

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

AMAURI OLIVEIRA DE ALMEIDA

**Modelagem computacional para estudo de distribuição
de vazão volumétrica na interface entre os
tratamentos preliminar e primário de uma estação de
tratamento de esgoto**

São Paulo

2022

AMAURI OLIVEIRA DE ALMEIDA

Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão
volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e
primário de uma estação de tratamento de esgoto

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como parte das exigências para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

São Paulo

2022

Amauri Oliveira de Almeida

Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e primário de uma estação de tratamento de esgoto

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Ciências

Trabalho aprovado. São Paulo, 10 de outubro de 2022:

Orientador:
Orientador

Professor
Convidado 1

Professor
Convidado 2

São Paulo
2022

AMAURI OLIVEIRA DE ALMEIDA

Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão
volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e
primário de uma estação de tratamento de esgoto

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo como parte das exigências para a obtenção do
título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Energia e Fluidos.

Orientador: Jayme Pinto Ortiz

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 05 de fevereiro de 2023

Assinatura do autor: Amauri O. de Almeida

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Almeida, Amauri Oliveira de
Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e primário de uma estação de tratamento de esgoto / A. O. Almeida -- versão corr. -- São Paulo, 2022.

191 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Dinâmica dos fluidos computacional 2.Distribuição de vazões 3.ETE I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

*Este trabalho é dedicado às crianças adultas que
sonharam, sonham ou sonharão em se tornar cientistas.*

Agradecimentos

Agradeço à Universidade de São Paulo, em especial à Escola Politécnica, pela oportunidade de realização do curso de Mestrado.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Jayme Pinto Ortiz, pela proposta de pesquisa e pelo esforço em sua realização.

Agradeço à SABESP pelo apoio no desenvolvimento desse trabalho, a partir do compartilhamento de dados de operação e informações de projeto da ETE Barueri, dentro da parceria do projeto SABESP/FDTE.

Agradeço à CAPES pela bolsa de Mestrado concedida por meio do PPGEM - Poli USP.

*“Quem são os homens mais do que a aparência de teatro?
A vaidade e a fortuna governam a farsa desta vida.
Ninguém escolhe o seu papel, cada um recebe o que lhe dão.
Aquele que sai sem fausto nem cortejo e que logo no rosto indica que é sujeito à dor, à
aflição, à miséria, esse é o que representa o papel de homem.
A morte, que está de sentinela, em uma das mãos segura o relógio do tempo. Na outra, a
foice fatal. E com esta, em um só golpe, certo e inevitável, dá fim à tragédia, fecha a
cortina e desaparece.”*

Matias Aires (2006)

RESUMO

ALMEIDA, Amauri Oliveira de, Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e primário de uma estação de tratamento de esgoto. 2022. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

As estações de tratamento de esgoto (ETE) são instalações centrais na estrutura do saneamento básico e apresentam diversos desafios tecnológicos para uma operação mais eficiente, não somente do ponto de vista do tratamento, mas também sob a perspectiva energética. Este trabalho utilizou uma abordagem CFD (*Computational Fluid Dynamics*) para analisar as distribuições das vazões volumétricas nos vertedores do tratamento preliminar e também na entrada dos Decantadores Primários (DP) de uma ETE. Os modelos e as simulações foram desenvolvidos utilizando-se o *Ansys Fluent* versão R1 2021, que utiliza o Método dos Volumes Finitos e todas as simulações foram feitas em regime permanente. Foram utilizadas malhas do tipo híbrida compostas por elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos. Foi adotado o modelo de turbulência *kappa-epsilon* padrão com funções de parede. Os resultados obtidos indicam que os modelos desenvolvidos conseguem representar bem os protótipos. Também foi possível concluir, a partir dos resultados, que é possível alterar a distribuição de vazões por meio da imposição de um desnível entre os vertedores ou pelo fechamento parcial de um dos vertedores. Um desnível de 5 cm entre as cristas dos vertedores provoca uma diferença de vazão de 1,4 m³/s e a mesma diferença de vazão é obtida quando são fechados dois ciclos em um dos vertedores. Além disso, as simulações realizadas mostraram que ocorre o afogamento do vertedor por montante para vazões iguais a 16 e 17,5 m³/s em cada módulo; também foi verificado que vazão de pico prevista para 2040, 17,5 m³/s em cada módulo, não ultrapassa a capacidade hidráulica da estrutura do canal dos DP. Com o modelo da região dos Decantadores Primários foi possível determinar a distribuição das vazões entre os DP e também concluir que os Decantadores mais próximos às entradas tem menor vazão por conta do campo de velocidades dessa região. Contudo, essas diferenças não ultrapassam 14 % da vazão média em um Decantador. Simulações com saídas assimétricas mostraram que a posição dos DP em relação às entradas é o fator preponderante na distribuição das vazões entre os DP. Simulações com entradas assimétricas provaram que uma diferença acentuada entre as vazões das duas entradas do canal de alimentação dos DP altera a distribuição das vazões entre os Decantadores Primários.

Palavras-chave: Dinâmica dos fluidos computacional. Distribuição de vazões. ETE.

ABSTRACT

ALMEIDA, Amauri Oliveira de, Computational modeling to study volumetric flow distribution at the interface between the preliminary and primary treatments of a waste water treatment plant. 2022. Master's Dissertation (Master of Sciences) - Polytechnic School, University of São Paulo, São Paulo, 2022.

Wastewater treatment plants (WWTP) are central facilities in the basic sanitation structure and present several technological challenges for a more efficient operation, not only from the treatment point of view but also from the energy efficiency perspective. This work used a Computational Fluid Dynamic (CFD) approach to analyze the flow distributions in the spillways of a WWTP and also at the entrance of the Primary Settlers (PS). The models and simulations were developed using Ansys Fluent R1 Version 2021, which uses the the Finite Volume Method and the simulations were all carried out in steady state. Hybrid meshes composed of prismatic, polyhedral and hexahedral elements were used. The standard *kappa-epsilon* turbulence model with wall functions was adopted. The results obtained indicate that the developed models are able to represent the prototypes well. It was also possible to conclude from the results that it is possible to change the flow distribution by imposing a gap between the spillways or by partially closing one of them. A difference of 5 cm between the crests of the spillways causes a flow difference of $1.4 m^3/s$ and the same flow difference is obtained when two cycles are closed in one of the spillways. In addition, the simulations carried out showed that the spillway drowning by upstream occurs for flows equal to 16 and $17.5 m^3/s$ in each module, it was also verified that the peak flow forecast for 2040 ($17.5 m^3/s$ in each module) do not exceed the hydraulic capacity of the PS feeding channel's structure. With the model of the Primary Settlers region, it was possible to determine the flow distribution between the PS and also to conclude that the Settlers closer to the entrances have lower flow due to the velocity field in the region. Nevertheless, these differences do not exceed 14 % of the average flow in a Settler. Simulations with asymmetric outlets showed that the position of the PS in relation to the inlets is the preponderant factor in the distribution of flows between the PS. And the simulations with asymmetric inputs proved that a large difference between the flows of the two inputs of the PS feeding channel alters the distribution of flows between the Primary Settlers.

Keywords: Computational fluid dynamics. Flow distribution. WWTP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de aplicação de uma análise DFC na hidráulica.	43
Figura 2 – Exemplo de aplicação DFC na área biomédica - estudo de artéria estenosada.	43
Figura 3 – Simulação DFC aplicada no projeto de um capacete esportivo.	44
Figura 4 – Simulação DFC aplicada no estudo da dispersão de torres de resfriamento.	44
Figura 5 – Uma célula com o nó P e os nós vizinhos.	48
Figura 6 – Relação entre os adimensionais y^+ e u^+ para um escoamento turbulento.	53
Figura 7 – Geometria usada na simulação DFC de uma junção de dois canais.	54
Figura 8 – Geometria usada na simulação DFC de um vertedor labirinto do tipo triangular-trapezoidal.	54
Figura 9 – Geometria usada na simulação DFC de um vertedor lateral.	55
Figura 10 – Geometria (a) e malha (b) usadas na simulação DFC de um vertedor.	55
Figura 11 – Malha utilizada na simulação DFC de um canal aberto.	56
Figura 12 – Malha usada na simulação DFC de um vertedor labirinto do tipo triangular-trapezoidal.	57
Figura 13 – Malha usada na simulação DFC para a avaliação do escoamento sobre um vertedor.	58
Figura 14 – Malha usada na simulação DFC para o estudo de capacidade máxima de um vertedor.	58
Figura 15 – Coordenada z adimensionalizada em função da velocidade adimensionalizada para diferentes modelos de turbulência.	61
Figura 16 – Nível da superfície livre no vertedor para diferentes modelos de turbulência.	61
Figura 17 – Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp em Barueri.	65
Figura 18 – Poço distribuidor.	65
Figura 19 – Vista aérea da região que engloba os Canais de Grades, as Caixas de Areia, os Tanques de Pré-aeração e os Vertedores Bicos de Pato.	66
Figura 20 – Vista de montante de um dos vertedores de um dos Bicos de Pato.	67
Figura 21 – Vista de montante de parte da estrutura de um dos vertedores labirinto.	67
Figura 22 – Vista aérea esquemática da ligação entre os Bicos de Pato e os Decantadores Primários do módulo 1.	68
Figura 23 – Vista aérea dos Decantadores Primários dos módulos 1 e 2 e indicações das galerias em linhas tracejadas.	68
Figura 24 – Canal que alimenta os Decantadores Primários de um módulo.	69
Figura 25 – Vista aérea dos Tanques de aeração.	69
Figura 26 – Vista aérea dos Decantadores Secundários e das cinco saídas para o Rio Tietê.	70

Figura 27 – Perfil de vazão e nível do poço distribuidor – variação diária.	71
Figura 28 – Vazões médias, máximas e mínimas bombeadas do poço distribuidor. . .	72
Figura 29 – Vazões médias, máximas e mínimas bombeadas do poço distribuidor. . .	72
Figura 30 – Vazão em cada um dos módulos durante o mês de junho.	73
Figura 31 – Vazão em cada um dos módulos durante o mês de setembro.	73
Figura 32 – Desenho esquemático em corte da região das adufas e do vertedor. . . .	74
Figura 33 – Desenho esquemático em planta da região das adufas e dos vertedores. .	75
Figura 34 – Desenho esquemático das comportas e do vertedores do tipo labirinto. .	75
Figura 35 – Corte da região dos vertedores labirinto.	76
Figura 36 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos BP com <i>stop log</i> . .	77
Figura 37 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos BP com <i>stop</i> <i>log</i> com algumas paredes omitidas.	77
Figura 38 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos BP sem <i>stop log</i> . .	78
Figura 39 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos BP sem <i>stop</i> <i>log</i> com algumas paredes omitidas.	78
Figura 40 – Vista em planta da entrada num conjunto de oito decantadores primários. .	79
Figura 41 – Uma das entradas do canal que distribui o efluente para os decantadores primários.	80
Figura 42 – Distribuição das comportas de entrada dos decantadores primários. . . .	80
Figura 43 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos DP.	81
Figura 44 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos DP com a omissão de algumas paredes.	82
Figura 45 – Detalhe da geometria da região dos DP com destaque para as adufas que interligam o canal de alimentação dos DP com os DP7 e DP8.	82
Figura 46 – Modelo para a região dos BP com <i>stop log</i> com indicações de entradas e saídas.	83
Figura 47 – Modelo para a região dos BP com <i>stop log</i> com indicações de entradas e saídas.	84
Figura 48 – Modelo para a região dos BP sem <i>stop log</i> com as indicações de entradas e saídas.	84
Figura 49 – Modelo para a região dos BP sem <i>stop log</i> com as indicações de entradas e saídas.	85
Figura 50 – Modelo para a região dos DP com as indicações de entradas e saídas. . .	86
Figura 51 – Modelo para a região dos DP com as indicações de entradas e saídas - vista lateral.	86
Figura 52 – Células próximas à parede com as indicações de y_P e y_H	89
Figura 53 – Detalhe em corte da primeira malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.	91

Figura 54 – Detalhe em corte da segunda malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.	91
Figura 55 – Detalhe em corte da terceira malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.	92
Figura 56 – Valores da pressão média no domínio para cada uma das malhas simuladas.	92
Figura 57 – Detalhe em corte da primeira malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.	93
Figura 58 – Detalhe em corte da segunda malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.	94
Figura 59 – Detalhe em corte da terceira malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.	94
Figura 60 – Valores da pressão média no domínio para cada uma das malhas simuladas.	95
Figura 61 – Malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato com <i>stop log</i>	97
Figura 62 – Malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato sem <i>stop log</i>	97
Figura 63 – Detalhe em corte da malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.	98
Figura 64 – Malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.	99
Figura 65 – Detalhe em corte da malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.	99
Figura 66 – Esquema de um vertedor de parede delgada.	101
Figura 67 – Relação entre os adimensionais C_Q e h/P obtidos do modelo em escala reduzida.	102
Figura 68 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional, com o modelo reduzido e com dados experimentais (Protótipo).	103
Figura 69 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e os experimentais.	105
Figura 70 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e os experimentais.	105
Figura 71 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP com <i>stop log</i> para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	108
Figura 72 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com <i>stop log</i> para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	108
Figura 73 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP sem <i>stop log</i> para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	109
Figura 74 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP sem <i>stop log</i> para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	109
Figura 75 – Corte do resultado apresentado na Figura 71 passando pela adufa com a indicação do nível d'água e do vertimento.	110
Figura 76 – Detalhe do vertimento da água com a indicação da carga na crista do vertedor.	111

Figura 77 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e com o modelo reduzido.	112
Figura 78 – Perfis de níveis d'água na direção do escoamento para diferentes valores de vazão.	112
Figura 79 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com o modelo dos BP com um desnível de 20 cm para uma vazão de 16 m ³ /s.	113
Figura 80 – Detalhe do resultado apresentado na Figura 79.	114
Figura 81 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 20 cm para uma vazão de 16 m ³ /s.	114
Figura 82 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP com seis ciclos fechados para uma vazão de 16 m ³ /s.	115
Figura 83 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com o fechamento de seis ciclos.	116
Figura 84 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 8 m ³ /s.	118
Figura 85 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 10,5 m ³ /s.	118
Figura 86 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 11,5 m ³ /s.	119
Figura 87 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 13,5 m ³ /s.	119
Figura 88 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 16 m ³ /s.	120
Figura 89 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de 17,5 m ³ /s.	120
Figura 90 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 8 m ³ /s.	122
Figura 91 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 8 m ³ /s - vista lateral.	122
Figura 92 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 8 m ³ /s.	123
Figura 93 – Curva cota vazão obtida com as simulações.	124
Figura 94 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 8 m ³ /s.	126
Figura 95 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 8 m ³ /s.	126
Figura 96 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 10,5 m ³ /s.	127
Figura 97 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de 10,5 m ³ /s.	128

Figura 98 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$	129
Figura 99 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$	129
Figura 100 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$	130
Figura 101 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$	131
Figura 102 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	132
Figura 103 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	132
Figura 104 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$	133
Figura 105 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$	134
Figura 106 – Frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo com quatro DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	136
Figura 107 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	136
Figura 108 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	137
Figura 109 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP numa configuração assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	137
Figura 110 – Frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo com cinco DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	138
Figura 111 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	138
Figura 112 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	139
Figura 113 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP numa configuração assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	139
Figura 114 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	141
Figura 115 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	142

Figura 116–Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	142
Figura 117–Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	143
Figura 118–Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	144
Figura 119–Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	145
Figura 120–Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	145
Figura 121–Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	146
Figura 122–Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	147
Figura 123–Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	148
Figura 124–Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	148
Figura 125–Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	149
Figura 126–Vista lateral do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.	161
Figura 127–Vista posterior do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.	162
Figura 128–Vista superior do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.	162
Figura 129–Vista posterior do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.	163
Figura 130–Vista superior do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.	163
Figura 131–Vista lateral do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.	164
Figura 132–Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a primeira malha do modelo dos BP com <i>stop log</i>	165
Figura 133–Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a segunda malha do modelo dos BP com <i>stop log</i>	166
Figura 134–Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a terceira malha do modelo dos BP com <i>stop log</i>	166

Figura 135 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a primeira malha do modelo dos DP.	167
Figura 136 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a segunda malha do modelo dos DP.	167
Figura 137 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a terceira malha do modelo dos DP.	168
Figura 138 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$	169
Figura 139 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$	170
Figura 140 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$	170
Figura 141 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	171
Figura 142 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$	171
Figura 143 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$	172
Figura 144 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$	172
Figura 145 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$	173
Figura 146 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	173
Figura 147 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$	174
Figura 148 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 1 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	174
Figura 149 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 5 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	175
Figura 150 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 10 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	175
Figura 151 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 15 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	176
Figura 152 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um ciclo fechado para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	176
Figura 153 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com dois ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	177
Figura 154 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com três ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	177

Figura 155–Resíduos para a simulação do modelo dos BP com quatro ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	178
Figura 156–Resíduos para a simulação do modelo dos BP com cinco ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	178
Figura 157–Circuito hidráulico usado para realizar os ensaios no modelo reduzida usado pela FCTH.	187
Figura 158–Esquema e dimensões do modelo reduzida usado pela FCTH.	188
Figura 159–Vista superior do modelo em escala reduzida usado pela FCTH.	189
Figura 160–Vista do escoamento no modelo reduzido usado pela FCTH.	190

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Expressões para os cálculos dos coeficientes.	48
Tabela 2 – Expressões para os cálculos de F e D	49
Tabela 3 – Modelos de turbulência mais comuns.	51
Tabela 4 – Modelos de turbulência usados por diferentes pesquisadores.	60
Tabela 5 – Resumo da variação das vazões e das cotas do poço distribuidor a partir de alguns parâmetros estatísticos (nov/2019-nov/2020).	71
Tabela 6 – Parâmetros para o modelo κ - ϵ	88
Tabela 7 – Resumo dos valores calculados para a determinação do valor de y_H	90
Tabela 8 – Número de elementos das malhas para o modelo da região dos BP.	90
Tabela 9 – Resultados para o estudo de independência de malha para o modelo da região dos BP.	91
Tabela 10 – Variação da carga na crista para uma vazão de $8 m^3/s$ para diferentes malhas.	93
Tabela 11 – Número de elementos das malhas para o modelo da região dos DP.	94
Tabela 12 – Resultados para o estudo de independência de malha para o modelo da região dos DP.	95
Tabela 13 – Variação da distribuição percentual da vazão entre os DP para uma vazão de $8 m^3/s$ para diferentes malhas.	96
Tabela 14 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos BP com <i>stop log</i>	96
Tabela 15 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos BP sem <i>stop log</i>	98
Tabela 16 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos DP.	98
Tabela 17 – Processador e quantidade de memória RAM dos equipamentos utilizados nas simulações.	100
Tabela 18 – Valores de vazões e carga na crista no vertedor obtidos a partir de ensaios no protótipo (somente um vertedor).	101
Tabela 19 – Carga na crista do vertedor, vazões e erros percentuais obtidos a partir de simulações no modelo tridimensional dos Bicos de Pato com <i>stop log</i>	103
Tabela 20 – Dados de vazão e nível d'água para o canal de alimentação dos DP do módulo 1.	104
Tabela 21 – Valores de vazões e carga na crista do vertedor obtidos a partir das simulações.	111
Tabela 22 – Valores de vazões para cada um dos módulos para diferentes valores de desníveis entre os vertedores.	115

Tabela 23 – Valores de vazões para cada um dos módulos para diferentes graus de fechamento de um dos vertedores.	117
Tabela 24 – Valores de vazões desviadas de um vertedor para diferentes números de trapézios fechados de um dos vertedores.	117
Tabela 25 – Nível da água no canal do DP para diferentes valores de vazões.	123
Tabela 26 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	125
Tabela 27 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$	127
Tabela 28 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$	128
Tabela 29 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$	130
Tabela 30 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$	131
Tabela 31 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$	133
Tabela 32 – Máximas diferenças entre as vazões de dois Decantadores para diferentes valores de vazão total em um módulo.	134
Tabela 33 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	135
Tabela 34 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$	140
Tabela 35 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, Entrada 01.	141
Tabela 36 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	144
Tabela 37 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.	146
Tabela 38 – Dados de vazão dos medidores Venturi para o mês de junho de 2020 com frequência de 5 em 5 minutos.	181
Tabela 39 – Dados de vazão dos medidores ultrassom para o mês de junho de 2020 com frequência de 5 em 5 minutos.	182
Tabela 40 – Dados de vazão dos medidores Venturi para o mês de setembro de 2020 com frequência de 1 em 1 hora.	182
Tabela 41 – Dados de vazão dos medidores ultrassom para o mês de setembro de 2020 com frequência de 1 em 1 hora.	183
Tabela 42 – Valores de C_Q e h/P obtidos a partir de ensaios no modelo reduzido.	186

Lista de abreviaturas e siglas

ABCON	Associação Nacional das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto
ARSESP	Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
BP	Bico(s) de Pato
CA	Caixa(s) de Areia
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
CG	Canal (Canais) de Grades
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNS	<i>Direct Numerical Simulation</i>
DP	Decantador(es) Primário(s)
DS	Decantador(es) Secundário(s)
ETE	Estação (Estações) de Tratamento de Esgoto
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LES	<i>Large Eddy Simulations</i>
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
Plansab	Plano Nacional de Saneamento Básico
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier-Stokes</i>
RMS	<i>Reynolds Stress Model</i>
RNG	<i>Re-Normalisation Group</i>
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SIMPLE	<i>Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations</i>
SST	<i>Shear Stress Transport</i>
TA	Tanque(s) de Aeração
TDMA	<i>Tridiagonal Matrix Algorithm</i>
TPA	Tanque(s) de Pré-aeração
VOF	<i>Volume of Fluids</i>

Lista de símbolos

Γ	Coefficiente de difusão [-]
ϕ	Uma propriedade de transporte do fluido
ρ	Massa específica do fluido [kg/m^3]
p	Pressão [Pa]
\mathbf{g}	Aceleração da gravidade [m/s^2]
\mathbf{V}	Vetor velocidade [m/s]
V	Magnitude da velocidade [m/s]
u	Componente da velocidade na direção x [m/s]
v	Componente da velocidade na direção y [m/s]
w	Componente da velocidade na direção z [m/s]
S_ϕ	Termo fonte
μ	Viscosidade dinâmica [$Pa.s$]
ν	Viscosidade cinemática [m^2/s]
$grad$	Operador gradiente
div	Operador divergente
Δt	Intervalo finito de tempo [s]
l	Comprimento característico [m]
C_Q	Coefficiente de vazão [-]
u^+	Velocidade adimensionalizada [-]
y^+	Distância da parede adimensionalizada [-]
y_P	Distância do centro da célula mais próxima da parede à parede [cm]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	33
1.1	GERAL	33
1.2	OBJETIVOS	35
1.2.1	Gerais	35
1.2.2	Específicos	35
1.3	JUSTIFICATIVA	35
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	SANEAMENTO BÁSICO	37
2.2	DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL	38
2.2.1	Vantagens e limitações da Dinâmica dos Fluidos Computacional	41
2.2.2	Aplicações da Dinâmica dos Fluidos Computacional	42
2.2.3	Método dos Volumes Finitos	45
2.2.4	Turbulência	49
2.2.5	Parâmetros adimensionais u^+ e y^+	52
2.3	SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTOS EM CANAIS ABERTOS	53
2.3.1	Alguns exemplos abordados na literatura	53
2.3.2	Geração da malha	56
2.3.3	Modelo multifásico	59
2.3.4	Modelos de turbulência	59
2.3.5	CrITÉRIOS de convergência	62
3	MÉTODO	63
3.1	GERAL	63
3.2	ESTUDO DE CASO - ETE BARUERI	64
3.3	MODELAGEM	74
3.3.1	Geometria dos Bicos de Pato	74
3.3.2	Geometria da entrada dos DP	79
3.3.3	Modelos para os BP	83
3.3.4	Modelo para a entrada dos DP	85
3.3.5	Modelo de turbulência	87
3.4	DESENVOLVIMENTO DA MALHA	88
3.4.1	Estudo de independência da malha	90
3.4.1.1	Estudo para o modelo dos BP	90
3.4.1.2	Estudo para o modelo da entrada dos DP	93

3.4.2	Malhas utilizadas nas simulações	96
3.5	CONFIGURAÇÕES DO <i>ANSYS FLUENT</i>	99
3.6	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	101
3.6.1	Vertedores Bicos de Pato	101
3.6.2	Entrada dos Decantadores Primários	104
4	RESULTADOS	107
4.1	RESULTADOS PARA A REGIÃO DOS BP	107
4.1.1	Curva cota vazão para o vertedor	107
4.1.2	Desnível entre os vertedores	113
4.1.3	Fechamento gradativo de um dos vertedores	115
4.1.4	Afogamento do vertedor por montante	117
4.2	RESULTADOS PARA A ENTRADA DOS DP	121
4.2.1	Curva cota vazão para o canal de alimentação dos DP	121
4.2.2	Distribuição da vazão entre os DP	125
4.2.3	Distribuição da vazão entre os DP - saídas assimétricas	135
4.2.4	Distribuição da vazão entre os DP - entradas assimétricas	140
5	CONCLUSÕES	151
	REFERÊNCIAS	155
	APÊNDICES	159
APÊNDICE A	– DIMENSÕES DOS MODELOS	161
APÊNDICE B	– GRÁFICOS OBTIDOS NOS ESTUDOS DE IN- DEPENDÊNCIA DE MALHA	165
APÊNDICE C	– RESÍDUOS OBTIDOS NAS SIMULAÇÕES	169
	ANEXOS	179
ANEXO A	– DADOS DA ETE BARUERI	181
ANEXO B	– DADOS EXPERIMENTAIS PARA O VERTEDOR	185
ANEXO C	– MODELO REDUZIDO (FCTH)	187
	ÍNDICE	191

INTRODUÇÃO

1.1 GERAL

De acordo com a Lei Nº 14.026, o saneamento básico consiste do seguinte conjunto de serviços: abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana, manejo de resíduos sólidos e drenagem/manejo de águas pluviais urbanas (Presidência da República, 2020). Contudo, no contexto do presente trabalho, saneamento básico vai se referir à esgotamento sanitário.

No Brasil, o saneamento básico é de responsabilidade dos municípios, que contratam empresas de saneamento para a prestação desse serviço. No geral, as emmpresas contradas são companhias de saneamento estaduais tais como Copasa, Embasa, Sabesp, entre outras (Presidência da República, 2020). Há também uma crescente participação de empresas de saneamento privado nesse setor, que corresponde atualmente a 5,2 % do mercado (ABCON, 2020).

O esgoto sanitário a ser tratado nas estações consiste em uma mistura de efluentes residenciais, industriais, comerciais, também há a presença de águas de chuva e de águas subterrâneas. Assim, há a presença de diversos componentes que precisam ser removidos durante o tratamento (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

O tratamento do esgoto sanitário coletado é realizado por meio de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) ; cada ETE apresenta suas especificidades de tamanho e método de tratamento, porém podemos distinguir, no geral, as seguintes etapas fundamentais no tratamento: preliminar, primário, primário avançado, secundário, secundário com remoção de nutrientes, terciário e avançado (TCHOBANOGLIOUS; BURTON; STENSEL, 2003).

Tradicionalmente as pesquisas em torno das ETE concentraram esforços no sentido de identificar os poluentes e na busca por métodos de tratamento que possibilitassem a eliminação desses contaminantes. Mas há também, mais recentemente, esforços no

sentido de melhorar as condições operacionais das estações de tratamento em termos de sua eficiência e da redução do consumo energético, devido ao impacto energético crescente desse setor no consumo global de energia elétrica. De acordo com dados da Alemanha e da Itália cerca de 1 % de toda a energia elétrica consumida nesses países está associada com o tratamento de efluentes (LONGO et al., 2016).

O aumento da cobertura de saneamento básico no Brasil é crucial para a saúde pública, para a preservação do meio ambiente e para o desenvolvimento do país, contudo os custos e investimentos necessários são muito expressivos não somente na construção de novas estações e na ampliação das redes de coleta já em funcionamento, mas também na operação e manutenção das estações existentes (Ministério das Cidades, 2013). Somente 49 % de todo esgoto sanitário produzido no Brasil é tratado e precisariam ser investidos cerca de R\$ 13,3 bilhões por ano de 2020 até 2033 para a universalização desse serviço (Ministério das Cidades, 2013). Portanto, a redução de custos na construção ou na operação dessas estações de tratamento de águas residuárias é algo muito bem-vindo no desafio da universalização do tratamento de esgoto sanitário no Brasil.

Vazões assimétricas causam maiores custos operacionais, portanto encontrar um meio de melhorar a simetria da distribuição de vazões em uma ETE permite economizar recursos e melhorar os resultados do tratamento. Uma forma de se fazer isso é estudar a distribuição das vazões por meio do uso de uma ferramenta de Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) ou *Computational Fluid Dynamics* (CFD), que permite simular computacionalmente o escoamento e estabelecer um modelo numérico computacional. Posteriormente, com a utilização de resultados experimentais obtidos da própria estação de tratamento, realizar a validação do modelo numérico computacional. Esse modelo validado poderá ser utilizado futuramente até mesmo como uma ferramenta de operação da estação e também pode ser utilizado de forma mais imediata para encontrar as condições ótimas de operação ou para avaliar o impacto que mudanças nas vazões causariam.

O presente trabalho utiliza simulações numéricas computacionais com o emprego do método dos volumes finitos para resolver e analisar o escoamento na saída do tratamento preliminar e também na entrada do tratamento primário de uma estação de tratamento de esgoto sanitário da Sabesp localizada no município de Barueri. Os modelos das duas regiões são simulados para diferentes condições de operação com o intuito de permitir a compreensão das condições atuais e também de permitir que possíveis propostas de melhorias na estação sejam analisadas quanto à sua viabilidade técnica do ponto de vista do escoamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Gerais

Constitui objeto geral desse trabalho o desenvolvimento de pesquisa em Engenharia Hidráulica para a determinação da distribuição de vazões volumétricas na interface entre os tratamentos preliminar e primário de uma estação de tratamento de esgoto. Mais especificamente, esse trabalho desenvolverá um estudo de caso aplicado à uma ETE da SABESP, localizada no município de Barueri – São Paulo.

1.2.2 Específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- Utilizar modelos numéricos computacionais para representar o escoamento nos vertedores dos Bicos de Pato e na entrada dos Decantadores Primários;
- Validar os modelos com dados experimentais;
- Utilizar os modelos para avaliar a viabilidade de propostas de melhorias na ETE.

1.3 JUSTIFICATIVA

A coleta e o tratamento das águas residuárias gerada pelas comunidades é fundamental para a garantia da saúde pública e para a proteção do meio ambiente. Diversas doenças são impedidas de se propagarem com a implementação do esgotamento sanitário. No Brasil, só são tratados cerca de 49 % de todo esgoto sanitário produzido e, assim, ainda persistem no país internações por conta de doenças transmitidas pelo contato com corpos d'água que recebem efluentes sem o devido tratamento (Ministério das Cidades, 2013).

Em 2013 foi estabelecido o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) que estabeleceu as metas e condições para o alcance da universalização do saneamento básico até 2033. Foi estimado que seria necessário um investimento de R\$ 300 bilhões nesses 20 anos (Ministério das Cidades, 2013).

Com a perspectiva e a necessidade do aumento da cobertura do saneamento básico no Brasil, é de suma importância o desenvolvimento de pesquisas que possam contribuir para a melhoria das condições técnicas e operacionais das ETE e que sejam reduzidos os custos envolvidos, de modo a possibilitar o aumento da cobertura de tratamento de esgoto.

Além das questões sociais, ambientais e sanitárias, o tratamento do esgoto sanitário também é relevante do ponto de vista energético. Dados referentes aos Estados Unidos

indicam que a energia elétrica consumida nas ETE corresponde a cerca de 3,4% de toda energia elétrica consumida naquele país, o que faz dessa atividade a terceira no Ranking dos maiores consumidores (SIMON-VÁRHELYI; CRISTEA; LUCA, 2020).

No Brasil, à medida que cresce o número de ETE em operação a tendência é que o sistema elétrico seja pressionado por essa demanda considerável, o que aumenta a necessidade de se melhorar o desempenho energético dos sistemas de tratamento de efluentes.

Com isso, observa-se a grande importância não somente de se construir novas ETE, mas também de se ter estações mais eficientes no processo de desenvolvimento do Brasil. Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir para uma melhor capacidade de operação da ETE Barueri e com isso proporcionar uma melhora na qualidade de vida das pessoas (saúde pública), na conservação dos recursos hídricos (meio ambiente) e na melhor utilização dos recursos energéticos (sistema elétrico).

É importante salientar que a Diretoria da Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (ARSESP) , com base na Lei Complementar Estadual N° 1.025 (2007) regulamentada pelo Decreto Estadual N° 52.455 (Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo, 2007), instituiu um Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico para a Inovação (PDI), com o objeto de fomentar o desenvolvimento científico e tecnológico, a adoção de tecnologias apropriadas e a difusão de conhecimentos gerados para o saneamento básico, bem como incentivar a realização de projetos para o desenvolvimento de soluções que contribuam para a universalização do acesso e a melhoria dos serviços.

Com esse programa a ARSESP, a exemplo do que já ocorre nos setores de energia elétrica e gás canalizado, passará a autorizar a utilização de um percentual da receita operacional direta das empresas de saneamento em P&D. Um dos temas prioritários do programa da ARSESP corresponde a melhoria de processo de construção, operação e manutenção de sistemas de água e esgoto sanitário, o que demonstra que a temática aqui abordada já é reconhecida como prioritária pelo Poder Público.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SANEAMENTO BÁSICO

O saneamento básico é o conjunto de infraestruturas e medidas adotadas pelo governo a fim de gerar melhores condições de vida para a população. No Brasil, esse conceito está estabelecido pela lei N° 11.445/07, que engloba o conjunto de serviços estruturais de abastecimento de água, esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e drenagem de águas pluviais urbanas (Presidência da República, 2007).

De modo geral, pode-se dizer que nos últimos 20 anos os serviços de saneamento básico no Brasil tiveram profundos avanços. Porém, ainda persistem muitos problemas relacionados com a indisponibilidade de infraestrutura e com as desigualdades regionais, este último é um reflexo do desenvolvimento desigual do território brasileiro (PENA, 2014).

Apesar de o abastecimento de água potável nos municípios brasileiros ter sido praticamente universalizado, 99,6 % dos municípios contam com abastecimento por rede geral, o mesmo não ocorreu em relação aos serviços de coleta e tratamento de esgotamento sanitário, apenas 60,3 % dos municípios apresentam esses serviços (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017).

No que diz respeito ao atendimento à população, 43 % das pessoas têm acesso à rede coletora e tratamento sanitária, 12 % utilizam fossa séptica, 18 % têm o esgoto coletado mas não tratado e 27 % não contam nem mesmo com a coleta, o que, na prática, significa um grande número de domicílios situados em localidades com esgoto a céu aberto (ANA, 2017). As desigualdades regionais nesses quesitos são expressivas. As duas maiores cidades do País, São Paulo e Rio de Janeiro, apresentam índices de tratamento de esgoto sanitário de 65,6 % e 66,21 %, nessa ordem. Outras capitais apresentam situação muito distinta e a média nacional é de aproximadamente 43 %. Na Região Norte, por exemplo, Belém e Macapá apresentam índices de tratamento de esgoto sanitário de 10,69 % e 9,16 %, respectivamente (ANA, 2017).

Com o objetivo de melhorar a situação do saneamento básico no Brasil, o governo brasileiro instituiu o Plano Nacional de Saneamento Básico (Plansab) em 2013, que consiste em um conjunto de metas e objetivos para transformar a realidade desse setor no país durante um período de vinte anos (2014-2033). Entre essas metas, destacam-se as seguintes: a) atingir a marca de 92 % dos domicílios rurais ou urbanos atendidos com coleta de esgoto ou fossa séptica b) Elevar a porcentagem de tratamento do esgoto coletado para 93 % (Ministério das Cidades, 2013).

Foi aprovado em 2020 a Lei Nº 14.026, que implementou um novo marco legal do saneamento (Presidência da República, 2020). A expectativa é que esse novo marco regulatório contribua para uma melhora substancial na situação do saneamento básico no Brasil, pois foram estabelecidos mecanismos que permitem maior concorrência entre as empresas prestadoras de serviço e também incentivam a criação de metas para a melhoria da cobertura e da qualidade dos serviços prestados. Dentre as mudanças mais importantes podem ser destacados os seguintes: os municípios terão que abrir licitação para a contratação de serviços de saneamento e os contratos firmados deverão estabelecer metas de expansão e para a melhora na qualidade dos serviços. Outra mudança importante é que a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) tornou-se responsável pela regulamentação desses serviços (Presidência da República, 2020).

2.2 DINÂMICA DOS FLUIDOS COMPUTACIONAL

A equação de Navier-Stokes, Equação 2.1, e a equação da continuidade, Equação 2.2, permitem reproduzir analiticamente a hidrodinâmica de escoamentos incompressíveis, tema de interesse do presente trabalho. Contudo, há poucas soluções analíticas para essas equações, devido à sua complexidade, pois essas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais não lineares de segunda ordem. Com a escassez de soluções analíticas, foram desenvolvidas e amplamente aplicadas soluções numéricas para essas equações, o que resultou em uma área de estudo: a Mecânica dos Fluidos Computacional (TU; YEOH; LIU, 2018).

$$\rho \left[\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla (\mathbf{V}) \right] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mu \nabla^2 \mathbf{V} \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho (\nabla \cdot \mathbf{V}) = 0 \quad (2.2)$$

Nas Equações 2.1 e 2.2, ρ , \mathbf{V} , p , \mathbf{g} e μ são a massa específica do fluido, o vetor velocidade, a pressão, o vetor aceleração da gravidade e a viscosidade dinâmica, nessa

ordem.

Os três tipos de técnicas disponíveis para a solução numérica de equações que descrevem o movimento dos fluidos são: o método das diferenças finitas (o método dos volumes finitos está nessa categoria), o método dos elementos finitos e o método espectral. Em cada um desses métodos é realizada uma discretização do problema de modo que as equações diferenciais são substituídas por equações algébricas, que são bem mais simples de resolver (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A fluidodinâmica computacional ou dinâmica dos fluidos computacional (DFC) pode ser descrita de forma generalizada como a simulação numérica de todos aqueles processos físicos ou físico-químicos que apresentam escoamento. A mecânica dos fluidos computacional é um vasto campo de aplicação das soluções numéricas das equações da mecânica dos fluidos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

No presente trabalho é utilizado o método dos volumes finitos. Nesse método o campo contínuo é substituído por um número finito de volumes e as equações da mecânica dos fluidos são aplicadas para cada um dos volumes, resultando em um sistema de equações algébricas que pode ser resolvido por meio de um método numérico implementado em um computador.

Além disso, há algumas vantagens das simulações obtidas com um método DFC em relação aos resultados obtidos com experimentos. Versteeg e Malalasekera (1995) destacam as seguintes:

- Redução substancial no tempo e no custo para o desenvolvimento de um projeto;
- Possibilidade de simular sistemas os quais seriam impossíveis de serem implementados em um experimento controlado (Ex. sistemas muito grandes);
- Facilitação do estudo de sistemas sob condições de risco e simulações de acidentes (Ex. simulações fora das condições limites);
- O nível de detalhes dos resultados não é limitado pela instrumentação utilizada, como ocorre nos modelos físicos.

Todos os códigos DFC contém os seguintes três elementos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995):

- Pré-processador;
- Solver;
- Pós-processador.

O pré-processador é onde ocorre a definição da geometria e a geração da malha, seleção do fenômeno físico ou químico que precisa ser modelado, definição de propriedades dos fluidos e especificações das condições de contorno.

Já o *solver* é responsável pela integração das equações de transporte em cada

volume de controle, pela discretização das equações integrais e pela solução do sistema de equações algébricas por um método iterativo.

E, finalmente, o pós-processador é onde acontece a visualização dos resultados: os campos vetoriais, dos campos de contornos. Também é por meio do pós-processador que se pode ter acesso a gráficos bidimensionais e tridimensionais e a manipulação visual do objeto, além de permitir a visualização dos resultados com uma escala de cores.

Os três conceitos matemáticos úteis na avaliação da adequação do algoritmo numérico são convergência, consistência e estabilidade.(VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Quando o tamanho do elemento utilizado no método numérico tender a zero e a sua solução convergir para a solução exata e o sistema de equações se tornar equivalente ao original, este método apresenta convergência e consistência. E se o método convergir mesmo com a introdução de erros iniciais, ele também apresenta estabilidade. Vale ressaltar que consistência e estabilidade são condições necessárias para que ocorra convergência em sistemas não lineares (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

As três propriedades fundamentais de métodos numéricos (DFC) robustos são conservatividade (*conservativeness*); limitatividade (*boundedness*) e transportividade (*transportiveness*)(VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Um método numérico que possua a propriedade da conservatividade garante que as propriedades que se conservam localmente em cada um dos volumes finitos também vão se conservar globalmente. Já a propriedade da limitatividade é semelhante a propriedade de estabilidade e implica que em um problema linear e sem fontes a solução está limitada pelos valores mínimos e máximos da variável estudada. Como os problemas de fenômenos de transporte são não lineares para a aplicação da limitatividade é necessário o estudo de um problema linear semelhante àquele que se está analisando (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Um método numérico atende a condição de transportividade se ele considera adequadamente a direcionalidade em termos da intensidade da difusão em relação à advecção (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Estas três propriedades: conservatividade, limitatividade e transportividade podem configurar uma alternativa às propriedades matematicamente mais rigorosas de convergência, consistência e de estabilidade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

É impossível avaliar a validade de modelos físicos e químicos embutidos em um programa tão complexo quanto um código DFC ou mesmo determinar a acurácia dos resultados finais, a não ser por comparação com resultados experimentais (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

2.2.1 Vantagens e limitações da Dinâmica dos Fluidos Computacional

A abordagem DFC está atualmente presente tanto na vanguarda da pesquisa científica que investiga os fenômenos da Mecânica dos Fluidos e da Transferência de Calor quanto na prática da engenharia moderna (TU; YEOH; LIU, 2018).

Simulações DFC permitem o estudo de termos das equações que governam os fenômenos de transporte de uma maneira mais detalhada e isso permite avanços inclusive na abordagem teórica dessas equações. Outra vantagem é que uma ferramenta DFC fornece uma ótima complementação às abordagens teórica e experimental. Isto é, a abordagem computacional permite uma redução substancial no tempo de projeto e nos custos quando comparada à opção experimental e permite a solução de escoamentos que a abordagem analítica ainda não permite (TU; YEOH; LIU, 2018).

Também deve ser citado que uma ferramenta DFC permite a simulação de condições que não podem ser reproduzidas experimentalmente, como acidentes industriais ou desastres naturais. Além disso, essas simulações permitem um nível de visualização de detalhes do escoamento que dificilmente pode ser obtido por outro método (TU; YEOH; LIU, 2018).

Apesar das diversas vantagens apresentadas, uma ferramenta DFC também apresenta algumas limitações características. Erros numéricos sempre existirão nos resultados obtidos de simulações via DFC dado que a capacidade de armazenamento dos computadores é finita. Logo sempre haverá uma diferença entre o resultado da aplicação do método numérico e os valores reais (TU; YEOH; LIU, 2018).

A visualização da enorme quantidade de dados gerados por uma simulação com uma ferramenta DFC geralmente é feita com o auxílio de campos vetoriais, contornos e animações gerados na etapa de pós-processamento. E mesmo os resultados que visualmente parecem coerentes podem na verdade apresentar erros dos mais variados, por isso os resultados de qualquer simulação DFC devem ser examinados cuidadosamente antes de serem tomados como corretos (TU; YEOH; LIU, 2018).

É importante salientar que apesar de o método computacional ser muito conveniente, ele não deve ser visto como uma substituição ao método experimental nem ao método analítico, mas sim como uma boa complementação para a solução de problemas. Escoamentos que envolvam mais de uma fase, ebulição ou condensação podem ser mais desafiadores para a abordagem DFC e uma complementação com dados experimentais é essencial (TU; YEOH; LIU, 2018).

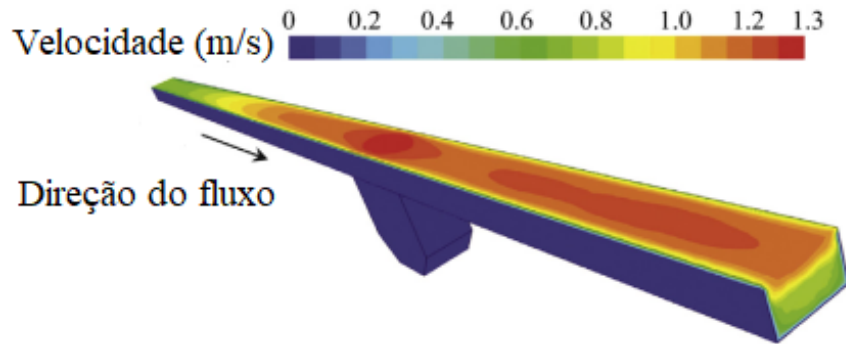
2.2.2 Aplicações da Dinâmica dos Fluidos Computacional

A dinâmica dos fluidos computacional pode ser empregada na avaliação de fenômenos físicos e também pode ser de grande valia no projeto de produtos nos quais há influência de fenômenos de transporte. Em resumo, a presença de fenômenos tais como dissipação, difusão, convecção, presença de camadas limite e ocorrência de turbulência justificam a aplicação de um método DFC. As áreas do conhecimento nas quais a abordagem DFC é útil são muito amplas e continuam crescendo. Dentre essas áreas, podem ser destacadas as seguintes (TU; YEOH; LIU, 2018):

- Pesquisa;
- Educacional;
- Projeto;
- Aeroespacial;
- Automotiva;
- Biomédica;
- Química;
- Engenharia Civil, Sanitária e Ambiental;
- Metalúrgica;
- Nuclear;
- Energética;
- Esportes.

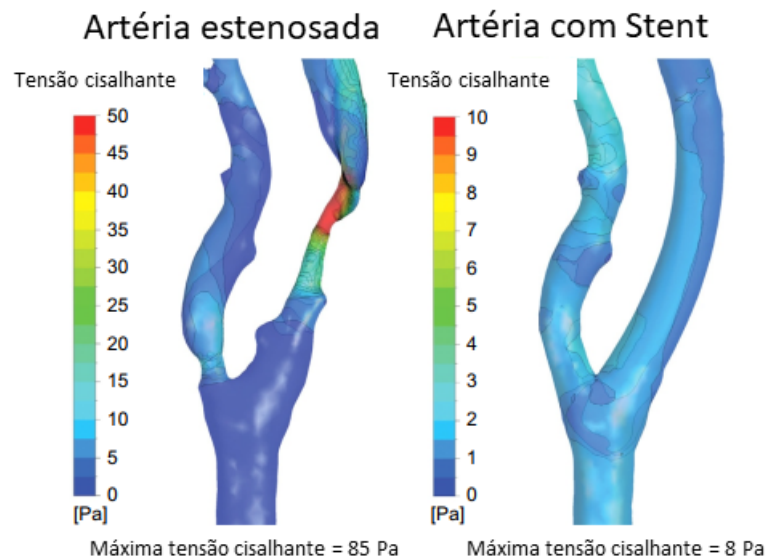
Distintas aplicações da análise DFC em diferentes áreas da Engenharia podem ser observadas nas figuras 1, 2, 3 e 4. O campo de velocidades de uma armadilha invertida instalada em um canal para retirar sólidos do escoamento está representado na Figura 1, as tensões de cisalhamento nas paredes de uma artéria em condição estenosada e após a aplicação de um Stent estão indicadas na Figura 2, as linhas de corrente e o campo de pressão em um capacete para ciclistas estão ilustrados na Figura 3 e as linhas de emissão do escoamento que deixa uma torre de resfriamento foram destacadas na Figura 4. Pode-se notar que se trata de uma ferramenta cuja abrangência de aplicação vai desde áreas mais tradicionais como a Engenharia Civil até campos de estudo mais recentes como a Engenharia Biomédica (TU; YEOH; LIU, 2018).

Figura 1 – Exemplo de aplicação de uma análise DFC na hidráulica.



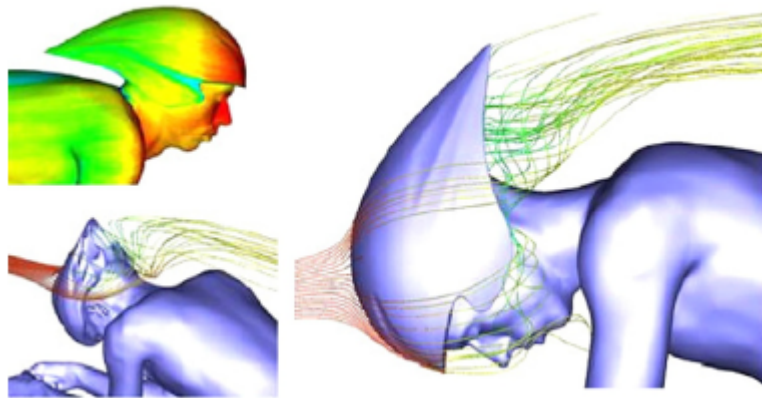
Fonte: Mohsin e Kaushal (2016).

Figura 2 – Exemplo de aplicação DFC na área biomédica - estudo de artéria estenosada.



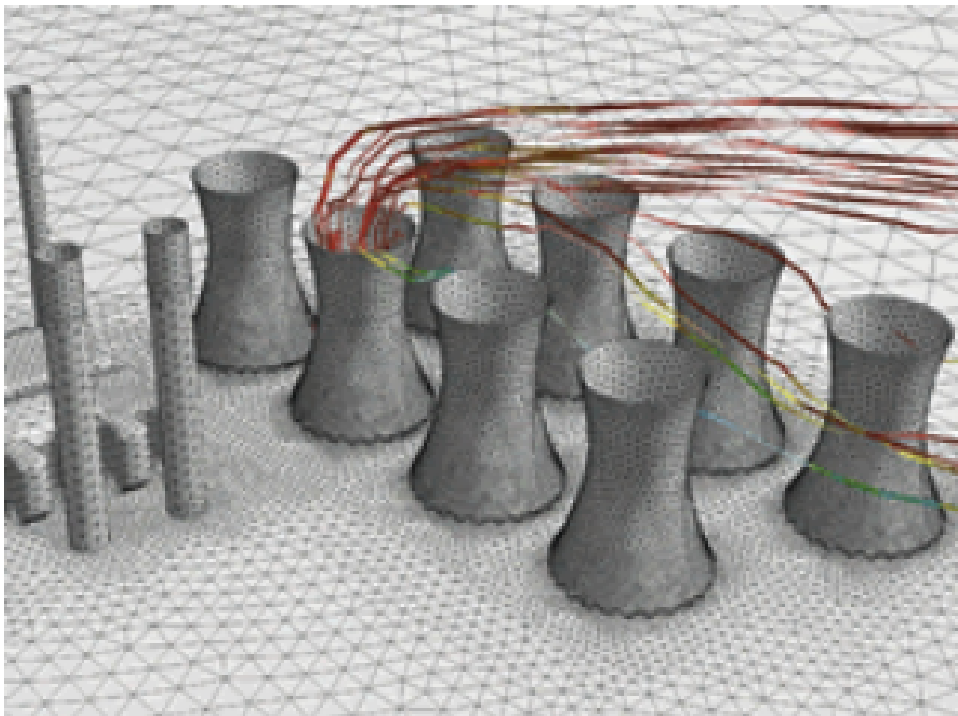
Fonte: Tu, Yeoh e Liu (2018).

Figura 3 – Simulação DFC aplicada no projeto de um capacete esportivo.



Fonte: Tu, Yeoh e Liu (2018).

Figura 4 – Simulação DFC aplicada no estudo da dispersão de torres de resfriamento.



Fonte: Tu, Yeoh e Liu (2018).

2.2.3 Método dos Volumes Finitos

O método dos volumes finitos foi inicialmente desenvolvido como um caso especial do método das diferenças finitas. Esse método pode ser dividido nas seguintes etapas (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995):

- Integração das equações diferenciais para cada volume de controle;
- Discretização que envolve a substituição de equações diferenciais por equações de diferenças finitas;
- Solução do sistema de equações algébricas com o uso de um método iterativo.

É justamente a primeira etapa que distingue esse método de todos os outros métodos DFC. A aplicação das equações de transporte para cada um dos volumes finitos expressa a conservação das principais propriedades de interesse no escoamento para cada um desses volumes e representa uma associação mais direta do método numérico com o problema físico, o que torna esse método mais simples de se entender quando comparado com os métodos dos elementos finitos ou o método espectral (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Por exemplo, a conservação de uma variável ϕ pode ser expressa pelo balanço apresentado na Equação 2.3 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\begin{aligned}
 & [\textit{taxa de variação de } \phi \textit{ no volume de controle com relação ao tempo}] \\
 & = [\textit{fluxo líquido de } \phi \textit{ devido à advecção no volume de controle}] \\
 & \quad + [\textit{fluxo líquido de } \phi \textit{ devido à difusão no volume de controle}] \\
 & \quad + [\textit{taxa líquida de geração de } \phi \textit{ no volume de controle}]
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Programas DFC contém técnicas de discretização adequadas para aplicação nas equações que descrevem os fenômenos de transporte: advecção, difusão, fontes e sorvedouros e as taxas de variação temporal (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

As equações que descrevem tais fenômenos são complexas e não-lineares portanto um método iterativo apropriado é necessário para a solução. Um método muito utilizado é o TDMA (*Tridiagonal Matrix Algorithm*), que resolve linha por linha as equações algébricas do sistema de equações e o algoritmo SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations*) para garantir o acoplamento entre a pressão e a velocidade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A única maneira de reduzir os erros devido à malha inadequada é a realização do estudo de independência de malha, que consiste em realizar o refinamento da malha até que certos resultados-chave parem de oscilar com qualquer refinamento adicional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A Equação 2.4 é a equação geral de transporte de uma propriedade ϕ genérica, que afirma que a soma da taxa de crescimento dessa propriedade em um dado elemento com o fluxo líquido de ϕ é igual a soma das taxas de crescimento da mesma propriedade devido aos efeitos difusivos e presença de fontes (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A Equação 2.4 é um ponto de partida para o método dos volumes finitos. Em notação mais compacta, a Equação 2.4 pode ser escrita na forma apresentada na Equação 2.5 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\phi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\phi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\phi)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial z}) + S_\phi \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\phi\mathbf{V}) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) + S_\phi \quad (2.5)$$

Nas Equações 2.4 e 2.5, ρ , ϕ , Γ e S_ϕ são a massa específica do fluido, uma propriedade de transporte do fluido, o coeficiente de difusão e o termo fonte, nessa ordem.

Para o desenvolvimento do método dos volumes finitos, um passo fundamental é a integração da Equação 2.5 em um volume de controle, obtendo-se a Equação 2.6.

$$\int_{V_C} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{V_C} \text{div}(\rho\phi\mathbf{V}) dV = \int_{V_C} \text{div}(\Gamma \text{grad } \phi) dV + \int_{V_C} S_\phi dV \quad (2.6)$$

O segundo termo do lado esquerdo e o primeiro termo do lado direito da Equação 2.6 podem ser reescritos como integrais de superfícies com a aplicação do Teorema de Gauss, vide Equação 2.7 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{V_C} \rho\phi dV \right) + \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dA + \int_{V_C} S_\phi dV \quad (2.7)$$

Deve-se observar que na Equação 2.7 também foi modificada a ordem de integração e derivação do primeiro termo do lado esquerdo. A partir da Equação 2.7 e adotando a hipótese de regime permanente, obtemos a Equação 2.8.

$$\int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) dA = \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dA + \int_{V_C} S_\phi dV \quad (2.8)$$

Por fim, a equação mais geral para a aplicação do método dos volumes finitos também considera a integração no tempo, além da integração em um dado volume, conforme está explícito na Equação 2.9 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\int_{\Delta t} \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} (\rho\phi) dV \right) dt + \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\rho\phi\mathbf{V}) dAdt = \int_{\Delta t} \int_A \mathbf{n} \cdot (\Gamma \text{grad } \phi) dAdt + \int_{\Delta t} \int_{VC} S_\phi dV dt \quad (2.9)$$

Após a integração das equações para cada volume de controle, o próximo passo é a discretização dessas equações. A discretização de uma equação diferencial para um escoamento transiente e com a presença de advecção e difusão é dado pela Equação 2.10 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + a_S\phi_S + a_N\phi_N + a_B\phi_B + a_T\phi_T + a_P^0\phi_P^0 + S_u \quad (2.10)$$

Os termos a_P e a_P^0 da Equação 2.10 são dados, respectivamente, pelas Equações 2.11 e 2.12. O termo fonte médio, pode ser linearizado conforme a Equação 2.13 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$a_P = a_W + a_E + a_S + a_N + a_B + a_T + a_P^0 + \Delta F - S_P \quad (2.11)$$

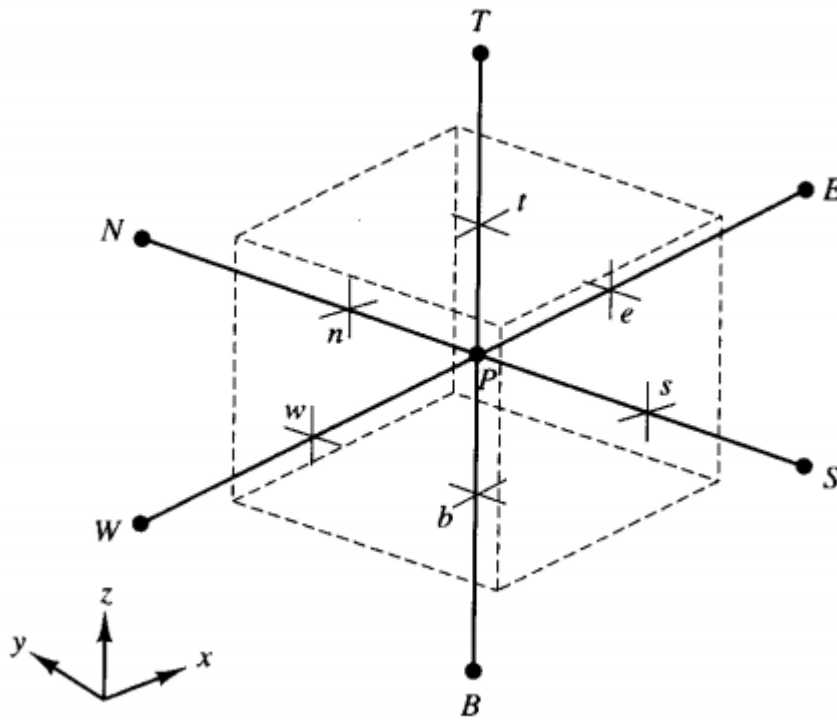
$$a_P^0 = \frac{\rho_P^0 \Delta V}{\Delta t} \quad (2.12)$$

$$\bar{S} \Delta V = S_u + S_P \phi_P \quad (2.13)$$

Os coeficientes dos elementos vizinhos são calculados conforme o que está exposto nas Tabelas 1 e 2, em função do fluxo convectivo por unidade de área, F e da difusividade, D . Os subscritos maiúsculos indicam os nós e os minúsculos denotam as faces que separam dois nós consecutivos, vide Figura 5 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

Finalmente, o último passo do método dos volumes finitos é resolver o sistema de equações algébricas resultante da aplicação da Equação 2.10 para cada um dos nós (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995). A solução desse sistema normalmente é feito com o auxílio de um código DFC, no presente trabalho será utilizado o Ansys Fluent.

Figura 5 – Uma célula com o nó P e os nós vizinhos.



Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995)

Tabela 1 – Expressões para os cálculos dos coeficientes.

Coeficiente	Expressão
a_W	$\max[F_w, (D_w + \frac{F_w}{2}), 0]$
a_E	$\max[-F_e, (D_e - \frac{F_e}{2}), 0]$
a_S	$\max[F_s, (D_s + \frac{F_s}{2}), 0]$
a_N	$\max[-F_n, (D_n - \frac{F_n}{2}), 0]$
a_B	$\max[F_b, (D_b + \frac{F_b}{2}), 0]$
a_T	$\max[-F_t, (D_t - \frac{F_t}{2}), 0]$
ΔF	$F_e - F_w + F_n - F_s + F_t - F_b$

Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

Tabela 2 – Expressões para os cálculos de F e D .

Face	w	e	s	n	b	t
F	$(\rho u)_w A_w$	$(\rho u)_e A_e$	$(\rho u)_s A_s$	$(\rho u)_n A_n$	$(\rho u)_b A_b$	$(\rho u)_t A_t$
D	$\frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w$	$\frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e$	$\frac{\Gamma_s}{\delta y_{SP}} A_s$	$\frac{\Gamma_n}{\delta y_{PN}} A_n$	$\frac{\Gamma_b}{\delta z_{BP}} A_b$	$\frac{\Gamma_t}{\delta z_{PT}} A_t$

Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

2.2.4 Turbulência

Um escoamento pode ser laminar, de transição ou turbulento. O fenômeno da turbulência ocorre em um escoamento cujo número de Reynolds, dado pela Equação 2.14, ultrapasse um valor característico que depende do tipo de escoamento. Na Equação 2.14, V é a velocidade característica, l é o comprimento característico e ν é a viscosidade cinemática do fluido. No caso do escoamento em canais abertos, o escoamento é laminar para números de Reynolds menores do que 500, é turbulento para número de Reynolds maiores do que 2500 e de transição para valores intermediários (ÇENGEL; CIMBALA, 2018).

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (2.14)$$

Quando um escoamento se torna turbulento, mesmo que as condições de contorno sejam constantes, não haverá comportamento de regime permanente e todas as propriedades do escoamento variam de forma caótica. Mesmo os escoamentos turbulentos mais simples apresentam um forte caráter tridimensional (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A maneira encontrada para representar as variáveis do escoamento turbulento é decompor as variáveis em duas componentes uma fixa e outra flutuante, conforme a Equação 2.15. A média de uma propriedade do escoamento pode ser definida de acordo com a Equação 2.16 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\phi(t) = \Phi + \phi'(t) \quad (2.15)$$

$$\Phi = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi(t) dt \quad (2.16)$$

Como o termo flutuante varia de forma aleatória, as componentes positivas anulam as negativas e a média é nula, vide Equação 2.17 (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\overline{\phi'} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} \phi'(t) dt \equiv 0 \quad (2.17)$$

Para obter as equações de transporte para o escoamento turbulento, é necessário substituir as variáveis das Equações 2.18 até 2.21 por sua respectiva forma decomposta em uma parte fixa e outra flutuante, como está posto na Equação 2.15. Ou seja, \mathbf{u} , u , v , w e p são substituídos por $\mathbf{U} + \mathbf{u}'$, $U + u'$, $V + v'$, $W + w'$ e $P + p'$, nessa ordem. E em seguida aplica-se a média temporal em cada termo das equações (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\text{div } \mathbf{u} = 0 \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div}(u\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \text{div grad } u \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \text{div}(v\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \text{div grad } v \quad (2.20)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div}(w\mathbf{u}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \text{div grad } w \quad (2.21)$$

Após as devidas manipulações algébricas, obtém-se a Equação 2.22 e as Equações de 2.23 até 2.25, que apresentam novos termos associados aos termos flutuantes das componentes da velocidade, u' , v' e w' .

$$\text{div } \mathbf{U} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \text{div}(\rho U \mathbf{U}) = \frac{\partial P}{\partial x} + \text{div}(\mu \text{grad } U) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'^2})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial z} \right] \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \text{div}(\rho V \mathbf{U}) = \frac{\partial P}{\partial y} + \text{div}(\mu \text{grad } V) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'v'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'^2})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial z} \right] \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial(\rho W)}{\partial t} + \text{div}(\rho W \mathbf{U}) = \frac{\partial P}{\partial z} + \text{div}(\mu \text{grad } W) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u'w'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v'w'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w'^2})}{\partial z} \right] \quad (2.25)$$

Os termos adicionais nas Equações 2.23, 2.24 e 2.25 são conhecidos como tensões de Reynolds. As Equações 2.23 até 2.25 são chamadas de Equações de Reynolds (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

A Equação 2.26 é a equação de transporte para uma propriedade genérica ϕ quando se considera escoamento turbulento. Comparando-se as Equações 2.5 e 2.26 nota-se grande semelhança, a menos de novos termos associados ao escoamento turbulento (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \text{div}(\rho\Phi\mathbf{U}) = \text{div}(\Gamma_{\Phi} \text{grad} \Phi) + \left[-\frac{\partial(\overline{\rho u' \phi'})}{\partial x} - \frac{\partial(\overline{\rho v' \phi'})}{\partial y} - \frac{\partial(\overline{\rho w' \phi'})}{\partial z} \right] + S_{\Phi} \quad (2.26)$$

Na prática, a massa específica média pode variar e o valor instantâneo da massa específica varia devido às flutuações estatísticas decorrentes da turbulência. De acordo com Bradshaw, Cebeci e Whitelaw (1981), conforme citado por Versteeg e Malalasekera (1995), pequenas flutuações na massa específica não parecem afetar o escoamento de forma significativa.

Os termos que surgem tomando-se a média temporal das equações com os termos flutuantes alteram o balanço que existia entre o número de incógnitas e o número de equações. Há seis novas incógnitas, tensões de Reynolds. Para resolver esse problema foram desenvolvidos diversos modelos de turbulência. Alguns dos modelos mais comuns estão listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Modelos de turbulência mais comuns.

Modelos clássicos - baseados nas equações RANS
Modelo a zero equações - comprimento de mistura
Modelo a uma equação - Spalart-Almaras
Modelos a duas equações - modelos $\kappa - \epsilon$, modelos $\kappa - \omega$ e ASM
Modelo com sete equações - Modelo das tensões de Reynolds

Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

Os modelos clássicos fazem uso das equações da formulação das equações RANS (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*) e são amplamente utilizados em softwares DFC comerciais atualmente. Já a abordagem LES (*Large Eddy Simulation*) utiliza uma estratégia diferente para computar a turbulência. Nesse caso adota-se um certo comprimento de corte que é utilizado como um filtro que define que as escalas de turbulência maiores do que o corte serão resolvidos e as menores serão modeladas. Apesar de apresentar um custo computacional menor do que a opção de uma DNS (*Direct Numerical Simulation*) essa opção de LES ainda apresenta uma demanda computacional acima dos modelos clássicos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 1995).

2.2.5 Parâmetros adimensionais u^+ e y^+

Dois adimensionais muito importantes para a correta simulação do escoamento próximo à parede são u^+ e y^+ . Para o cálculo desses adimensionais é necessário a definição de um parâmetro chamado velocidade de atrito, que está disposto na Equação 2.27. Na qual τ_w é a tensão de cisalhamento na parede e ρ é a massa específica do fluido (WILCOX, 1994).

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (2.27)$$

A partir dessa velocidade de atrito, a velocidade do escoamento, U , é adimensionalizada, dividindo-a pela velocidade de atrito, u_τ , como pode ser observado na Equação 2.28 (WILCOX, 1994).

$$u^+ = \frac{U}{u_\tau} \quad (2.28)$$

Finalmente, o parâmetro adimensional y^+ é definido pela Equação 2.29, que adimensionaliza a distância y_P entre a parede e o centro do elemento mais próximo da parede (WILCOX, 1994).

$$y^+ = \frac{\rho u_\tau y_P}{\mu} \quad (2.29)$$

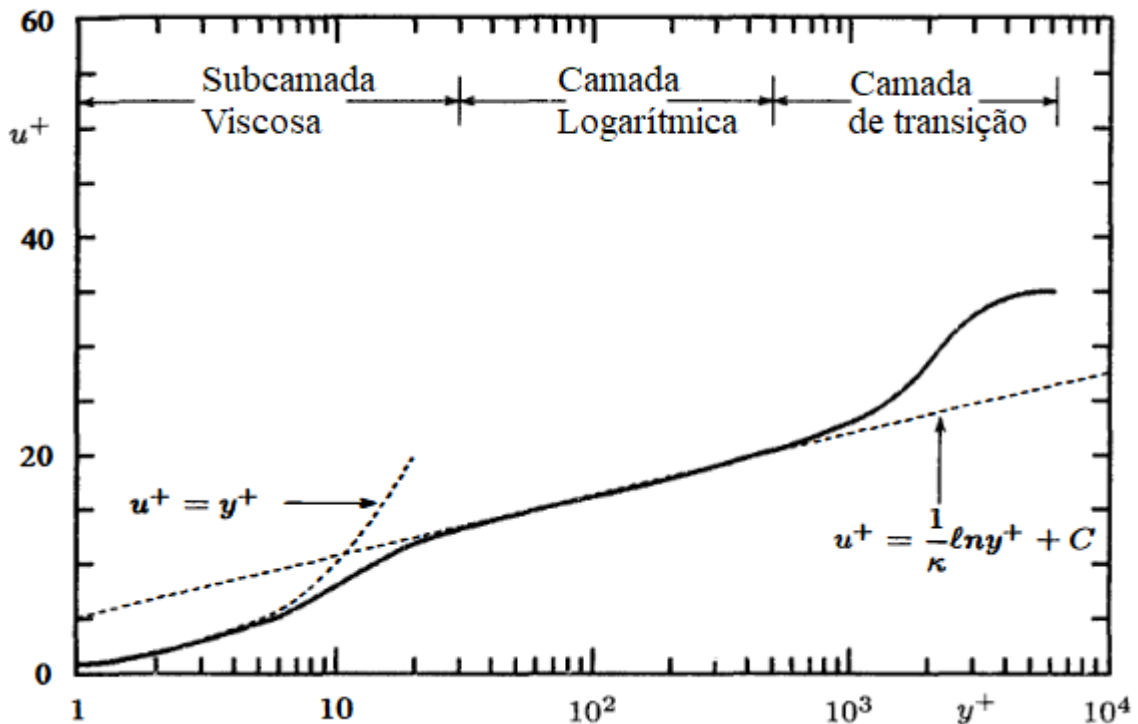
Essa variável, y^+ , permite a divisão do escoamento próximo à parede em diferentes regiões: subcamada viscosa, camada logarítmica e camada de transição. Nas duas primeiras regiões há uma correlação diferente entre u^+ e y^+ . Na camada logarítmica, é válida a relação dada pela Equação 2.30, na qual k e C são constantes. Na subcamada viscosa é utilizada a Equação 2.31 (WILCOX, 1994).

$$u^+ = \frac{1}{k} \log(y^+) + C \quad (2.30)$$

$$u^+ = y^+ \quad (2.31)$$

Para que o modelo de turbulência adotado nas simulações consiga ter um bom desempenho próximo à parede é importante manter o valor da variável adimensional y^+ dentro das faixas nas quais as aproximações utilizadas pelo modelo de turbulência têm boa aderência aos dados experimentais. Mais especificamente, é importante garantir que o valor de y^+ fique em uma das duas faixas: entre 1 e 5, na qual a aproximação da Equação 2.31 é utilizada ou entre 30 e 500, na qual a aproximação da Equação 2.30 é utilizada, vide Figura 6 (WILCOX, 1994).

Figura 6 – Relação entre os adimensionais y^+ e u^+ para um escoamento turbulento.



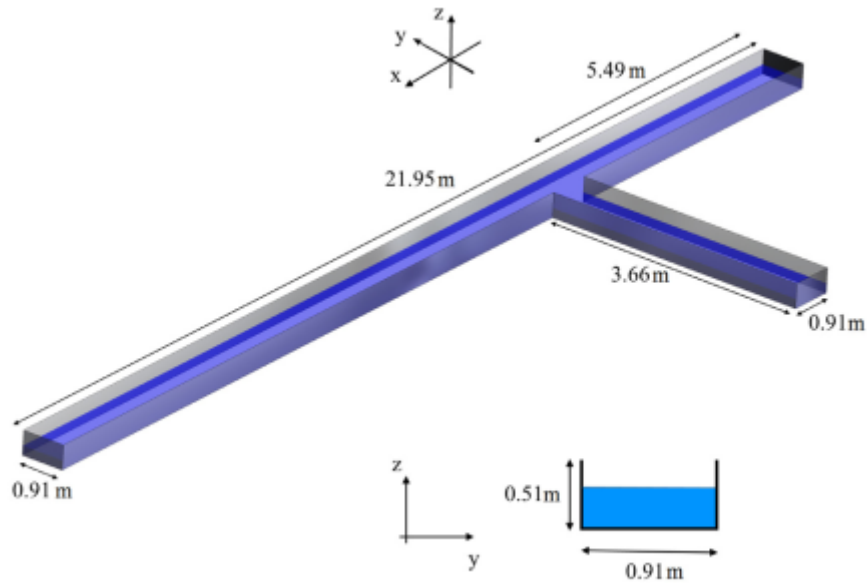
Fonte: Wilcox (1994).

2.3 SIMULAÇÕES DE ESCOAMENTOS EM CANAIS ABERTOS

2.3.1 Alguns exemplos abordados na literatura

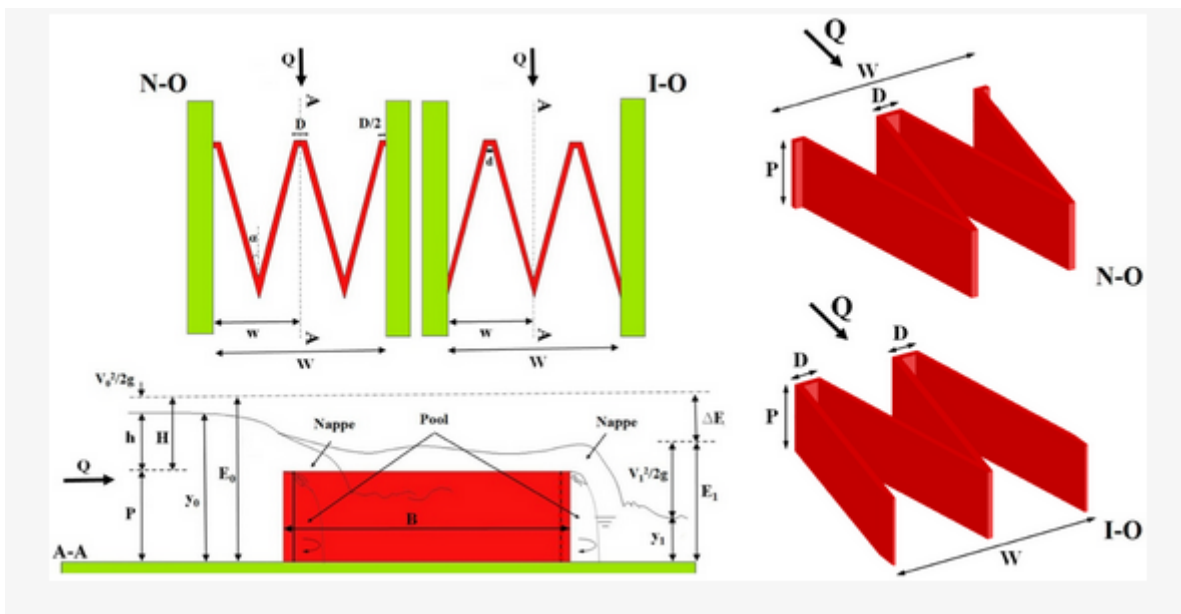
Há na literatura diversos exemplos de trabalhos que usam simulações DFC para estudar o escoamento hidráulico em diferentes aplicações tais como irrigação, barragens, redes de esgoto, entre outras. Luo et al. (2018) utilizaram simulações para estudar a confluência de dois fluxos em um canal aberto, foram utilizadas tanto uma modelagem unidimensional quanto uma modelagem tridimensional, nesse último caso foi empregada uma simulação DFC; e os resultados das duas abordagens foram comparados. Nesse estudo, foram analisados os efeitos da turbulência gerada pela união dos dois fluxos e a dissipação da energia na junção, que pode ser observada na geometria da Figura 7. Ghaderi et al. (2020) construíram um modelo numérico computacional e um modelo experimental para avaliar a influência de parâmetros geométricos no coeficiente de descarga, a dissipação da energia e o fluxo hidráulico em um vertedor do tipo triangular-trapezoidal como pode ser visualizado na Figura 8.

Figura 7 – Geometria usada na simulação DFC de uma junção de dois canais.



Fonte: Luo et al. (2018).

Figura 8 – Geometria usada na simulação DFC de um vertedor labirinto do tipo triangular-trapezoidal.

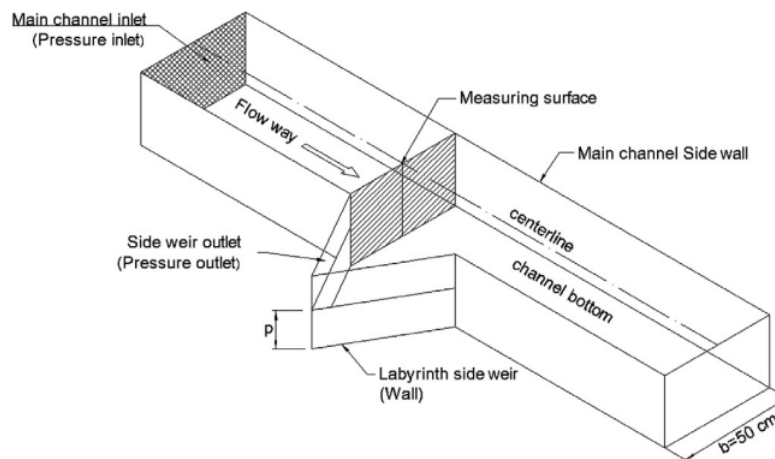


Fonte: Ghaderi et al. (2020).

Aydin (2012) simulou o escoamento sobre um vertedor lateral, cujo modelo pode ser observado na Figura 9, com o objetivo de estudar a superfície livre da água sobre o vertedor. Os resultados dos perfis de vertimento obtidos foram comparados com dados experimentais e o autor concluiu que o modelo utilizado com a utilização do método VOF (*Volume of Fluids*) é uma ferramenta efetiva nesse tipo de problema.

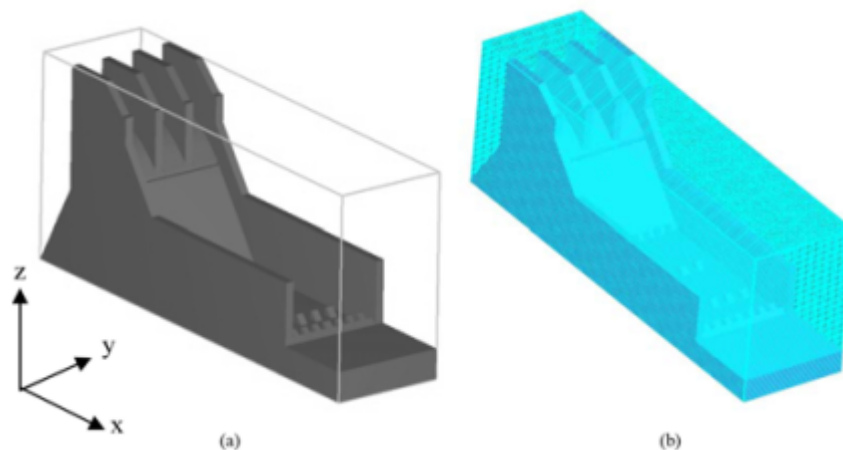
Kumcu (2017) utilizou a geometria e a malha da Figura 10 para realizar as simulações de um vertedor de uma barragem hidroelétrica que seria construída na Turquia. Também foi construído um modelo em escala 1:50 para a condução de experimentos e comparação dos resultados. Segundo o autor, os resultados obtidos com as simulações apresentam um bom nível de concordância com o dados experimentais.

Figura 9 – Geometria usada na simulação DFC de um vertedor lateral.



Fonte: Aydin (2012).

Figura 10 – Geometria (a) e malha (b) usadas na simulação DFC de um vertedor.



Fonte: Kumcu (2017).

Independente da área na qual o trabalho se insere, há sempre algumas etapas comuns nas simulações DFC de escoamentos em canais abertos, tais como a construção da geometria, a geração da malha, a definição do modelo multifásico, a escolha do modelo de turbulência e a definição dos critérios de convergência. As etapas da geração de malha e as subsequentes serão ilustradas brevemente nas próximas seções.

2.3.2 Geração da malha

Grande parte do tempo despendido em uma simulação DFC é empregado na etapa de geração da malha pois ela tem grande influência na convergência da simulação e na qualidade dos resultados gerados (TU; YEOH; LIU, 2018). Duas importantes categorias nas quais se classificam as malhas são: estruturadas e não estruturadas. A aplicação de uma malha estruturada é, geralmente, preferível, contudo não é sempre a opção mais adequada por conta das características peculiares de cada geometria.

Por exemplo, com a utilização da geometria da Figura 7, foi gerada com o uso do *Ansys Fluent* a malha que pode ser visualizada na Figura 11. Observa-se que é uma malha não uniforme com uma maior discretização nas regiões próximas à parede e na região de mistura dos dois fluxos. E, analogamente, a malha que pode ser observada na Figura 12 foi gerada com a utilização do *software FLOW-3D* a partir da geometria que foi apresentada na Figura 8. Uma malha que apresenta regiões estruturadas e regiões não estruturadas é classificada como híbrida. Malhas geradas para simulações DFC em geometrias mais complexas e que apresentam malhas híbridas podem ser observadas nas Figuras 13 e 14.

Figura 11 – Malha utilizada na simulação DFC de um canal aberto.

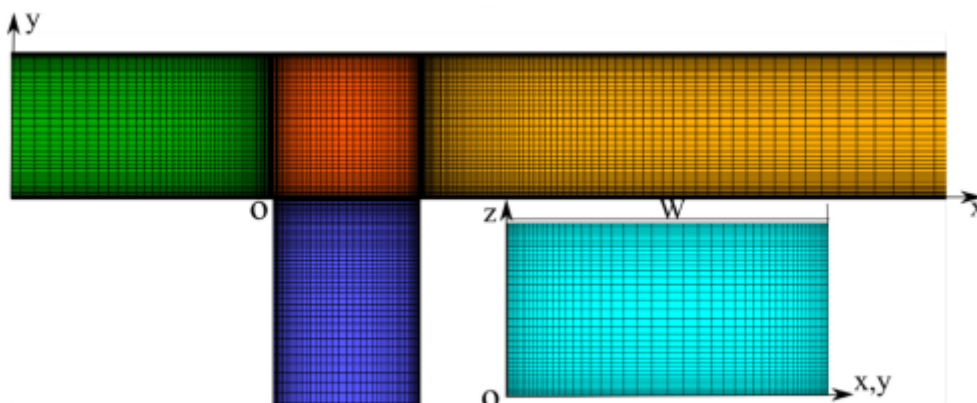
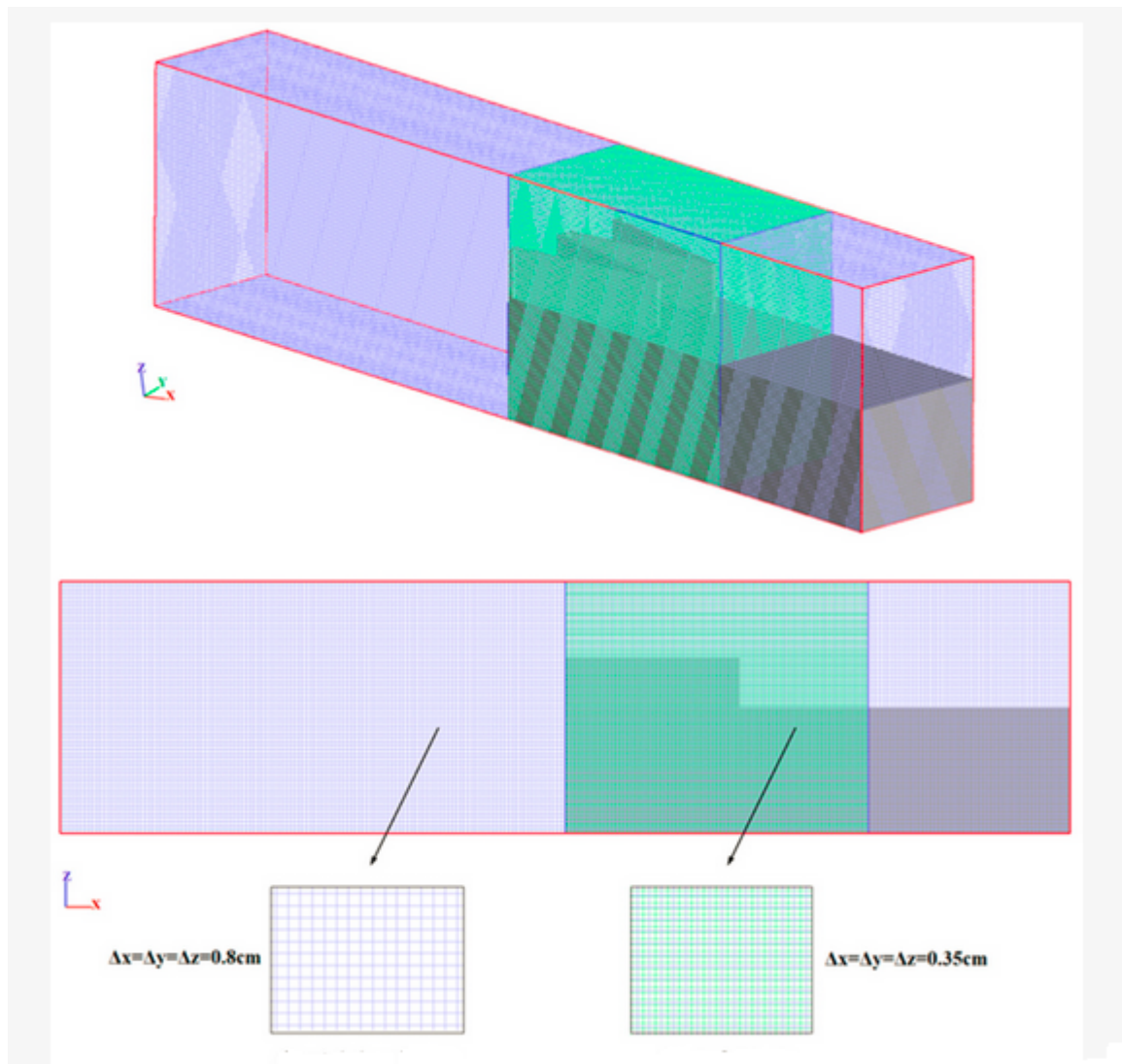
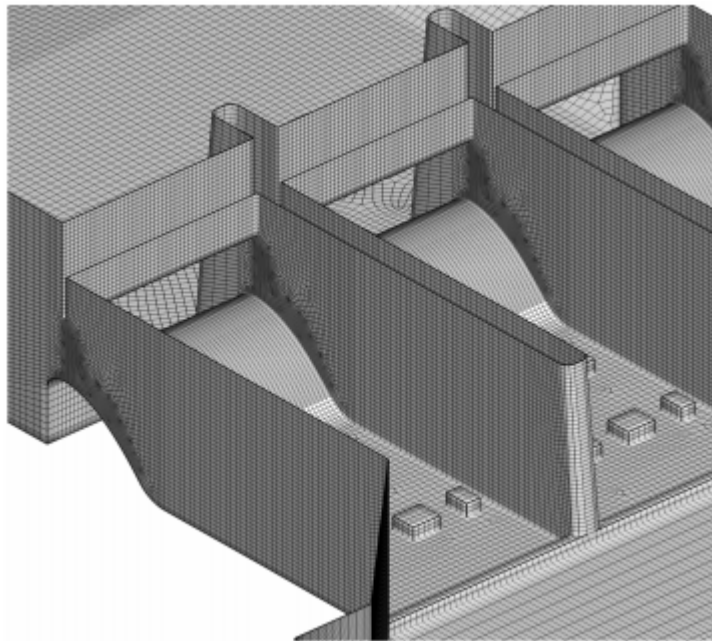


Figura 12 – Malha usada na simulação DFC de um vertedor labirinto do tipo triangular-trapezoidal.



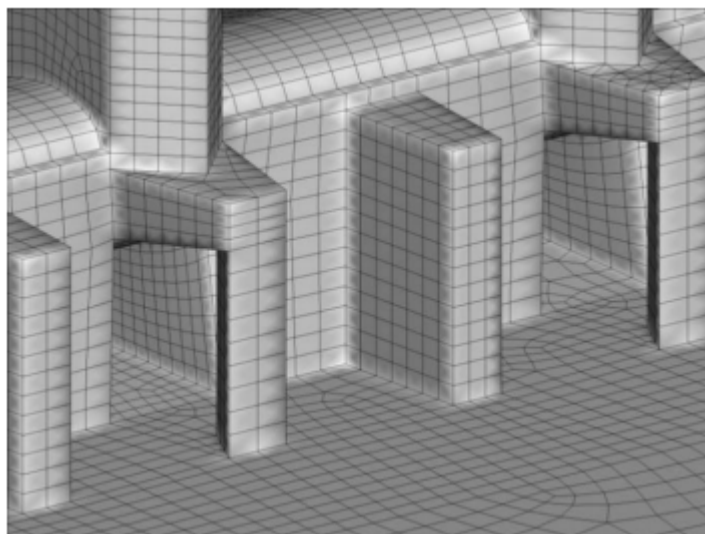
Fonte: Ghaderi et al. (2020).

Figura 13 – Malha usada na simulação DFC para a avaliação do escoamento sobre um vertedor.



Fonte: Zeng et al. (2017).

Figura 14 – Malha usada na simulação DFC para o estudo de capacidade máxima de um vertedor.



Fonte: Li et al. (2011).

2.3.3 Modelo multifásico

O modelo VOF (*Volume of Fluids*) é usualmente utilizado para simulações de escoamentos em canais abertos e todos os trabalhos utilizados como referência neste trabalho utilizaram esse modelo para resolver o escoamento bifásico água/ar com superfície livre. O Manual do Usuário do *Ansys Fluent* também recomenda o modelo VOF para a simulação de escoamentos em canais abertos (ANSYS Fluent User's Guide, 2021).

No modelo VOF, a fração volumétrica da água em cada célula do domínio computacional, α_a , é definida conforme a Equação 2.32. Sendo que $\delta\Omega_a$ e $\delta\Omega_c$ são o volume ocupado pela água em uma dada célula e o volume total dessa célula, nessa ordem (ANSYS Fluent Theory Guide, 2021).

$$\alpha_a = \frac{\delta\Omega_a}{\delta\Omega_c} \quad (2.32)$$

A determinação da fração volumétrica da água em cada célula é feita resolvendo a Equação 2.33 e a fração volumétrica do ar, α_{ar} , é calculada usando o fato de a soma das duas frações ser igual a unidade, Equação 2.34 (ANSYS Fluent Theory Guide, 2021).

$$\frac{1}{\rho_a} \left[\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_a \rho_a) + \nabla \cdot (\alpha_a \rho_a \mathbf{V}_a) = S_{\alpha_a} + \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{ar,a} - \dot{m}_{a,ar}) \right] \quad (2.33)$$

$$\alpha_a + \alpha_{ar} = 1 \quad (2.34)$$

O escoamento é resolvido de maneira análoga a um escoamento monofásico, porém as propriedades do fluido são calculadas considerando as frações volumétricas da água e do ar naquela célula, Equações 2.35 e 2.36 (ANSYS Fluent Theory Guide, 2021).

$$\rho = \alpha_a \rho_a + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (2.35)$$

$$\mu = \alpha_a \mu_a + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (2.36)$$

2.3.4 Modelos de turbulência

Não há uma única resposta correta quando se trata de escolher um modelo de turbulência para simular o escoamento em canal aberto, diferentes pesquisadores adotam modelos distintos. Há alguns exemplos de diferentes usos de modelos de turbulência no estudo de problemas que envolvem escoamento em canal aberto na Tabela 4.

Tabela 4 – Modelos de turbulência usados por diferentes pesquisadores.

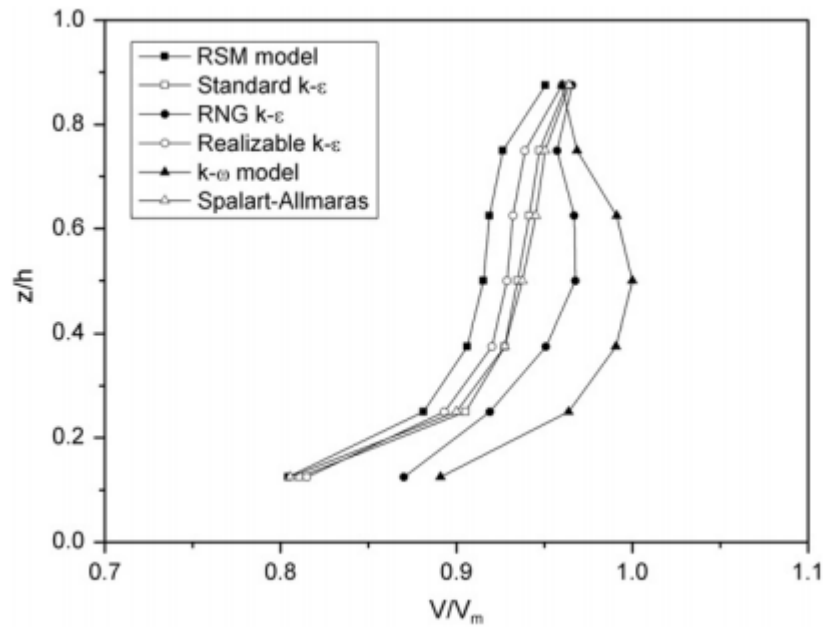
Tipo de escoamento	Modelo adotado	Pesquisadores
Escoamento na junção de dois canais	SST $\kappa - \omega$	Luo et al. (2018)
Escoamento sobre vertedores	Standard $\kappa - \epsilon$	Li et al. (2011)
Escoamento em um vertedor	LES	Bennett et al. (2018)
Escoamento sobre vertedores	Standard $\kappa - \epsilon$	Zeng et al. (2017)
Escoamento sobre vertedores labirinto	$\kappa - \epsilon$ RNG	Ghaderi et al. (2020)
Escoamento em vertedor labirinto lateral	RSM	Aydin (2012)
Escoamento numa armadilha invertida	$\kappa - \epsilon$ realizable	Mohsin e Kaushal (2016)
Escoamento sobre um vertedor	Standard $\kappa - \epsilon$	Kumcu (2017)
Escoamento em um rio canalizado	$\kappa - \epsilon$ RNG	Ma et al. (2002)

Fonte: Próprio Autor.

Há também trabalhos que comparam os resultados para diferentes modelos de turbulência como fizeram Aydin e Emiroglu (2013), que construíram um gráfico relacionando a velocidade adimensionalizada e a coordenada z adimensionalizada no centro da entrada do vertedor lateral da geometria da Figura 9 para diferentes modelos de turbulência simulados cujos resultados podem ser observados na Figura 15.

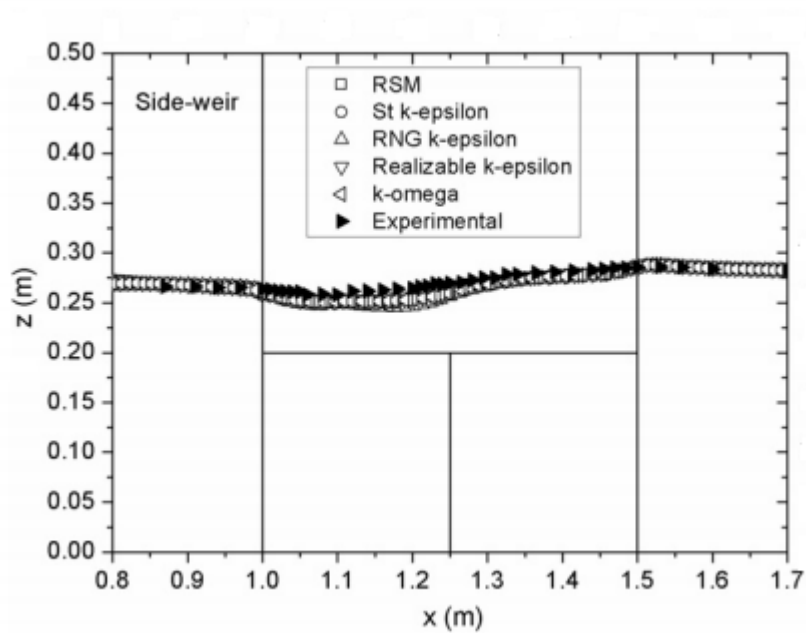
Na comparação entre os diferentes modelos disponíveis, é preciso ponderar a qualidade dos resultados com o custo computacional envolvido para se chegar a escolha mais adequada, uma vez que dois modelos podem fornecer resultados semelhantes para um dado problema, vide Figura 16, que apresenta os níveis da água obtidos nas simulações utilizando o vertedor da Figura 9.

Figura 15 – Coordenada z adimensionalizada em função da velocidade adimensionalizada para diferentes modelos de turbulência.



Fonte: Aydin e Emiroglu (2013).

Figura 16 – Nível da superfície livre no vertedor para diferentes modelos de turbulência.



Fonte: Aydin (2012).

2.3.5 Critérios de convergência

Mohsin e Kaushal (2016) consideraram o balanço de massa no domínio como sendo um dos critérios de convergência, um desbalanço (*imbalance*) abaixo de 0,5 % foi adotado como limite para a convergência da solução em um estudo DFC da eficiência de uma armadilha invertida para retirada de sólidos de uma galeria de esgoto. Além disso, eles também estabeleceram que os resíduos deviam ficar abaixo de 0,001.

O Manual do Usuário do *Ansys Fluent* estabelece que para a maioria das aplicações de Engenharia, resíduos abaixo de 0,001 são considerados suficientes (ANSYS Fluent User's Guide, 2021). Por outro lado, também há recomendações mais rigorosas como, por exemplo, o critério estabelecido pela LEAP CFD TEAM (2012), que recomenda que sejam verificados três condições para a convergência: resíduos menores do que 0,0001, estabilização dos valores das variáveis de interesse e *imbalance* menor do que 1 % no domínio.

MÉTODO

3.1 GERAL

Com a finalidade de se atingir os objetivos propostos, o método utilizado no desenvolvimento deste trabalho dividiu-se nas seguintes etapas:

- Visitas técnicas;
- Levantamento das informações técnicas do projeto hidráulico executivo da ETE, sobretudo a geometria de entrada dos Decantadores Primários, a geometria da região dos Bicos de Pato e das suas condições atuais de operação;
- Análise do banco de dados de medição de vazão na ETE, particularmente o histórico de vazões recentes e de projeções futuras;
- Reprodução em CAD da geometria da entrada dos Decantadores Primários e da região dos Bicos de Pato;
- Elaboração de modelos computacionais DFC utilizando a técnica de volumes finitos, cujas geometrias deverão representar a geometria de entrada nos Decantadores Primários e dos Bicos de Pato;
- Construção e aprimoramento da malha computacional, buscando-se a condição de independência de malha;
- Validação dos modelos computacionais tendo como dados de entrada as vazões volumétricas e como dados de saída os níveis de água;
- Pós-processamento dos resultados;
- Análise dos resultados obtidos e avaliação de possíveis modificações do projeto hidráulico com o objetivo de alterar a distribuição das vazões entre os Módulos 1 e 2 e a determinação da distribuição de vazões na entrada dos Decantadores Primários.

3.2 ESTUDO DE CASO - ETE BARUERI

A ETE Barueri é a maior estação de tratamento de esgoto do Brasil e foi projetada para atender a cerca de 4 milhões de pessoas, com uma vazão média de projeto de $9,5 \text{ m}^3/\text{s}$. No entanto, desde o início da operação em 1988 a vazão média vem crescendo ao longo dos anos e está em $13,62 \text{ m}^3/\text{s}$ atualmente, vide Tabela 5. Por conta da crescente quantidade de esgoto sanitário que chega à estação, sua capacidade foi ampliada para uma vazão média de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma vazão de pico de $27 \text{ m}^3/\text{s}$ em 2010, e há novos planos de ampliação para 2030 e 2040. A previsão para 2030 é de uma vazão média de $21 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma vazão de pico de $31,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e, analogamente, para o ano de 2040 é projetada uma vazão média de $23 \text{ m}^3/\text{s}$ e uma vazão de pico de $34,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

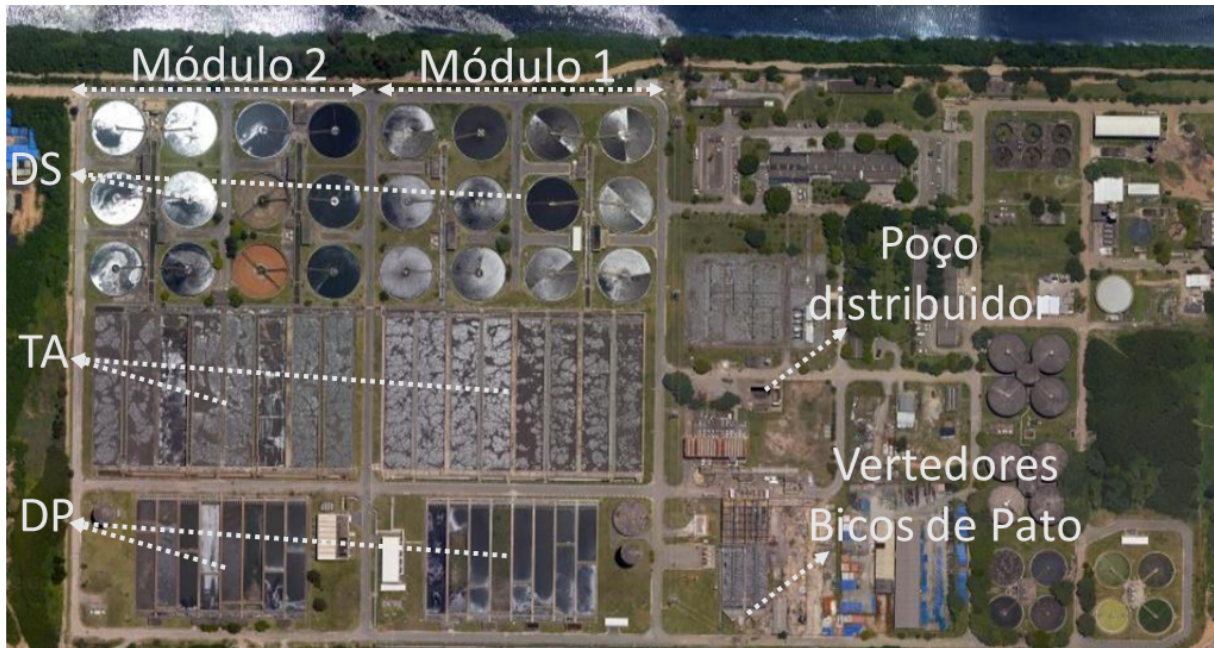
Visitas técnicas feitas à ETE Barueri, dentro do desenvolvimento do projeto SABESP/FDTE, permitiram conhecer em detalhes o funcionamento da estação. É feita, a seguir, uma descrição sucinta do funcionamento da estação e de suas estruturas de tratamento.

A ETE Barueri conta com dois módulos, que operam de forma independente: módulo 1, o mais recente, e módulo 2, o mais antigo. Cada módulo conta com 2 Caixas de Areia (CA), 2 Tanques de pré aeração (TPA), 1 Bico de Pato (BP), 8 Decantadores Primários (DP), 8 Tanques de Aeração (TA) e 12 Decantadores Secundários (DS). A estrutura da ETE de maneira ampla pode ser observada na Figura 17, o que fornece uma ideia da dimensão da instalação e da disposição das diferentes partes. Foram destacados a localização do Poço Distribuidor e dos vertedores Bicos de Patos, assim como foi evidenciada a divisão entre os dois módulos e os principais elementos que os compõem: DP, TA e DS.

A ETE Barueri faz uso do processo de lodo ativado, que é um tratamento biológico comumente utilizado nas estações de maior capacidade de tratamento. O processo convencional tem como objetivo a remoção da matéria orgânica com uma eficiência de aproximadamente 90 % e consiste em duas fases: líquida e sólida. A seguir, é feita uma descrição sucinta das respectivas etapas do tratamento. O efluente a ser tratado chega à ETE por meio do interceptor Tietê Oeste Margem Sul, que está instalado a 30 metros de profundidade, esse interceptor encaminha o esgoto ao poço distribuidor, Figura 18.

A água residuária é, em seguida, recalçada até o canal afluente às grades mecanizadas (Canal à jusante das bombas) e passa pelos Canais de Grades (CG), que retiram parte dos sólidos que chegam junto com o esgoto. Após passar pelo gradeamento, o esgoto segue para as Caixas de Areia (CA), onde é realizada a remoção da areia, que sedimenta por ação da gravidade.

Figura 17 – Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgoto da Sabesp em Barueri.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

Figura 18 – Poço distribuidor.

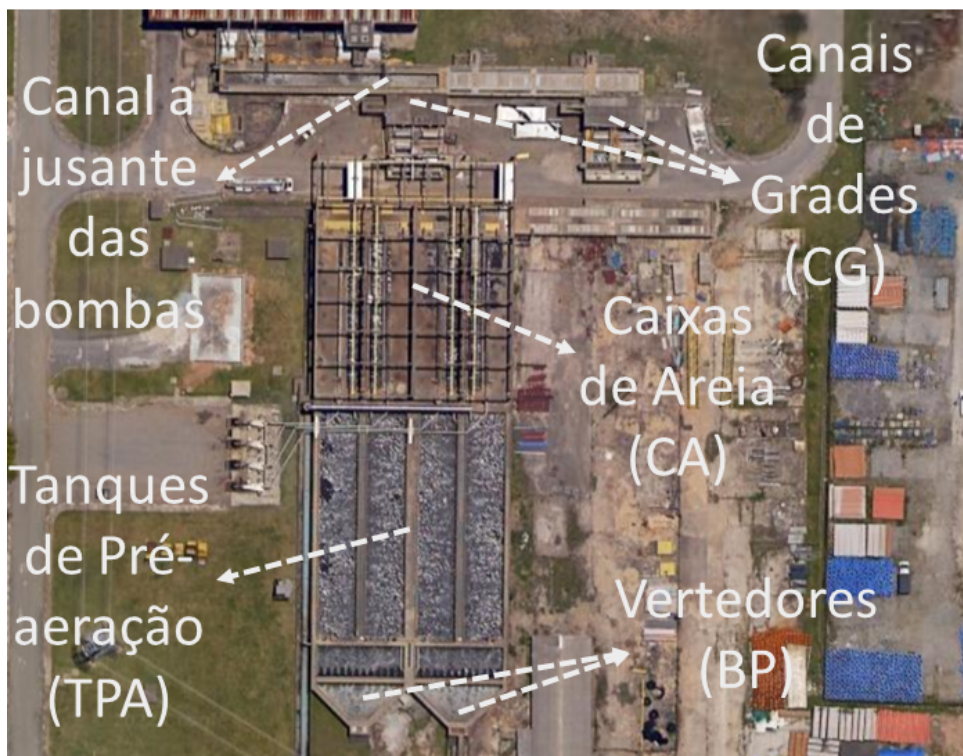


Fonte: Próprio Autor.

Em seguida o efluente é aerado nos Tanques de Pré-Aeração (TPA) no qual é injetado ar na forma de bolhas grossas de modo a evitar odores e, logo depois, é vertido nos vertedores dos Bicos de Pato (BP), os quais possuem uma estrutura labirinto-trapezoidal que contribui para o processo de aeração.

Podem ser observados os Canais de Grades (CG), as Caixas de Areia (CA), os Tanques de Pré-aeração (TPA) e os vertedores Bicos de Pato na Figura 19. O vertedor de um dos Bicos de Pato pode ser observado na Figura 20. O efluente verte numa estrutura conhecida como labirinto, cuja geometria pode ser observada na Figura 21 e é direcionado para uma das entradas de uma das galerias que interligam as saídas dos Bicos de Pato com as entradas do canal de alimentação dos Decantadores Primários.

Figura 19 – Vista aérea da região que engloba os Canais de Grades, as Caixas de Areia, os Tanques de Pré-aeração e os Vertedores Bicos de Pato.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

A disposição das galerias que alimentam os Decantadores Primários e também os próprios Decantadores podem ser observados esquematicamente nas Figuras 22 e 23. As galerias de interligação entre os Vertedores Bicos de Pato e as entradas dos Decantadores Primários estão indicadas em linhas tracejadas.

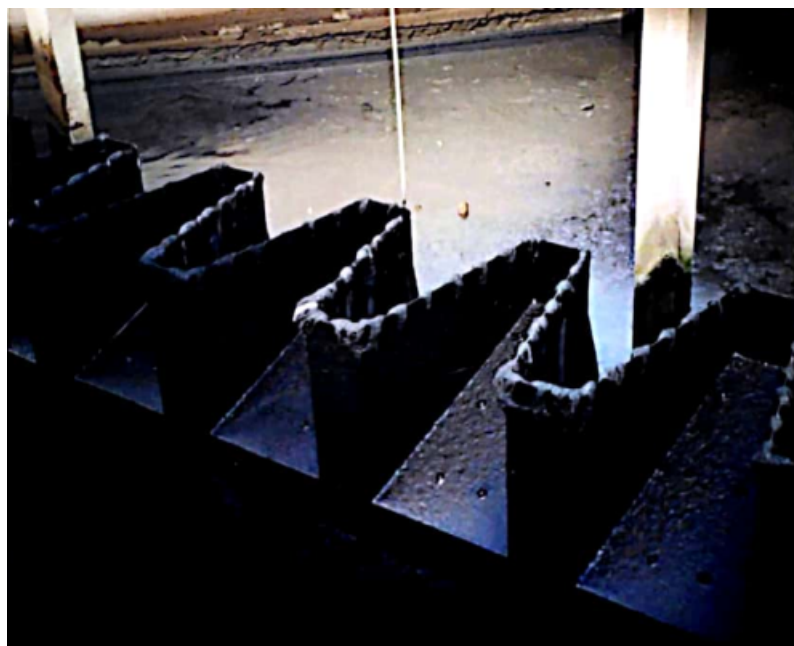
O canal que alimenta os oito DP de um dos módulos pode ser observado na Figura 24, o fluxo ocorre da esquerda para a direita. Nos Tanques de Aeração, Figura 25, é promovida a aeração com bolhas finas com a finalidade de propiciar o crescimento das colônias de bactérias aeróbicas responsáveis pela degradação da matéria orgânica.

Figura 20 – Vista de montante de um dos vertedores de um dos Bicos de Pato.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 21 – Vista de montante de parte da estrutura de um dos vertedores labirinto.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Figura 22 – Vista aérea esquemática da ligação entre os Bicos de Pato e os Decantadores Primários do módulo 1.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

Figura 23 – Vista aérea dos Decantadores Primários dos módulos 1 e 2 e indicações das galerias em linhas tracejadas.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

Após o processo de degradação da matéria orgânica nos Tanques de Aeração e do processo de sedimentação que ocorre nos Decantadores Secundários, Figura 26, o efluente clarificado é devolvido ao meio ambiente. Mais especificamente, a fase líquida final do tratamento é despejada no rio Tietê por meio de cinco saídas (S1, S2, S3, S4 e S5) da estação, vide Figura 26.

A fase sólida diz respeito ao tratamento e disposição da massa biológica chamada de lodo, que é gerada durante o tratamento. Nesta etapa do tratamento são adicionados produtos químicos ao lodo para condicionamento e desaguamento e disposição em centrífugas ou filtros prensas para aumentar o teor de sólidos e facilitar o transporte e disposição final em aterros sanitários aprovados pelo órgão ambiental (SABESP, 2021).

Figura 24 – Canal que alimenta os Decantadores Primários de um módulo.



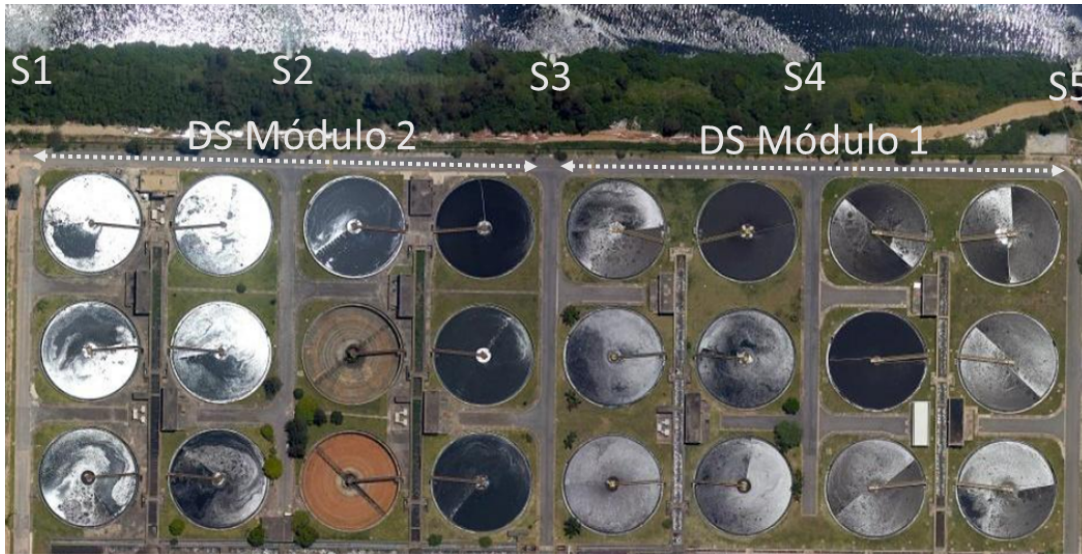
Fonte: Próprio Autor.

Figura 25 – Vista aérea dos Tanques de aeração.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

Figura 26 – Vista aérea dos Decantadores Secundários e das cinco saídas para o Rio Tietê.



Fonte: Próprio Autor a partir do Google Maps.

A partir de dados de operação da ETE, foram levantadas e sistematizadas as informações sobre o funcionamento da estação. Especial atenção foi dedicada aos dados sobre as vazões e aos níveis. No caso das vazões foram analisados dados sobre as vazões bombeadas, que são obtidas com medidores do tipo ultrassom instalados no recalque de cada uma das bombas elevatórias, e as vazões que chegam em cada módulo da estação, que são monitoradas com medidores do tipo Venturi posicionados nas galerias que interligam os Bicos de Pato com as entradas dos canais de alimentação dos Decantadores Primários.

As principais informações sobre as vazões bombeadas na estação e a cotas do poço distribuidor ao longo do período de operação analisado: novembro de 2019 até novembro de 2020 podem ser observadas na Tabela 5. O período de um ano permite avaliar as variações sazonais das vazões de operação da ETE.

Essas estatísticas foram obtidas a partir de dados de operação da ETE fornecidos pela Sabesp. No Anexo A, há uma pequena amostra dos dados na forma em que foram recebidos, Tabelas 38, 39, 40 e 41. Observa-se que a frequência de amostragem dos dados recebidos varia e que foram recebidos dados com frequência de amostragem de cinco em cinco minutos e também de uma em uma hora.

Observa-se que a média das vazões de operação é de 13620 L/s muito acima da vazão inicial de projeto, que era de 9500 L/s . Mas a capacidade da estação foi ampliada para 16000 L/s , portanto a vazão média de operação da estação no período analisado é inferior a sua vazão nominal. Outro dado que deve ser destacado é que a vazão máxima registrada na estação no período estudado foi de 23800 L/s , que está abaixo da vazão de pico prevista da estação, que é de 27000 L/s .

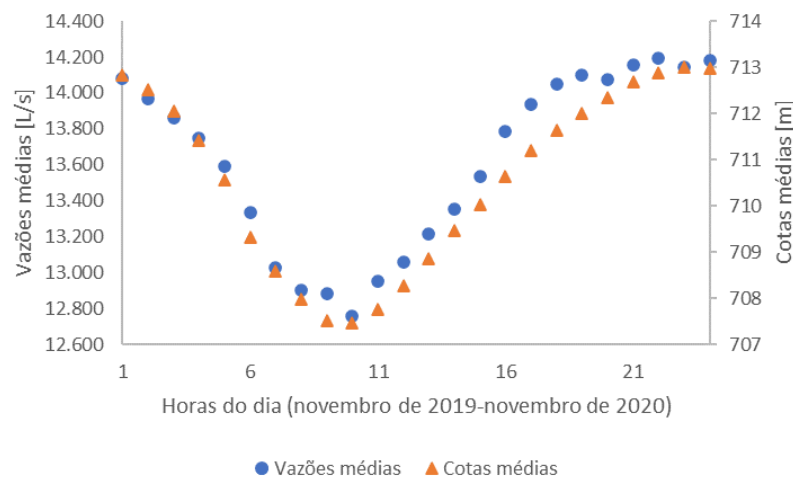
Tabela 5 – Resumo da variação das vazões e das cotas do poço distribuidor a partir de alguns parâmetros estatísticos (nov/2019-nov/2020).

Parâmetro	Vazões [L/s]	Cotas [m]
Média	13620	711
Máximo	23800	718
Mínimo	1900	700
Desvio padrão	2228	3,4
Amplitude	15554	15

Fonte: Próprio Autor.

Os perfis de cotas do poço distribuidor e vazões bombeadas ao longo das 24 horas de um dia típico de operação podem ser observados na Figura 27. As menores vazões ocorrem no período da manhã e as maiores vazões ocorrem no período da noite/madrugada.

Figura 27 – Perfil de vazão e nível do poço distribuidor – variação diária.

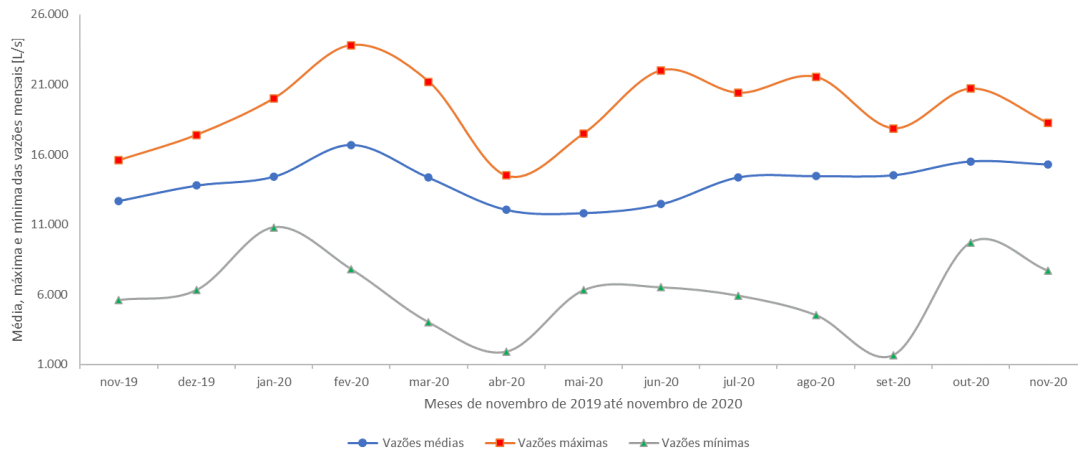


Fonte: Próprio Autor.

Os perfis das vazões médias, máximas e mínimas bombeadas mensais entre novembro de 2019 e novembro de 2020 podem ser observados nas Figuras 28 e 29. Observa-se que no período chuvoso, mais especificamente no mês de fevereiro, a vazão máxima registrada superou os 23000 L/s. Essa vazão é muito maior do que a vazão média prevista para a estação que é de 16000 L/s, contudo ainda está abaixo da capacidade hidráulica (vazão de pico prevista), que é de 27000 L/s.

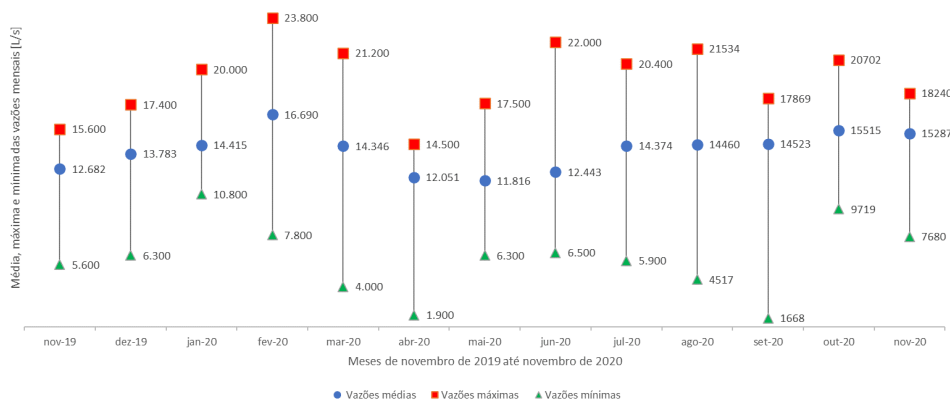
As medições realizadas pelos medidores de vazão do tipo Venturi localizados nas galerias que alimentam os módulos 1 e 2 da estação confirmam a ocorrência de uma diferença de vazão notável entre os dois módulos conforme se pode observar nas Figuras 30 e 31.

Figura 28 – Vazões médias, máximas e mínimas bombeadas do poço distribuidor.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 29 – Vazões médias, máximas e mínimas bombeadas do poço distribuidor.

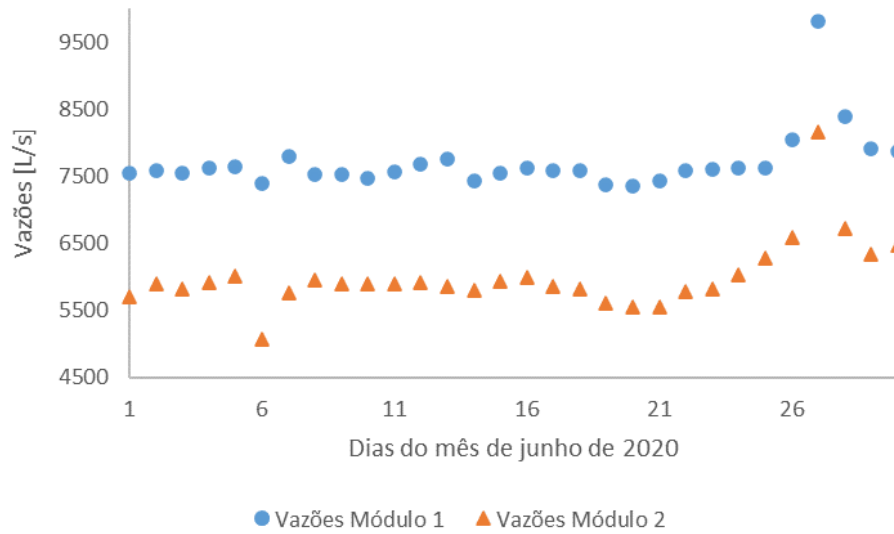


Fonte: Próprio Autor.

Pode-se notar que as diferenças entre as vazões que chegam aos módulos podem ultrapassar os 2000 litros por segundo e que o módulo 1 recebe uma quantidade maior de vazão.

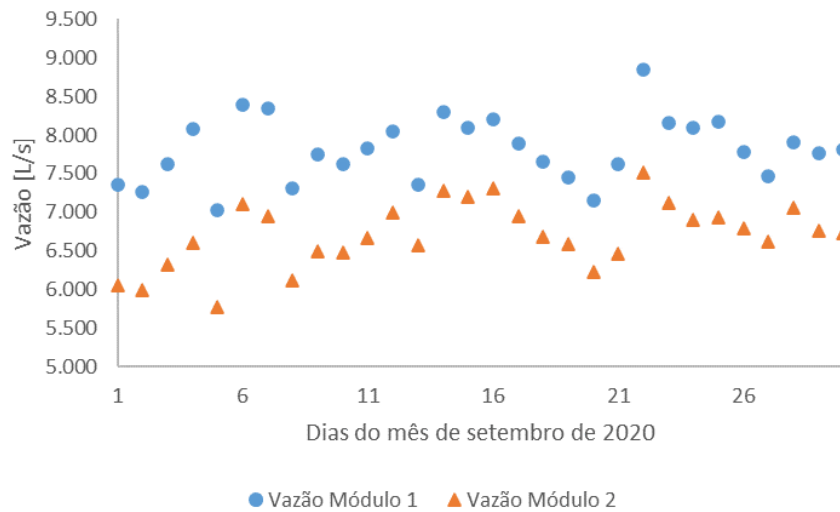
Há, portanto, registro de distribuição assimétrica de vazões entre os dois módulos, apesar de ambos os módulos apresentarem a mesma capacidade nominal de tratamento. O que implica que essa diferença de vazões advém de dificuldades operacionais como, por exemplo, Decantadores Primários fora de operação. Essa distribuição de vazões pode acarretar maiores custos de operação, sendo assim é fundamental que a operação da estação tenha ferramentas para atuar nessa distribuição no sentido da maior eficiência operacional.

Figura 30 – Vazão em cada um dos módulos durante o mês de junho.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 31 – Vazão em cada um dos módulos durante o mês de setembro.



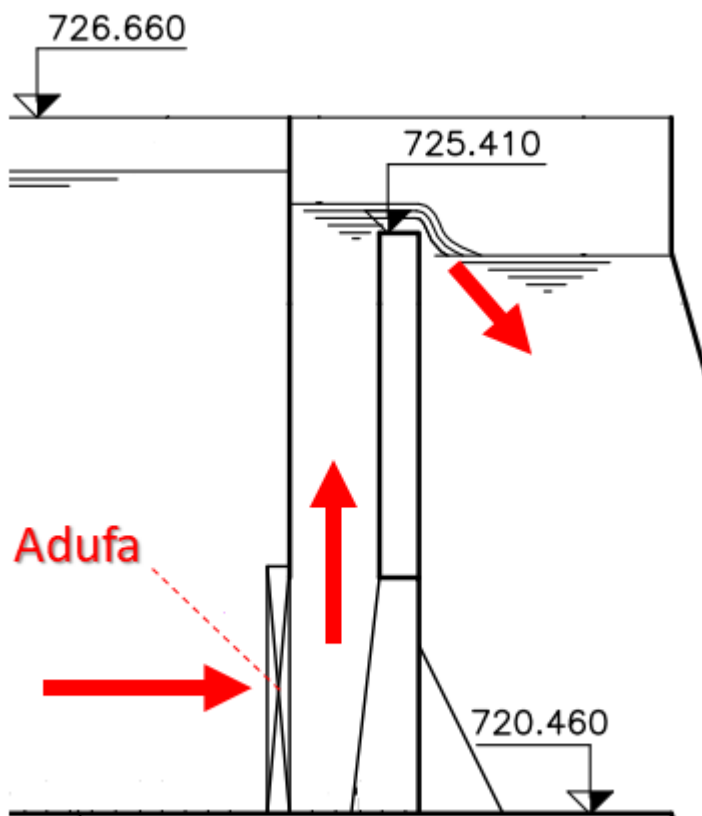
Fonte: Próprio Autor.

3.3 MODELAGEM

3.3.1 Geometria dos Bicos de Pato

O desenvolvimento da modelagem numérica computacional da região dos vertedores Bicos de Pato começou com o entendimento dos fluxos hidráulicos e com a descrição da geometria dessa região. O percurso que o fluido faz entre as entradas das adufas e as saídas nos vertedores pode ser observado, de forma muito simplificada, na Figura 32. Observa-se que a entrada é afogada e a saída é em queda livre.

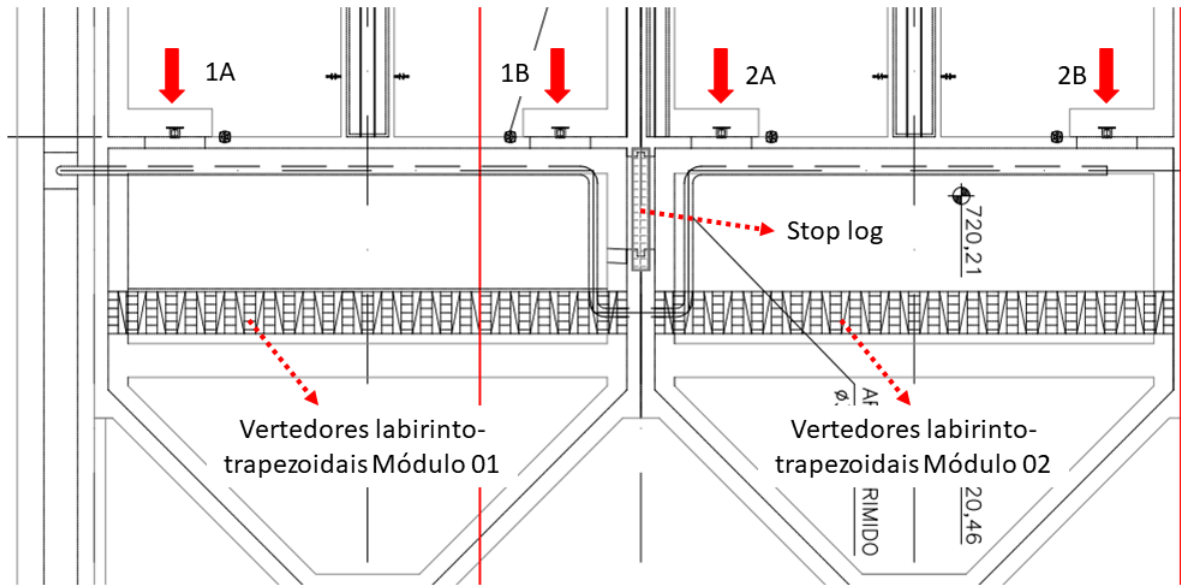
Figura 32 – Desenho esquemático em corte da região das adufas e do vertedor.



Fonte: JNS-SABESP (2011b).

Há, no total, quatro adufas denominadas de 1A, 1B, 2A e 2B, que alimentam os dois Bicos de Pato, como pode ser visualizado na Figura 33, que é uma vista em planta da região do vertedor com a indicação esquemática das adufas e dos vertedores. As posições dos vertedores e do *stop log*, que separa os dois Bicos de Pato, também estão destacadas na Figura 33.

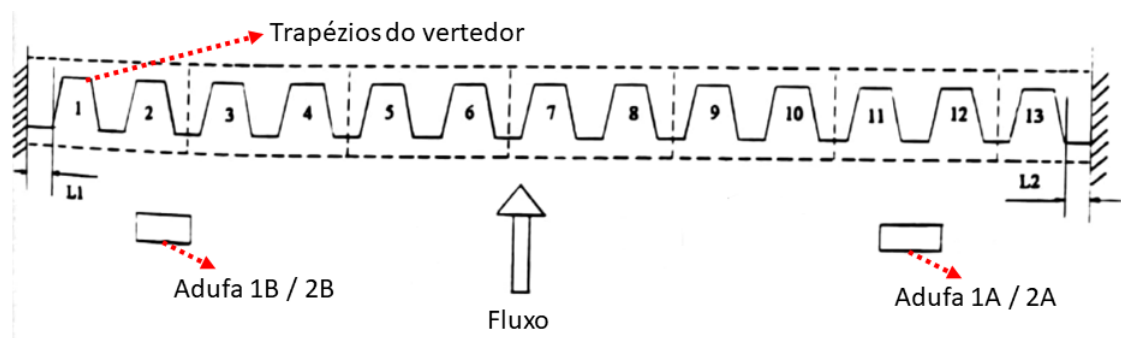
Figura 33 – Desenho esquemático em planta da região das adufas e dos vertedores.



Fonte: JNS-SABESP (2010d).

A estrutura dos vertedores instalados nesse trecho é do tipo labirinto com perfil trapezoidal. Há um total de treze ciclos em forma de trapézios para cada um dos Bicos de Pato. A disposição das adufas 1B/2B e 1A/2A e o número de ciclos ou trapézios em um vertedor podem ser observados na Figura 34. L1 e L2 são os comprimentos excedentes das chapas próximas à parede.

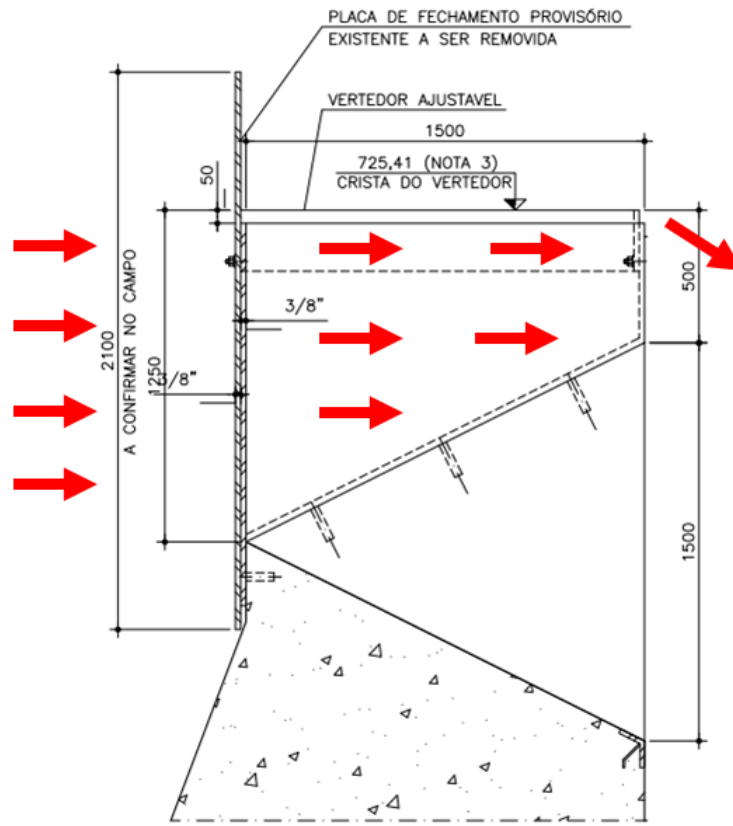
Figura 34 – Desenho esquemático das comportas e do vertedores do tipo labirinto.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Um corte transversal dos vertedores com as indicações das dimensões pode ser observado na Figura 35. É importante observar que nessa vista da estrutura, o escoamento é da esquerda para a direita.

Figura 35 – Corte da região dos vertedores labirinto.

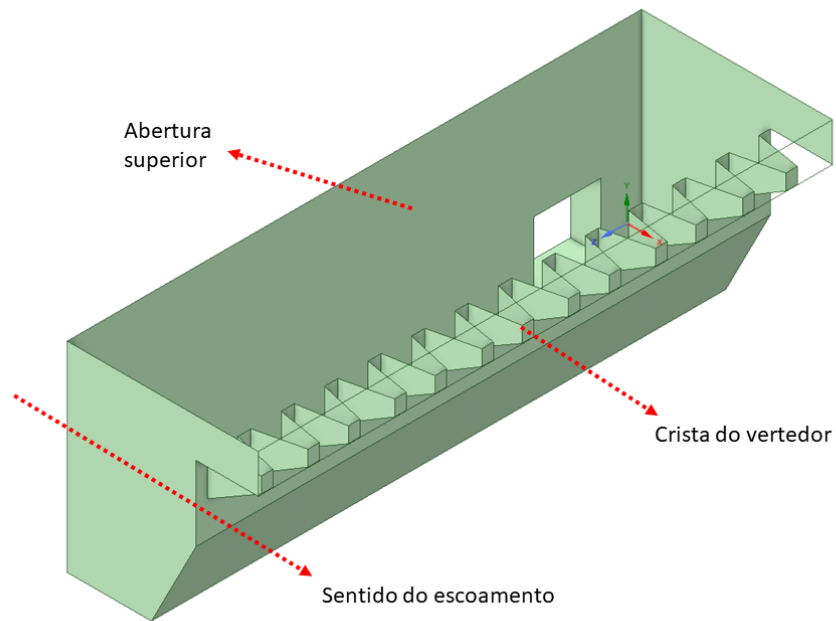


Fonte: JNS-SABESP (2010c).

A partir das informações apresentadas nas figuras 32, 33, 34 e 35 e com as dimensões de projeto da estrutura da região dos Bicos de Pato, foram construídas as geometrias dos modelos para a região dos Bicos de Pato. No Apêndice A, é possível consultar as dimensões utilizadas na construção da geometria utilizada no modelo dos Bicos de Pato, Figuras 126, 127 e 128.

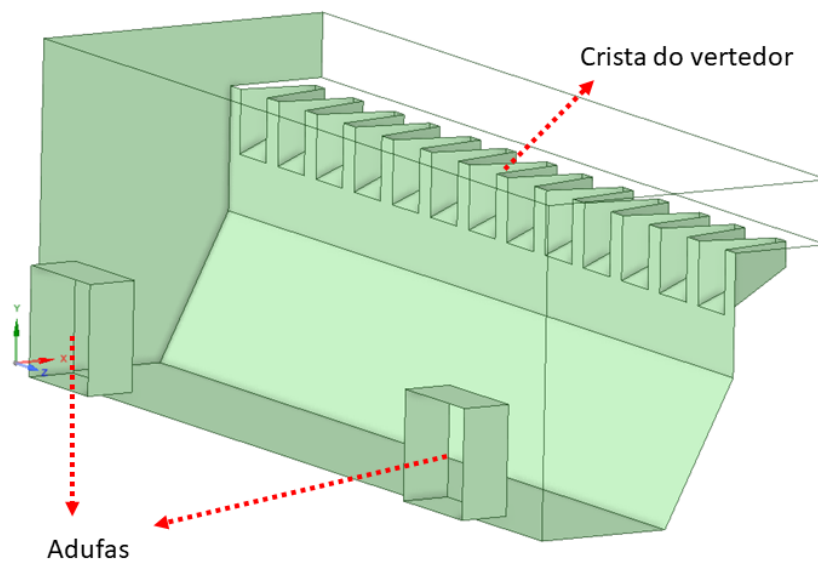
Uma vista isométrica de jusante da geometria da região dos BP para um único vertedor e uma vista isométrica de montante com a omissão de duas superfícies para permitir a visualização da geometria interna podem ser visualizadas nas Figuras 36 e 37, nessa ordem. De forma análoga, uma vista isométrica de jusante da geometria para dois vertedores interligados pela abertura correspondente ao *stop log* e uma vista isométrica de montante com a omissão de algumas paredes para permitir uma melhor visualização da geometria interna podem ser observadas nas Figuras 38 e 39, respectivamente.

Figura 36 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos BP com *stop log*.



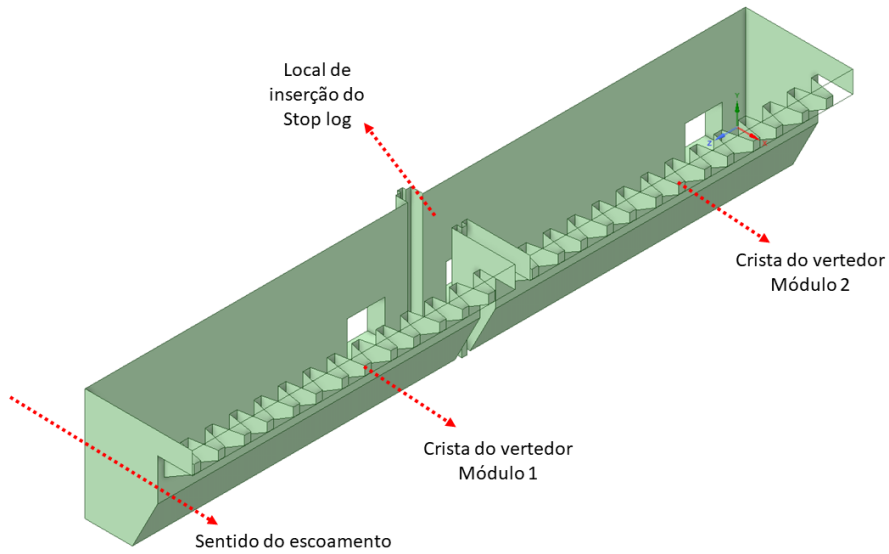
Fonte: Próprio Autor.

Figura 37 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos BP com *stop log* com algumas paredes omitidas.



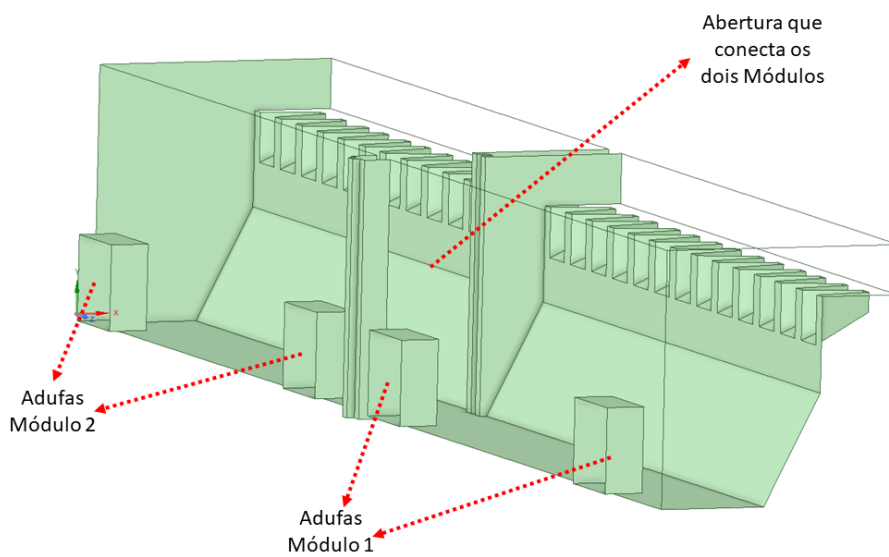
Fonte: Próprio Autor.

Figura 38 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos BP sem *stop log*.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 39 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos BP sem *stop log* com algumas paredes omitidas.

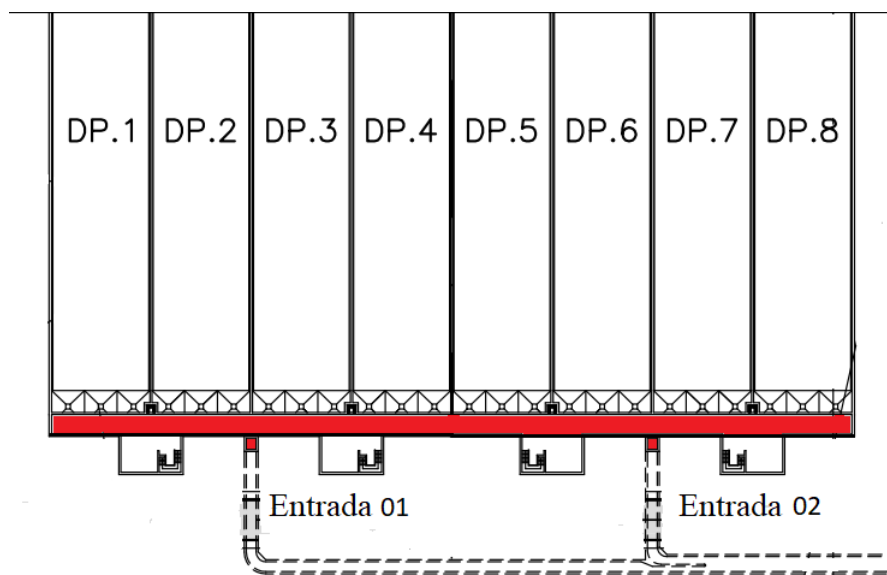


Fonte: Próprio Autor.

3.3.2 Geometria da entrada dos DP

Pode-se observar, em planta, como estão dispostas as entradas que alimentam o canal que distribui o efluente para os oito decantadores primários de um módulo na Figura 40; e também está destacado o próprio canal de alimentação. Além disso, deve ser observado que os oito Decantadores Primários são numerados de DP1 até DP8 da esquerda para a direita numa vista de montante para jusante.

Figura 40 – Vista em planta da entrada num conjunto de oito decantadores primários.

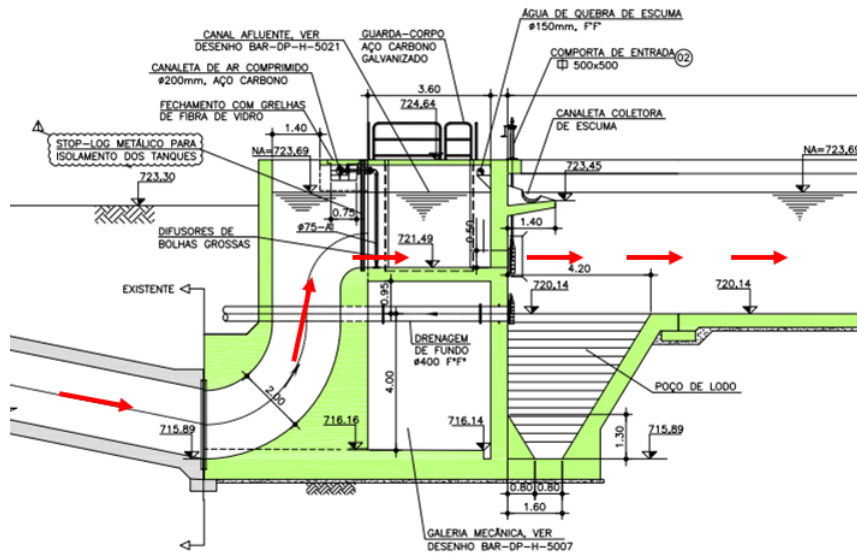


Fonte: JNS-SABESP (2011a).

Pode-se observar como é a geometria de cada uma das duas entradas que alimentam o canal que distribui o efluente para os Decantadores Primários na Figura 41. Cada uma dessas entradas têm uma seção quadrada cujo lado mede dois metros. A disposição das cinco comportas de entrada nos Decantadores Primários pode ser observada na Figura 42.

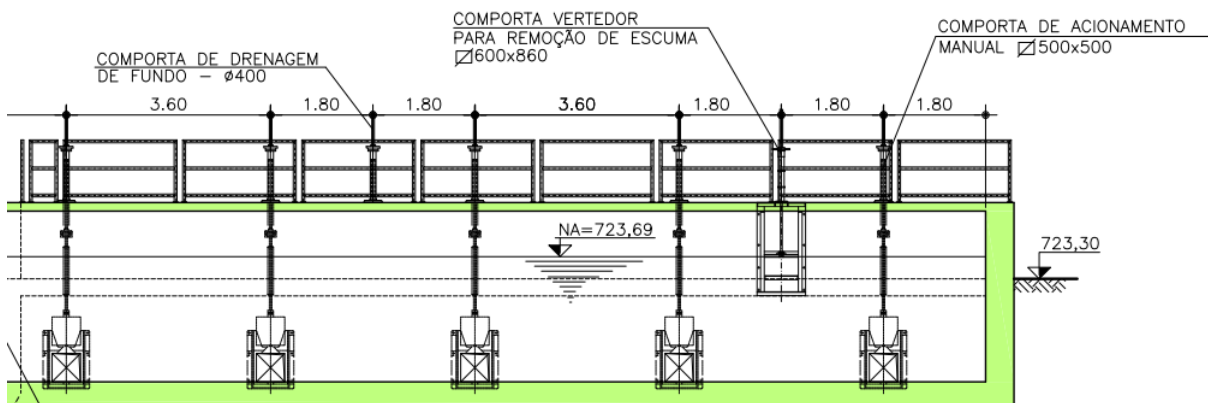
A partir das informações apresentadas nas figuras 40, 41 e 42 e com as dimensões de projeto da estrutura da região dos Decantadores Primários foi construída a geometria do modelo dessa região. Duas simplificações foram feitas em relação à geometria do protótipo para a construção da geometria desse modelo com a finalidade de tornar a simulação do modelo compatível com os recursos computacionais disponíveis nesse trabalho: a redução do comprimento dos Decantadores Primários (de 70 m para 5 m na direção do escoamento) e a exclusão do poço de lodo. Essas duas modificações não comprometem os resultados obtidos nas simulações visto que elas não alteram as vazões nem os níveis d'água e permitem uma grande redução no número de elementos da malha computacional.

Figura 41 – Uma das entradas do canal que distribui o efluente para os decantadores primários.



Fonte: JNS-SABESP (2010a).

Figura 42 – Distribuição das comportas de entrada dos decantadores primários.

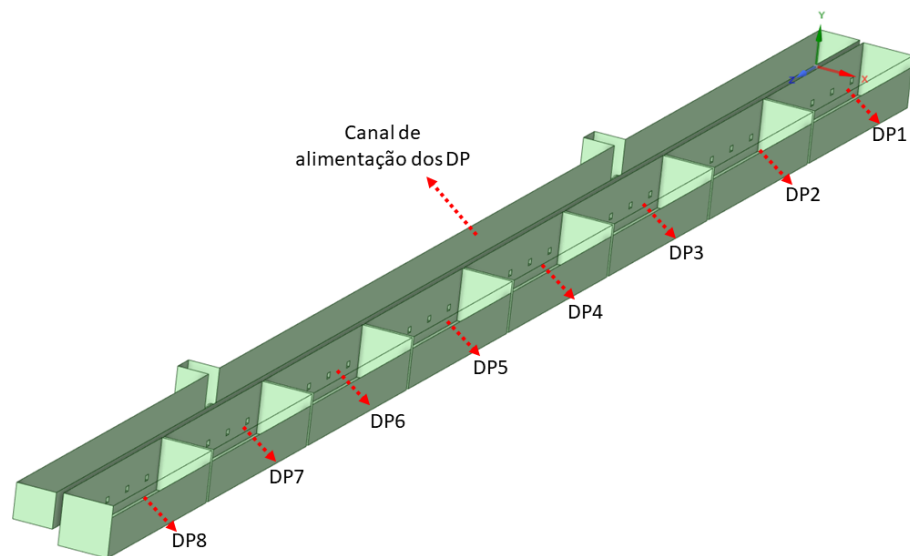


Fonte: JNS-SABESP (2010b).

No Apêndice A, é possível consultar as dimensões utilizadas na construção da geometria utilizada no modelo da entrada dos Decantadores Primários, Figuras 129, 130 e 131.

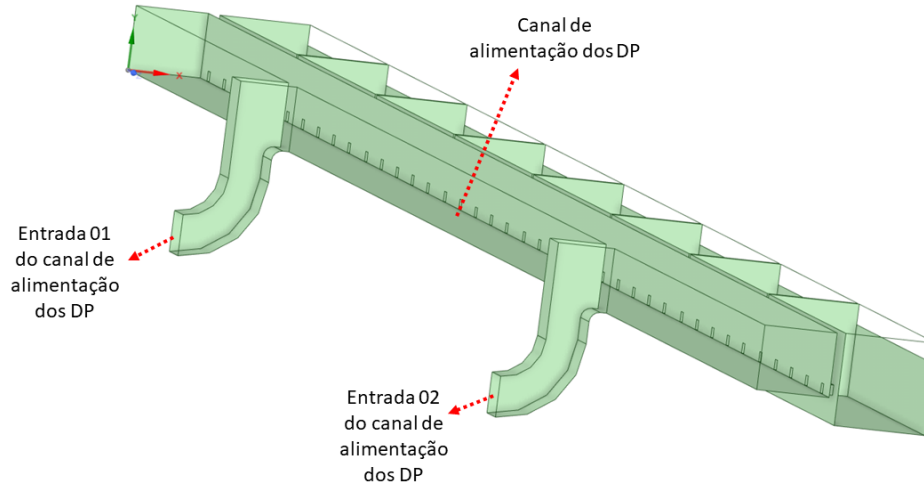
Uma vista isométrica de jusante da geometria da região dos DP para um único módulo e uma vista isométrica de montante com a omissão de duas superfícies para permitir a visualização da geometria interna podem ser visualizadas nas Figuras 43 e 44, nessa ordem. As adufas que interligam o canal de alimentação dos DP com os próprios decantadores estão destacadas na Figura 45.

Figura 43 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos DP.



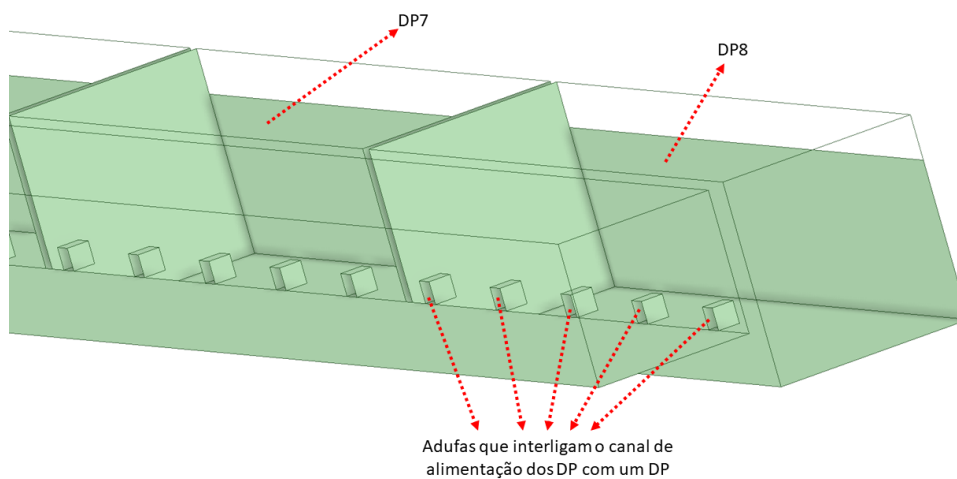
Fonte: Próprio Autor.

Figura 44 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos DP com a omissão de algumas paredes.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 – Detalhe da geometria da região dos DP com destaque para as adufas que interligam o canal de alimentação dos DP com os DP7 e DP8.

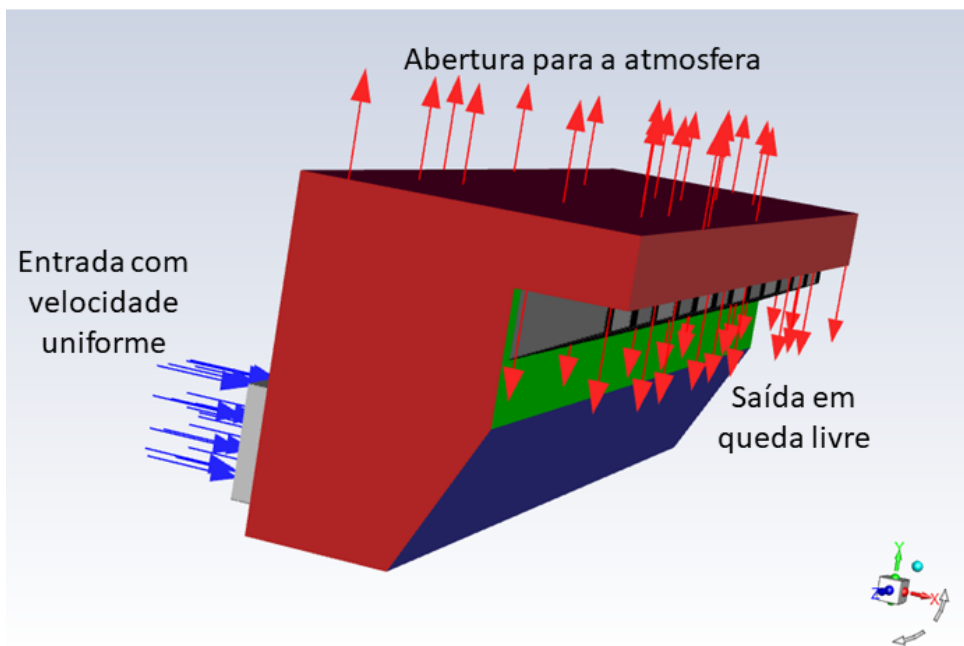


Fonte: Próprio Autor.

3.3.3 Modelos para os BP

Serão consideradas duas possibilidades de modelos: uma considerando a utilização do *stop log* entre os bicos de pato e outra sem utilizá-lo. O modelo para o sistema com *stop log* pode ser visualizado nas Figuras 46 e 47. Nesse caso, há dois vertedores independentes e idênticos, por isso somente um é representado. A geometria desse modelo foi construída no software *SpaceClaim*. Os dados de entrada desse modelo são as velocidades de entrada e os dados de saída são os níveis de água no vertedor.

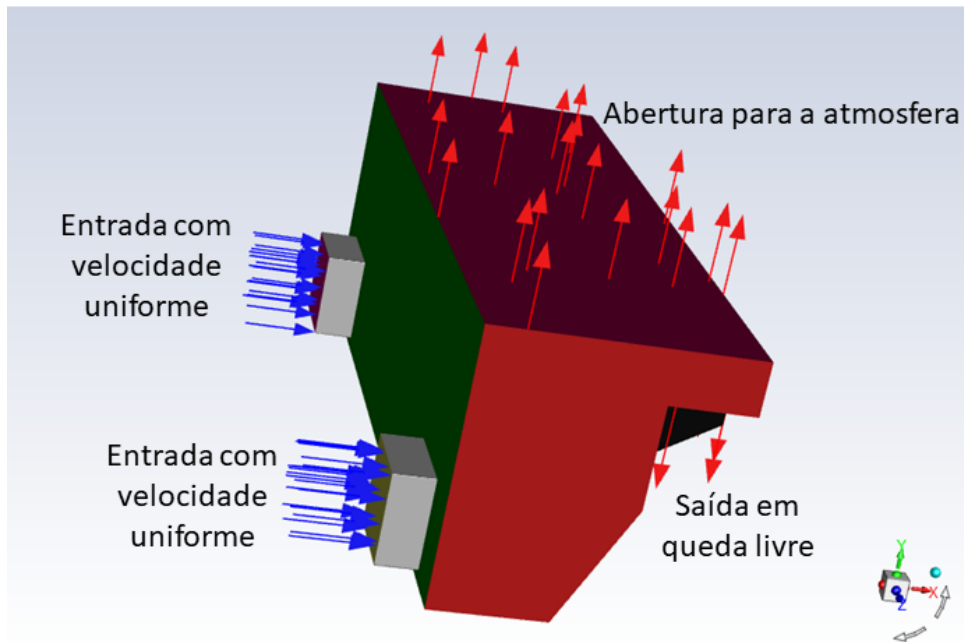
Figura 46 – Modelo para a região dos BP com *stop log* com indicações de entradas e saídas.



Fonte: Próprio Autor.

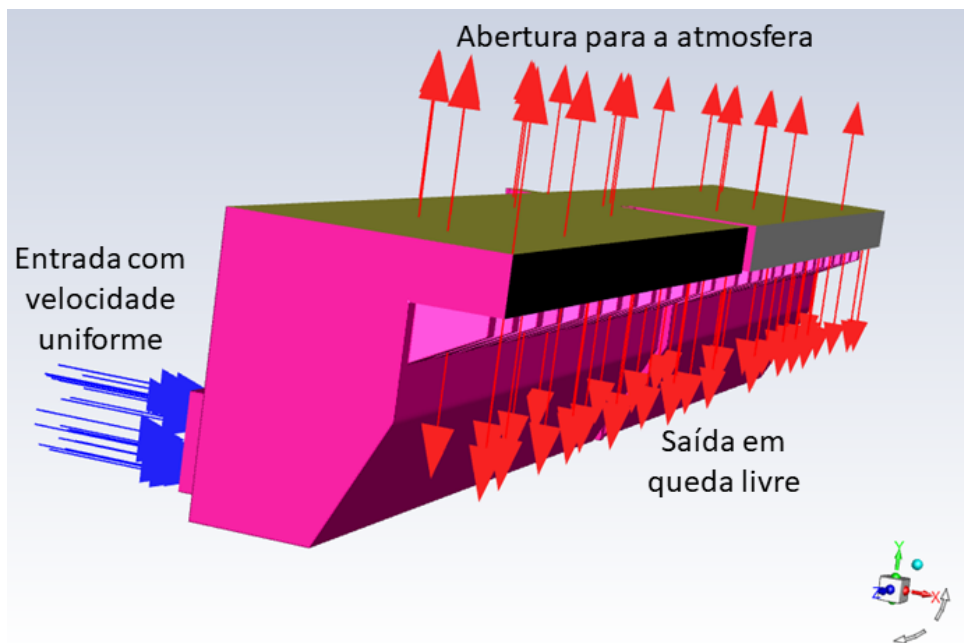
O modelo para o sistema sem *stop log* pode ser visualizado nas Figuras 48 e 49. Nesse caso, há dois vertedores que se comunicam e, portanto, operam no mesmo nível. A comunicação entre os vertedores se dá por meio de uma região que pode abrigar um *stop log* e por conseguinte tem uma geometria com reentrâncias para o encaixe desse dispositivo, vide Figura 33. A geometria desse modelo foi construída com o software *SpaceClaim*. Os dados de entradas são as velocidades nas entradas e os dados de saídas são os níveis de água nos vertedores e a distribuição da vazão entre os dois vertedores.

Figura 47 – Modelo para a região dos BP com *stop log* com indicações de entradas e saídas.



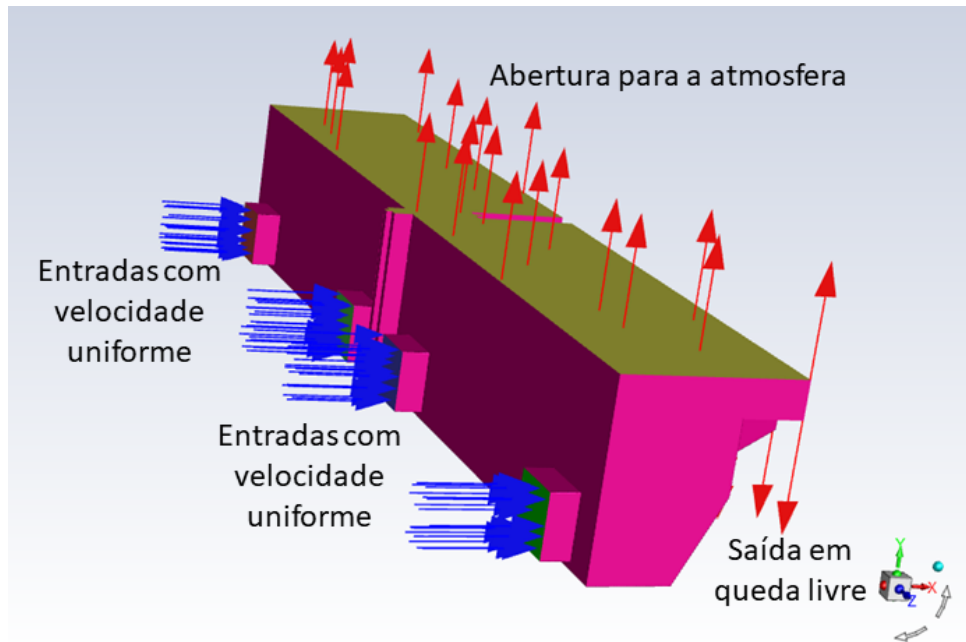
Fonte: Próprio Autor.

Figura 48 – Modelo para a região dos BP sem *stop log* com as indicações de entradas e saídas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 49 – Modelo para a região dos BP sem *stop log* com as indicações de entradas e saídas.

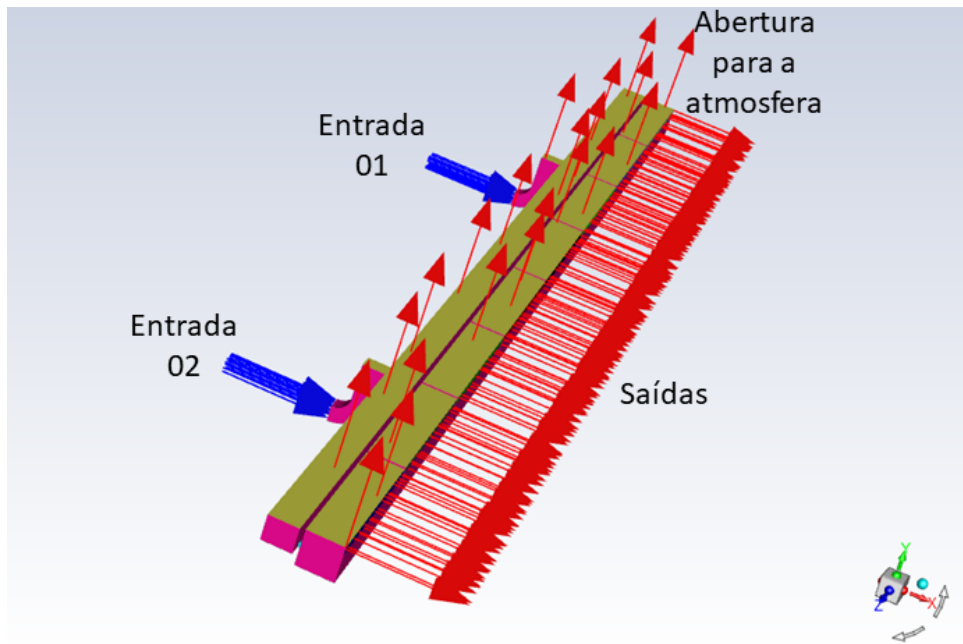


Fonte: Próprio Autor.

3.3.4 Modelo para a entrada dos DP

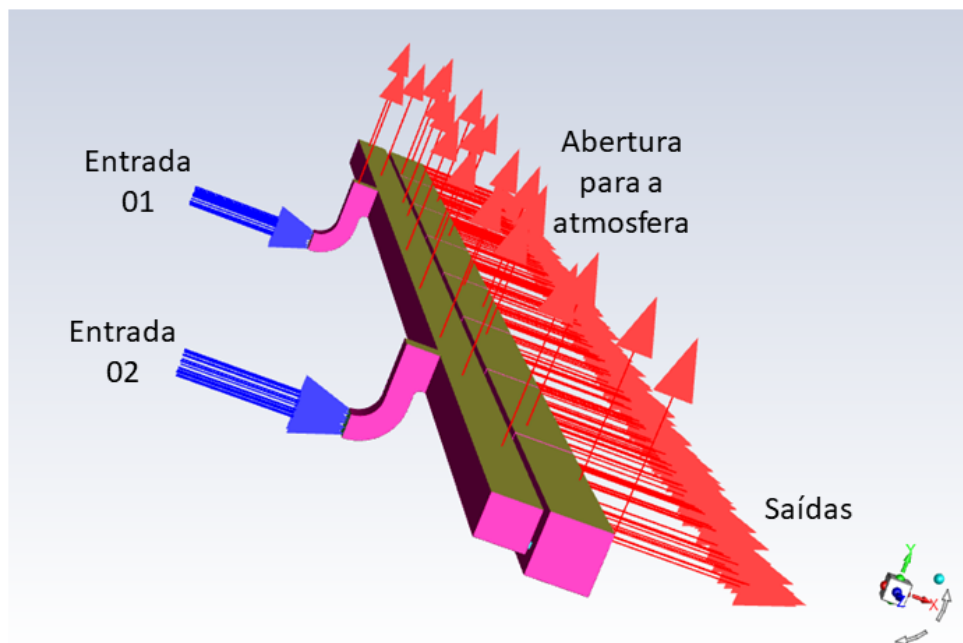
Uma vista isométrica de jusante e uma vista isométrica de montante do modelo da região dos Decantadores Primários podem ser visualizadas nas Figuras 50 e 51, nessa ordem. O modelo é composto basicamente por duas entradas, um canal de alimentação com 40 saídas, cinco para cada um dos oito Decantadores Primários, e os próprios decantadores. A geometria desse modelo foi construída no *software SpaceClaim*. Os dados de entrada desse modelo são as velocidades nas entradas e os dados de saída são a distribuição da vazão entre os oito Decantadores e os níveis d'água (NA) do canal de distribuição.

Figura 50 – Modelo para a região dos DP com as indicações de entradas e saídas.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 – Modelo para a região dos DP com as indicações de entradas e saídas - vista lateral.



Fonte: Próprio Autor.

3.3.5 Modelo de turbulência

Conforme pode ser observado na Tabela 4, diferentes modelos de turbulência são adotados para as simulações DFC conforme as características de cada problema e os objetivos da simulação. Uma boa prática é adotar o modelo mais simples que consiga a turbulência em um nível de detalhe adequado para o problema que se está simulando (WILCOX, 1994).

No geral, os diferentes modelos de turbulência apresentam resultados semelhantes para a simulações de escoamentos em canais abertos no que diz respeito ao escoamento principal, as diferenças aparecem nos escoamentos secundários (KNIGHT; WRIGHT, 2005). E como o presente trabalho está analisando tão somente o escoamento principal, é natural que seja adotado o modelo κ - ϵ padrão que está bem estabelecido e validado em diversos *Solvers* DFC, inclusive no Fluent. Essa escolha é adequada para as simulações do presente trabalho porque o modelo κ - ϵ padrão concilia robustez, simplicidade e exatidão para muitos escoamentos, como os escoamentos em canais abertos aqui estudados. Esse modelo se baseia na aproximação de Boussinesq para as tensões de Reynolds. Na Equação 3.1 está ilustrada essa aproximação em notação indicial.

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \kappa \delta_{ij} \quad (3.1)$$

A Equação 3.1 é análoga à equação para a tensão de cisalhamento de um fluido newtoniano e a variável μ_t é conhecida como viscosidade turbulenta. Ou seja, a Equação 3.1 estabelece que as tensões de Reynolds podem ser descritas como o produto da viscosidade turbulenta com a taxa de deformação do escoamento.

As Equações 3.2 até 3.4 são as equações do modelo κ - ϵ . Onde κ é a energia cinética turbulenta, ϵ é a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta, E_{ij} é a taxa de deformação. Os valores dos parâmetros utilizados podem ser consultados na Tabela 6.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\epsilon} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial(\rho\kappa)}{\partial t} + \text{div}(\rho\kappa\mathbf{U}) = \text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \text{grad } \kappa \right) + 2\mu_t E_{ij} E_{ij} - \rho\epsilon \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho\epsilon\mathbf{U}) = \text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{\kappa} \mu_t E_{ij} E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{\kappa} \quad (3.4)$$

Podem ser destacadas as seguintes vantagens do modelo κ - ϵ de acordo com Versteeg e Malalasekera (1995).

Tabela 6 – Parâmetros para o modelo κ - ϵ .

Parâmetros	Valores
C_μ	0,09
$C_{1\epsilon}$	1,44
$C_{2\epsilon}$	1,92
σ_κ	1,00
σ_ϵ	1,30

Fonte: Versteeg e Malalasekera (1995).

- É um modelo relativamente simples no qual apenas valores iniciais ou condições de contorno precisam ser fornecidas;
- Apresenta excelente desempenho para diversos escoamentos importantes em processos industriais;
- É o modelo de turbulência mais amplamente utilizado e validado.

3.4 DESENVOLVIMENTO DA MALHA

Especial atenção foi dedicada ao refinamento da malha próxima às paredes por conta dos maiores gradientes presentes nessas regiões devido à condição de não escorregamento. Por isso, foram realizadas estimativas de quais deviam ser o tamanho dos elementos próximos à parede de modo a ter consistência com o modelo de turbulência adotado nas simulações, ou seja, o modelo $\kappa - \epsilon$ padrão com o uso de funções de parede.

Uma estimativa do valor adequado para o tamanho dos elementos próximos à parede é obtido por meio da suposição de que se trata de um escoamento em uma placa plana. Na Equação 3.5, Re é o número de Reynolds, ρ é a massa específica do fluido, U é a velocidade do escoamento e L é o comprimento característico (WILCOX, 1994).

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \quad (3.5)$$

Com o valor do número de Reynolds, é possível calcular o coeficiente da tensão de cisalhamento na parede com a Equação experimental 3.6 (WILCOX, 1994).

$$C_f = [2 \log(Re) - 6,5]^{-2,3} \quad (3.6)$$

E com o valor do coeficiente da tensão de cisalhamento na parede, é possível calcular a tensão de cisalhamento na parede (placa plana) por meio da Equação 3.7 (WILCOX, 1994).

$$\tau_w = \left(\frac{1}{2}\rho U^2\right)C_f \quad (3.7)$$

Agora, com o valor da tensão de cisalhamento na parede, é possível obter a velocidade de atrito, Equação 3.8 (WILCOX, 1994).

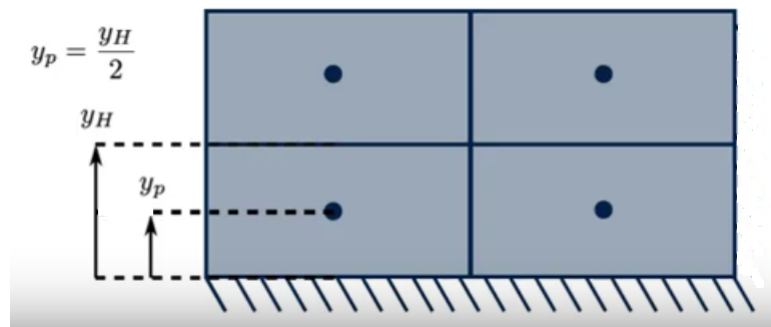
$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.8)$$

Finalmente, com a velocidade de atrito conhecida e com o valor de y^+ escolhido de modo a se limitar a região logarítmica da Figura 6, o valor de y_P pode ser determinado com a Equação 3.9 (WILCOX, 1994).

$$y_P = \frac{y^+ \mu}{\rho u_\tau} \quad (3.9)$$

É importante, no entanto, frisar que y_P é metade de y_H , ou seja, o tamanho estimado inicial dos elementos próximos à parede é o dobro do valor determinado de y_P , como se pode observar na Figura 52.

Figura 52 – Células próximas à parede com as indicações de y_P e y_H .



Fonte: ANSYS Fluent Theory Guide (2021).

Os valores dos parâmetros calculados com as Equações 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 e 3.9 e também o valor obtido para y_H estão dispostos na Tabela 7. Os valores adotados para as velocidades características, U , foram de $0,2 \text{ m/s}$ (BP) e $0,04 \text{ m/s}$ (DP). E para o comprimento característico, L , foram adotados os valores de $4,16 \text{ m}$ (BP) e $3,6 \text{ m}$ (DP). Essas velocidades foram estimadas pela máxima vazão ($17,5 \text{ m}^3/\text{s}$) dividida pela área projetada na direção do escoamento e o comprimento característico foi adotado como a dimensão da estrutura na direção do escoamento.

Tabela 7 – Resumo dos valores calculados para a determinação do valor de y_H .

Parâmetro	Re	C_f	$\tau_w [N/m^2]$	$u_\tau [m/s]$	y^+	$y_P [mm]$	$y_H [mm]$
BP	$8,3 \cdot 10^5$	0,021	0,42	0,021	100	4,77	9,54
DP	$1,43 \cdot 10^5$	0,046	0,037	0,006	100	16,6	33,2

Fonte: Próprio Autor.

Portanto os elementos da malha adjacentes à parede do modelo BP devem ser refinados de modo que tenham 9,54 mm ($\approx 1cm$) de tamanho para garantir que o valor de y^+ seja de 100 nessa região, já os elementos do modelo DP devem ter 33,2 mm ($\approx 3cm$) para satisfazer a mesma condição. É preciso, no entanto, ressaltar que esses valores foram obtidos com o uso de aproximações significativas e serão utilizados apenas para nortear o quão refinado os elementos próximos à parede devem ser.

3.4.1 Estudo de independência da malha

3.4.1.1 Estudo para o modelo dos BP

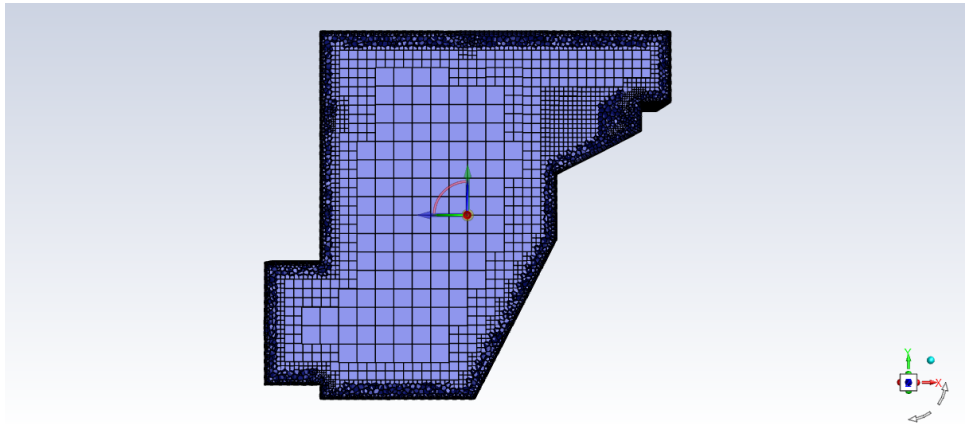
O estudo de independência de malha para o modelo da região dos BP foi realizado com a verificação da variação da pressão média no domínio computacional e do nível na crista do vertedor à medida em que se promovia o refinamento da malha e o consequente aumento do número de elementos. Foram consideradas três malhas com números crescentes de elementos: Malha 01, Malha 02 e Malha 03. Cortes mostrando os elementos internos para cada uma dessas malhas podem ser visualizados nas Figuras 53, 54 e 55. As quantidades de elementos para cada uma dessas malhas estão resumidas na Tabela 8. O valor da pressão média no domínio computacional e também a variação percentual dessa pressão média em relação ao valor correspondente à malha anterior estão dispostos na Tabela 9. No Apêndice B, podem ser conferidas os gráficos para a variação da pressão no domínio computacional durante as simulações, Figuras 132, 133 e 134.

Tabela 8 – Número de elementos das malhas para o modelo da região dos BP.

Malha	Número de elementos (10^6)
Malha 01	0,24
Malha 02	0,79
Malha 03	1,30

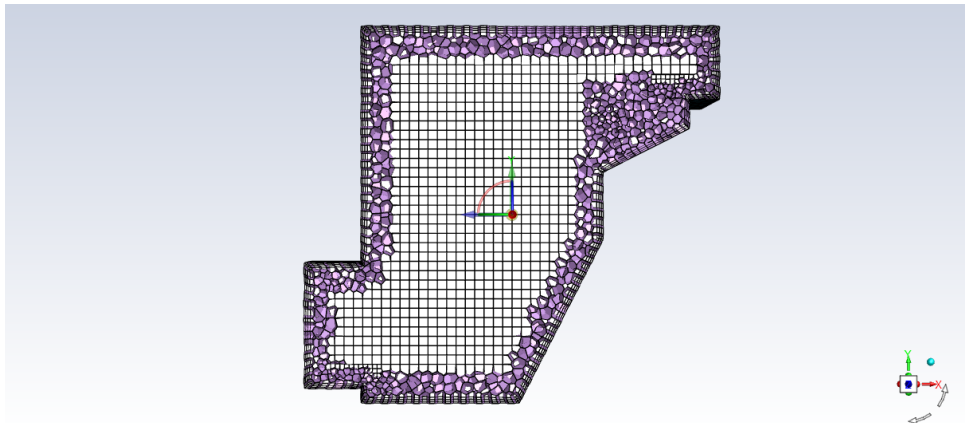
Fonte: Próprio Autor.

Figura 53 – Detalhe em corte da primeira malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 54 – Detalhe em corte da segunda malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.



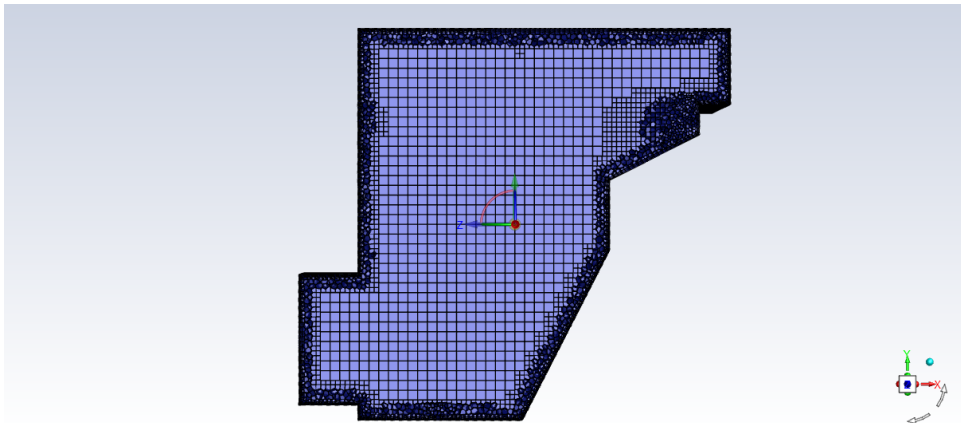
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 9 – Resultados para o estudo de independência de malha para o modelo da região dos BP.

Malha	Pressão média [Pa]	Variação da pressão média [%]
Malha 01	18608	-
Malha 02	18647	0,21
Malha 03	18674	0,14

Fonte: Próprio Autor.

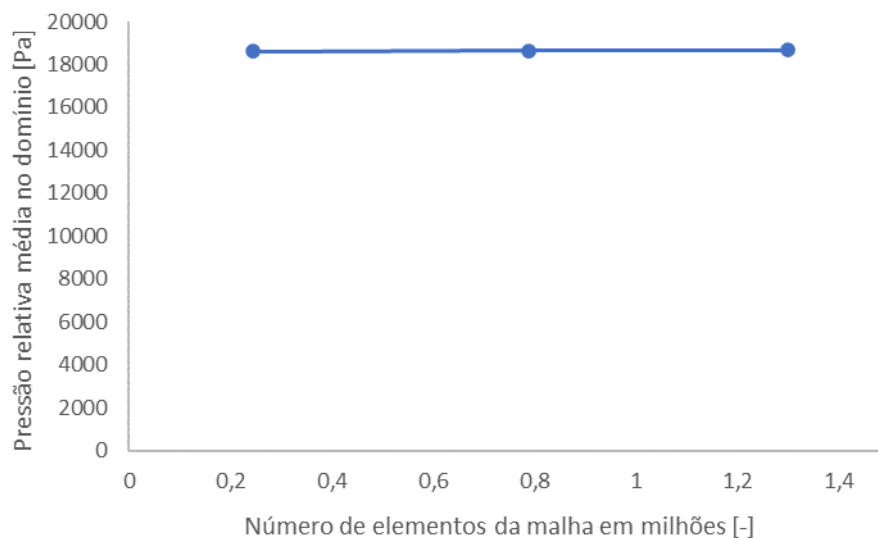
Figura 55 – Detalhe em corte da terceira malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.



Fonte: Próprio Autor.

A variação da pressão média com o aumento do número de elementos na malha computacional da região dos BP pode ser visualizada na Figura 56 e os valores da carga na crista obtidos nas simulações com cada uma das malhas estão dispostos na Tabela 10. A variação da carga na crista não ultrapassa o valor de 2% para as diferentes malhas simuladas. E apesar de ocorrer um aumento da variação percentual entre as Malhas 02 e 03, essa variação é residual e não se faz necessário prosseguir com o refinamento da malha.

Figura 56 – Valores da pressão média no domínio para cada uma das malhas simuladas.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 10 – Variação da carga na crista para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ para diferentes malhas.

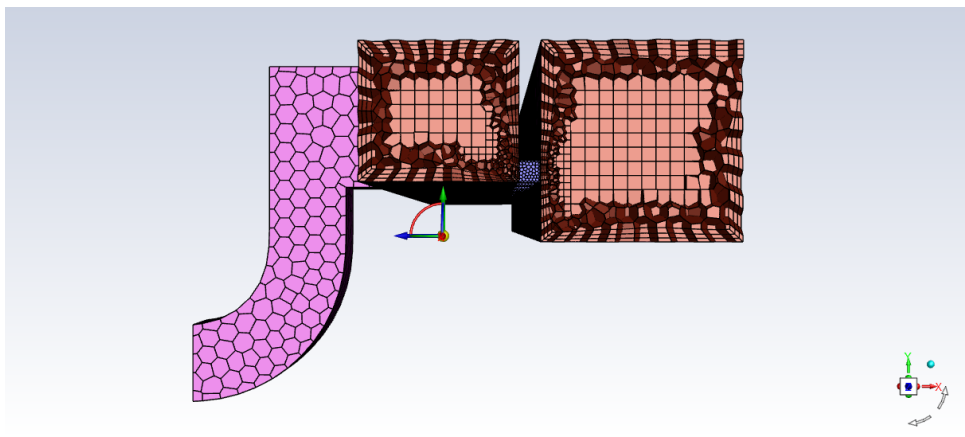
Malha	Carga na crista [cm]	Variação da carga na crista [%]
Malha 01	19,929	-
Malha 02	20,062	0,67
Malha 03	20,367	1,52

Fonte: Próprio Autor.

3.4.1.2 Estudo para o modelo da entrada dos DP

O estudo de independência de malha para o modelo da região dos DP foi realizado com a verificação da variação da pressão média no domínio computacional e da distribuição percentual da vazão total ($8 \text{ m}^3/\text{s}$) entre os DP à medida em que se promovia o refinamento da malha e o conseqüente aumento do número de elementos. Foram consideradas três malhas com número crescente de elementos e cortes mostrando os elementos internos para cada uma dessas malhas podem ser visualizados nas Figuras 57, 58 e 59. As informações acerca do número de elementos de cada uma das malhas estão resumidas na Tabela 11.

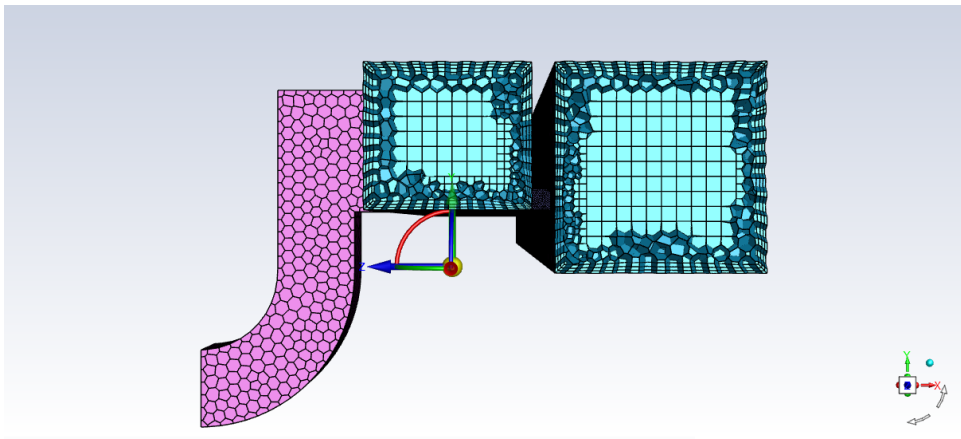
Figura 57 – Detalhe em corte da primeira malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.



Fonte: Próprio Autor.

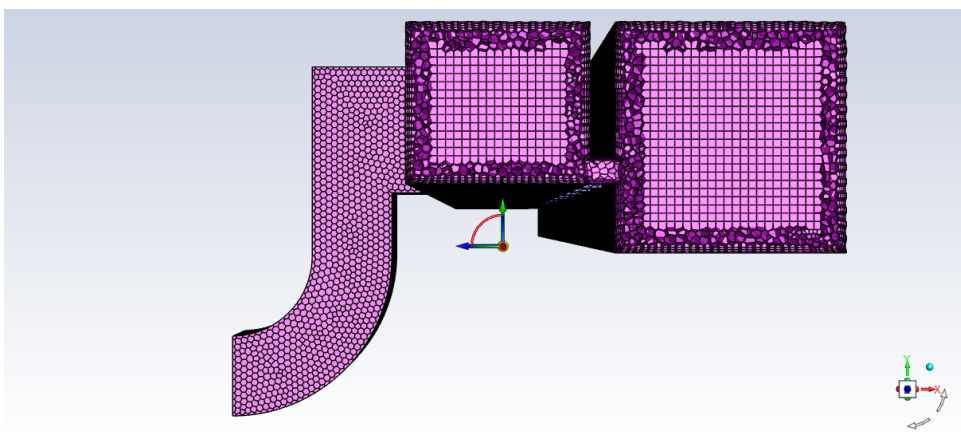
O valor da pressão média no domínio computacional e também a variação percentual dessa pressão média em relação ao valor correspondente à malha anterior estão dispostos na Tabela 12. E apesar de ocorrer um aumento da variação percentual entre as Malhas 02 e 03, essa variação é residual e não se faz necessário prosseguir com o refinamento da malha. No Apêndice B, podem ser conferidas os gráficos para a variação da pressão no domínio computacional durante as simulações, Figuras 135, 136 e 137.

Figura 58 – Detalhe em corte da segunda malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 59 – Detalhe em corte da terceira malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 11 – Número de elementos das malhas para o modelo da região dos DP.

Malha	Número de elementos (10^6)
Malha 01	0,59
Malha 02	1,05
Malha 03	2,00

Fonte: Próprio Autor.

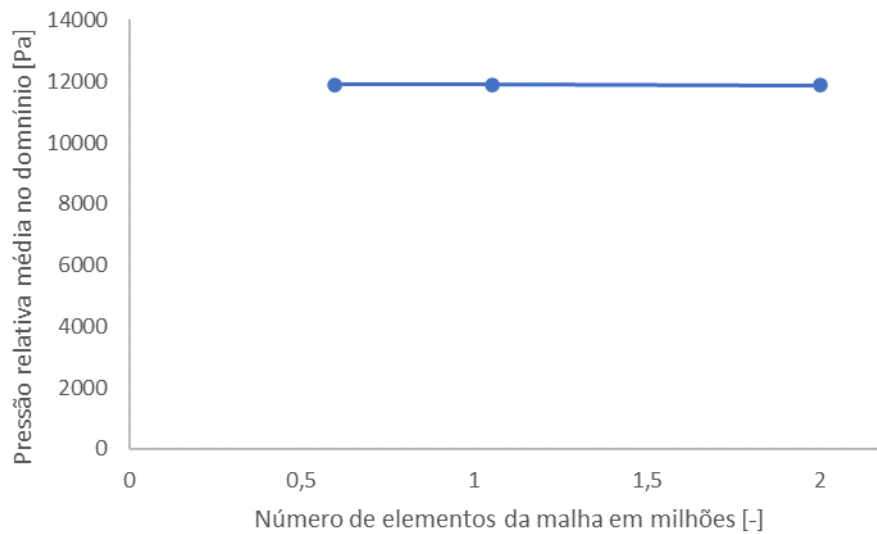
Tabela 12 – Resultados para o estudo de independência de malha para o modelo da região dos DP.

Malha	Pressão média [Pa]	Varição da pressão média [%]
Malha 01	11901	-
Malha 02	11895	0,05
Malha 03	11871	0,2

Fonte: Próprio Autor.

A variação da pressão média com o aumento do número de elementos na malha computacional da região dos DP pode ser visualizada na Figura 60 e os valores percentuais da vazão total ($8 \text{ m}^3/\text{s}$) recebidos em cada um dos oito DP para as simulações realizadas com cada uma das malhas estão dispostos na Tabela 13. A diferença da vazão percentual recebida por um mesmo Decantador Primário não ultrapassa o valor de 0,5% para simulações com diferentes malhas simuladas.

Figura 60 – Valores da pressão média no domínio para cada uma das malhas simuladas.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 13 – Variação da distribuição percentual da vazão entres os DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ para diferentes malhas.

Decantador Primário	Distribuição da vazão (%)		
	Malha 01	Malha 02	Malha 03
DP1	12,6	12,6	13,1
DP2	12,1	11,9	12,0
DP3	12,1	12,0	12,0
DP4	12,8	12,9	13,1
DP5	12,8	13,0	13,0
DP6	12,1	12,1	11,8
DP7	12,3	12,2	11,9
DP8	13,1	13,3	13,1

Fonte: Próprio Autor.

3.4.2 Malhas utilizadas nas simulações

A malha para a simulação do modelo da região dos Bicos de Pato com *stop log* foi construída com 788.551 elementos, que corresponde à Malha 02 do estudo de independência de malha para o modelo dos Bicos de Pato, o tamanho dos elementos variam de 1,5 a 16 centímetros, a estimativa inicial de 1 cm, Tabela 7, não pôde ser utilizada pelo elevado número de elementos que seriam necessários. Essa malha pode ser visualizada na Figura 61 e é constituída de elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos. Os principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo dos Bicos de Pato com *stop log* podem ser verificados na Tabela 14. Os elementos internos da malha utilizada na simulação da região dos Bicos de Pato com *stop log* podem ser observados na Figura 63.

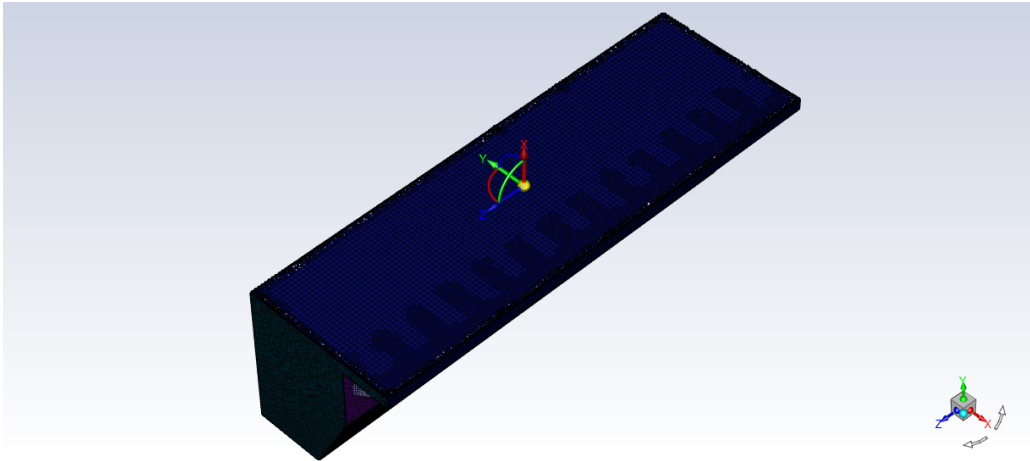
Tabela 14 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos BP com *stop log*.

Valor	Qualidade ortogonal [-]	Distorção [-]	Razão de aspecto [-]
Máximo	1	0,8	26
Mínimo	0,2	0	1
Médio	0,94	0,06	3,4
Recomendado <i>Ansys</i>	> 0,1	<0,95	<10

Fonte: Próprio Autor.

A malha para a simulação do modelo da região dos Bicos de Pato sem *stop log* foi construído com 1.595.105 elementos, o tamanho dos elementos também variam de 1,5 a 16 centímetros. Essa malha pode ser visualizada na Figura 62 e é constituída de elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos.

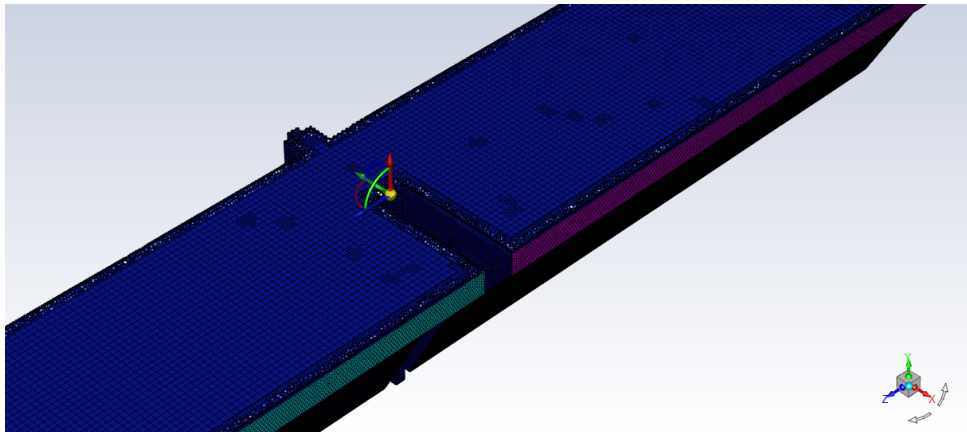
Figura 61 – Malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato com *stop log*.



Fonte: Próprio Autor.

Os principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo dos Bicos de Pato sem *stop log* podem ser verificados na Tabela 15.

Figura 62 – Malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato sem *stop log*.



Fonte: Próprio Autor.

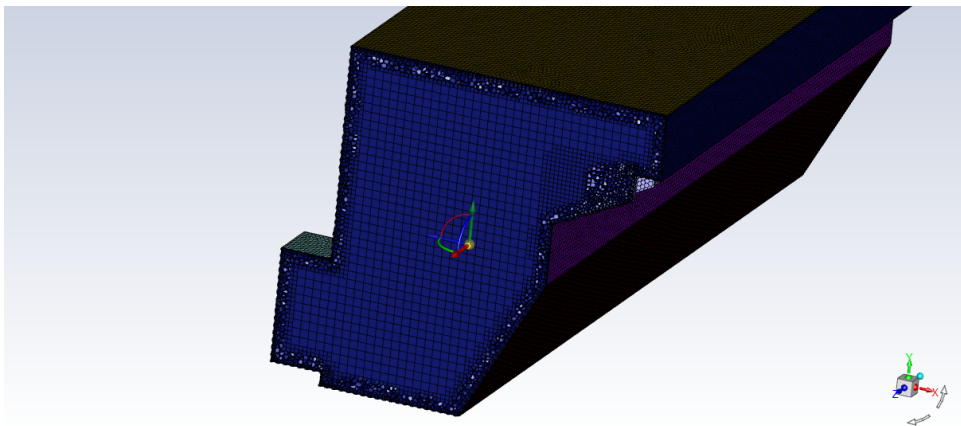
A malha para as simulações do modelo da região dos DP é constituída por elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos, como pode ser observada na Figura 64. O número de elementos é 2.009.460, que corresponde à Malha 03 do estudo de independência de malha para o modelo dos Decantadores Primários, o tamanho dos elementos variam de 3 a 16 centímetros, o que está concordante com a estimativa inicial, 7. Os principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo dos Decantadores Primários podem ser verificados na Tabela 16.

Tabela 15 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos BP sem *stop log*.

Valor	Qualidade ortogonal [-]	Distorção [-]	Razão de aspecto [-]
Máximo	1	0,8	24,5
Mínimo	0,2	0	1
Médio	0,94	0,06	3,4
Recomendado <i>Ansys</i>	> 0,1	<0,95	<10

Fonte: Próprio Autor.

Figura 63 – Detalhe em corte da malha utilizada na simulação dos Bicos de Pato.



Fonte: Próprio Autor.

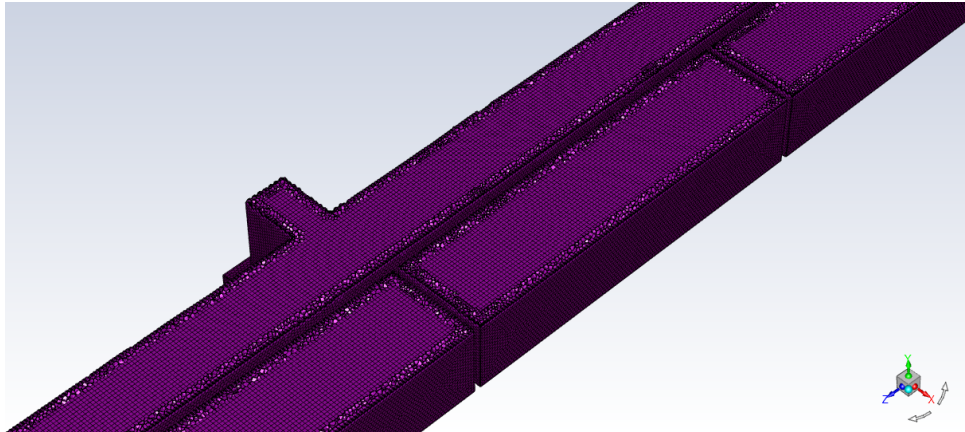
Os elementos internos da malha utilizada na simulação da região de entrada dos Decantadores Primários podem ser observados na Figura 65.

Tabela 16 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos DP.

Valor	Qualidade ortogonal [-]	Distorção [-]	Razão de aspecto [-]
Máximo	1	0,8	44,7
Mínimo	0,2	0	1
Médio	0,95	0,05	3,2
Recomendado <i>Ansys</i>	> 0,1	<0,95	<10

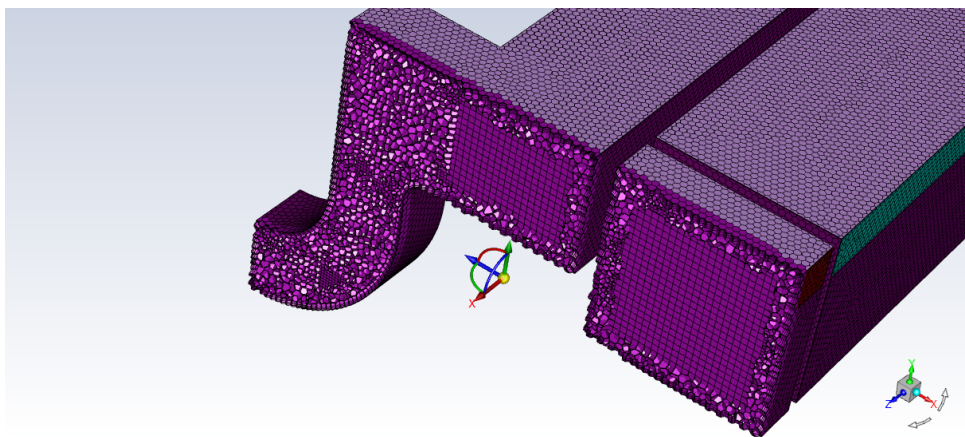
Fonte: Próprio Autor.

Figura 64 – Malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 65 – Detalhe em corte da malha utilizada na simulação da entrada dos Decantadores Primários.



Fonte: Próprio Autor.

3.5 CONFIGURAÇÕES DO ANSYS FLU- *ENT*

As configurações gerais adotadas nas diversas simulações foram: solução do escoamento com o método *Pressure-Based*, simulação em *Steady State* e vetor aceleração da gravidade constante, cuja única componente não nula é na direção vertical (eixo y) com valor de $-9,81 \text{ m/s}^2$.

Para os cálculos das frações volumétricas do escoamento foi adotado o modelo VOF e para o modelo de turbulência foi utilizado o modelo $\kappa - \epsilon$ padrão. E os valores de referência para a pressão e para a massa específica foram adotados como a pressão

atmosférica (101325 Pa) e a massa específica do ar (1,225 kg/m³).

Foram utilizadas três condições de contorno diferentes: entrada com a definição da velocidade, saída com a definição da pressão e a condição de abertura na qual o fluido pode entrar ou sair livremente e está submetido a pressão atmosférica.

O acoplamento pressão-velocidade foi configurado como *Coupled* e as discretizações foram configuradas da seguinte forma: pressão com *Modified Body Force Weighted*, momento com *Second Order Upwind*, fração volumétrica com *Compressive*, energia cinética turbulenta com *First Order Upwind* e taxa da dissipação turbulenta também com *First Order Upwind*. Já os gradientes foram computados com o método *Least Squares Cell-Based*.

As principais informações sobre os computadores utilizados nas simulações podem ser visualizadas na Tabela 17. O tempo para completar cada uma das simulações variou consideravelmente: as mais rápidas foram concluídas em cerca de 3 horas e as mais demoradas em, aproximadamente, 12 horas.

Tabela 17 – Processador e quantidade de memória RAM dos equipamentos utilizados nas simulações.

Equipamento	Processador	Memória RAM
Notebook	intel i7-10750H CPU 2.6 GHz	16 GB
Desktop	intel i7-3770K CPU 3.5 GHz	18 GB

Fonte: Próprio Autor.

As condições de parada para as simulações foram estabelecidas da seguinte forma: os valores dos resíduos (*Scaled Residuals*) devem ficar abaixo de 10^{-3} e também deve ocorrer a estabilização dos valores das variáveis monitoradas durante a simulação: pressão média no domínio e balanço volumétrico da água em todas as entradas e saídas. Além disso, o número de iterações foi limitado a 1000 iterações.

Os resíduos utilizados na monitoração da convergência das simulações estão identificados da seguinte forma: *continuity* para a equação da continuidade, *x-velocity*, *y-velocity* e *z-velocity* para a equação da quantidade de movimento, *k* para a equação de transporte da energia cinética turbulenta, *epsilon* para a equação de transporte da dissipação da energia cinética turbulenta e *vf-water* para a equação da fração volumétrica da água.

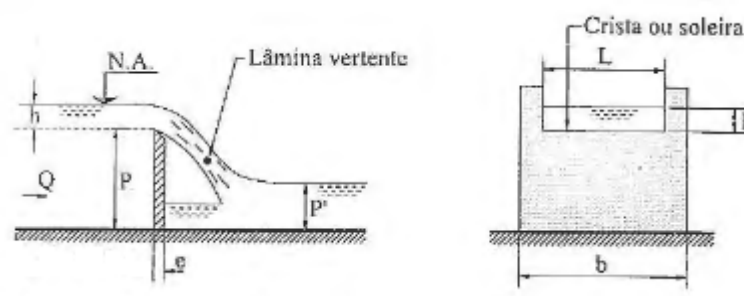
3.6 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

3.6.1 Vertedores Bicos de Pato

A vazão em um vertedor hidráulico do tipo labirinto-trapezoidal é dada pela Equação 3.10, na qual C_Q é o coeficiente de vazão do vertedor, L é o comprimento total da crista do vertedor, h_{vert} é a carga na crista do vertedor e g é a aceleração da gravidade (Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica, 1995). Os parâmetros utilizados na Equação 3.10 podem ser observados de forma esquemática na Figura 66.

$$Q_{vert} = C_Q \cdot L \cdot h_{vert}^{1,5} \sqrt{2g} \quad (3.10)$$

Figura 66 – Esquema de um vertedor de parede delgada.



Fonte: Porto (2006).

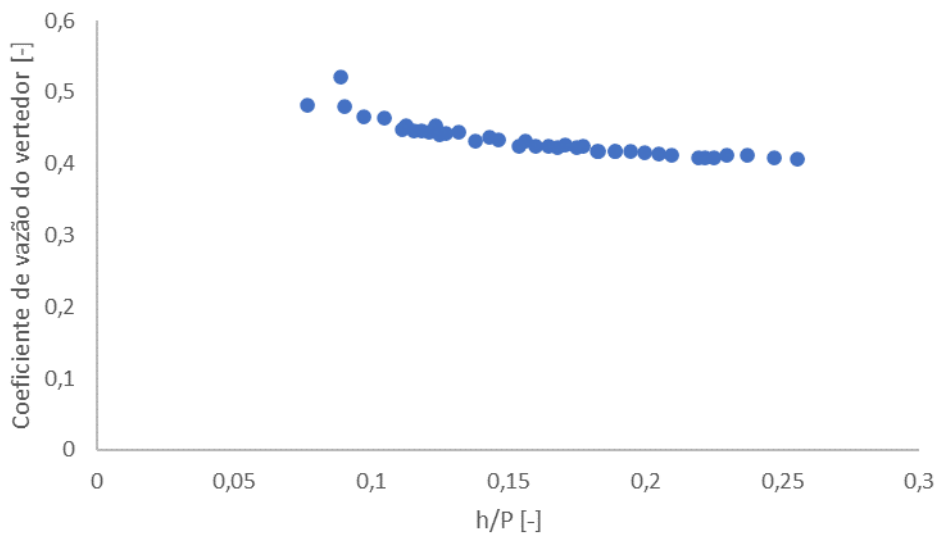
Tabela 18 – Valores de vazões e carga na crista no vertedor obtidos a partir de ensaios no protótipo (somente um vertedor).

h vert. [cm]	Q vert. [m^3/s]
17,00	6,45
16,20	6,06
16,05	5,98
15,70	5,78
15,25	5,54
14,70	5,35
14,20	5,08
13,60	4,75
13,55	4,73
12,90	4,37
12,15	4,13
11,30	3,75

Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Os valores medidos de h_{vert} com ensaios conduzidos no protótipo com somente um vertedor operando e os respectivos valores de vazão são apresentados na Tabela 18. Conhecidas as alturas do nível de água sobre a crista do vertedor, as vazões podem ser calculadas a partir da Equação 3.10. O comprimento total da crista, L , é de 50,12 metros e os valores de C_Q podem ser obtidos no gráfico apresentado na Figura 67. Os valores utilizados na construção do gráfico da Figura 67 estão no Anexo B, Tabela 42. Há ilustrações do esquema do modelo reduzido utilizado pela FCTH no Anexo C, Figuras 157 e 158 e fotos do próprio modelo reduzido, Figuras 159 e 160. Esse modelo utiliza semelhança de Froude e escala de 1:2,667.

Figura 67 – Relação entre os adimensionais C_Q e h/P obtidos do modelo em escala reduzida.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

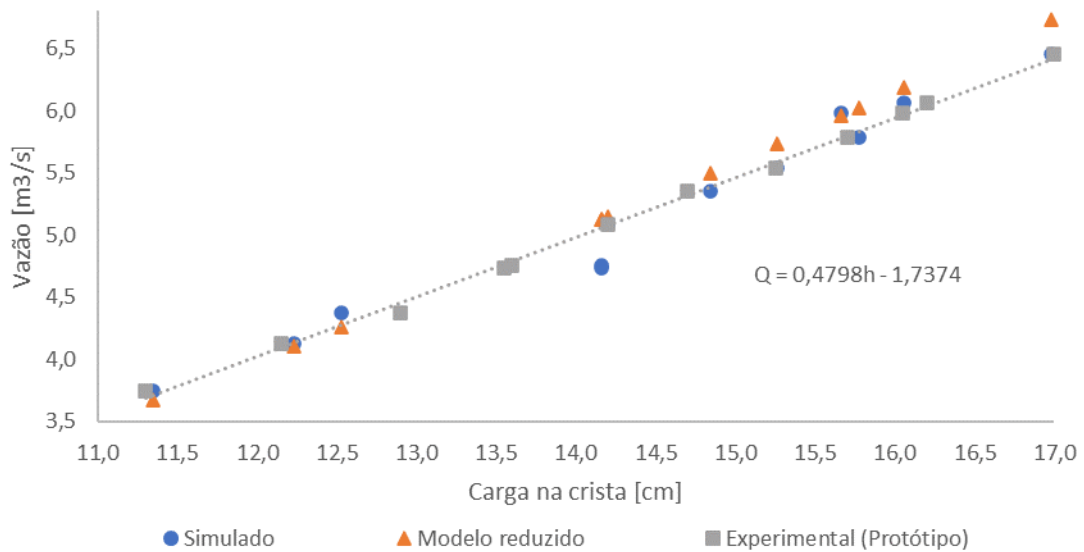
Os valores das cargas na crista do vertedor obtidos nas simulações, os valores de vazões utilizados para cada simulação e também o erro percentual em relação ao valor experimental medidos pela FCTH no protótipo estão dispostos na Tabela 19. A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas para diferentes vazões, das medições realizadas no protótipo pela FCTH e dos resultados obtidos com o modelo reduzido, obteve-se o gráfico da Figura 68, que permite a comparação dos três métodos distintos. Os resultados são concordantes, o que é um bom indicativo quanto a confiabilidade do modelo computacional.

Tabela 19 – Carga na crista do vertedor, vazões e erros percentuais obtidos a partir de simulações no modelo tridimensional dos Bicos de Pato com *stop log*.

h vert. [cm]	Q vert. [m^3/s]	Erro [%]
16,979	6,45	0,41
16,056	6,06	0,64
15,667	5,98	2,88
15,777	5,78	4,49
15,265	5,54	4,10
14,845	5,35	0,00
14,235	5,08	0,99
14,158	4,75	0,10
14,158	4,73	0,49
12,528	4,37	2,39
12,228	4,13	0,89
11,346	3,75	0,12

Fonte: Próprio Autor.

Figura 68 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional, com o modelo reduzido e com dados experimentais (Protótipo).



Fonte: Próprio Autor.

3.6.2 Entrada dos Decantadores Primários

O valor de projeto do NA do canal de alimentação dos Decantadores Primários para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ é de $2,25 \text{ m}$ e o valor obtido na simulação é de $2,28 \text{ m}$, o que implica um erro de $1,3 \%$. Os valores medidos de nível d'água (NA) com ensaios conduzidos no protótipo com somente um vertedor operando (o vertedor do módulo 1) e os respectivos valores de vazão são apresentados na Tabela 20.

Comparando-se os valores obtidos para o NA do canal de alimentação dos Decantadores nas simulações com vazões de $8,72 \text{ m}^3/\text{s}$ (NA de $2,31 \text{ m}$), $9,30 \text{ m}^3/\text{s}$ (NA de $2,32 \text{ m}$) e $10,59 \text{ m}^3/\text{s}$ (NA de $2,35 \text{ m}$) com os correspondentes dados experimentais, obtém-se erros de $1,76 \%$, $2,11 \%$ e $1,67 \%$. Os resultados são concordantes visto que os erros ficam abaixo de 3% , o que é um bom indicativo quanto a confiabilidade do modelo computacional.

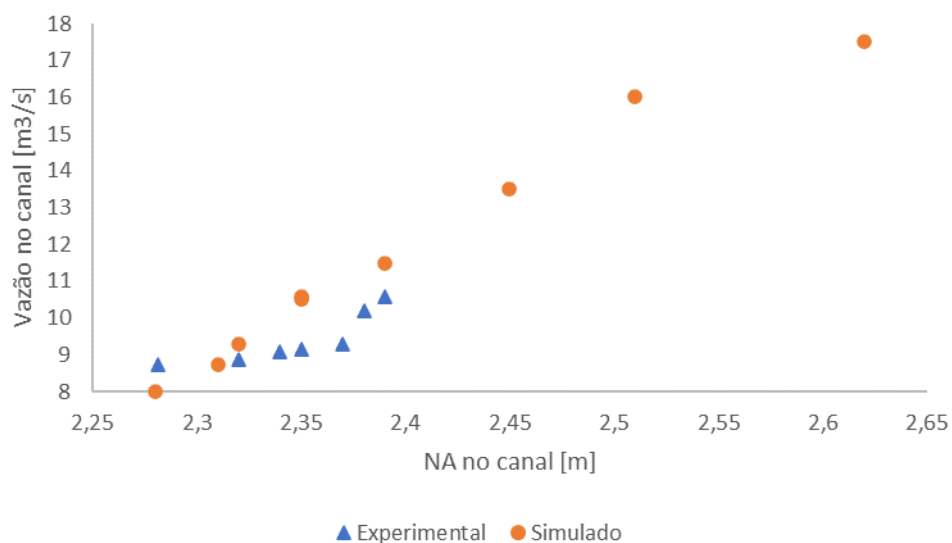
Tabela 20 – Dados de vazão e nível d'água para o canal de alimentação dos DP do módulo 1.

Q [m^3/s]	NA [m]
8,72	2,27
8,88	2,32
9,07	2,34
9,14	2,35
9,30	2,37
10,18	2,38
10,59	2,39

Fonte: FDTE/SABESP (2022).

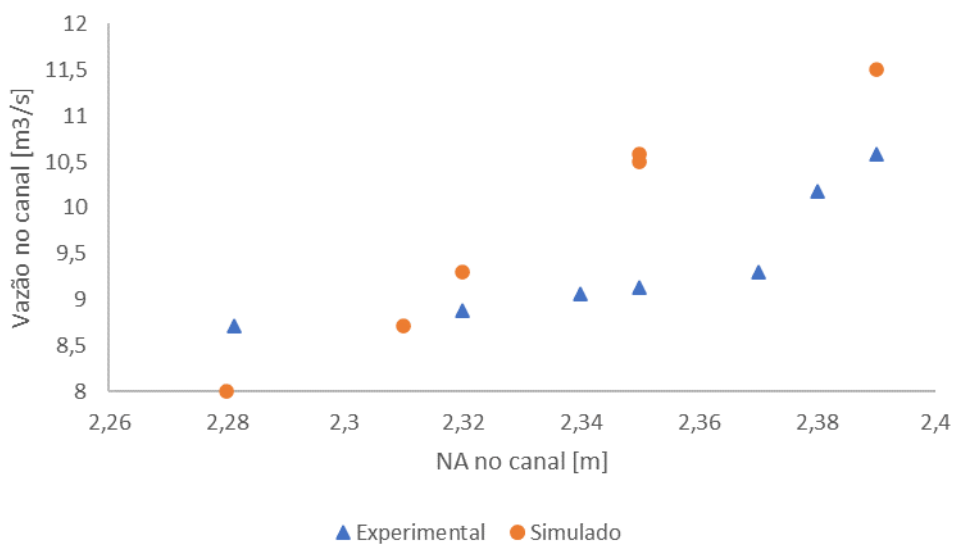
A partir dos resultados obtidos nas simulações realizadas para diferentes vazões e dos dados experimentais, obteve-se o gráfico da Figura 69, que permite a visualização das tendências concordantes entre os valores simulados e os valores experimentais. Os dados da região na qual há tantos valores experimentais quanto simulados estão destacados na Figura 70.

Figura 69 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e os experimentais.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 70 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e os experimentais.



Fonte: Próprio Autor.

RESULTADOS

4.1 RESULTADOS PARA A REGIÃO DOS BP

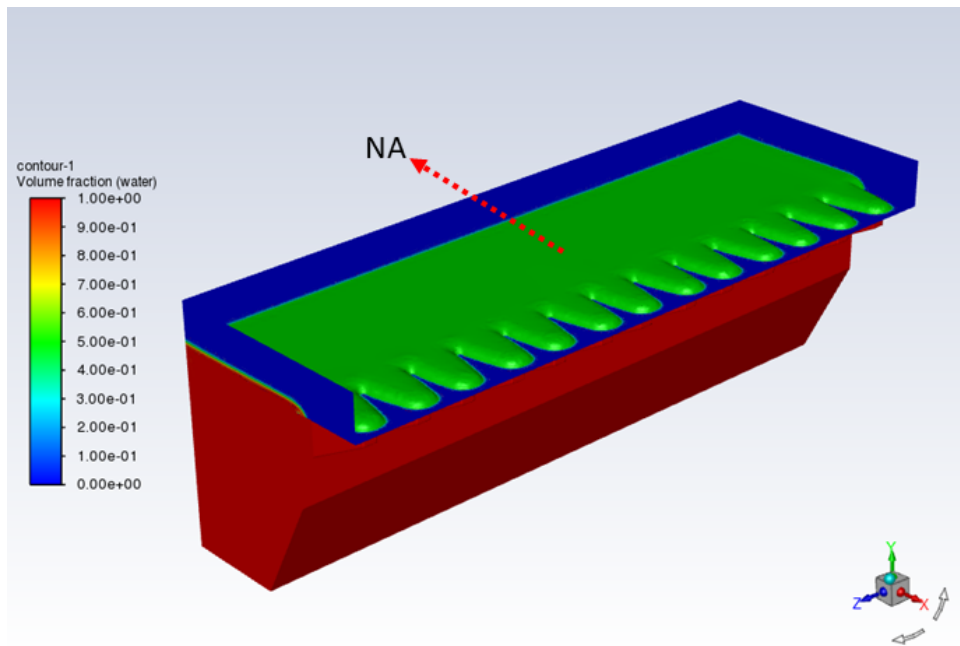
4.1.1 Curva cota vazão para o vertedor

As frações volumétricas da água para o modelo da região dos Bicos de Pato com *stop log* podem ser observadas na Figura 71, a cor azul corresponde a uma fração volumétrica de 0 para a água e a cor vermelha representa a região cuja fração volumétrica da água é de 1. A superfície verde destacada corresponde à fração volumétrica de 50 %, portanto corresponde também ao nível d'água (NA), conforme a convenção adotada neste trabalho. Esse resultado foi obtido para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Os resíduos para simulação realizada com o modelo tridimensional com *stop log* podem ser observados na Figura 72. Nota-se que os resíduos da continuidade (*continuity*) e da dissipação turbulenta (*epsilon*) não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações.

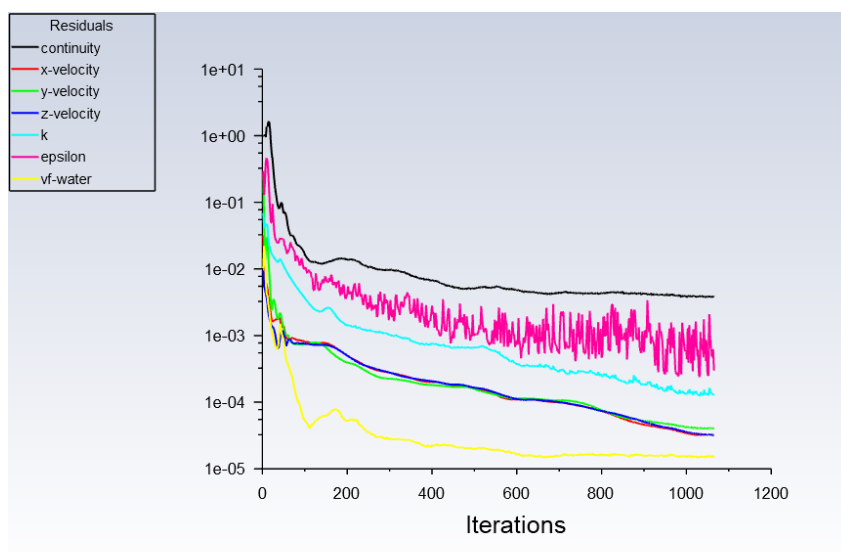
As frações volumétricas da água para o modelo da região dos Bicos de Pato sem *stop log* podem ser observadas na Figura 73, a cor azul corresponde a uma fração volumétrica de 0 para a água e a cor vermelha representa a região cuja fração volumétrica da água é de 1. A superfície verde destacada corresponde à fração volumétrica de 50 %, portanto corresponde também ao nível d'água (NA), conforme a convenção adotada neste trabalho. Esse resultado foi obtido para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$. É possível observar na Figura 73 que os dois vertedores se comunicam hidraulicamente, formando um vaso comunicante.

Figura 71 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP com *stop log* para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



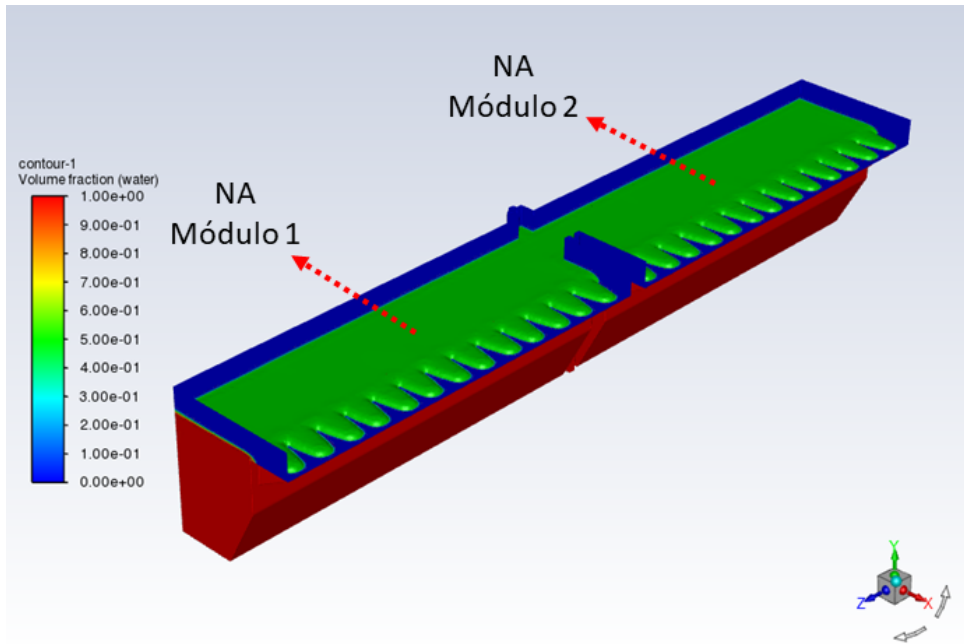
Fonte: Próprio Autor.

Figura 72 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com *stop log* para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

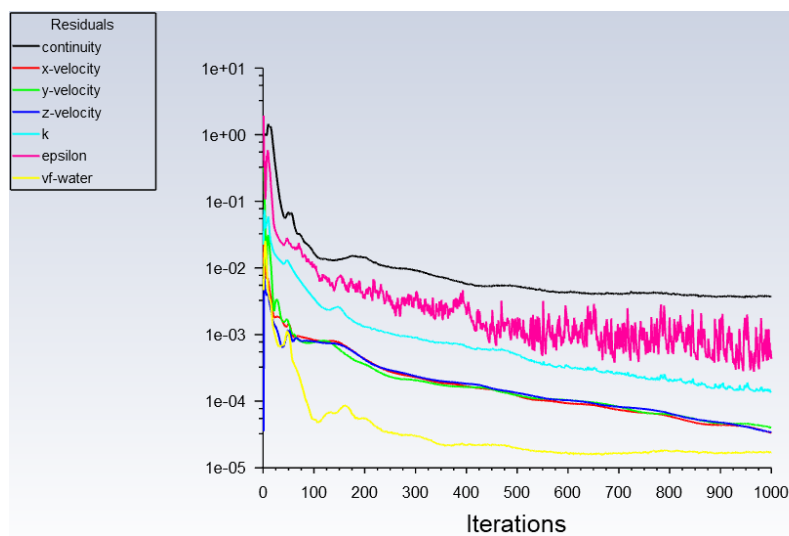
Figura 73 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP sem *stop log* para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Os resíduos para simulação realizada com o modelo dos BP sem *stop log* podem ser observados na Figura 74. Nota-se que os resíduos da continuidade e da dissipação turbulenta não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações.

Figura 74 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP sem *stop log* para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

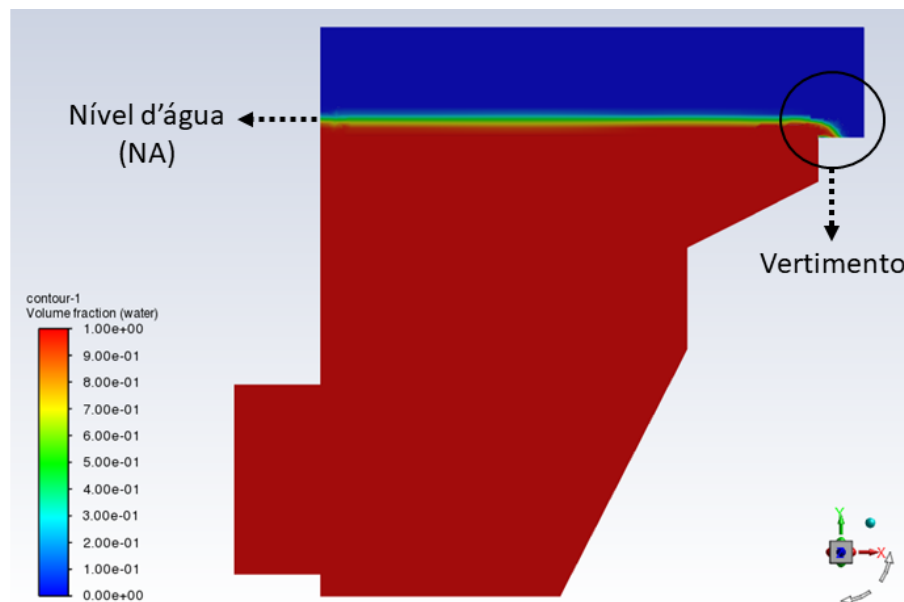


Fonte: Próprio Autor.

As distribuições das frações volumétricas da água, em vermelho, e do ar, em azul, obtidas com uma simulação do modelo do BP podem ser observadas na Figura 75. A fim de se determinar qual a altura da coluna de água sobre a crista do vertedor (a carga na crista), convencionou-se que o nível d'água (NA) é definido pela fração volumétrica de 50 % de água.

Uma ilustração da carga na crista do vertedor pode ser visualizada na Figura 76. Diversas simulações foram realizadas para diferentes valores de vazões e os resíduos dessas simulações estão no Apêndice C, Figuras 138, 139, 140, 141 e 142. Por exemplo, para a vazão de $6,45 \text{ m}^3/\text{s}$ a altura do nível de água obtido na crista do vertedor é de $16,979 \text{ cm}$, o que corresponde a um erro de $0,12 \%$ em relação aos dados da Tabela 18.

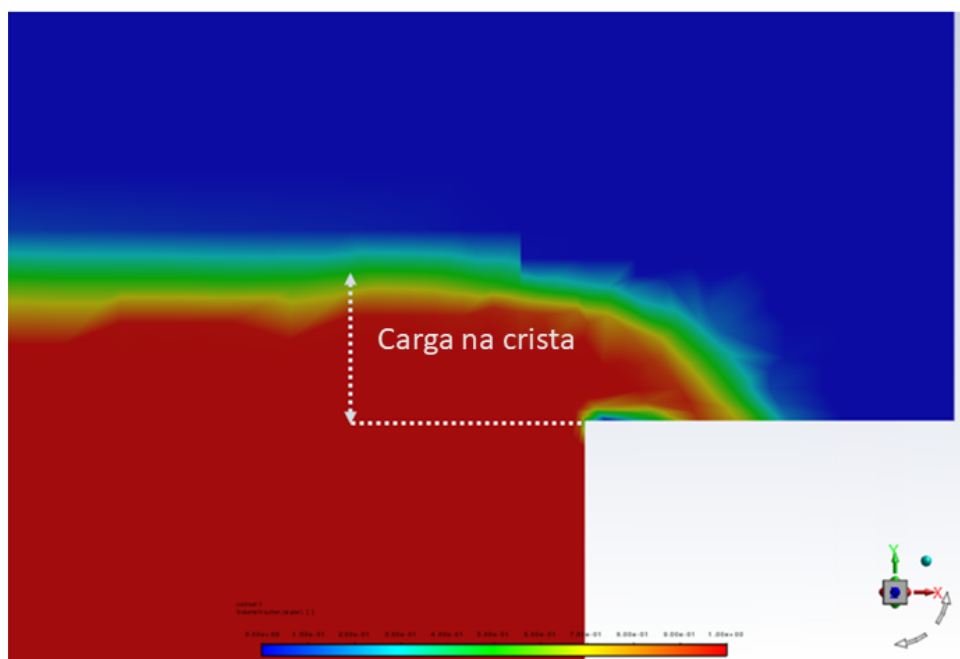
Figura 75 – Corte do resultado apresentado na Figura 71 passando pela adufa com a indicação do nível d'água e do vertimento.



Fonte: Próprio Autor.

O levantamento da curva cota vazão foi feito, inicialmente, para os valores das vazões cujas medidas experimentais de carga na crista estão disponíveis na Tabela 18. Posteriormente, esse procedimento foi estendido para os valores atuais da vazão nominal ($16 \text{ m}^3/\text{s}$) e da capacidade hidráulica ($27 \text{ m}^3/\text{s}$) e também para os valores previstos para 2030 e 2040, o que engloba a possibilidade de aumento da capacidade da ETE por meio de reformas para expansão da estação. Os resultados para a carga na crista para a vazão atual nominal ($16 \text{ m}^3/\text{s}$), para a vazão de pico atual ($27 \text{ m}^3/\text{s}$) e para vazões previstas até 2030 (média de $21 \text{ m}^3/\text{s}$ e $32 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico) e 2040 (média de $23 \text{ m}^3/\text{s}$ e $35 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico) estão dispostos na Tabela 21. A curva cota vazão para valores de vazão que abrangem valores de $3,75 \text{ m}^3/\text{s}$ até $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e os perfis de níveis d'água para diferentes valores de vazões podem ser visualizados nas Figuras 77 e 78, respectivamente.

Figura 76 – Detalhe do vertimento da água com a indicação da carga na crista do vertedor.



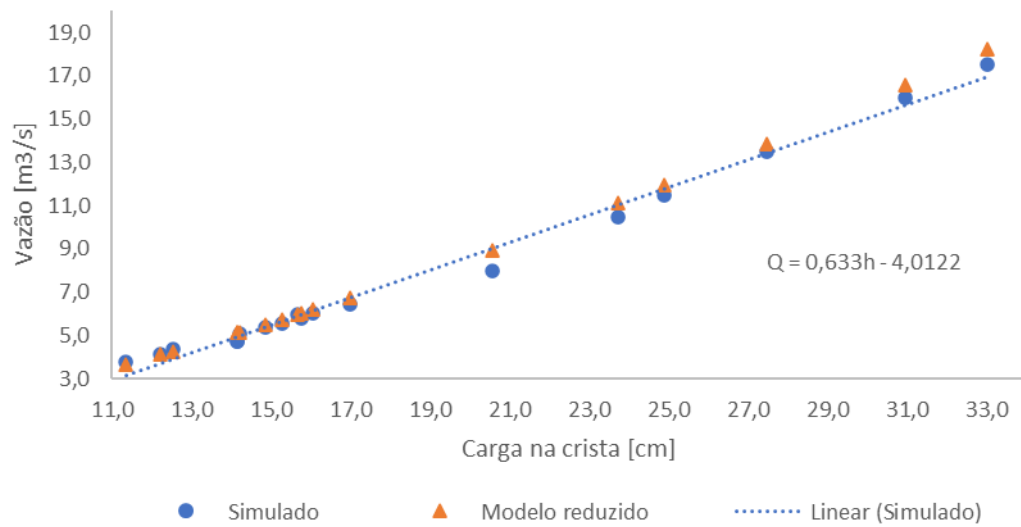
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 21 – Valores de vazões e carga na crista do vertedor obtidos a partir das simulações.

Carga na crista [cm]	Vazão (um módulo) [m^3/s]	Vazão (dois módulos) [m^3/s]
21	8,0	16
24	10,5	21
25	11,5	23
27	13,5	27
31	16,0	32
33	17,5	35

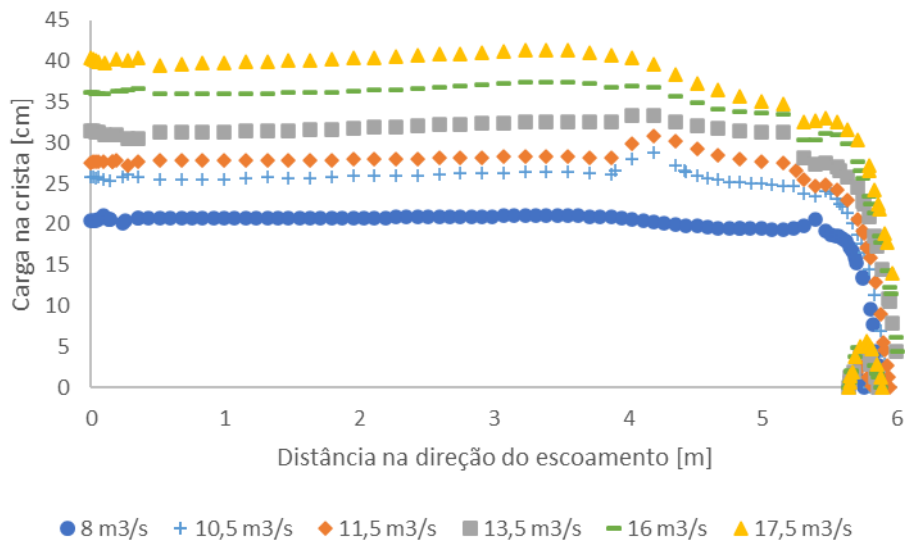
Fonte: Próprio Autor.

Figura 77 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e com o modelo reduzido.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 78 – Perfis de níveis d'água na direção do escoamento para diferentes valores de vazão.



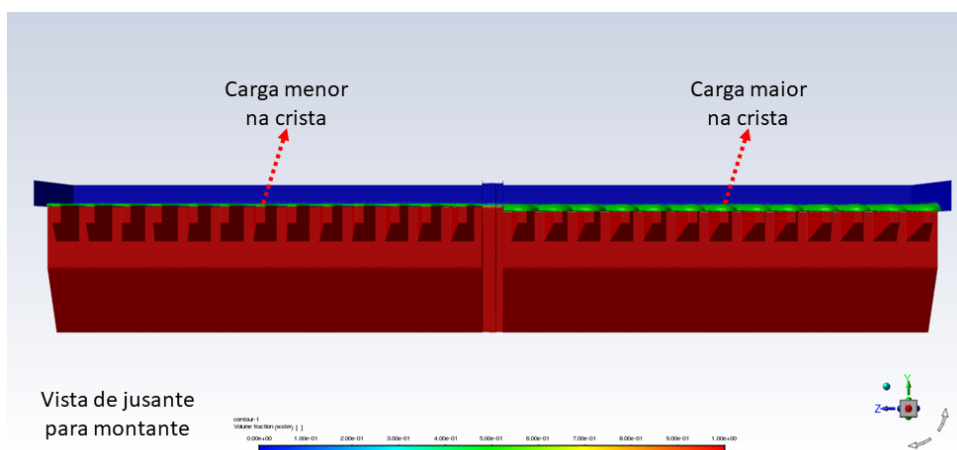
Fonte: Próprio Autor.

4.1.2 Desnível entre os vertedores

A imposição de um desnível entre as cristas dos dois vertedores, que se comunicam hidráulicamente e formam um vaso comunicante, permite a determinação das diferenças entre os valores de vazões que são direcionadas para cada vertedor em função do desnível que está pré-estabelecido. O que ocorre quando há um desnível de 20 cm entre os vertedores pode ser observado na Figura 79. Nesse caso, o vertedor da esquerda está elevado de 20 cm em relação ao nível do vertedor da direita, o que implica que o vertedor da direita terá uma vazão maior.

A posição relativa dos vertedores da Figura 79 pode ser visualizada, de forma mais próxima e detalhada, na Figura 80. Os resíduos gerados durante a simulação desse caso podem ser conferidos na Figura 81. Nota-se que os resíduos da continuidade (*continuity*) e da dissipação turbulenta (*epsilon*) não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações. Os resíduos das simulações para desníveis de 1 cm, 5 cm, 10 cm e 15 cm estão no Apêndice C, Figuras 148, 149, 150 e 151.

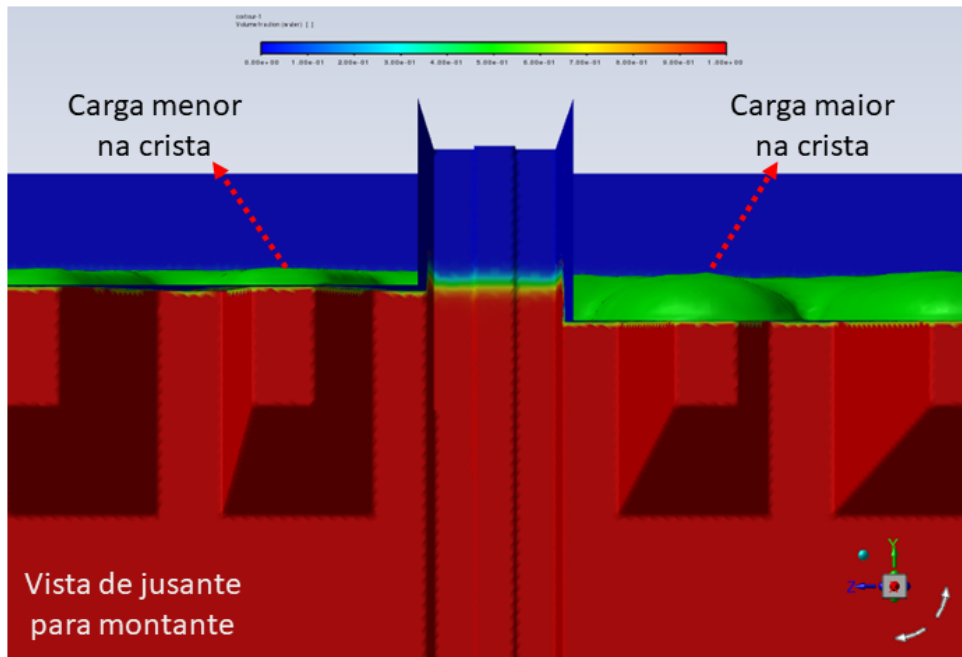
Figura 79 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com o modelo dos BP com um desnível de 20 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



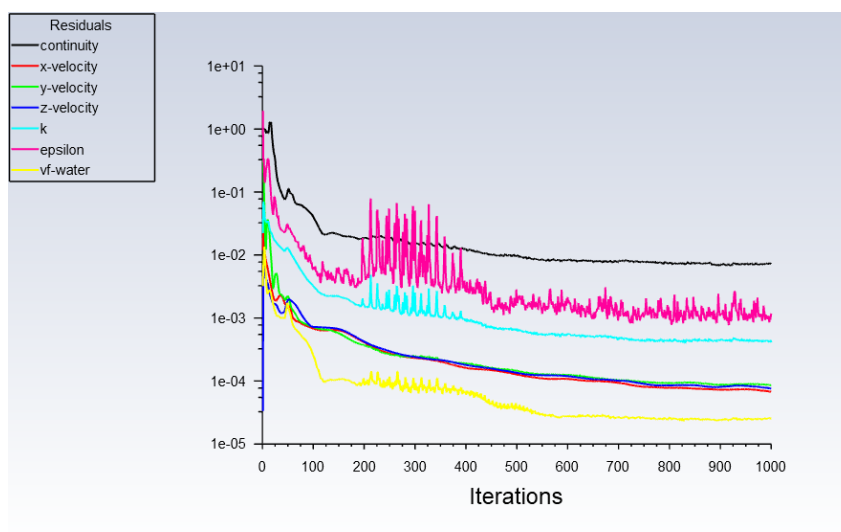
Fonte: Próprio Autor.

Os resultados das simulações realizadas com o modelo da região dos BP com um desnível crescente entre as cristas para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ estão dispostos na Tabela 22. Observa-se que mesmo para um desnível de apenas 1 cm existe uma diferença de vazão entre os vertedores de $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$.

Figura 80 – Detalhe do resultado apresentado na Figura 79.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 81 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 20 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 22 – Valores de vazões para cada um dos módulos para diferentes valores de desníveis entre os vertedores.

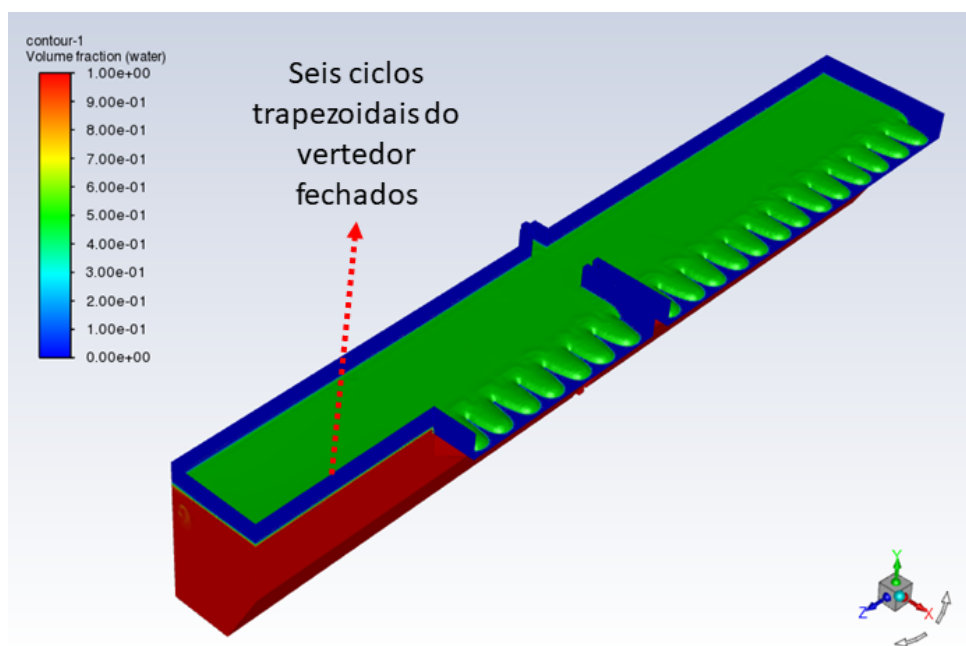
Desnível [cm]	Normal [m^3/s]	Com elevação [m^3/s]	Diferença [m^3/s]
1	8,3	7,7	0,6
5	8,7	7,3	1,4
10	9,1	6,9	2,2
15	9,6	6,4	3,2
20	12,6	3,4	9,2

Fonte: Próprio Autor.

4.1.3 Fechamento gradativo de um dos vertedores

Foi implementado um fechamento gradual de um dos vertedores na configuração sem *stop log*. A diminuição do comprimento de um dos vertedores desvia parte da vazão para o outro vertedor de modo que a vazão vertida em um diminui progressivamente e a vazão no outro aumenta na mesma proporção. O resultado da simulação com as frações volumétricas da água indicadas na escala de cores para o caso em que seis ciclos estão fechados em um dos vertedores para uma vazão de $16 m^3/s$ pode ser observado na Figura 82.

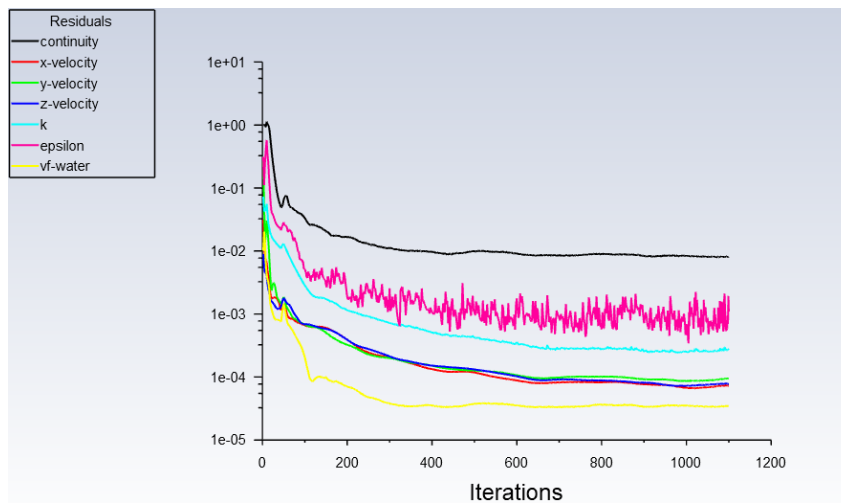
Figura 82 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos BP com seis ciclos fechados para uma vazão de $16 m^3/s$.



Fonte: Próprio Autor.

Os resíduos para simulação realizada com o modelo da região dos Bicos de Pato com o fechamento de seis ciclos de um total de treze em um único módulo e cujo resultado pode ser visualizado na Figura 82 podem ser observados na Figura 83. Nota-se que os resíduos da continuidade (*continuity*) e da dissipação turbulenta (*epsilon*) não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações. Os resíduos das simulações para o fechamento de um, dois, três, quatro e cinco ciclos estão no Apêndice C, Figuras 152, 153, 154, 155 e 156, respectivamente.

Figura 83 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com o fechamento de seis ciclos.



Fonte: Próprio Autor.

Os resultados das simulações para o fechamento gradativo de ciclos (trapézios) em um dos vertedores podem ser observados na Tabela 23. Observa-se que com aproximadamente metade de um vertedor fechado, seis ciclos, a diferença entre as vazões dos vertedores é de $4,6 \text{ m}^3/\text{s}$, o que significa um alto potencial de desvio das vazões entre os módulos por meio dessa estratégia.

Deve-se ressaltar, entretanto, que a vazão desviada não segue exatamente a mesma proporção de fechamento do vertedor como se poderia supor considerando a Equação 3.10, na qual a vazão é diretamente proporcional ao comprimento da crista do vertedor. Essa diferença, Tabela 24, é explicada pela resistência que a redução de seção da região do *stop log* impõe à passagem da vazão de um módulo para o outro.

Tabela 23 – Valores de vazões para cada um dos módulos para diferentes graus de fechamento de um dos vertedores.

Número de trapézios fechados	Com fechamento [m^3/s]	Normal [m^3/s]	Diferença [m^3/s]
1	7,7	8,3	0,6
2	7,3	8,7	1,4
3	6,9	9,1	2,2
4	6,7	9,3	2,6
5	6,2	9,8	3,6
6	5,7	10,3	4,6

Fonte: Próprio Autor.

Tabela 24 – Valores de vazões desviadas de um vertedor para diferentes números de trapézios fechados de um dos vertedores.

Número de trapézios fechados	Vazão calculada pela proporção de ciclos fechados [m^3/s]	vazão simulada [m^3/s]	Diferença [m^3/s]
1	0,62	0,30	0,32
2	1,23	0,70	0,53
3	1,85	1,10	0,75
4	2,46	1,30	1,16
5	3,08	1,80	1,28
6	3,69	2,30	1,39

Fonte: Próprio Autor.

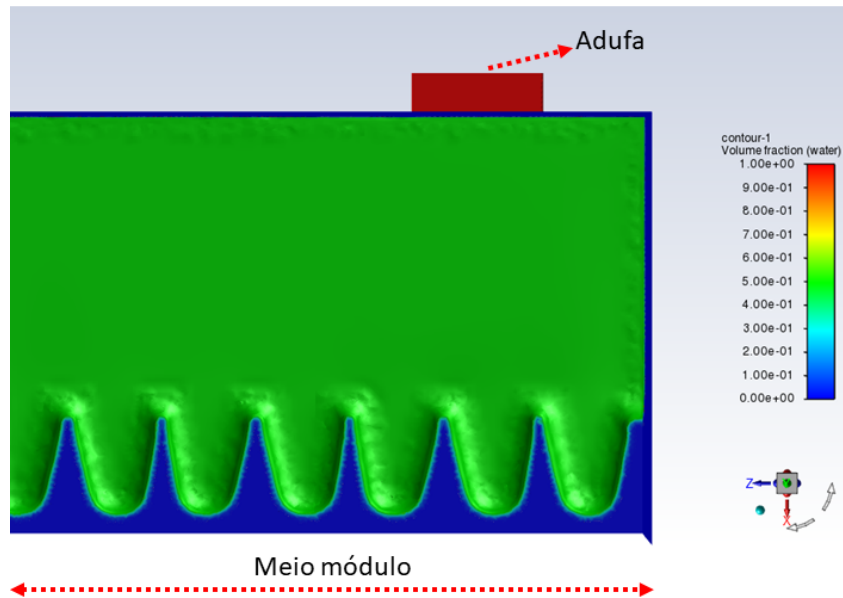
4.1.4 Afogamento do vertedor por montante

Uma vista superior do perfil segundo o qual a água verte na estrutura labirinto-trapezoidal de meio módulo pode ser observada na Figura 84, esse resultado foi obtido para uma vazão de $8 m^3/s$ em um módulo, a superfície verde é o nível d'água (NA) com interface água/ar. De forma análoga, vistas superiores dos perfis segundo os quais a água verte nas estruturas labirinto-trapezoidais para vazões de $10,5 m^3/s$, $11,5 m^3/s$, $13,5 m^3/s$, $16 m^3/s$ e $17,5 m^3/s$ podem ser observadas nas Figuras 85, 86, 87, 88 e 89, nessa ordem.

Comparando as Figuras 84, 85, 86, 87, 88 e 89 é possível perceber como o aumento da vazão no vertedor altera a geometria segundo a qual a água verte. Assim, na Figura 84 o perfil de vertimento é bem definido e coincide com a geometria do vertedor, mas nas Figuras 88 e 89 o perfil de vertimento se desvia visivelmente da geometria labirinto-trapezoidal do vertedor, o que corresponde a uma diminuição no comprimento do perfil de vertimento. Isso significa que para vazões iguais ou superiores a $16 m^3/s$ ocorre o

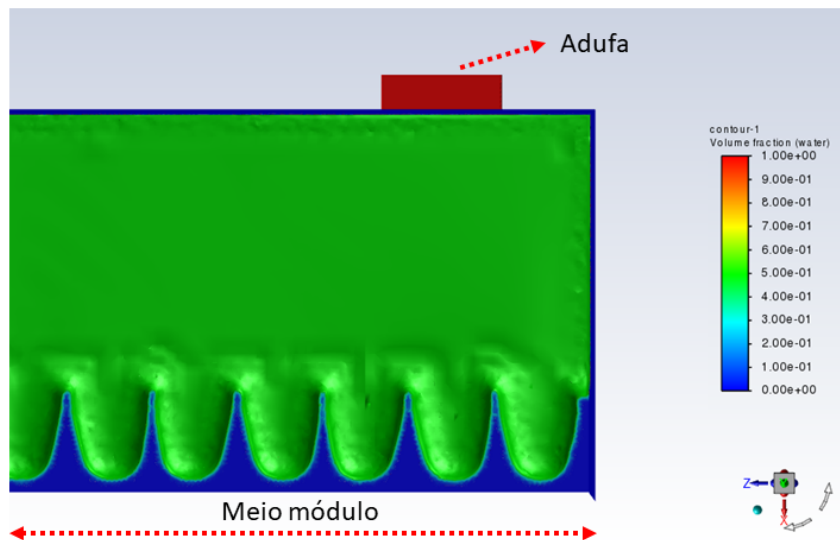
afogamento do vertedor.

Figura 84 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



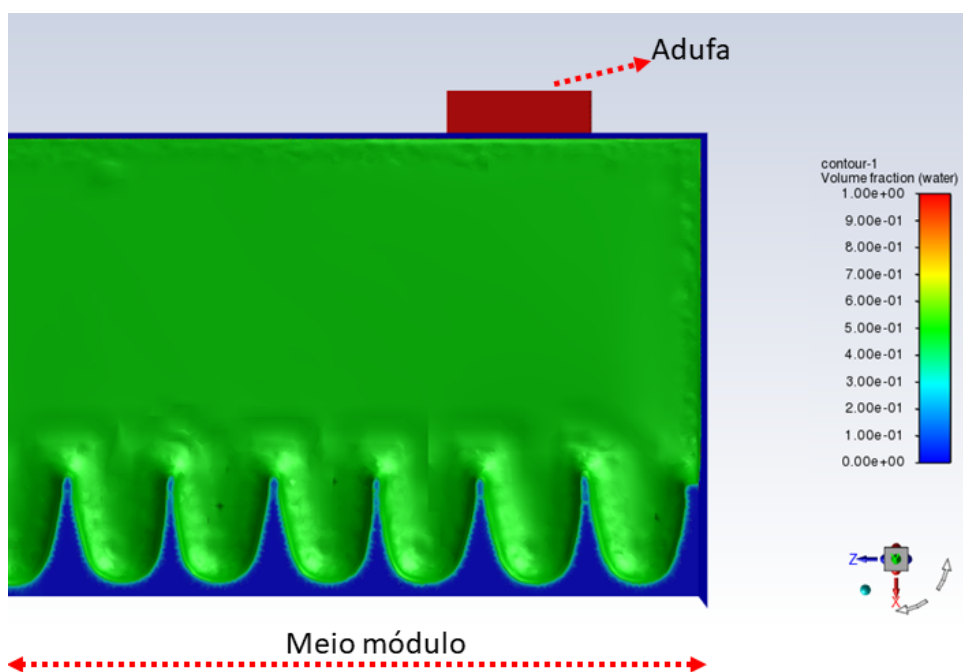
Fonte: Próprio Autor.

Figura 85 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



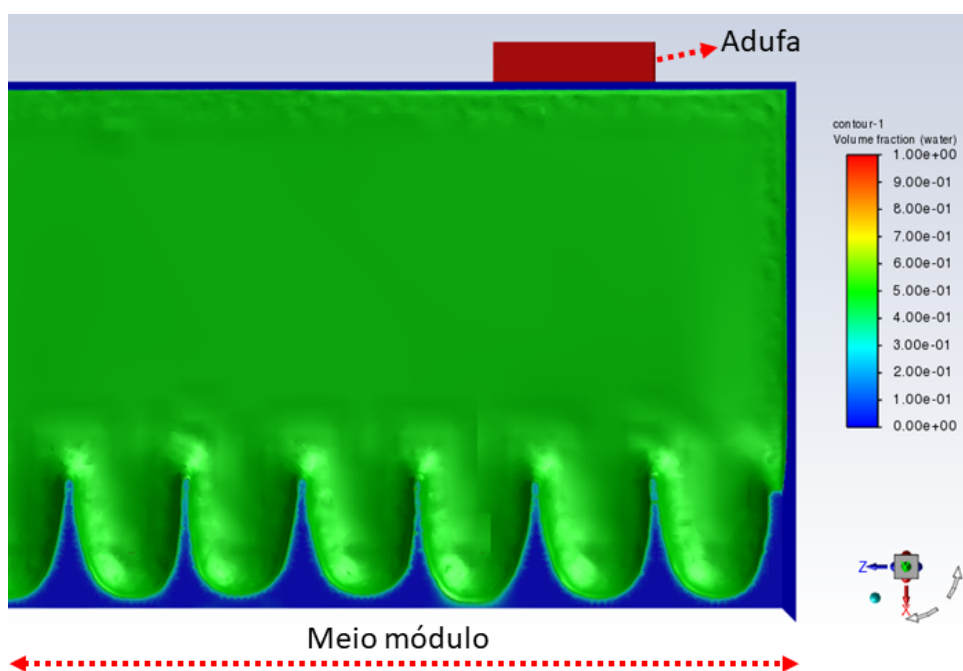
Fonte: Próprio Autor.

Figura 86 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



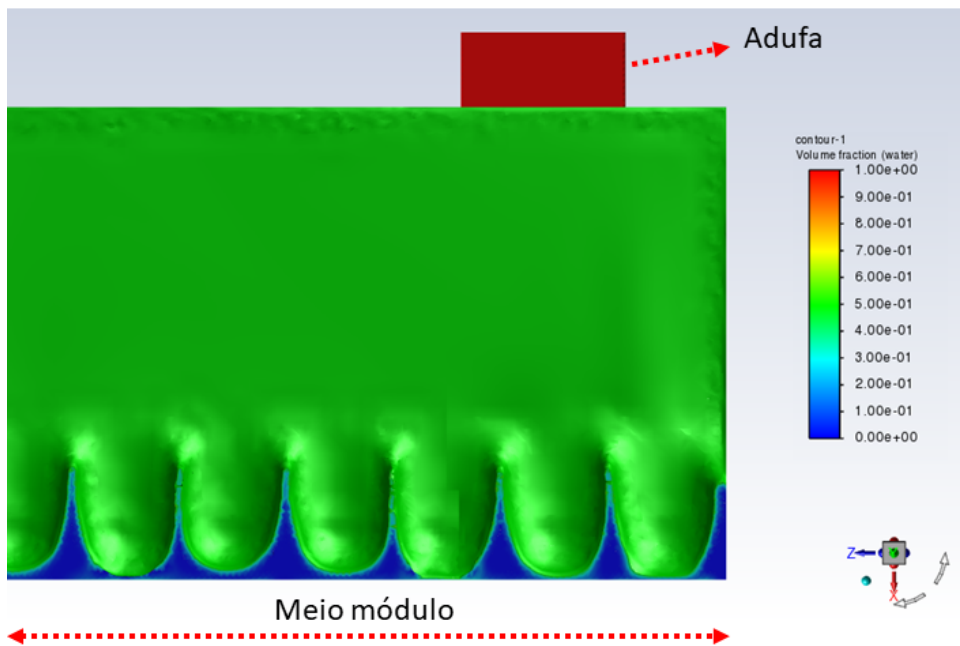
Fonte: Próprio Autor.

Figura 87 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



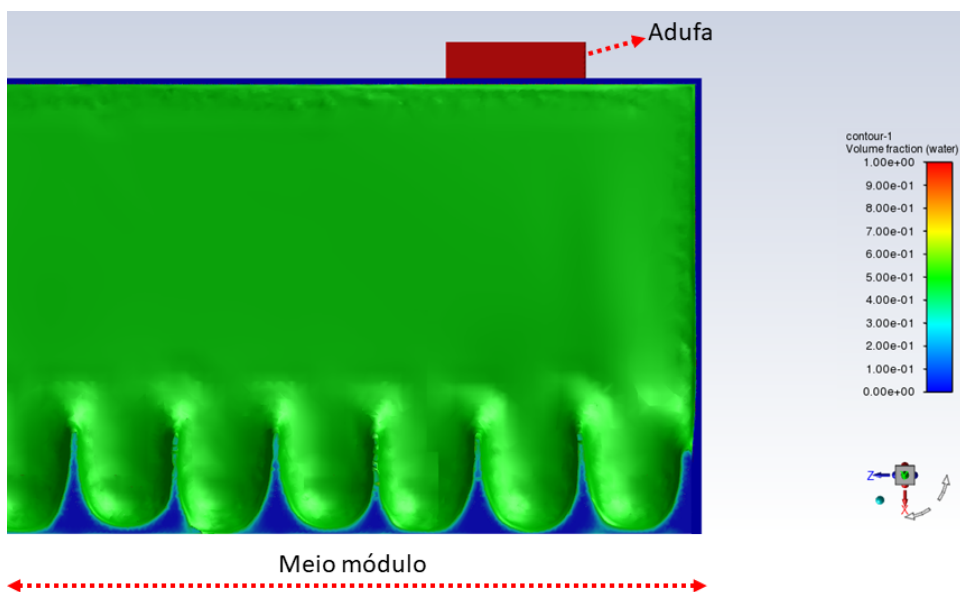
Fonte: Próprio Autor.

Figura 88 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 89 – Vertimento da água na estrutura trapezoidal do vertedor para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

4.2 RESULTADOS PARA A ENTRADA DOS DP

4.2.1 Curva cota vazão para o canal de alimentação dos DP

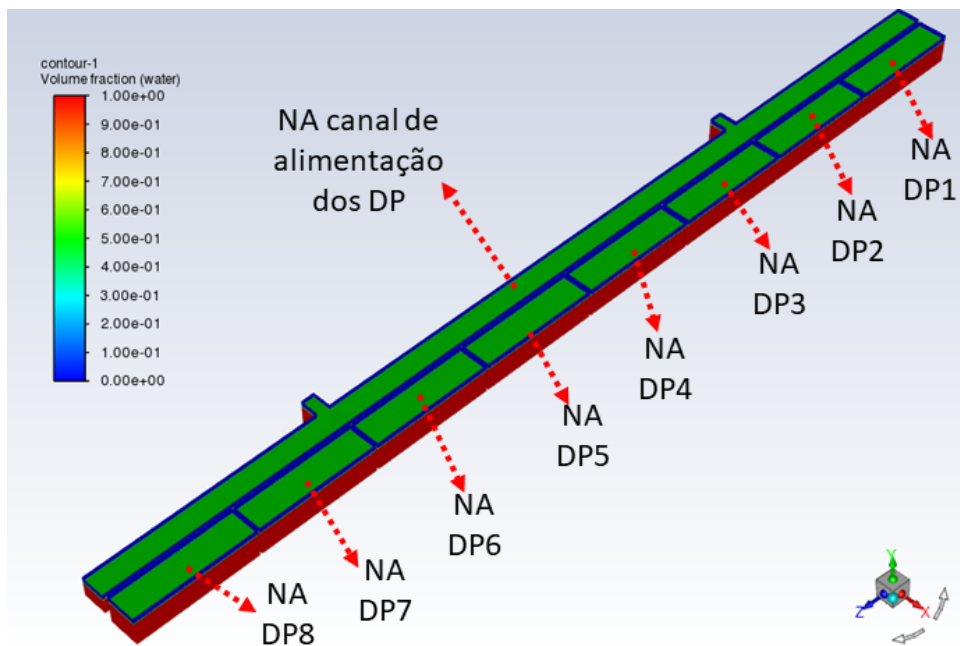
As frações volumétricas da água nas entradas do canal de alimentação dos Decantadores Primários e também nos próprios Decantadores para uma simulação com uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ podem ser observadas na Figura 90. A superfície verde destacada corresponde à fração volumétrica de 50 %, portanto corresponde também ao nível da água (NA), conforme a convenção adotada neste trabalho. Uma vista lateral do resultado para as frações volumétricas da água nas entradas, no canal de alimentação dos DP e nos próprios Decantadores pode ser observada na Figura 91. Esses resultados qualitativos estão de acordo com o comportamento observado no protótipo.

Os resíduos para simulação realizada com o modelo tridimensional da entrada dos Decantadores Primários para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ podem ser observados na Figura 92. Nota-se que os resíduos da continuidade (*continuity*) e da dissipação turbulenta (*epsilon*) não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações.

Para o levantamento da curva cota vazão para o canal de alimentação dos Decantadores Primários foram realizadas simulações com valores crescentes de vazão para um módulo, desde a vazão nominal atual ($8 \text{ m}^3/\text{s}$), a vazão de pico atual ($13,5 \text{ m}^3/\text{s}$) e incluindo também as vazões previstas para 2030 (média de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $16 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico) e 2040 (média de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico). Os resíduos dessas simulações estão no Apêndice C, Figuras 143, 144, 145, 146 e 147.

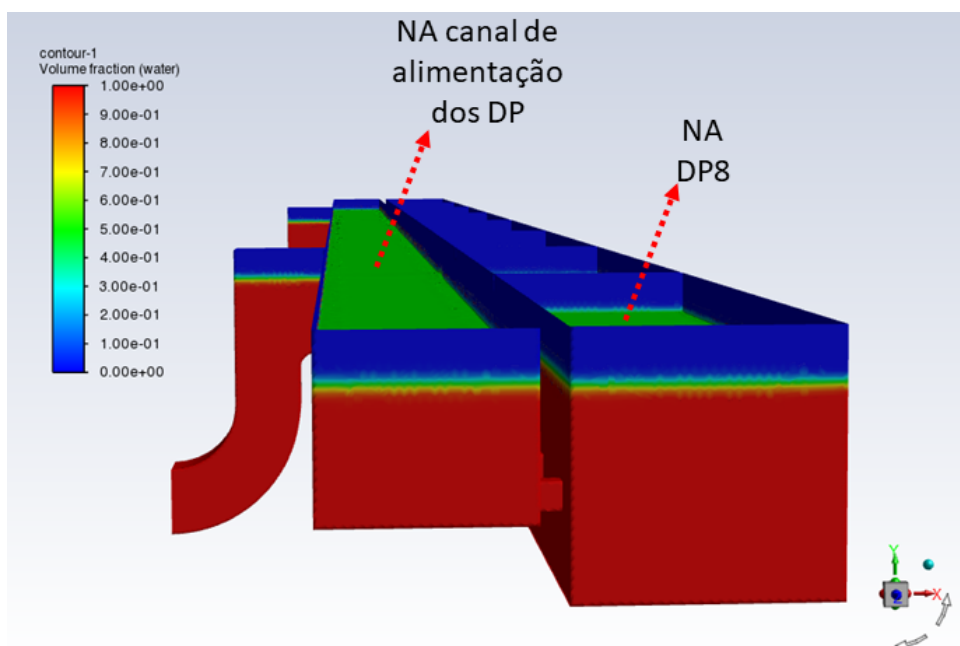
Os resultados para os níveis d'água (NA) do canal de alimentação dos DP para a vazão atual nominal, para a vazão atual de pico e para vazões previstas até 2030 (média de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $16 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico) e 2040 (média de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ de pico) estão dispostos na Tabela 25. A curva cota vazão, que permite a determinação dos valores das vazões a partir do valor do nível d'água (NA) no canal, para valores de vazão que abrangem valores de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ até $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ pode ser visualizada na Figura 93.

Figura 90 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



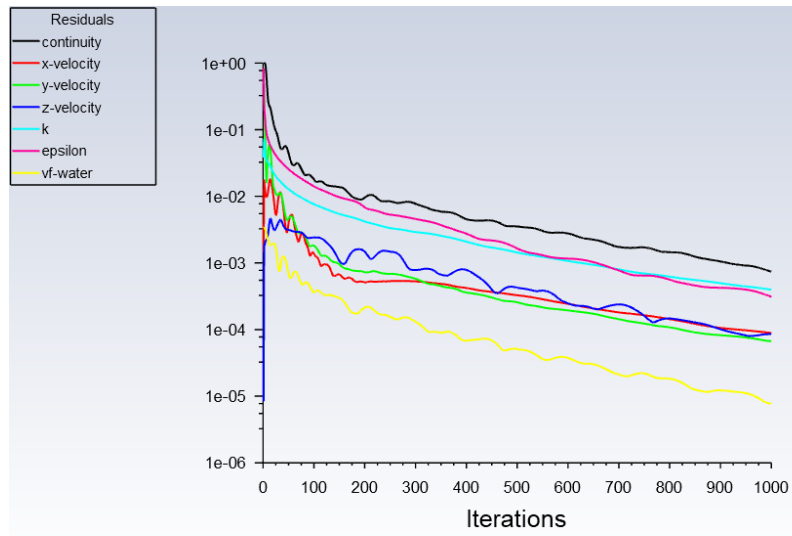
Fonte: Próprio Autor.

Figura 91 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$ - vista lateral.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 92 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



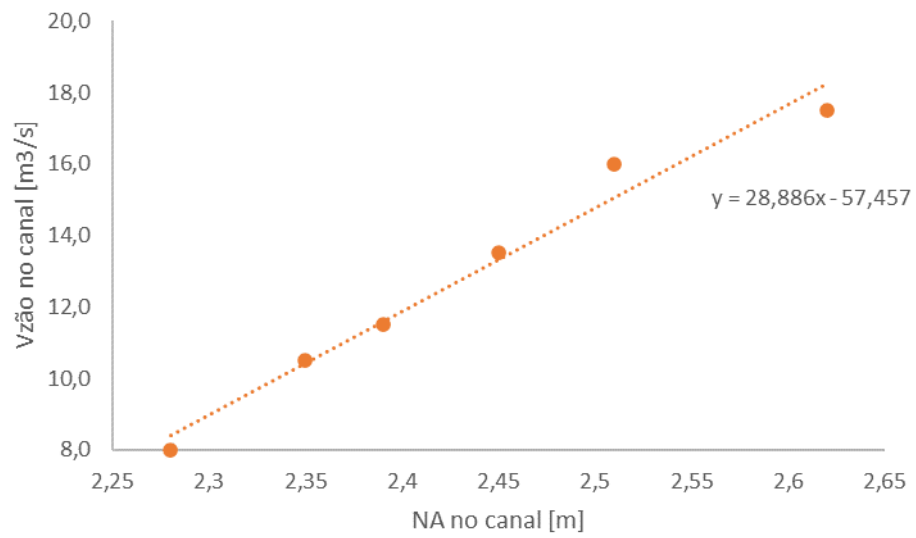
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 25 – Nível da água no canal do DP para diferentes valores de vazões.

Vazão (um módulo) [m^3/s]	Vazão (dois módulos) [m^3/s]	NA [m]
8,0	16	2,28
10,5	21	2,35
11,5	23	2,39
13,5	27	2,45
16,0	32	2,51
17,5	35	2,62

Fonte: Próprio Autor.

Figura 93 – Curva cota vazão obtida com as simulações.



Fonte: Próprio Autor.

4.2.2 Distribuição da vazão entre os DP

Os valores e também as correspondentes porcentagens das vazões recebidas em cada um dos oito Decantadores Primários estão dispostos nas Tabelas 26, 27, 28, 29, 30 e 31. Esses resultados foram obtidos para simulações com o modelo da entrada dos Decantadores Primários para vazões de $8 \text{ m}^3/\text{s}$, $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$, $16 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$, nessa ordem.

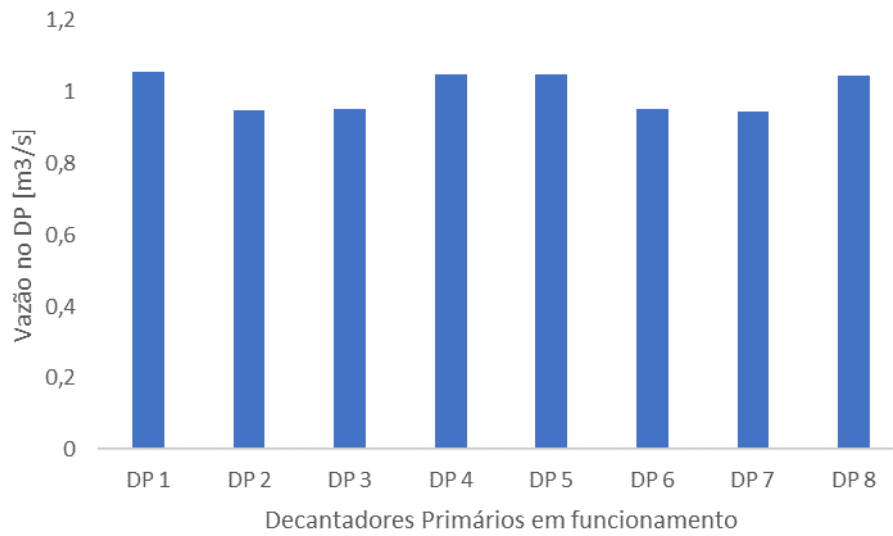
Os resultados obtidos para a distribuição da vazão entre os oito DP para todos os valores das vazões simuladas seguem o mesmo padrão, como pode ser observado nas Figuras 94, 96, 98, 100, 102 e 104. Os DP2, DP3, DP6 e DP7 recebem menos vazão quando comparados aos DP1, DP4, DP5 e DP8. Essas distribuições de vazões decorrem dos campos de velocidades no canal, que podem ser visualizados nas Figuras 95, 97, 99, 101, 103 e 105. Pode-se notar que as velocidades na direção do escoamento (direção do eixo x) são menores nas regiões do canal entre o DP2 e o DP3 e também entre o DP6 e o DP7, o que é coerente com as menores vazões recebidas nesses decantadores. Por outro lado, as máximas diferenças entre as vazões de dois Decantadores não superam os 14 % da vazão média de um Decantador, Tabela 32.

Tabela 26 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,06	13,19
DP2	0,95	11,88
DP3	0,95	11,92
DP4	1,05	13,13
DP5	1,05	13,09
DP6	0,95	11,89
DP7	0,95	11,82
DP8	1,05	13,09

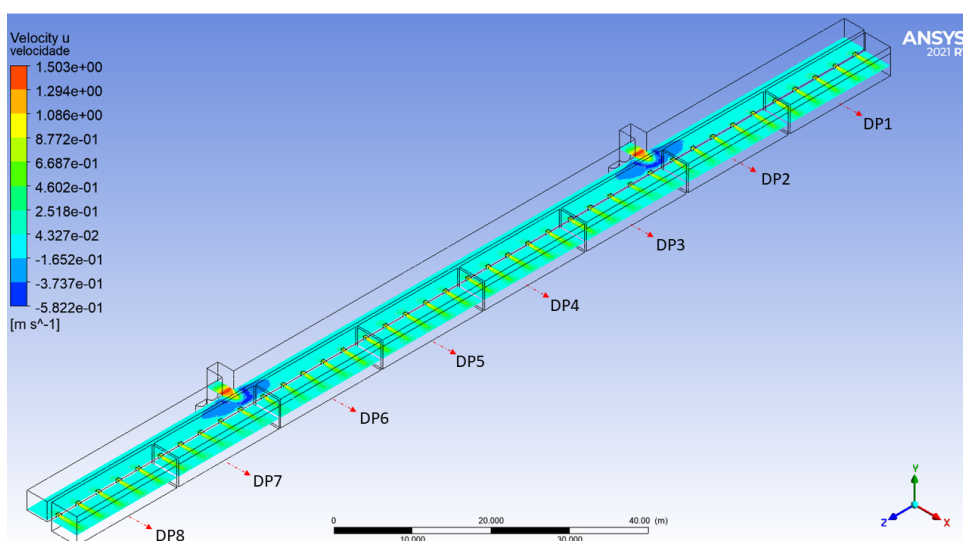
Fonte: Próprio Autor.

Figura 94 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 95 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



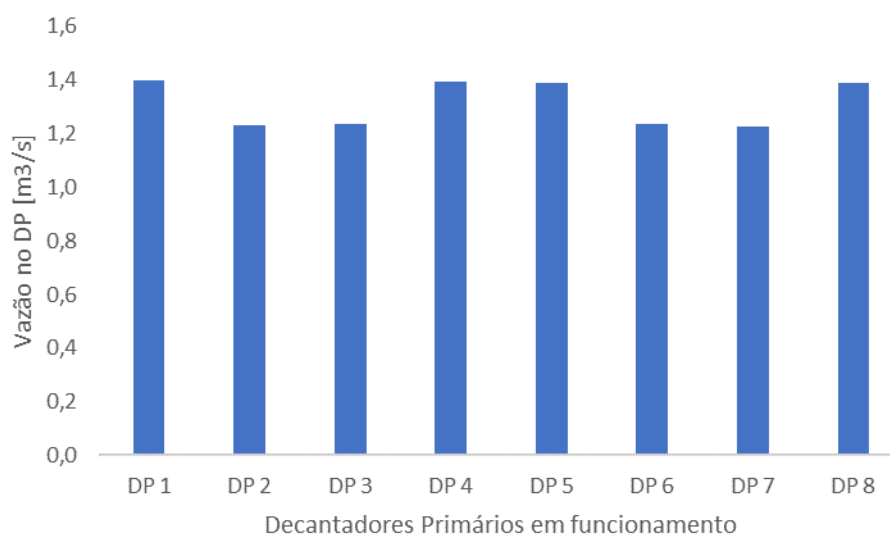
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 27 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,40	13,32
DP2	1,23	11,74
DP3	1,23	11,76
DP4	1,39	13,27
DP5	1,39	13,24
DP6	1,23	11,75
DP7	1,23	11,69
DP8	1,39	13,22

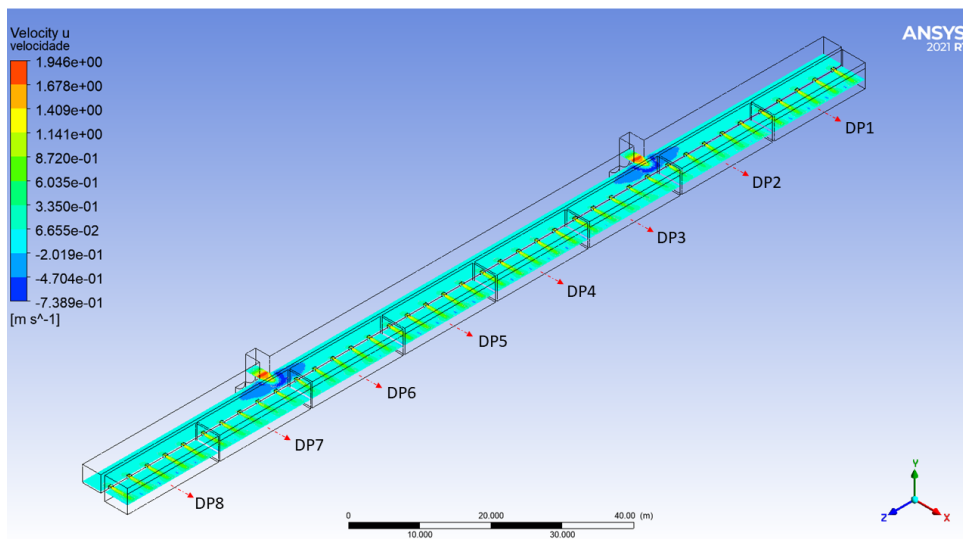
Fonte: Próprio Autor.

Figura 96 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 97 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



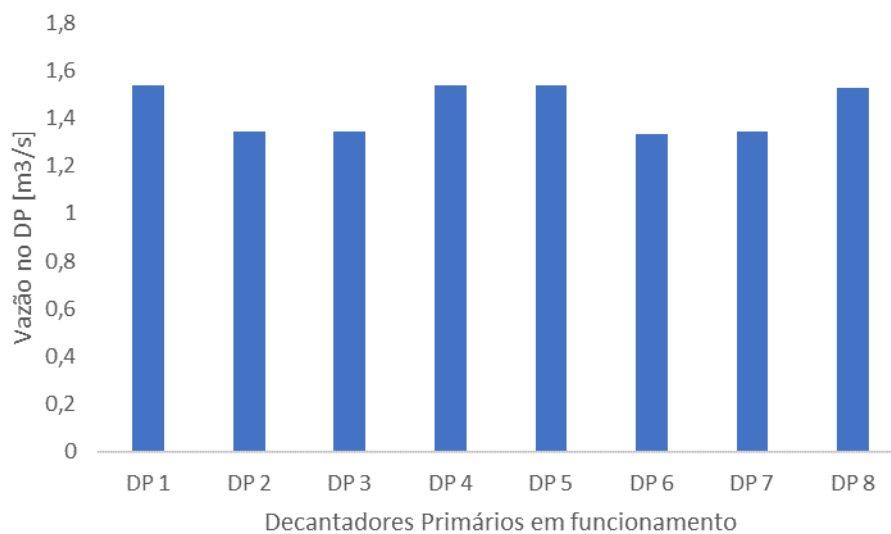
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 28 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,54	13,36
DP2	1,34	11,67
DP3	1,35	11,70
DP4	1,54	13,36
DP5	1,53	13,34
DP6	1,34	11,61
DP7	1,34	11,68
DP8	1,53	13,28

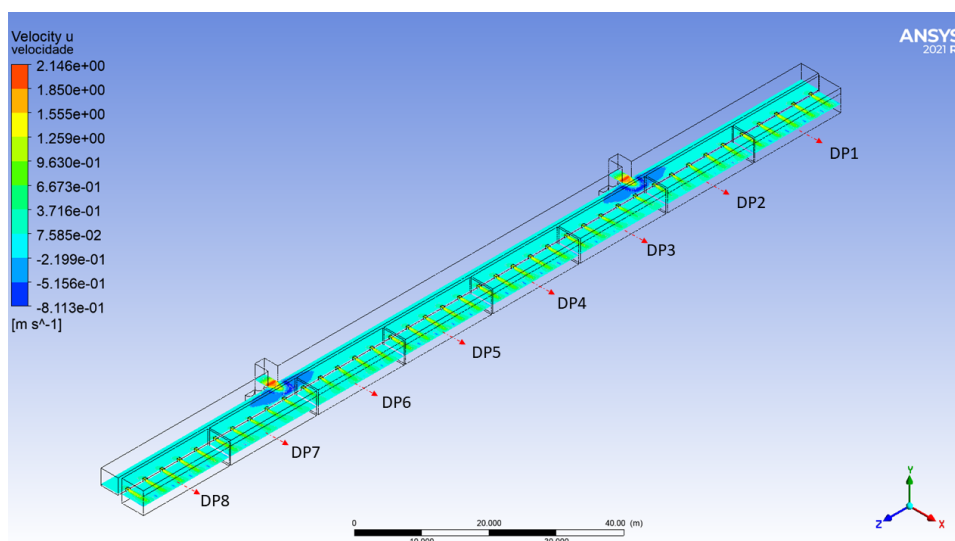
Fonte: Próprio Autor.

Figura 98 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 99 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



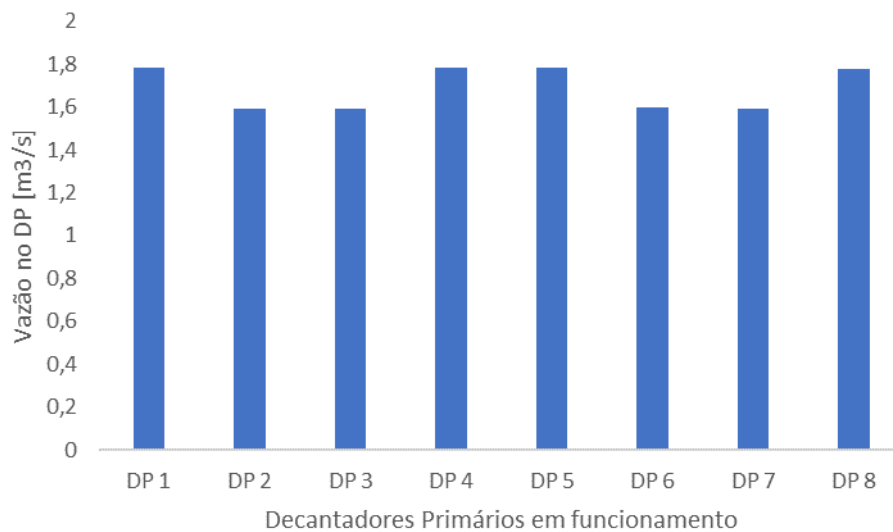
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 29 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,78	13,21
DP2	1,59	11,78
DP3	1,59	11,79
DP4	1,78	13,21
DP5	1,78	13,20
DP6	1,60	11,82
DP7	1,59	11,81
DP8	1,78	13,18

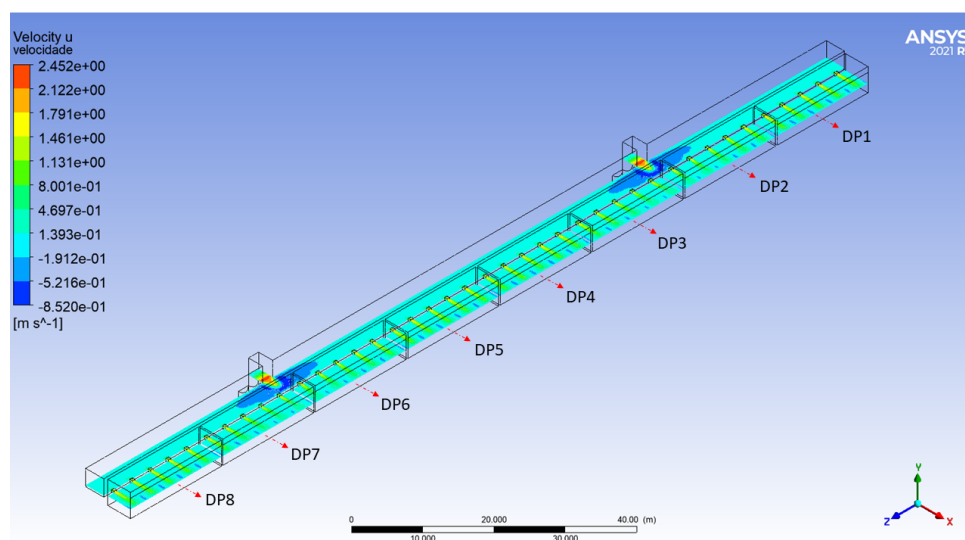
Fonte: Próprio Autor.

Figura 100 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 101 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



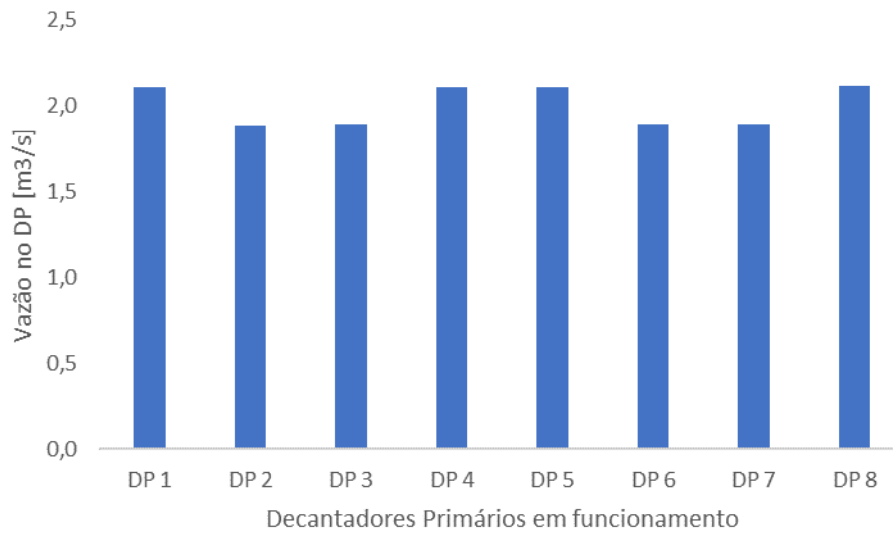
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 30 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	2,11	13,18
DP2	1,88	11,77
DP3	1,89	11,81
DP4	2,11	13,20
DP5	2,11	13,18
DP6	1,89	11,81
DP7	1,89	11,83
DP8	2,11	13,21

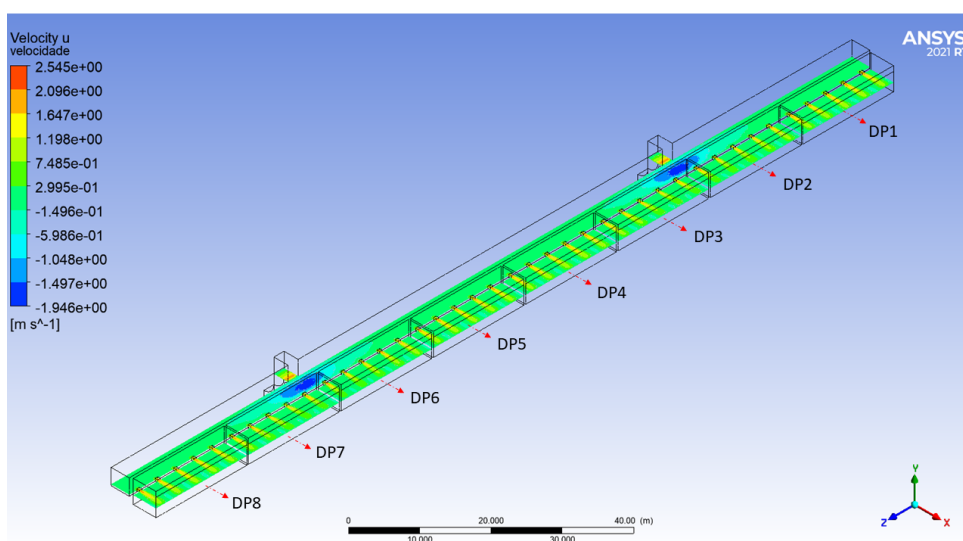
Fonte: Próprio Autor.

Figura 102 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 103 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



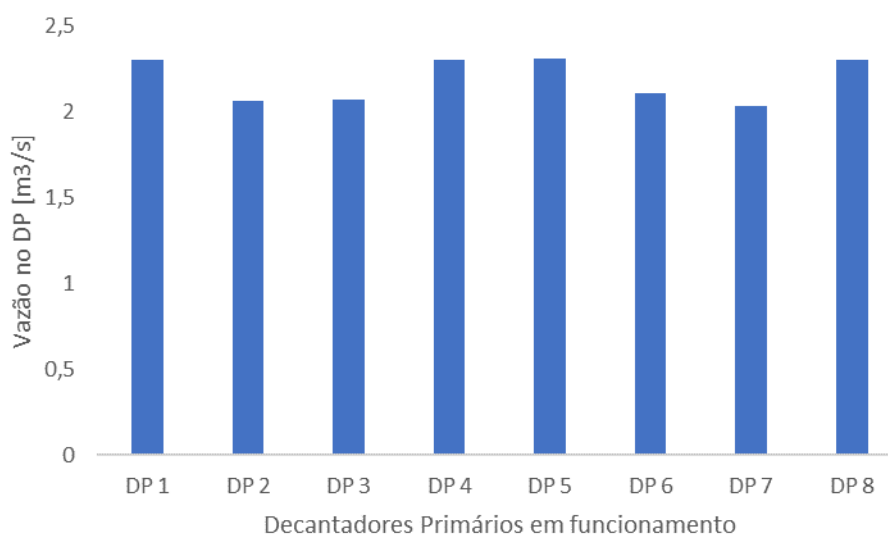
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 31 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	2,30	13,15
DP2	2,06	11,78
DP3	2,07	11,83
DP4	2,30	13,17
DP5	2,31	13,19
DP6	2,11	12,06
DP7	2,04	11,64
DP8	2,31	13,18

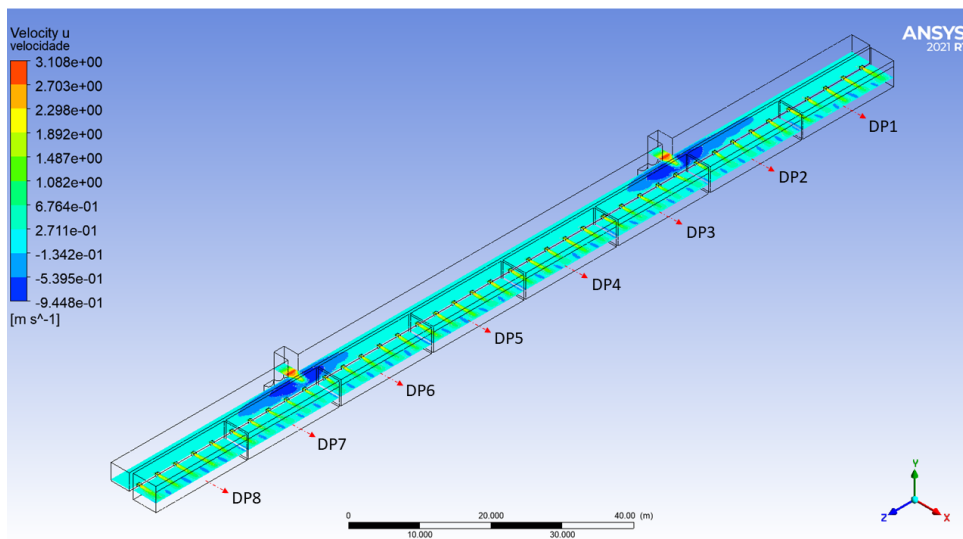
Fonte: Próprio Autor.

Figura 104 – Distribuição da vazão entre os DP para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 105 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 32 – Máximas diferenças entre as vazões de dois Decantadores para diferentes valores de vazão total em um módulo.

Vazão para um módulo [m^3/s]	Diferença máxima entre as vazões de dois DP [m^3/s]	Diferença máxima entre as vazões de dois DP/vazão média em cada Decantador [%]
8,0	0,11	11
10,5	0,17	13
11,5	0,20	14
13,5	0,19	11
16,0	0,23	12
17,5	0,27	12

Fonte: Próprio Autor.

4.2.3 Distribuição da vazão entre os DP - saídas assimétricas

Os resultados das frações volumétricas da água obtidas com as simulações do modelo dos Decantadores Primários com configurações assimétricas nas saídas podem ser observados nas Figuras 106 e 110. A Figura 106 corresponde à situação na qual quatro Decantadores ficam ativos em um extremo enquanto todos os outros permanecem fechados e a Figura 110 ilustra a condição na qual quatro Decantadores estão em operação em um extremo enquanto um único Decantador está em funcionamento na extremidade oposta. No primeiro caso, os DP5, DP6, DP7 e DP8 permanecem fechados e por isso não aparecem nos resultados, o mesmo ocorre para os DP5, DP6 e DP7 na segunda configuração.

Os resíduos obtidos durante as simulações utilizadas para produzir os resultados das Figuras 106 e 110 podem ser observados nas Figuras 107 e 111. Nota-se que somente os resíduos da continuidade não ficam abaixo de 10^{-3} , mesmo depois de 1000 iterações, e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações.

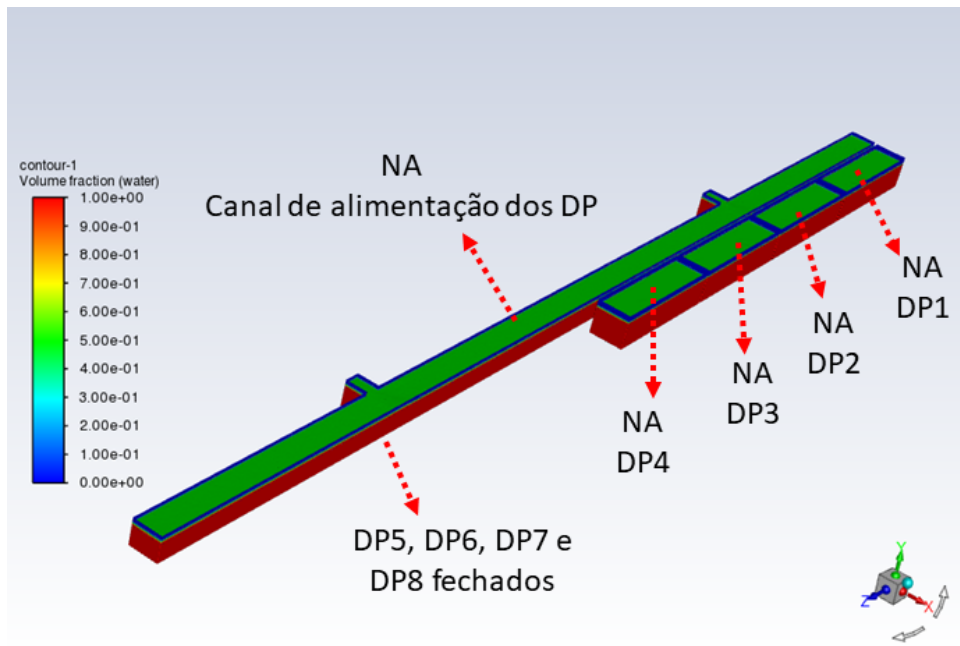
Os valores da distribuição de vazão entre os DP para a simulação com as configurações assimétricas nas saídas estão resumidos nas Tabelas 33 e 34. Esses resultados também estão sintetizados de forma gráfica nas Figuras 108, dados da Tabela 33, e 112, dados da Tabela 34. Observa-se que a diferença máxima entre as vazões de ois DP é de $0,14 \text{ m}^3/s$, o que corresponde a 7 % da vazão média em um DP para os resultados da Tabela 33 e analogamente $0,16 \text{ m}^3/s$ e 10 % para os dados da Tabela 34. As distribuições das velocidades na direção x ao longo da estrutura para as configurações assimétricas com quatro e cinco DP em funcionamento podem ser visualizadas nas Figuras 109 e 113, respectivamente.

Tabela 33 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/s$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	2,01	25,08
DP2	1,91	23,91
DP3	2,03	25,41
DP4	2,05	25,60

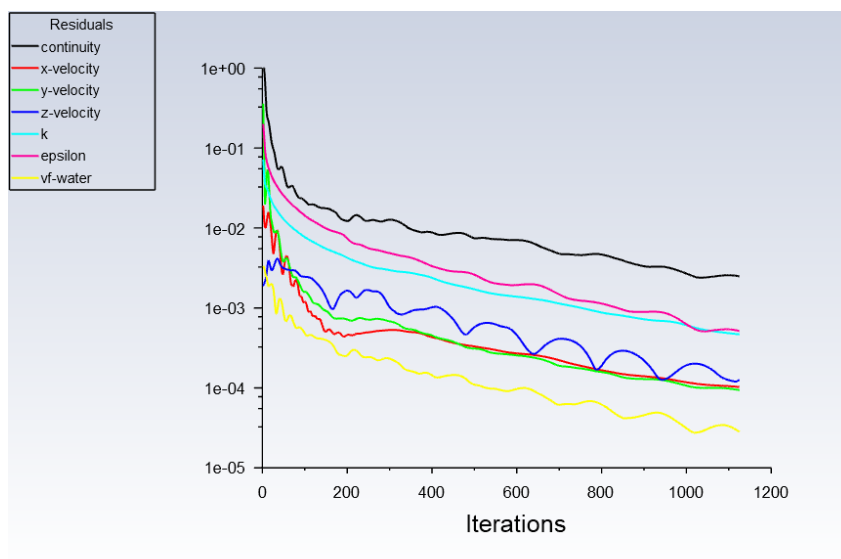
Fonte: Próprio Autor.

Figura 106 – Frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo com quatro DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



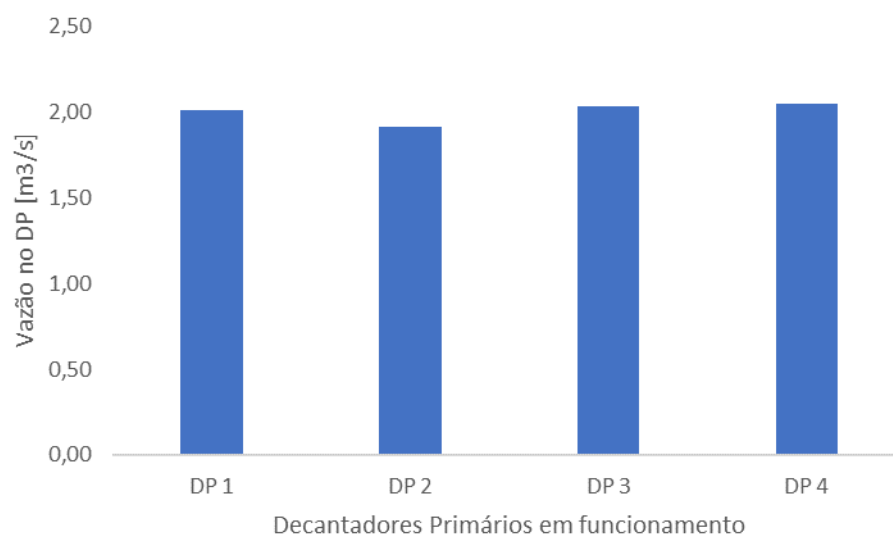
Fonte: Próprio Autor.

Figura 107 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



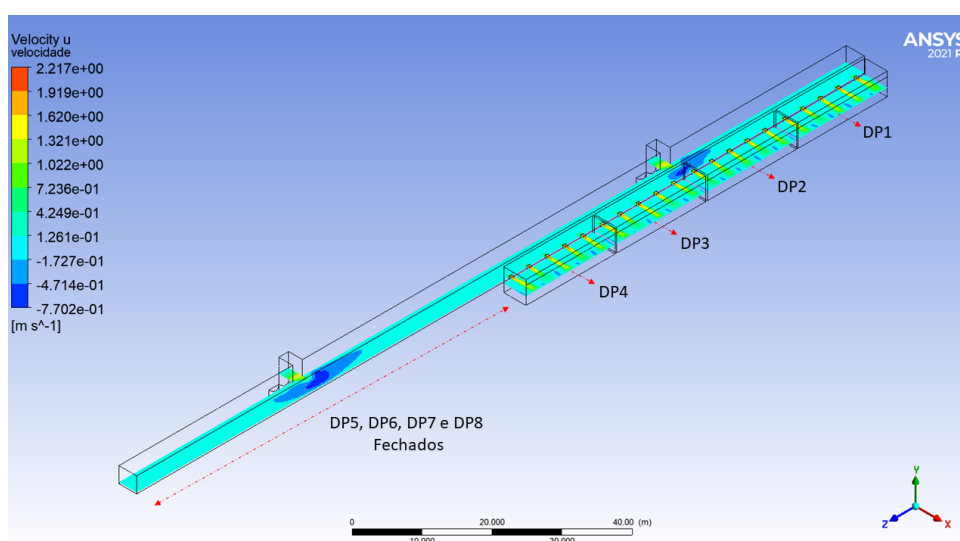
Fonte: Próprio Autor.

Figura 108 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



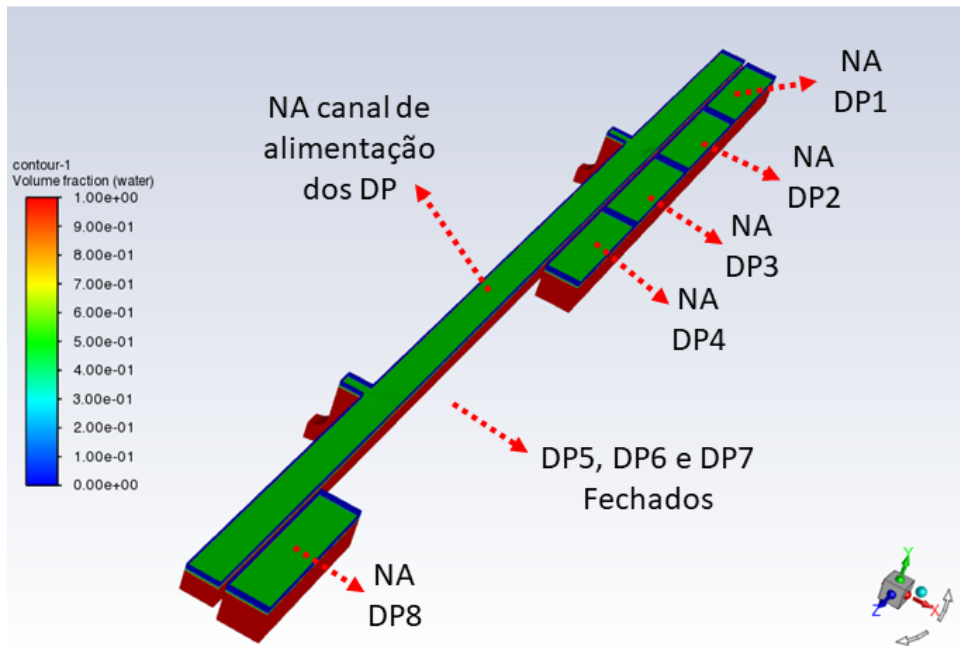
Fonte: Próprio Autor.

Figura 109 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP numa configuração assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



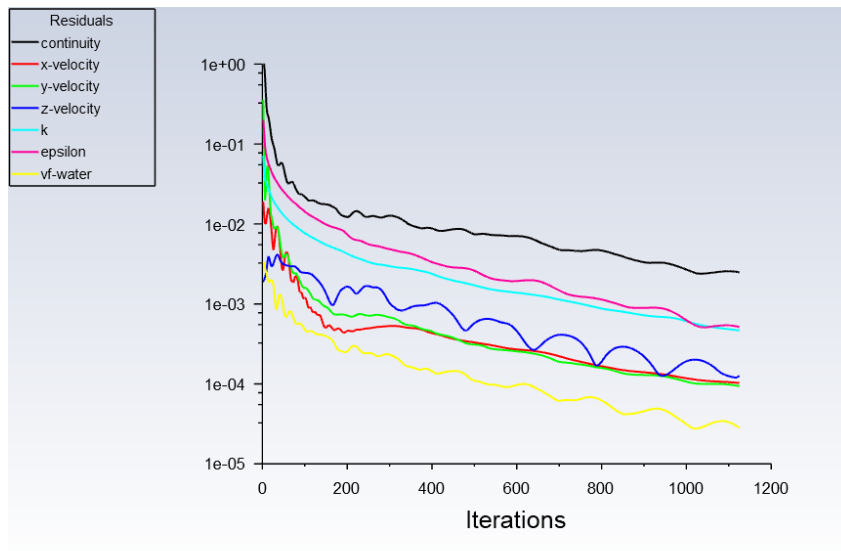
Fonte: Próprio Autor.

Figura 110 – Frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo com cinco DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



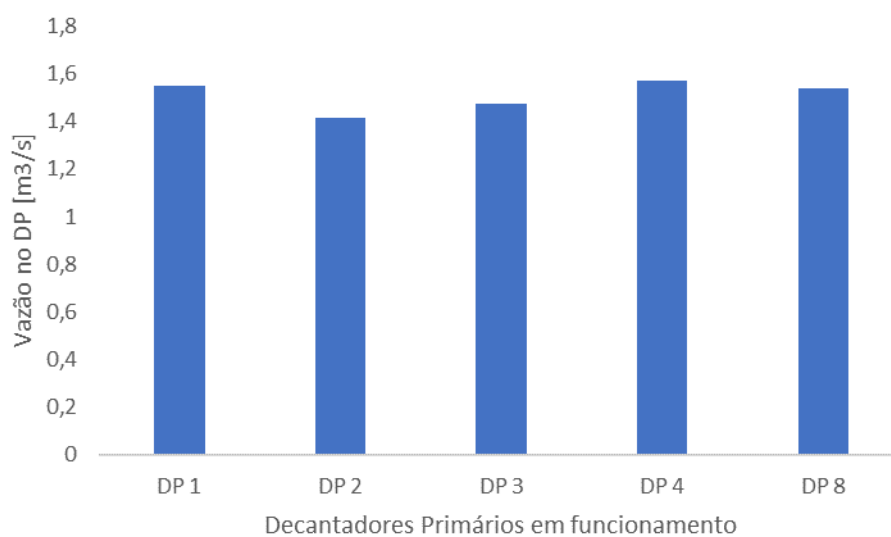
Fonte: Próprio Autor.

Figura 111 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP operando de forma assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



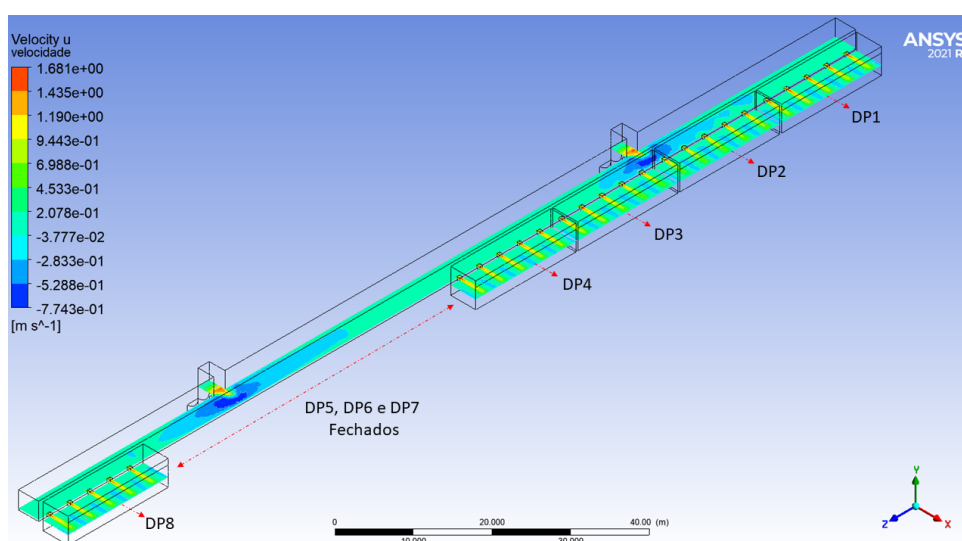
Fonte: Próprio Autor.

Figura 112 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 113 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP numa configuração assimétrica para uma vazão de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 34 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários para uma vazão total de $8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,66	20,75
DP2	1,50	18,75
DP3	1,62	20,25
DP4	1,63	20,38
DP8	1,59	19,88

Fonte: Próprio Autor.

4.2.4 Distribuição da vazão entre os DP - entradas assimétricas

As duas entradas do canal de alimentação dos Decantadores Primários estão distantes 72,2 m uma da outra, a galeria de interligação entre a saída dos Bicos de Pato e a entrada 01 é mais longa do que a ligação equivalente para a entrada 02, como pode ser observado na Figura 22. Essa diferença é de aproximadamente 72,2 m, mesma distância entre as entradas, e isso provoca uma diferença entre as vazões que chegam ao canal pela entrada 01 e pela entrada 02. Baseando-se no cálculo de perda de carga nas galerias, estimou-se que a entrada 01, mais distante, recebe 47 % e a entrada 02, mais próxima, recebe 53 % da vazão total que deixa o Bico de Pato.

Uma simulação foi realizada com o modelo da entrada dos Decantadores Primário com essa condição de vazões assimétricas na entrada para se determinar se essa assimetria na entrada afetaria a distribuição da vazão entre os oito DP. Os valores das vazões recebidas em cada um dos DP e também as correspondentes porcentagens estão dispostos na Tabela 35. A máxima diferença entre as vazões recebidas em dois DP é de $0,17 \text{ m}^3/\text{s}$, que corresponde a 17 % da vazão média recebida em um DP para os resultados da Tabela 35.

Os mesmos resultados apresentados na Tabela 35 podem ser observados na forma de um gráfico na Figura 114, observa-se que esse gráfico é muito semelhante aos gráficos obtidos para uma condição simétrica nas entradas, Figuras 94, 96, 98, 100, 102 e 104.

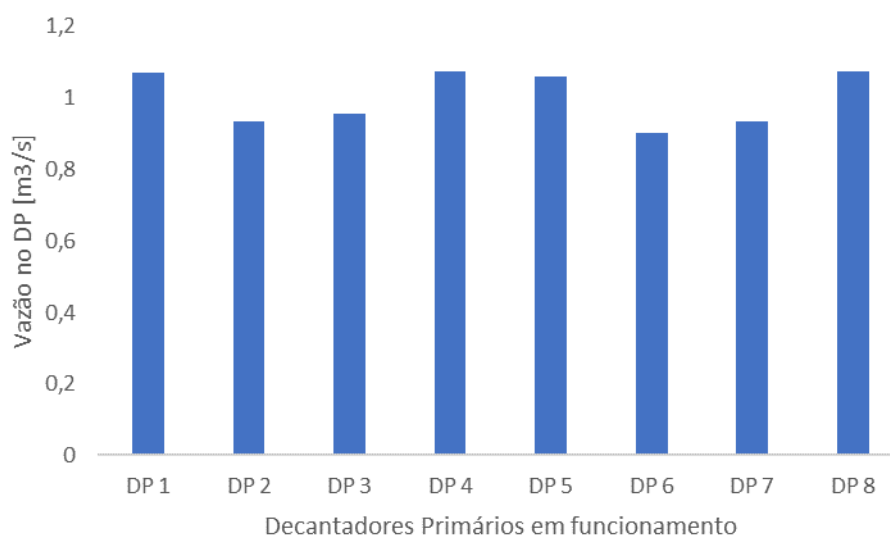
Gráficos de contorno da intensidade das velocidades na direção do eixo x e na direção do eixo z correspondentes aos resultados da Tabela 35 podem ser observados nas Figuras 115 e 116. Pode-se notar que esses gráficos são semelhantes aos gráficos da condição simétrica nas entradas, Figuras 95, 97, 99, 101, 103 e 105, ou seja, as diferenças não são muito acentuadas. Os resíduos obtidos para a simulação correspondentes aos resultados da Tabela 35 podem ser observados na Figura 117. Observa-se que todos os resíduos estão abaixo de 10^{-3} , e, portanto, a simulação convergiu.

Tabela 35 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, Entrada 01.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,07	13,37
DP2	0,93	11,66
DP3	0,95	11,93
DP4	1,07	13,41
DP5	1,06	13,26
DP6	0,90	11,26
DP7	0,94	11,69
DP8	1,07	13,41

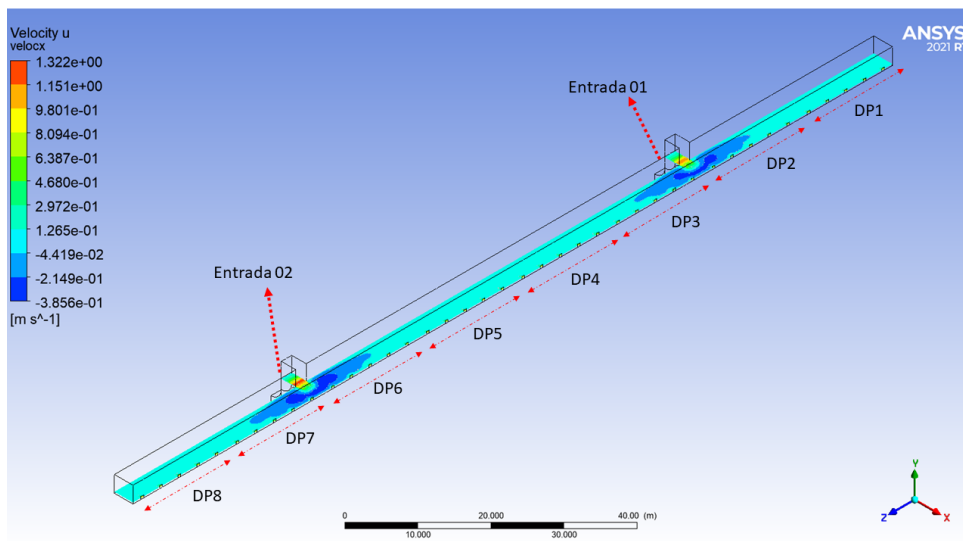
Fonte: Próprio Autor.

Figura 114 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



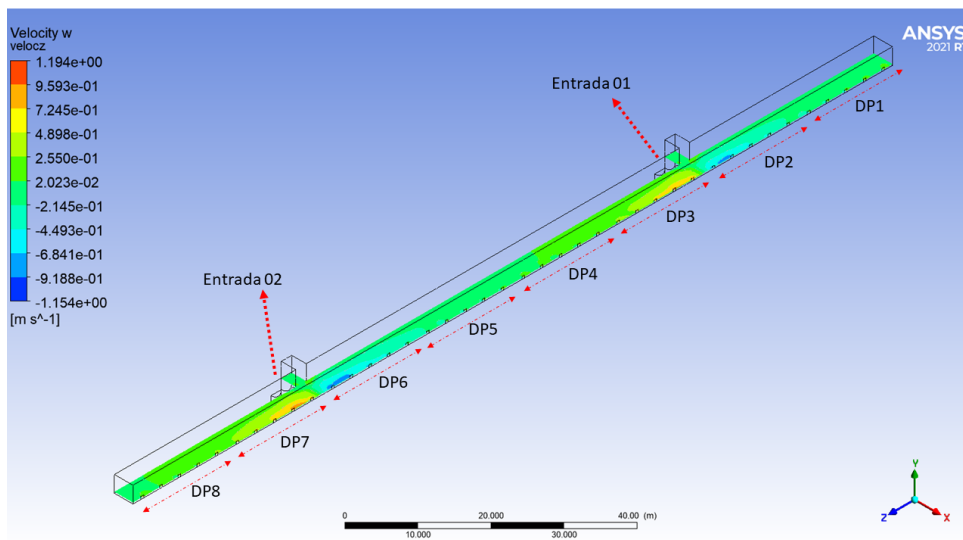
Fonte: Próprio Autor.

Figura 115 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



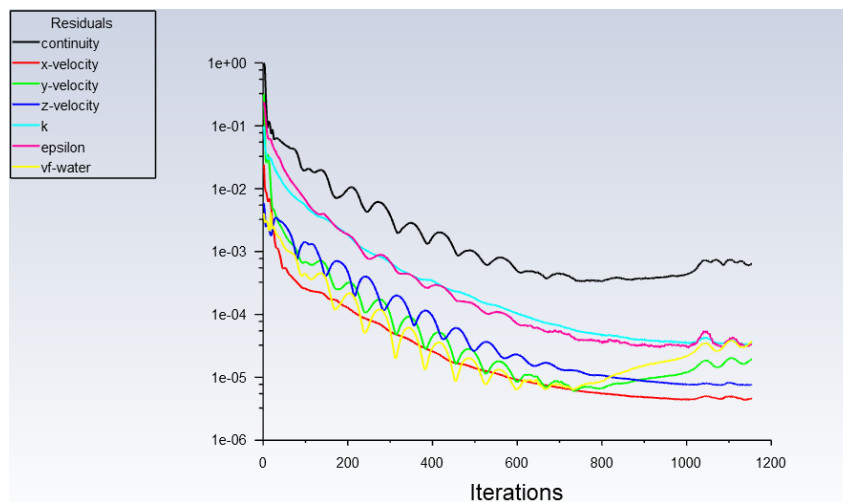
Fonte: Próprio Autor.

Figura 116 – Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $4,24 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $3,76 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 117 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas 4,24 m^3/s , entrada 02, e 3,76 m^3/s , entrada 01.



Fonte: Próprio Autor.

A fim de se determinar a influência de entradas assimétricas na distribuição das vazões entre os Decantadores Primários, foram analisadas mais duas condições: uma condição para a qual a entrada 02 recebe 70 % da vazão que deixa o Bico de Pato e a entrada 01 recebe 30 % e outra na qual a entrada 02 está totalmente fechada e a entrada 01 recebe toda vazão que deixa o Bico de pato de um dos módulos. Simulações foram realizadas com o modelo da entrada dos Decantadores Primário para essas duas condições de vazões assimétricas nas entradas, os valores das vazões recebidas em cada um dos DP e também as correspondentes porcentagens estão dispostos nas Tabelas 36 e 37. A máxima diferença entre as vazões recebidas em dois DP é de 0,18 m^3/s , que corresponde a 18 % da vazão média recebida em um DP para os resultados da Tabela 36 e analogamente 0,44 m^3/s e 44 % para os resultados da Tabela 37.

Os mesmos resultados apresentados nas Tabelas 36 e 37 podem ser observados nas formas de gráficos nas Figuras 118 e 122, respectivamente. Observa-se que esses gráficos são muito diferentes dos gráficos obtidos para uma condição simétrica nas entradas, Figuras 94, 96, 98, 100, 102 e 104.

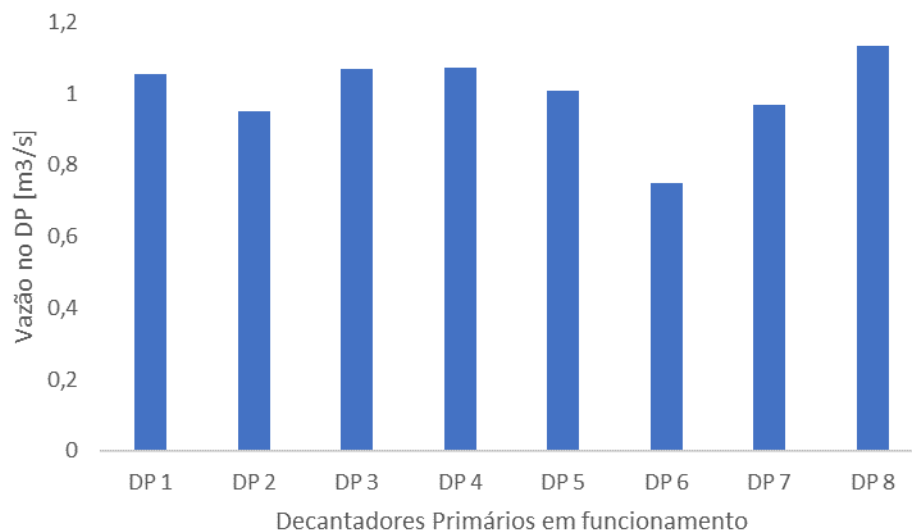
Os gráficos de contorno da intensidade das velocidades na direção do eixo x e na direção do eixo z correspondentes aos resultados da Tabela 36 podem ser observados nas Figuras 119 e 120 . Pode-se notar que esses gráficos são distintos dos gráficos da condição simétrica nas entradas, Figuras 95, 97, 99, 101, 103 e 105. Os resíduos obtidos para a simulação da condição assimétrica correspondente aos resultados da Tabela 36 podem ser observados na Figura 121. Observa-se que todos os resíduos estão abaixo de 10^{-3} , portanto a simulação convergiu.

Tabela 36 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,05	13,16
DP2	0,95	11,89
DP3	1,07	13,35
DP4	1,07	13,39
DP5	1,01	12,58
DP6	0,75	9,36
DP7	0,97	12,10
DP8	1,13	14,16

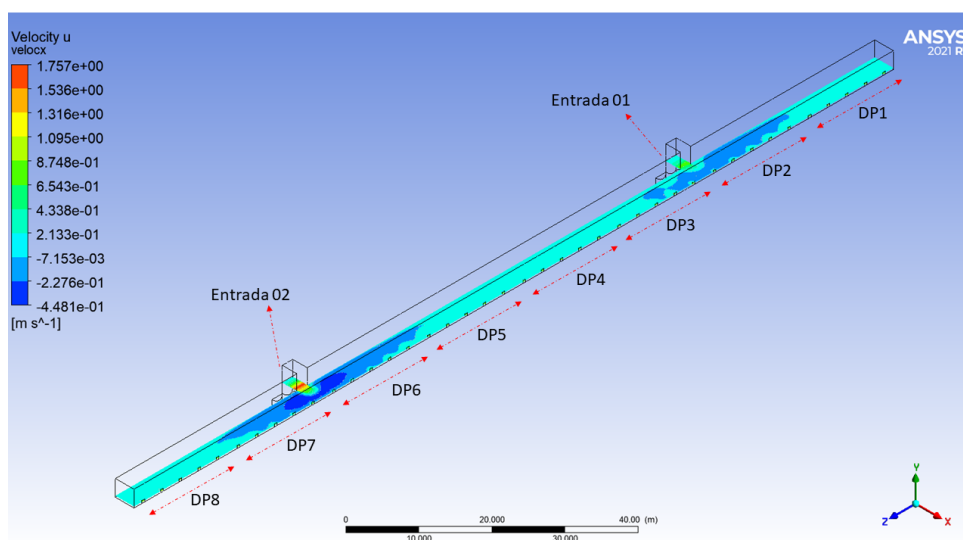
Fonte: Próprio Autor.

Figura 118 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



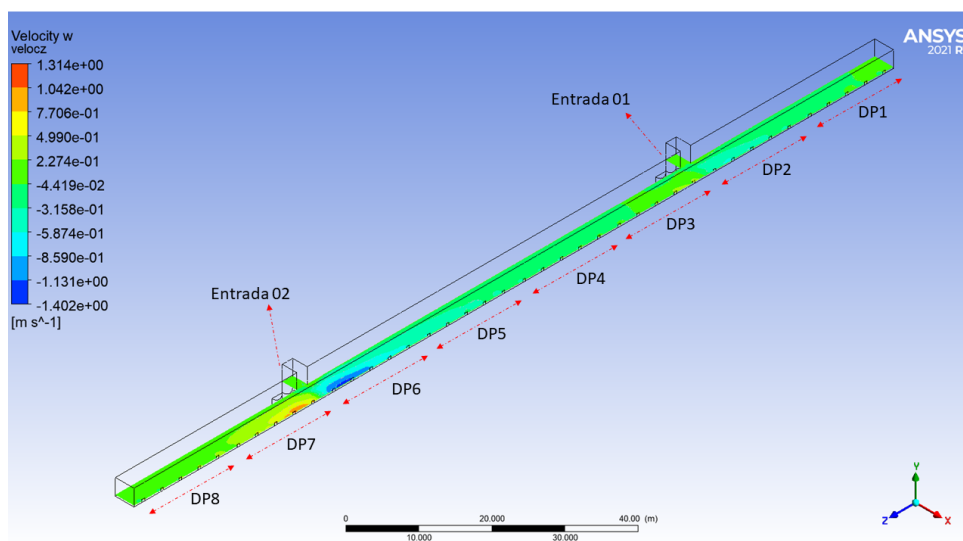
Fonte: Próprio Autor.

Figura 119 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



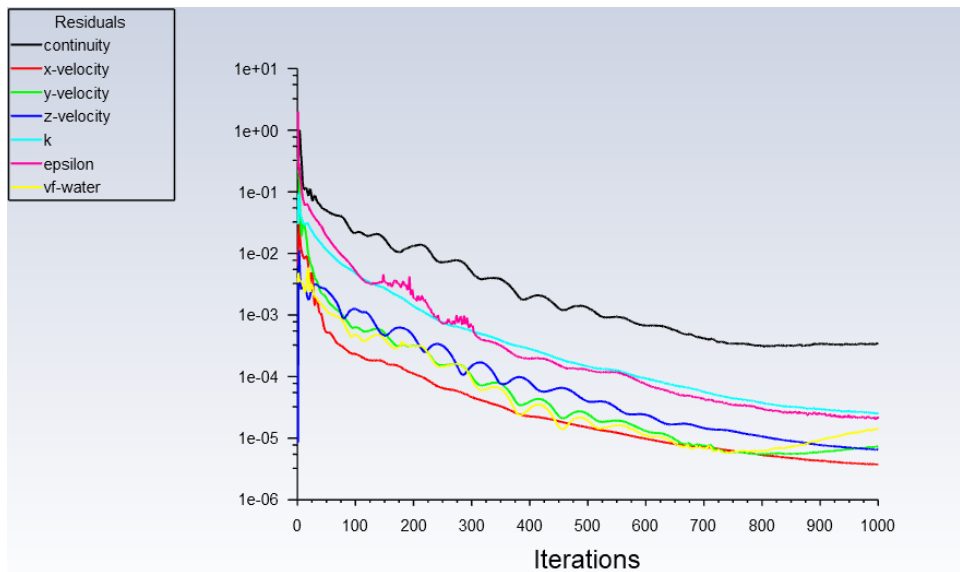
Fonte: Próprio Autor.

Figura 120 – Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $5,6 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $2,4 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 121 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas 5,6 m^3/s , entrada 02, e 2,4 m^3/s , entrada 01.



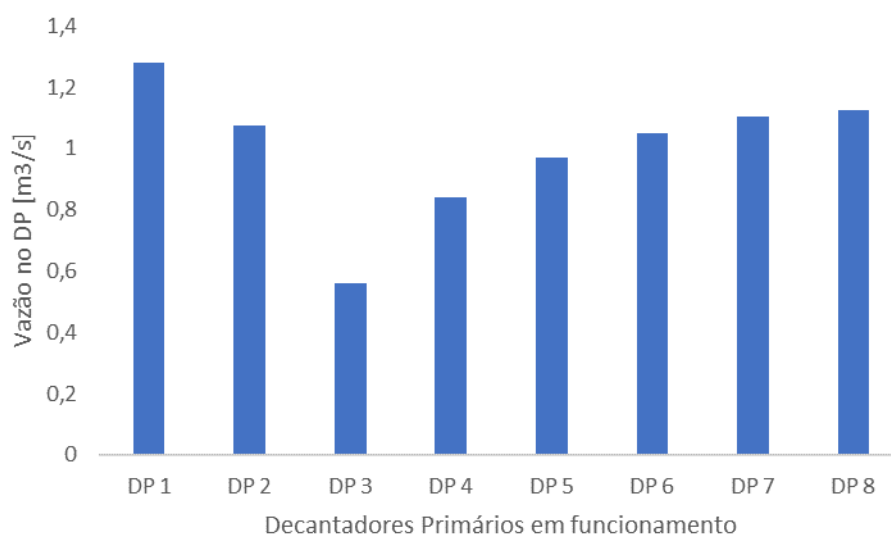
Fonte: Próprio Autor.

Tabela 37 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas 0 m^3/s , entrada 02, e 8 m^3/s , entrada 01.

Decantador Primário	Vazão [m^3/s]	Porcentagem [%]
DP1	1,28	15,98
DP2	1,07	13,43
DP3	0,56	6,99
DP4	0,84	10,51
DP5	0,97	12,10
DP6	1,05	13,12
DP7	1,10	13,80
DP8	1,13	14,06

Fonte: Próprio Autor.

Figura 122 – Vazões recebidas pelos respectivos Decantadores Primários - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.

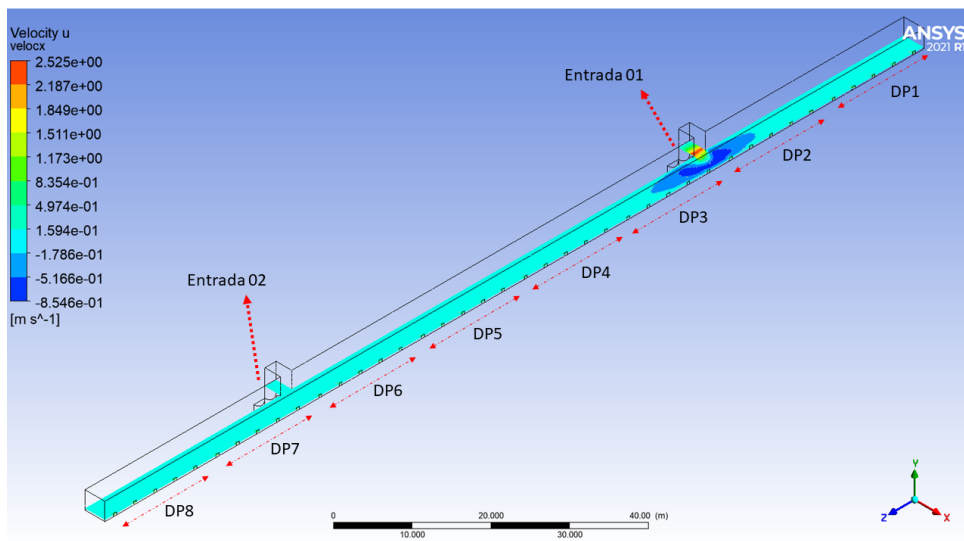


Fonte: Próprio Autor.

Gráficos de contorno da intensidade das velocidades na direção do eixo x e na direção do eixo z correspondentes aos resultados da Tabela 37 podem ser observados nas Figuras 123 e 124. Pode-se notar que esses gráficos são distintos dos gráficos da condição simétrica nas entradas, Figuras 95, 97, 99, 101, 103 e 105.

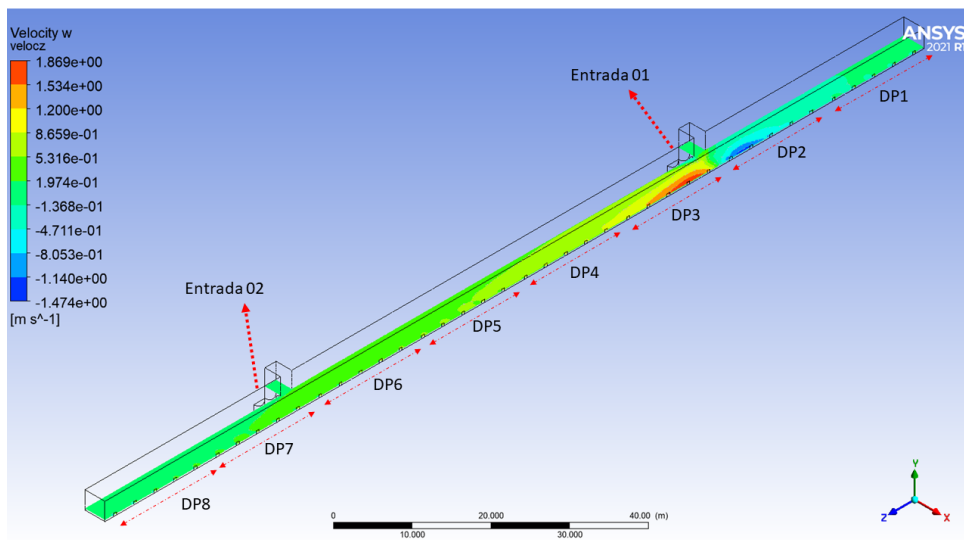
Os resíduos obtidos para a simulação da condição assimétricas nas entradas correspondentes aos resultados da Tabela 37 podem ser observados na Figura 125. Observa-se que todos os resíduos estão abaixo de 10^{-3} , exceto os resíduos da continuidade (*continuity*), e, portanto, essa simulação foi encerrada com a condição que limita o número de iterações..

Figura 123 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



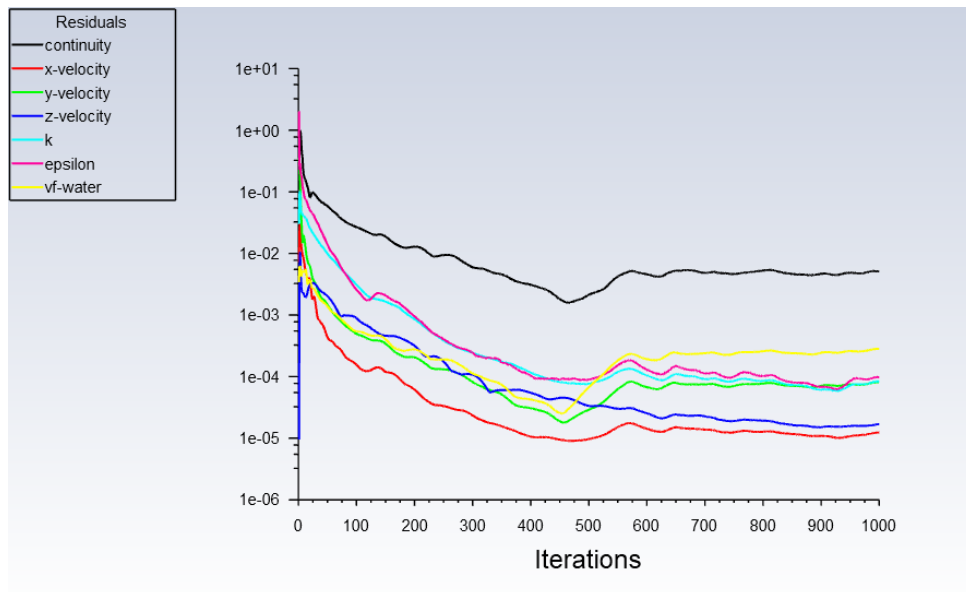
Fonte: Próprio Autor.

Figura 124 – Intensidade das velocidades na direção z para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 125 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 02, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 01.



Fonte: Próprio Autor.

CONCLUSÕES

Os modelos construídos com a utilização da ferramenta DFC Ansys Fluent foram capazes de representar de forma adequada o comportamento do protótipo tanto na região dos Bicos de Pato quanto na região dos Decantadores Primários. As simulações realizadas apresentaram resultados que estão de acordo com os dados experimentais disponíveis e também com o comportamento observado no protótipo durante as visitas técnicas. A confiabilidade dos modelos também foi assegurada por meio de um processo de validação que concluiu que o modelo da região dos Bicos de Pato apresentam resultados cujo desvio máximo em relação aos dados experimentais ficou abaixo de 5 %, Tabela 19, e uma análise equivalente em relação aos modelos da região dos Decantadores Primários apresentou erros que ficam abaixo de 3 %, contudo deve-se ponderar que em relação ao canal dos Decantadores Primários os dados disponíveis não abrangem um intervalo de valores de vazões tão amplo quanto os dados disponíveis para os Bicos de Pato.

O levantamento da curva cota vazão para a região dos Bicos de Pato, Figura 77, foi realizado por meio de simulações no modelo dos BP para um módulo e com essa curva é possível estabelecer um método de determinação da vazão no vertedor por meio da instalação de uma régua de nível no protótipo. Esse método de medição engloba toda a faixa de operação atual da ETE e também a vazão de pico prevista para 2040, já que foram realizadas simulações cujas vazões estão compreendidas entre $3,75 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para um módulo. As mesmas simulações foram utilizadas no estudo do afogamento do vertedor por montante, que mostrou que para vazões iguais a 16 e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ em um módulo ocorre o afogamento do vertedor, ou seja, vazões dessa ordem alteram o perfil de vertimento, Figuras 88 e 89.

As simulações com a imposição de um desnível entre as cristas dos vertedores mostraram que mesmo um desnível pequeno como 1 *cm* afeta o equilíbrio entre as vazões vertidas pelos respectivos Bicos de Pato. Por outro lado, essas simulações também indicam que com a imposição de um desnível entre as cristas é possível desviar a vazão entre os módulos. Um desnível de 5 *cm* entre as cristas provoca uma diferença de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ entre

os módulos quando a vazão é de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ nos dois módulos, Tabela 22.

Outra alternativa para o desvio de vazão que foi abordada pelas simulações realizadas no presente trabalho foi o fechamento gradativo de um dos vertedores. Essa abordagem apresenta a vantagem de não envolver nenhuma mudança de nível da crista dos vertedores, por outro lado, a vazão desviada não pode ser calculada simplesmente pela proporção do número de trapézios fechados devido à resistência que a redução de seção da região do *stop log* impõe ao escoamento entre os módulos, Tabela 24. No caso do fechamento de dois ciclos de um total de treze, a diferença entre as vazões dos dois módulos é de $1,4 \text{ m}^3/\text{s}$ para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$ nos dois módulos, Tabela 23.

O levantamento da curva cota vazão para o canal dos Decantadores Primários foi realizado com a utilização do modelo da entrada dos DP para um módulo, Figura 93, com essa curva é possível estabelecer um método de determinação da vazão no canal por meio da instalação de uma régua de nível no protótipo. Esse método de medição engloba toda a faixa de operação atual da ETE e também a vazão de pico prevista para 2040, já que foram realizadas simulações cujas vazões estão compreendidas entre $8 \text{ m}^3/\text{s}$ e $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$ para um módulo. Esses resultados também permitiram concluir que a estrutura do canal não é um gargalo hidráulico para a vazão de pico prevista para 2040, visto que o nível d'água simulado para essa vazão é de $2,62 \text{ m}$, Tabela 25, contra $3,15 \text{ m}$ de nível máximo, Figura 41.

Com as simulações realizadas com o modelo da região dos Decantadores Primários foi possível determinar que a distribuição da vazão entre os oito Decantadores segue um padrão como os das Figuras 94, 96, 98, 100, 102 e 104 qualquer que seja a vazão de operação desde que os oito Decantadores estejam em operação. Para condições em que não há oito Decantadores em operação, a cada configuração corresponderá uma distribuição de vazões, como, por exemplo, os das Figuras 108 e 112.

Como se pode notar em todas as distribuições obtidas, há uma tendência dos Decantadores mais próximos das entradas apresentarem vazões menores, isso decorre do fato das velocidades na direção longitudinal, direção do eixo z , serem maiores nessas regiões de entrada, o que dificulta o fluxo na direção transversal, direção do eixo x , e como consequência as velocidades transversais nessas regiões são menores, conforme pode ser notado nas Figuras 95, 99, 101 e 105. Entretanto, as diferenças máximas entre os Decantadores não ultrapassam 14 % da vazão média em um Decantador.

O modelo da região dos Decantadores Primários para entradas assimétricas mostrou que para uma diferença moderada entre as vazões nas duas entradas do canal de alimentação dos Decantadores Primários não ocorre uma alteração significativa da distribuição das vazões entre os oito Decantadores, Figura 114; contudo para uma diferença mais acentuada entre as vazões nas duas entradas, o mesmo modelo mostrou que a distribuição de vazões se altera de forma significativa, Figuras 118 e 122.

Em relação as simulações cujos resíduos da continuidade ou da dissipação da energia cinética turbulenta não ficaram abaixo de 10^{-3} , deve-se ressaltar que isso não compromete os resultados, visto que o mesmo ocorreu nas simulações utilizadas no processo de validação do modelo e isso não impediu que aqueles resultados concordassem com observações e dados experimentais. Ressalta-se também que os resultados absolutos dos resíduos não foram utilizados de forma isolada para a verificação de convergência nem para a avaliação da qualidade dos resultados finais. Foram utilizadas a variação da pressão média e o balanço volumétrico da água no domínio para a avaliação da convergência e os desvios em relação aos dados experimentais como indicativo da qualidade dos resultados.

Embora o estudo da análise de custo operacional da ETE em função de sua eficiência energética não faça parte do escopo do presente trabalho, a análise de distribuição de vazão volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e primário desenvolvido nesse trabalho mostrou que a análise DFC é uma ferramenta útil no estudo dos processos de uma ETE. Portanto essa abordagem pode ser utilizado como ponto de partida para estudos futuros de otimização de projetos de novas Estações de Tratamento de Esgoto, com foco na otimização de eficiência energética de operação e na análise financeira do custo operacional das diversas unidades que compõem a ETE.

REFERÊNCIAS

ABCON. **Conheça o cenário da prestação de serviços de água e esgoto no Brasil**. 2020. Disponível em: <<https://www.abconsindcon.com.br/sobre/>>.

AIRES, M. **Reflexões Sobre a Vaidade dos Homens**. São Paulo: Escala, 2006. 140 p.

ANA. **Atlas Esgotos**. 2017. Disponível em: <<http://atlasesgotos.ana.gov.br/>>.

ANSYS Fluent Theory Guide. **ANSYS Fluent Theory Guide**. Canonsburg: Ansys, 2021. 1070 p.

ANSYS Fluent User's Guide. **ANSYS Fluent User's Guide**. Canonsburg: Ansys, 2021. 4940 p.

Assembleia Legislativa do Estado de São Paulo. **Decreto nº 52.455 de 07 de dezembro de 2007**. 2007. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/2007/decreto-52455-07.12.2007.html>>.

AYDIN, M. C. CFD simulation of free-surface flow over triangular labyrinth side weir. **Advances in Engineering Software**, Elsevier Ltd, v. 45, n. 1, p. 159–166, 2012. ISSN 09659978. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2011.09.006>>.

AYDIN, M. C.; EMIROGLU, M. E. Determination of capacity of labyrinth side weir by CFD. **Flow Measurement and Instrumentation**, Elsevier, v. 29, p. 1–8, 2013. ISSN 09555986. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2012.09.008>>.

BENNETT, P. et al. Use of CFD for modelling spillway performance. **Dams and Reservoirs**, v. 28, n. 2, p. 62–72, 2018. ISSN 17568404.

BRADSHAW, P.; CEBECI, T.; WHITELAW, J. H. **Engineering Calculation Methods for Turbulent Flow**. London: Academic Press, 1981.

ÇENGEL, Y. A.; CIMBALA, J. M. **Fluid Mechanics Fundamentals and Applications**. Fourth. New York: McGraw-Hill, 2018.

FDTE/SABESP. **Estudo da Distribuição de Vazões Volumétricas nas Unidades Operacionais da Estação de Tratamento de Esgoto – ETE Barueri (Fase 2) e das demais ETEs (ABC, Parque Novo Mundo e São Miguel) da Região Metropolitana de São Paulo**. Relatório Restrito. São Paulo, 2022. 38 p.

Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica. **Relatório de Aferição de um medidor Venturi de 2.750 mm na Estação de Tratamento de Esgoto de Barueri**. São Paulo, 1995.

GHADERI, A. et al. Energy dissipation and hydraulics of flow over trapezoidal-triangular labyrinth weirs. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 7, 2020. ISSN 20734441.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Atlas do Saneamento**. 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/apps/atlas_saneamento/#/home/>.

JNS-SABESP. **DECANTADOR PRIMÁRIO - MÓDULO 1 CORTES AA, BB E CC**. São Paulo: SABESP, 2010.

JNS-SABESP. **DECANTADOR PRIMÁRIO - MÓDULO 1 GALERIA MECÂNICA - CORTES CC**. São Paulo: SABESP, 2010.

JNS-SABESP. **INTERLIGAÇÃO CAIXA DE AREIA - DECANTADOR PRIMÁRIO - VERTEDOR DE SAÍDA PLANTA, CORTES E DETALHES**. São Paulo: SABESP, 2010.

JNS-SABESP. **SISTEMA DE REMOÇÃO E LAVAGEM DE AREIA ARRANJO GERAL**. São Paulo: SABESP, 2010.

JNS-SABESP. **INTERVENÇÕES PREVISTAS SEGUNDA ETAPA DE OBRAS**. São Paulo: SABESP, 2011.

JNS-SABESP. **PERFIL HIDRÁULICO**. São Paulo: SABESP, 2011.

KNIGHT, D. W.; WRIGHT, N. G. **Guidelines for applying commercial CFD software to open channel flow**. 2005. Disponível em: <<https://www.nottingham.ac.uk/cfd/ocf/Methodology.pdf>>.

KUMCU, S. Y. Investigation of flow over spillway modeling and comparison between experimental data and CFD analysis. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 21, n. 3, p. 994–1003, 2017. ISSN 19763808.

LEAP CFD TEAM. **Convergence and Mesh Independence Study**. 2012. Disponível em: <<https://www.computationalfluidynamics.com.au/convergence-and-mesh-independent-study/>>.

LI, S. et al. Numerical Modeling of Probable Maximum Flood Flowing through a System of Spillways. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 137, n. 1, p. 66–74, 2011. ISSN 0733-9429.

LONGO, S. et al. Monitoring and diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 179, p. 1251–1268, 2016. ISSN 03062619. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043>>.

LUO, H. et al. Comparative 1D and 3D numerical investigation of open-channel junction flows and energy losses. **Advances in Water Resources**, Elsevier Ltd, v. 117, n. July 2017, p. 120–139, 2018. ISSN 03091708. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2018.05.012>>.

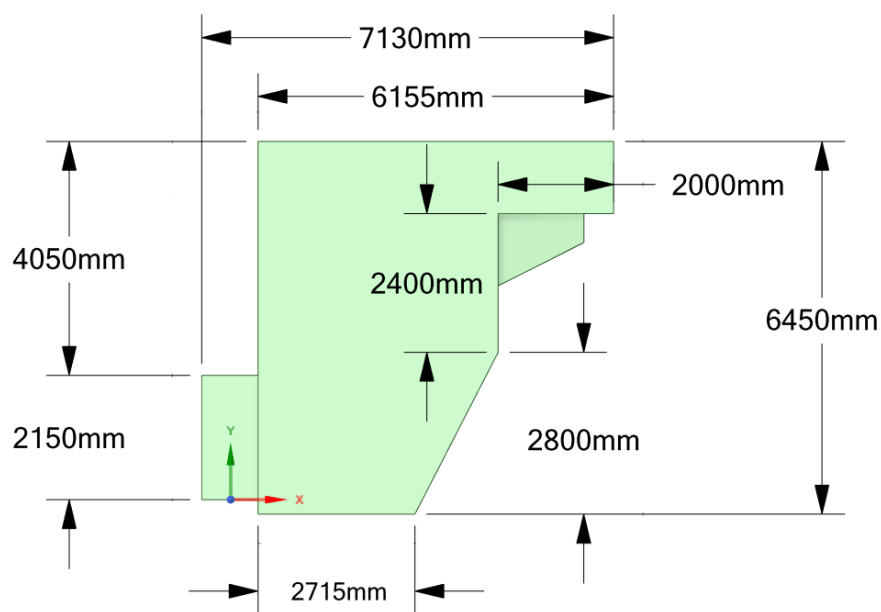
MA, L. et al. Computational fluid dynamics and the physical modelling of an upland urban river. **Geomorphology**, v. 44, n. 3-4, p. 375–391, 2002. ISSN 0169555X.

- Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico**. 2013. Disponível em: <http://www.cecol.fsp.usp.br/dcms/uploads/arquivos/1446465969{_}Brasil-PlanoNacionalDeSaneamentoB{_}sico>.
- MOHSIN, M.; KAUSHAL, D. R. 3D CFD validation of invert trap efficiency for sewer solid management using VOF model. **Water Science and Engineering**, Elsevier Ltd, v. 9, n. 2, p. 106–114, 2016. ISSN 16742370. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wse.2016.06.006>>.
- PENA, R. F. A. **Saneamento Básico no Brasil**. 2014. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/saneamento-basico-no-brasil.htm>>.
- PORTO, R. d. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. São Carlos: EESC, 2006. 540 p.
- Presidência da República. **Lei Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007**. 2007. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br/todos-os-documentos-do-portal/documentos-sre/alocacao-de-agua/oficina-escassez-hidrica/legislacao-sobre-escassez-hidrica/uniao/lei-no-11-445-2007-saneamento-basico>>.
- Presidência da República. **LEI Nº 14.026, DE 15 DE JULHO DE 2020**. 2020. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil{_}03/{_}Ato2019-2022/2020/Lei/L14026.ht>.
- SABESP. **Banco de dados da operação da ETE Barueri**. São Paulo: [s.n.], 2020.
- SABESP. **Tipos de Tratamento**. 2021. 1 p. Disponível em: <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=61>>.
- SIMON-VÁRHELYI, M.; CRISTEA, V. M.; LUCA, A. V. Reducing energy costs of the wastewater treatment plant by improved scheduling of the periodic influent load. **Journal of Environmental Management**, v. 262, n. December 2019, 2020. ISSN 10958630.
- TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- TU, J.; YEOH, G.-H.; LIU, C. **Computational Fluid Dynamics**. Third. Cambridge: Butterworth-Heineimann, 2018. 449 p.
- VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics The Finite Volume Method**. 2. ed. Essex: Pearson, 1995.
- WILCOX, D. C. **Turbulence Modeling for CFD**. La Cañada: DCW Industries, 1994.
- ZENG, J. et al. Applications of Computational Fluid Dynamics to Flow Ratings at Prototype Spillways and Weirs. I: Data Generation and Validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 143, n. 1, p. 04016072, 2017. ISSN 0733-9437.

Apêndices

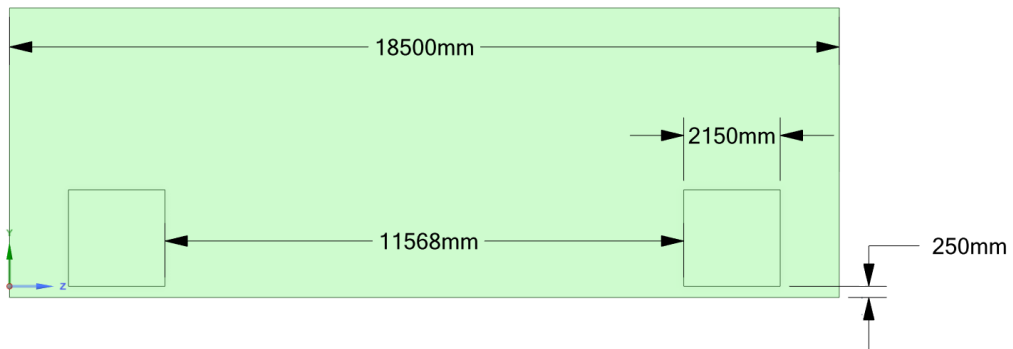
Dimensões dos modelos

Figura 126 – Vista lateral do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.



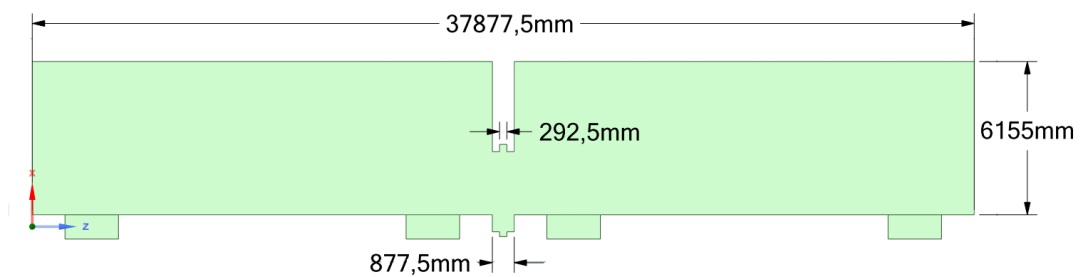
Fonte: Próprio Autor.

Figura 127 – Vista posterior do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.



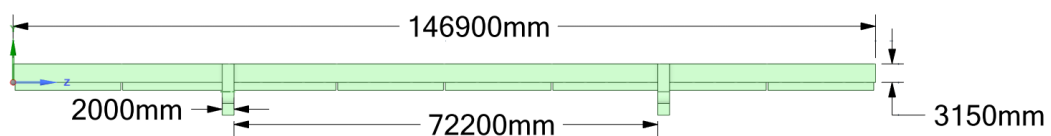
Fonte: Próprio Autor.

Figura 128 – Vista superior do modelo da região dos BP com as indicações de algumas dimensões.



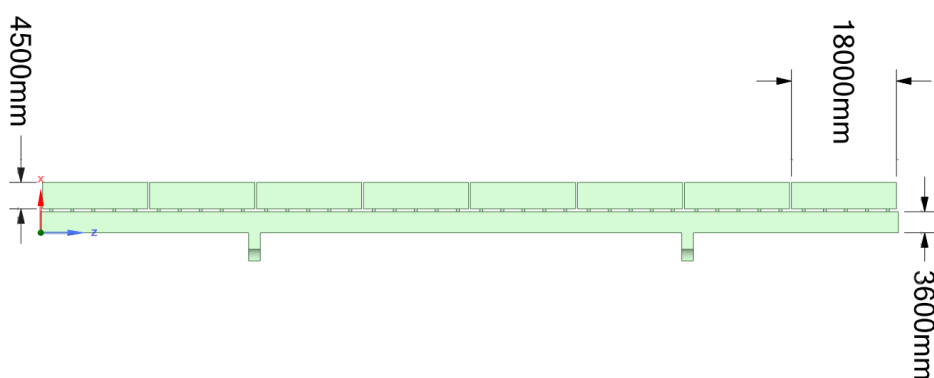
Fonte: Próprio Autor.

Figura 129 – Vista posterior do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.



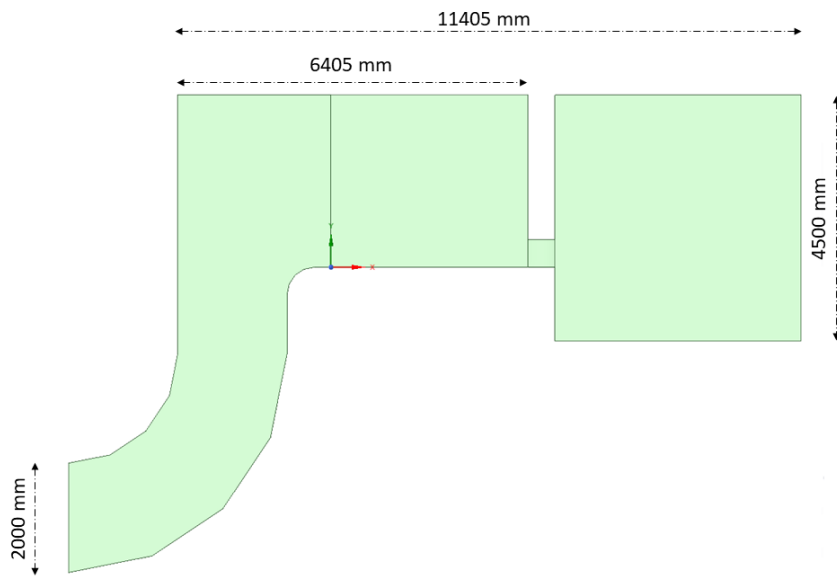
Fonte: Próprio Autor.

Figura 130 – Vista superior do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.



Fonte: Próprio Autor.

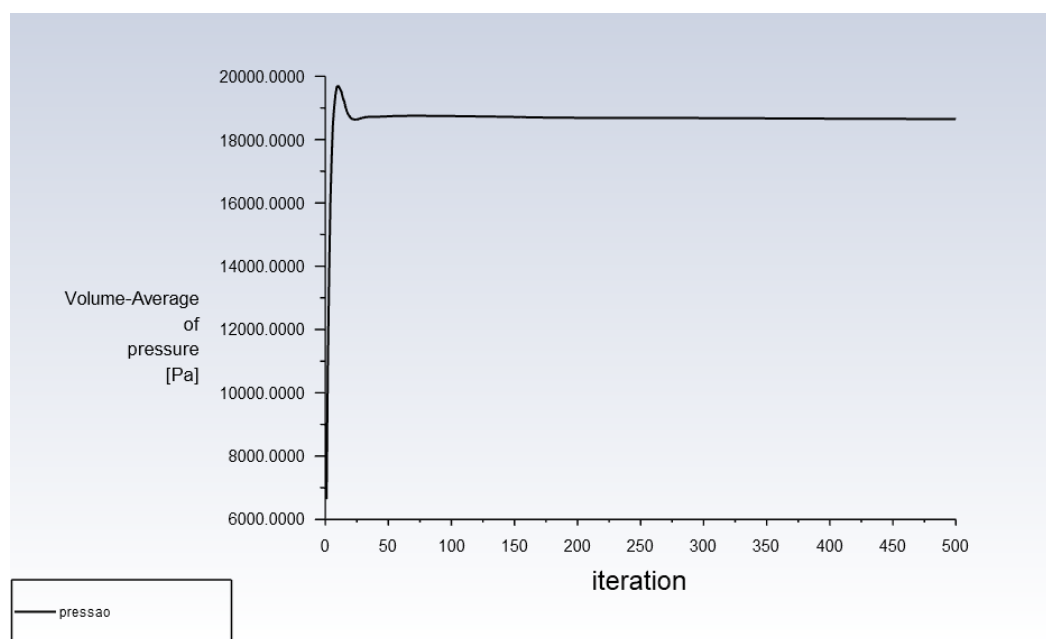
Figura 131 – Vista lateral do modelo da região dos DP com as indicações de algumas dimensões.



Fonte: Próprio Autor.

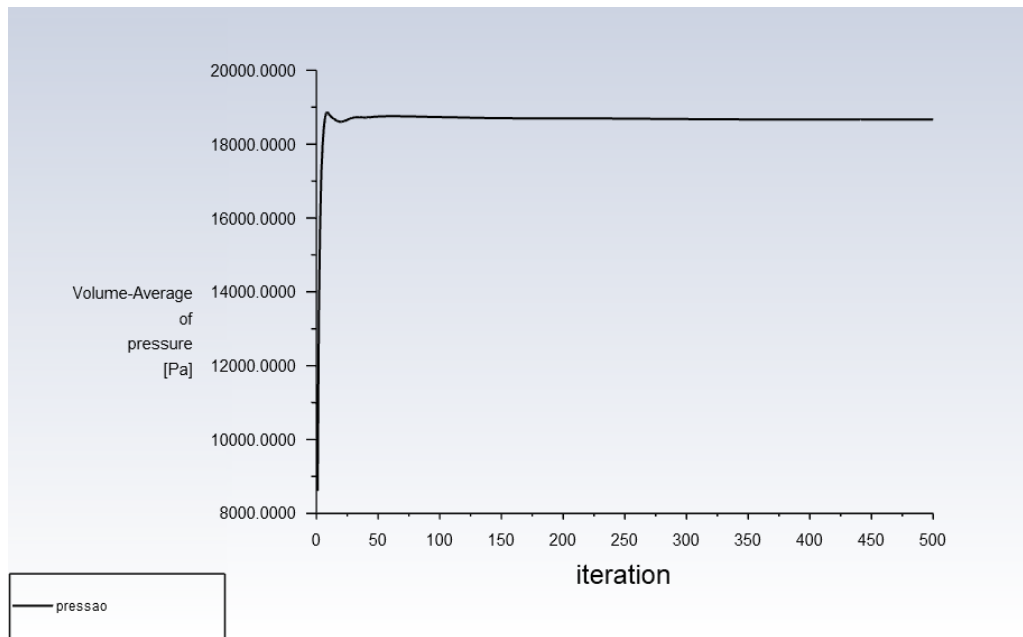
Gráficos obtidos nos estudos de independência de malha

Figura 132 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a primeira malha do modelo dos BP com *stop log*.



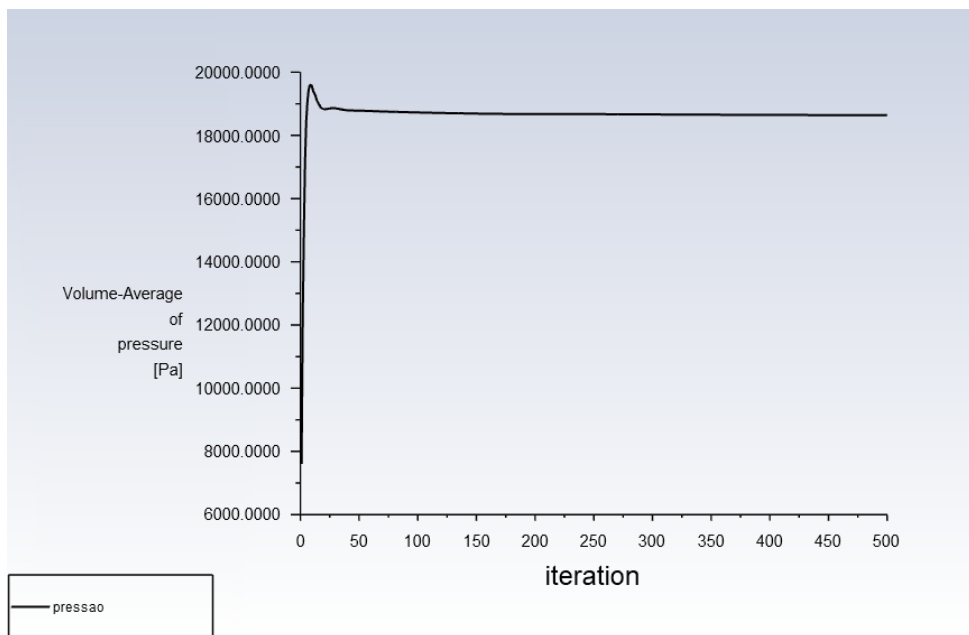
Fonte: Próprio Autor.

Figura 133 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a segunda malha do modelo dos BP com *stop log*.



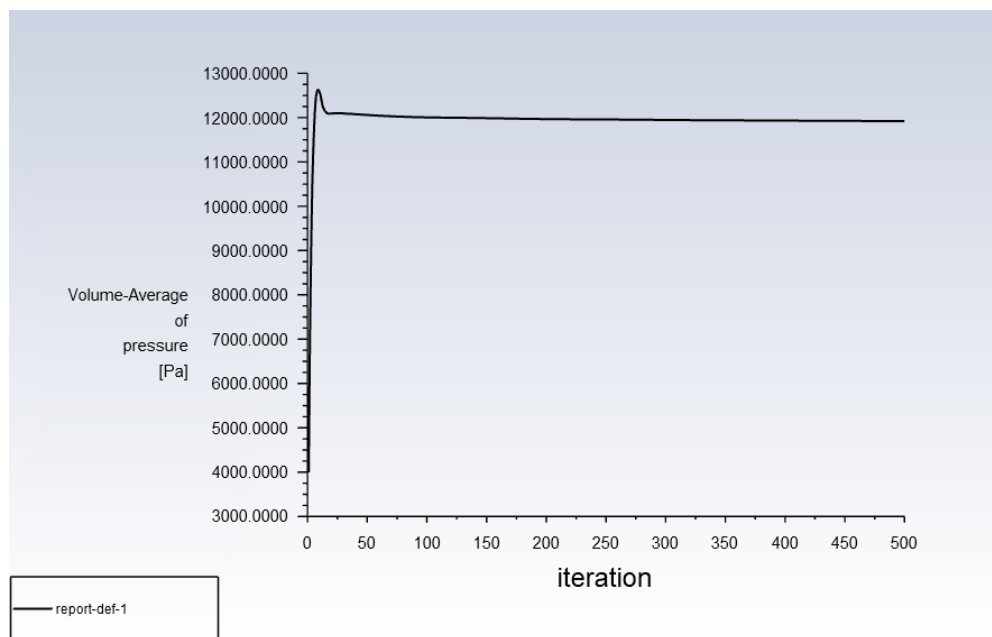
Fonte: Próprio Autor.

Figura 134 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a terceira malha do modelo dos BP com *stop log*.



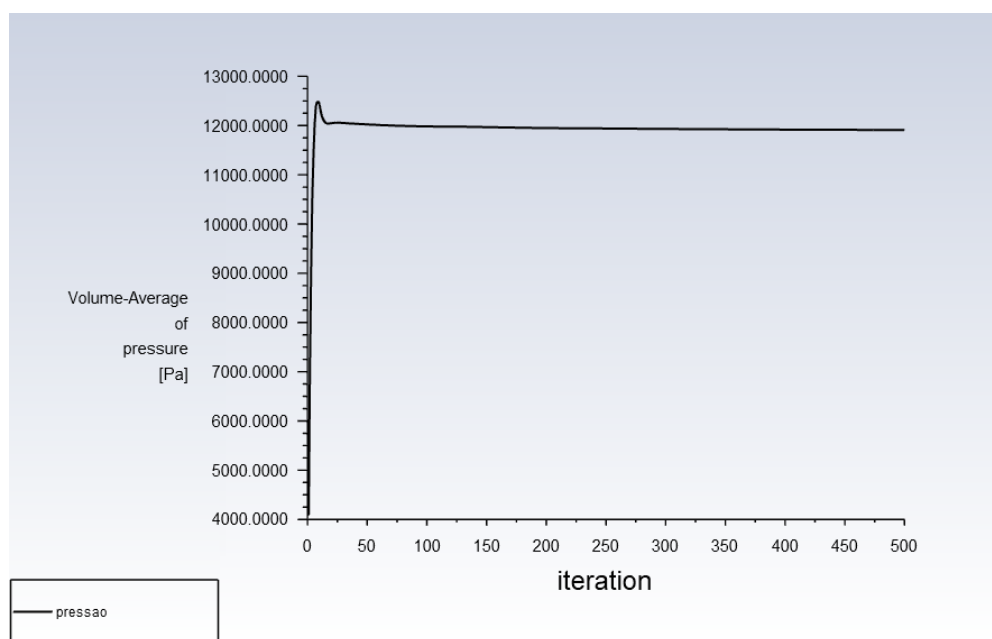
Fonte: Próprio Autor.

Figura 135 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a primeira malha do modelo dos DP.



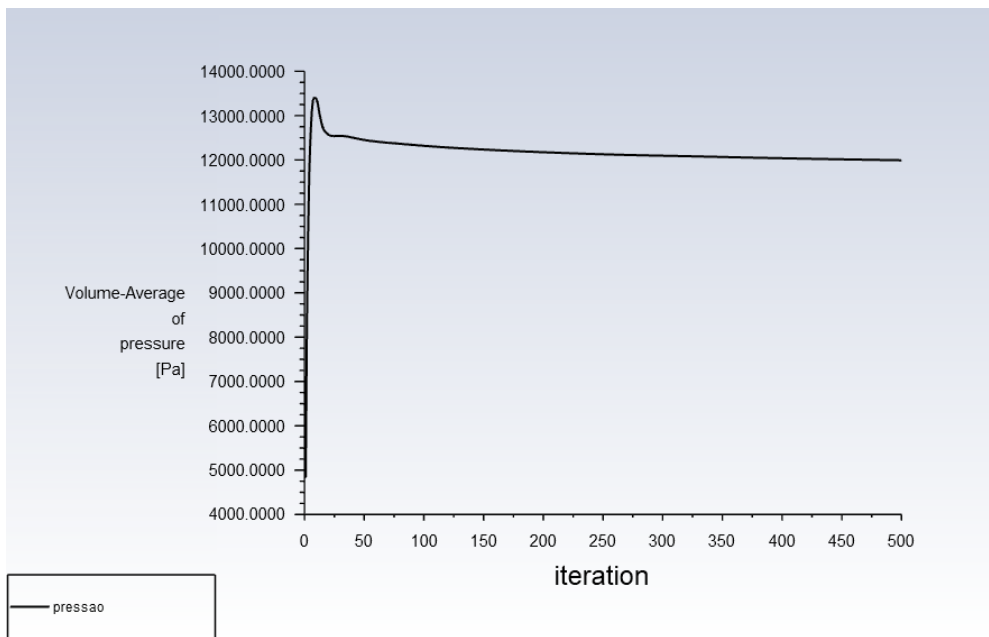
Fonte: Próprio Autor.

Figura 136 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a segunda malha do modelo dos DP.



Fonte: Próprio Autor.

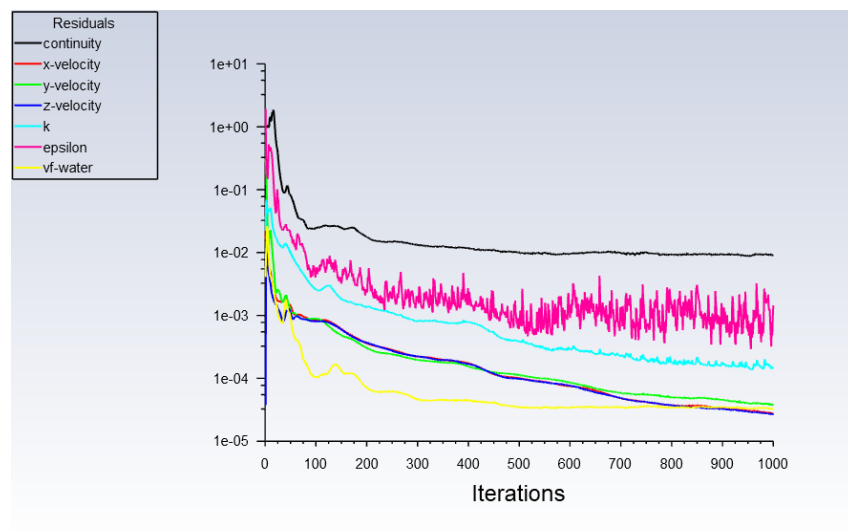
Figura 137 – Variação da pressão ao longo das iterações da simulação para a terceira malha do modelo dos DP.



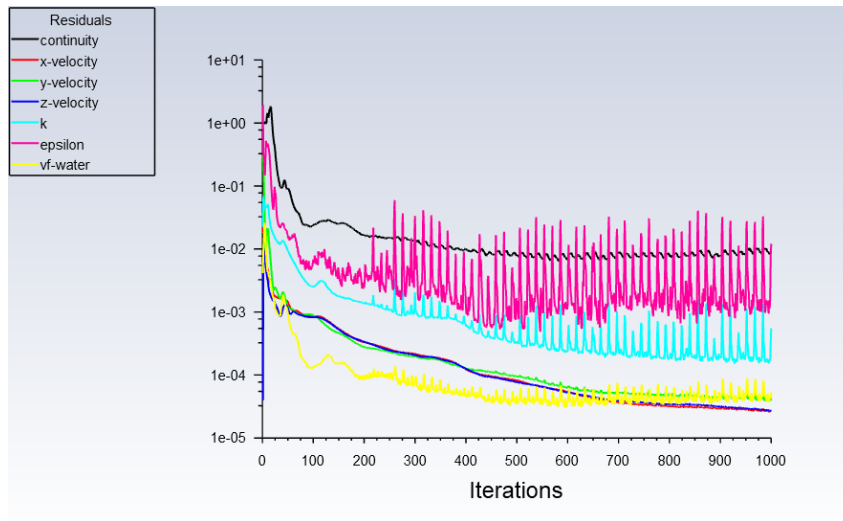
Fonte: Próprio Autor.

Resíduos obtidos nas simulações

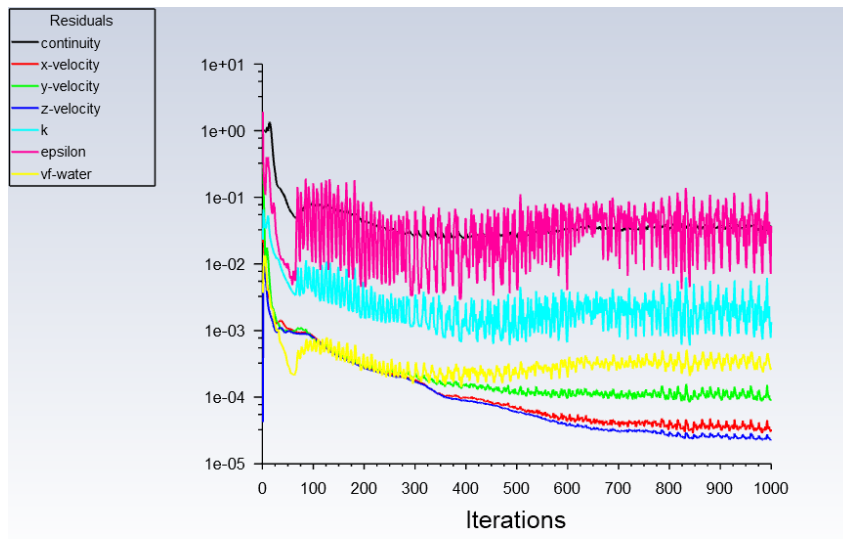
Figura 138 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.



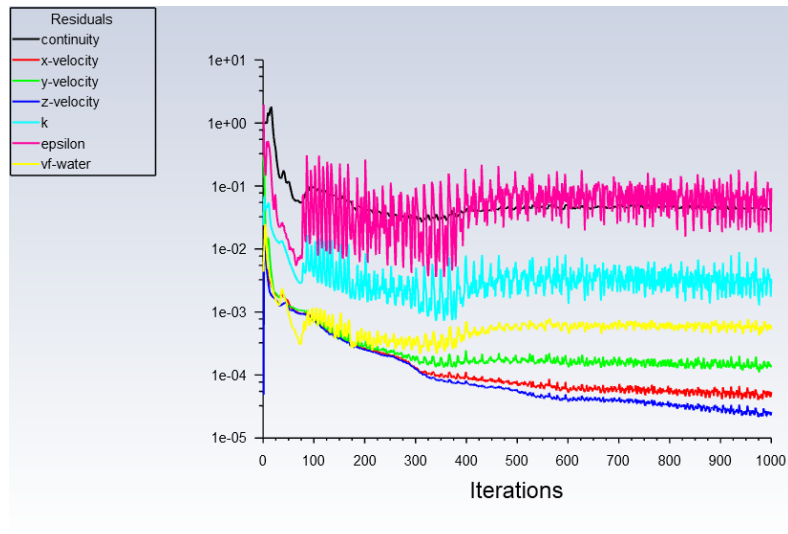
Fonte: Próprio Autor.

Figura 139 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

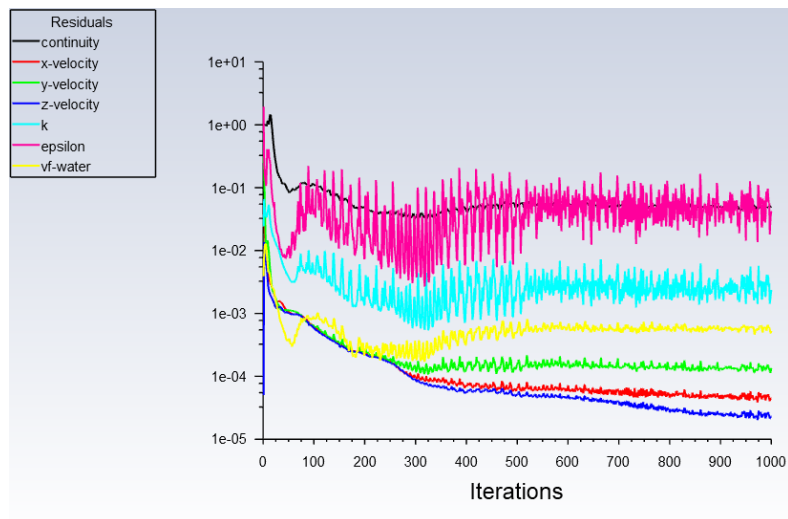
Fonte: Próprio Autor.

Figura 140 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

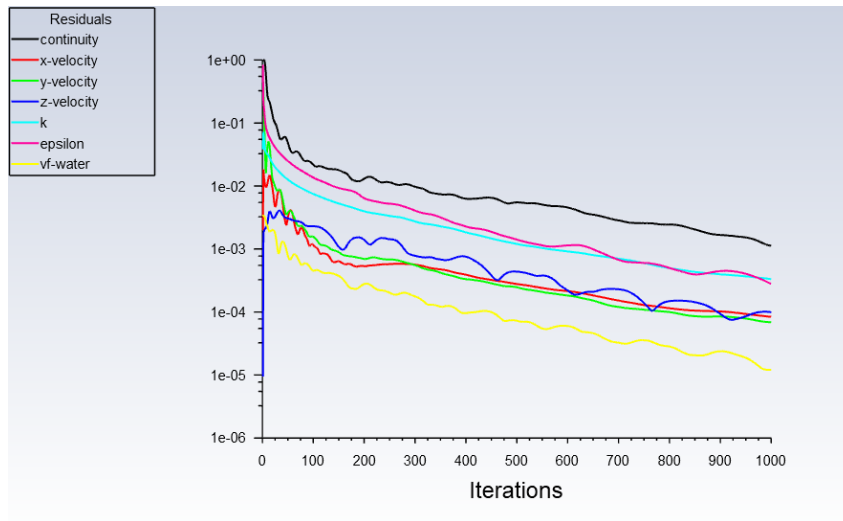
Fonte: Próprio Autor.

Figura 141 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

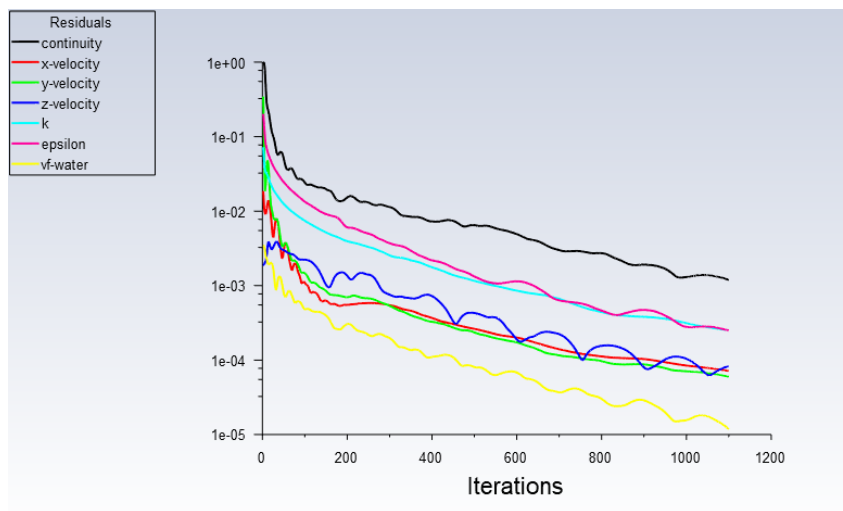
Fonte: Próprio Autor.

Figura 142 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

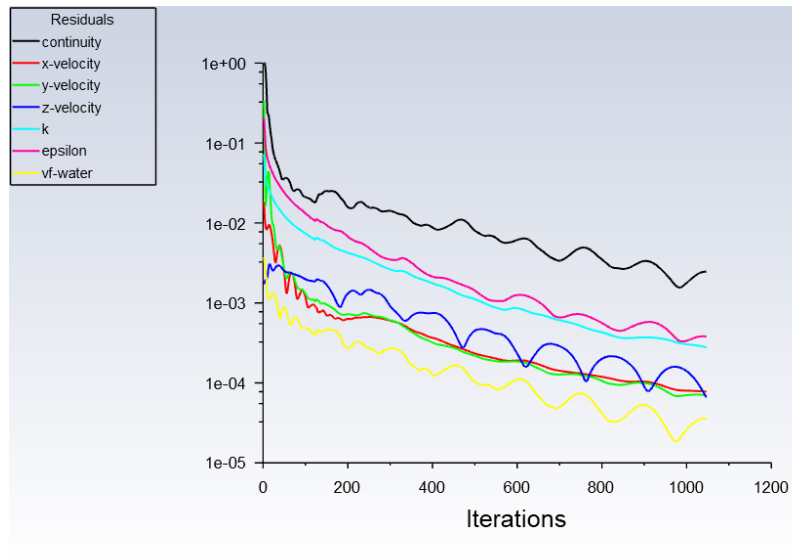
Fonte: Próprio Autor.

Figura 143 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $10,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

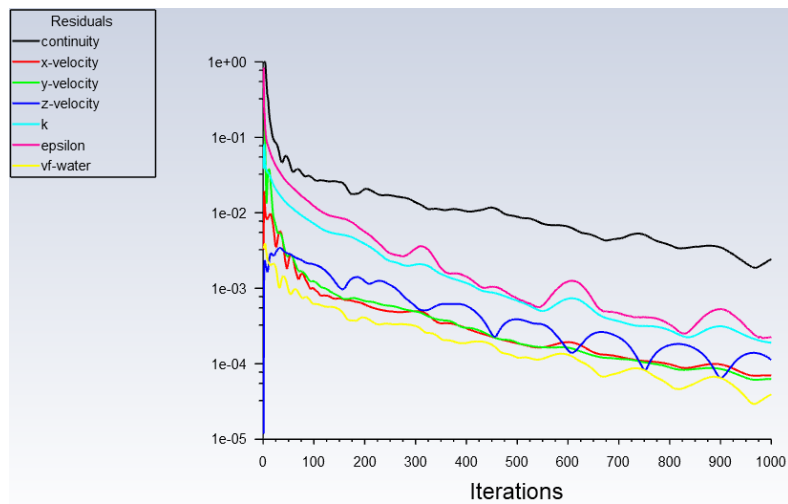
Fonte: Próprio Autor.

Figura 144 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $11,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

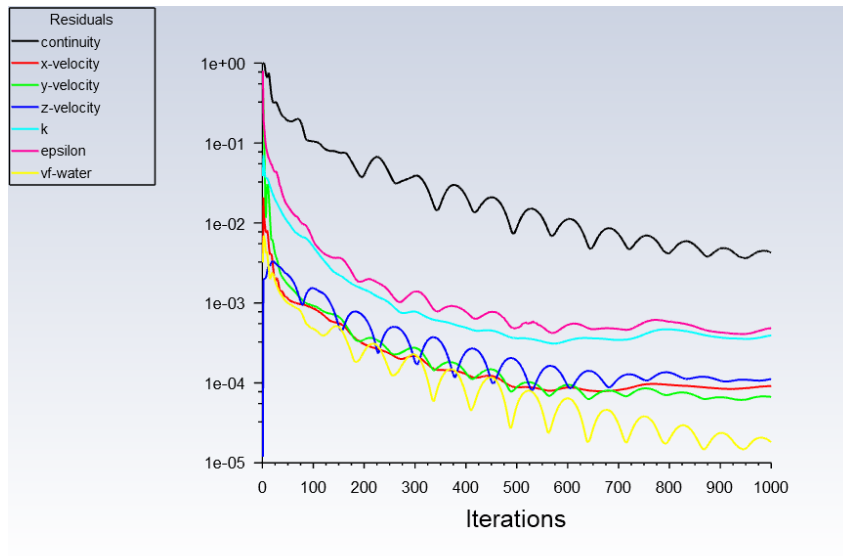
Fonte: Próprio Autor.

Figura 145 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $13,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

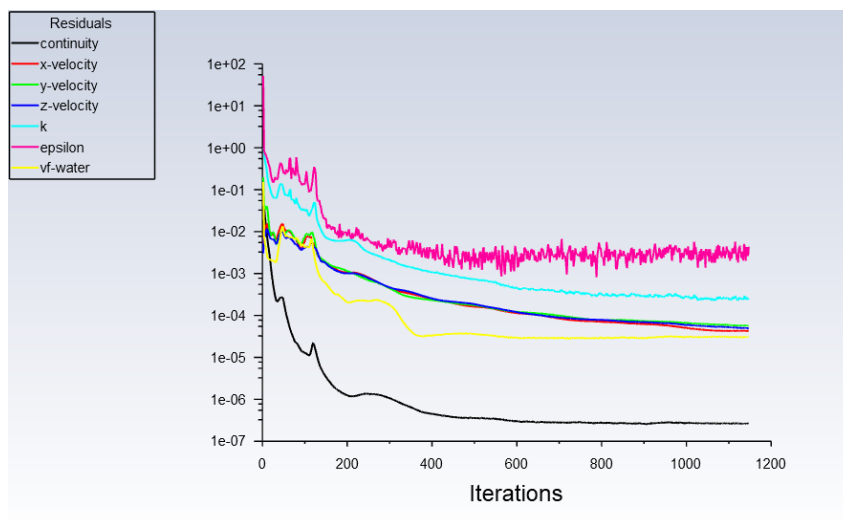
Fonte: Próprio Autor.

Figura 146 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: Próprio Autor.

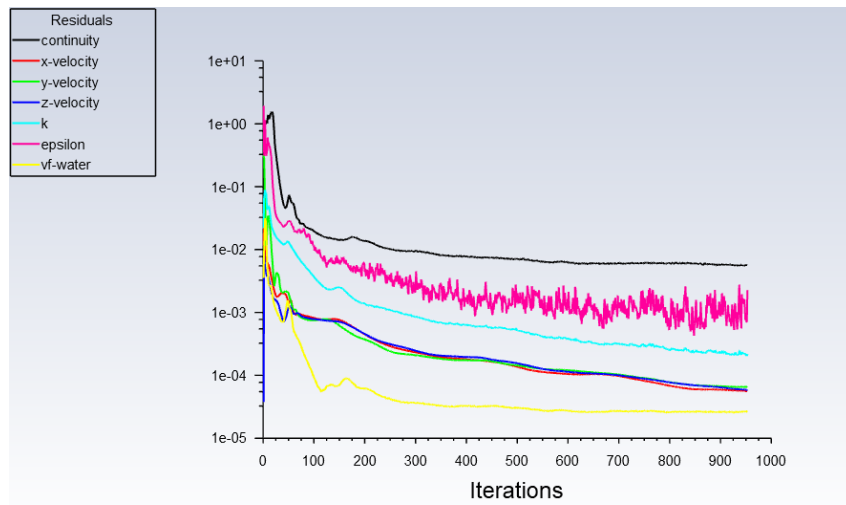
Figura 147 – Resíduos para a simulação do modelo dos DP para uma vazão de $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fonte: Próprio Autor.

Figura 148 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 1 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.

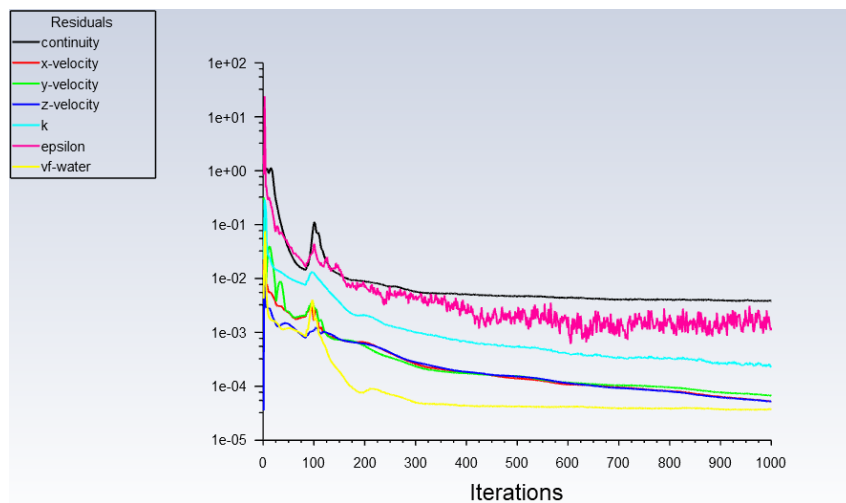
Fonte: Próprio Autor.

Figura 149 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 5 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



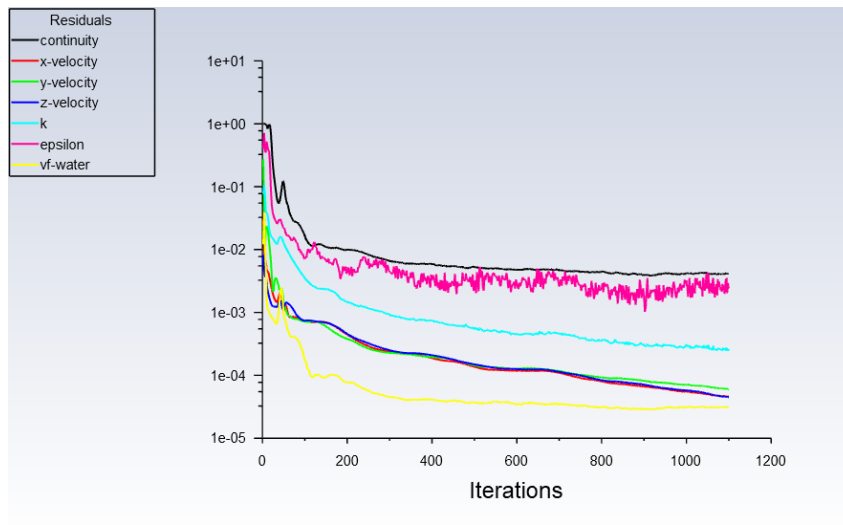
Fonte: Próprio Autor.

Figura 150 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 10 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



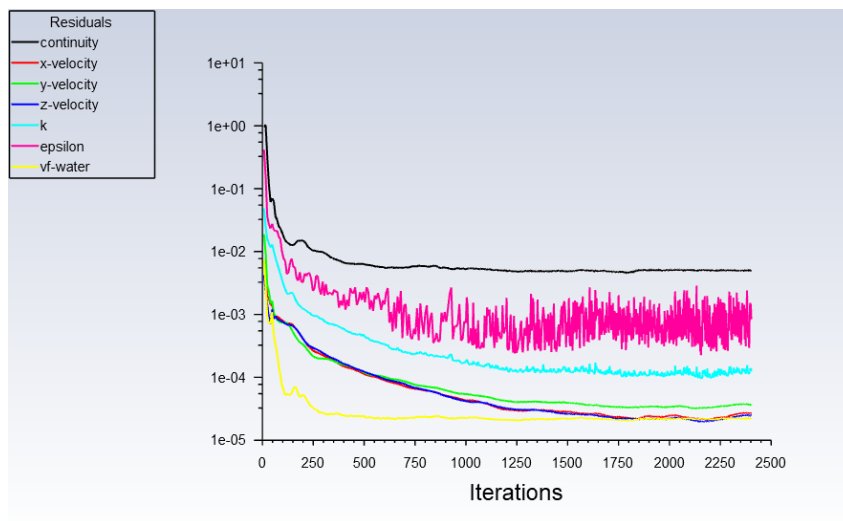
Fonte: Próprio Autor.

Figura 151 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um desnível de 15 cm para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



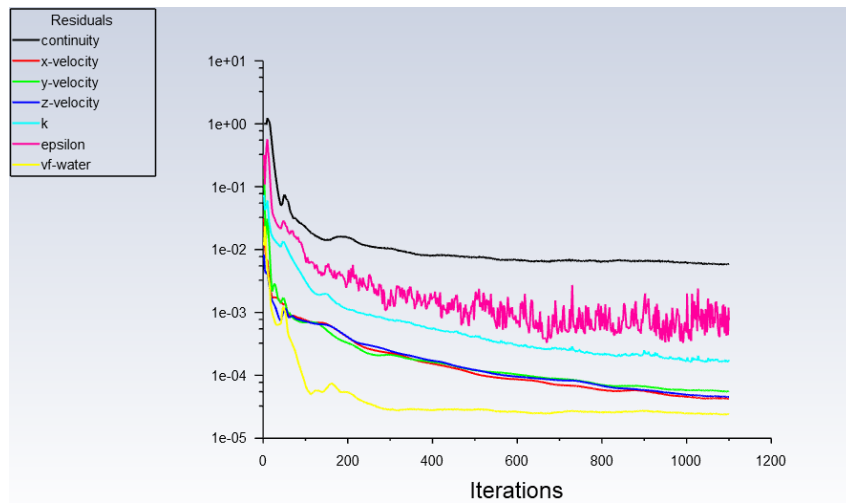
Fonte: Próprio Autor.

Figura 152 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com um ciclo fechado para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



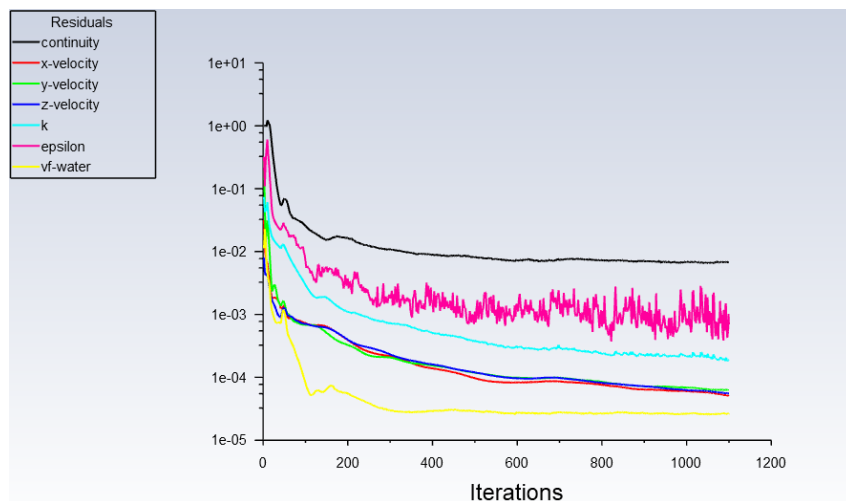
Fonte: Próprio Autor.

Figura 153 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com dois ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



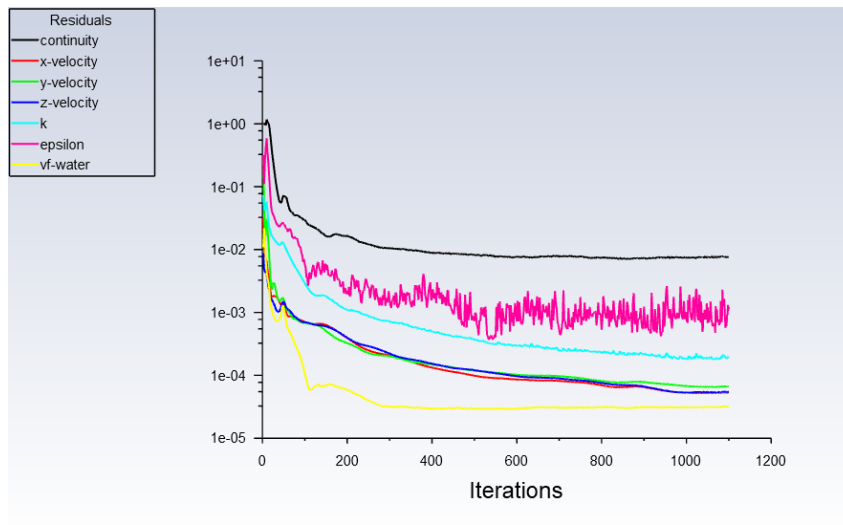
Fonte: Próprio Autor.

Figura 154 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com três ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



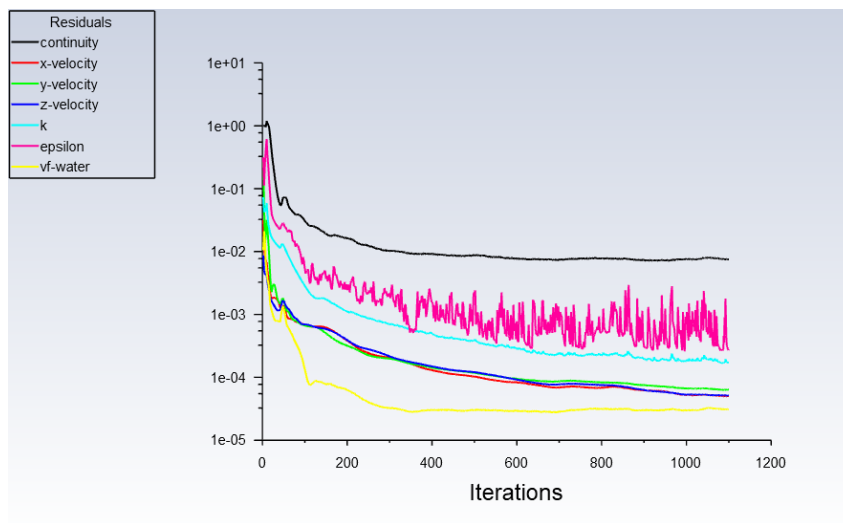
Fonte: Próprio Autor.

Figura 155 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com quatro ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 156 – Resíduos para a simulação do modelo dos BP com cinco ciclos fechados para uma vazão de $16 \text{ m}^3/\text{s}$.



Fonte: Próprio Autor.

Anexos



Dados da ETE Barueri

Tabela 38 – Dados de vazão dos medidores Venturi para o mês de junho de 2020 com frequência de 5 em 5 minutos.

Data	Hora	Vazão		
		Módulo 1 (L/s)	Módulo 2 (L/s)	Total (m ³ /s)
01/06/2020	07:13:47	7536	5291	12,8
01/06/2020	07:18:47	7207	5236	12,4
01/06/2020	07:23:47	7179	5148	12,3
01/06/2020	07:28:47	7141	5078	12,2
01/06/2020	07:33:47	7076	5187	12,3
01/06/2020	07:38:47	7217	5216	12,4
01/06/2020	07:43:47	7308	5129	12,4
01/06/2020	07:48:47	7271	5166	12,4
01/06/2020	07:53:47	7165	5369	12,5
01/06/2020	07:58:47	7087	5279	12,4
01/06/2020	08:03:47	7039	5145	12,2
01/06/2020	08:08:47	7128	5158	12,3

Fonte: Sabesp (2020).

Tabela 39 – Dados de vazão dos medidores ultrassom para o mês de junho de 2020 com frequência de 5 em 5 minutos.

Data	Hora	Vazão [m ³ /s]				Total
		Ebara 1	Ebara 2	Ebara 3	Ebara 4	
01/06/2020	07:13:47	6,29	0,00	4,35	0,00	10,65
01/06/2020	07:18:47	6,69	0,00	4,41	0,00	11,10
01/06/2020	07:23:47	6,59	0,00	4,57	0,00	11,16
01/06/2020	07:28:47	6,70	0,00	4,16	0,00	10,86
01/06/2020	07:33:47	6,71	0,00	4,49	0,00	11,20
01/06/2020	07:38:47	6,28	0,00	4,51	0,00	10,79
01/06/2020	07:43:47	6,46	0,00	4,30	0,00	10,76
01/06/2020	07:48:47	6,60	0,00	4,67	0,00	11,27
01/06/2020	07:53:47	6,46	0,00	4,39	0,00	10,85
01/06/2020	07:58:47	6,71	0,00	4,41	0,00	11,13
01/06/2020	08:03:47	6,51	0,00	4,65	0,00	11,16
01/06/2020	08:08:47	6,40	0,00	4,40	0,00	10,79

Fonte: Sabesp (2020).

Tabela 40 – Dados de vazão dos medidores Venturi para o mês de setembro de 2020 com frequência de 1 em 1 hora.

Data e hora	Vazão		
	Módulo 1 (L/s)	Módulo 2 (L/s)	Total (m ³ /s)
30/9/20 0:00	8.860,17	7.577,83	16.438,00
30/9/20 1:00	8.710,58	7.493,25	16.203,83
30/9/20 2:00	8.577,00	7.331,08	15.908,08
30/9/20 3:00	8.357,75	7.102,67	15.460,42
30/9/20 4:00	8.031,67	6.923,75	14.955,42
30/9/20 5:00	7.806,92	6.731,00	14.537,92
30/9/20 6:00	6.968,75	6.047,67	13.016,42
30/9/20 7:00	5.576,67	4.856,58	10.433,25
30/9/20 8:00	5.549,08	4.690,92	10.240,00
30/9/20 9:00	5.590,92	4.684,58	10.275,50
30/9/20 10:00	5.447,75	4.763,83	10.211,58
30/9/20 11:00	5.560,67	4.931,67	10.492,33

Fonte: Sabesp (2020).

Tabela 41 – Dados de vazão dos medidores ultrassom para o mês de setembro de 2020 com frequência de 1 em 1 hora.

Data e hora	Vazão (m ³ /s)				TOTAL
	EBARA 01	EBARA 02	EBARA 03	EBARA 04	
30/9/20 0:00	6,68	0,00	4,56	5,55	16,78
30/9/20 1:00	6,68	0,00	4,58	5,54	16,80
30/9/20 2:00	6,64	0,00	4,59	5,48	16,70
30/9/20 3:00	6,51	0,00	4,51	5,37	16,39
30/9/20 4:00	6,35	0,00	4,19	5,22	15,76
30/9/20 5:00	6,42	0,00	4,41	4,97	15,80
30/9/20 6:00	6,43	0,00	2,86	4,91	14,19
30/9/20 7:00	6,40	0,00	0,00	4,74	11,15
30/9/20 8:00	6,30	0,00	0,00	4,59	10,89
30/9/20 9:00	6,31	0,00	0,00	4,56	10,87
30/9/20 10:00	6,41	0,00	0,00	4,64	11,06
30/9/20 11:00	6,52	0,00	0,00	4,89	11,40

Fonte: Sabesp (2020).

B

Dados experimentais para o vertedor

Tabela 42 – Valores de C_Q e h/P obtidos a partir de ensaios no modelo reduzido.

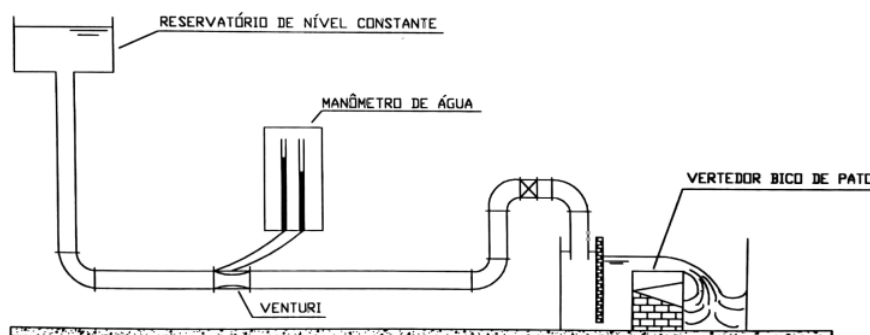
C_Q [-]	h/P [-]
0,076657	0,48099527
0,090373	0,47937631
0,089154	0,52145389
0,097384	0,46578727
0,104699	0,46341945
0,111404	0,44778999
0,112624	0,45255211
0,115686	0,44627014
0,118415	0,44645783
0,121158	0,44371147
0,12512	0,44094666
0,123414	0,45238793
0,127254	0,44270186
0,132131	0,44350476
0,137922	0,43141627
0,143104	0,43756281
0,146456	0,43263632
0,153772	0,42379576
0,15621	0,43175073
0,160172	0,4246993
0,164744	0,4246494
0,168097	0,42263207
0,170658	0,42659353
0,175108	0,42272213
0,177241	0,42493018
0,182423	0,41765819
0,183154	0,41817058
0,188946	0,41715399
0,188946	0,41715399
0,194676	0,41666886
0,199796	0,41487174
0,205161	0,41289553
0,209733	0,41220899
0,219486	0,40828079
0,221925	0,40890099
0,225156	0,40799897
0,229545	0,41276321
0,237043	0,41115696
0,246797	0,40842648
0,255575	0,4062856

Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Modelo reduzido (FCTH)

O esquema hidráulico para o modelo reduzido e as principais dimensões do modelo reduzido podem ser vistos nas Figuras 157 e 158, nessa ordem.

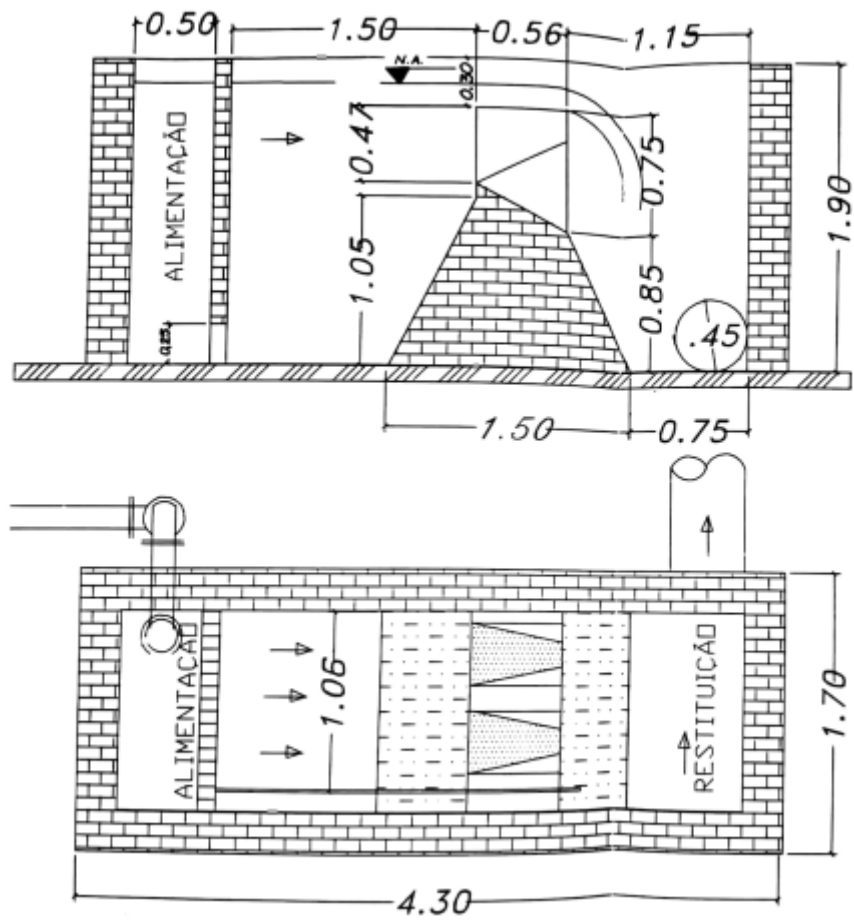
Figura 157 – Circuito hidráulico usado para realizar os ensaios no modelo reduzida usado pela FCTH.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

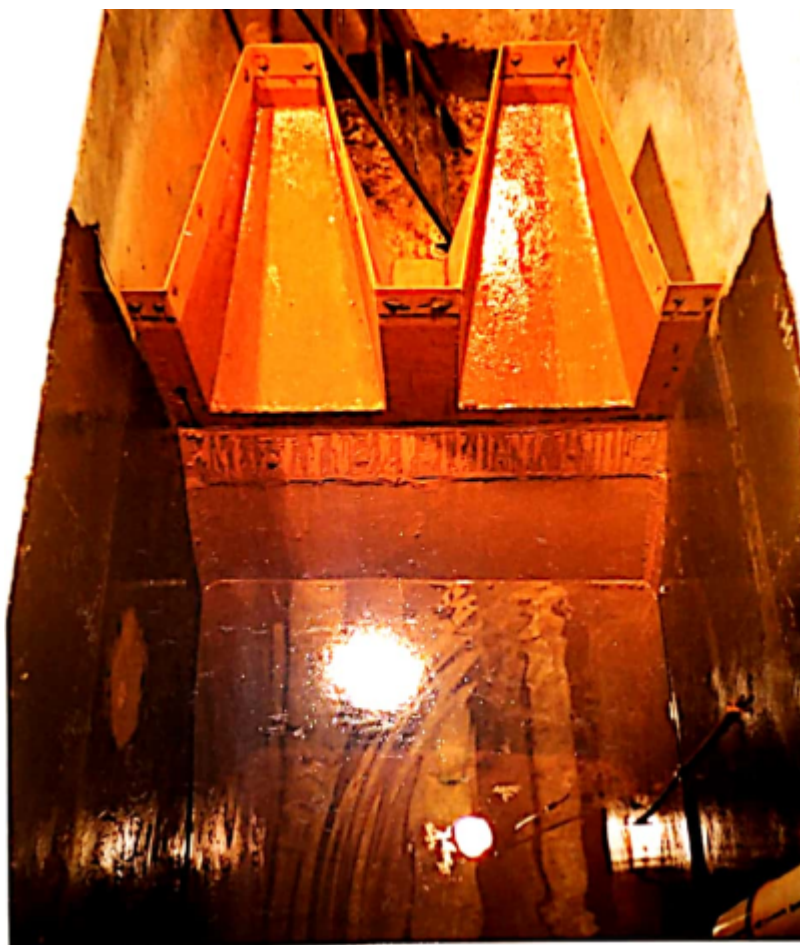
O modelo reduzido e o escoamento no modelo reduzido podem ser vistos nas Figuras 159 e 160, nessa ordem. Trata-se de um modelo com escala geométrica de 1:2,667.

Figura 158 – Esquema e dimensões do modelo reduzida usado pela FCTH.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Figura 159 – Vista superior do modelo em escala reduzida usado pela FCTH.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

Figura 160 – Vista do escoamento no modelo reduzido usado pela FCTH.



Fonte: Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (1995).

ÍNDICE

ARSESP, 36

Bicos de Pato, 66

Capacidade hidráulica, 71

CFD, 34

Consistência, 40

Convergência, 40

Decantadores Primários, 66

Decantadores Secundários, 68

DFC, 34

Equação de Navier-Stokes, 38

Estabilidade, 40

ETE, 33

ETE Barueri, 64

Modelo para a entrada dos DP, 85

Modelos de turbulência, 51

Modelos para os BP, 83

Método dos Volumes Finitos, 45

Plansab, 35

Sabesp, 34

Saneamento básico, 33

Tanques de Aeração, 66

Ultrassom, 70

Venturi, 70