

Modelagem computacional da distribuição de vazões volumétricas nos decantadores primários de uma estação de tratamento de esgoto

• **Data de entrada:**
17/03/2023
• **Data de aprovação:**
03/07/2023

Computational modeling of the flow distribution in the primary settlers of a wastewater treatment plant

Amauri Oliveira de Almeida¹ | Jayme Pinto Ortiz^{*}

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.037>

ORCID ID

Almeida AO  <https://orcid.org/0009-0007-2779-4612>

Ortiz JP  <https://orcid.org/0000-0002-5021-3384>

Resumo

As estações de tratamento de esgoto (ETEs) são instalações centrais na estrutura do saneamento básico e apresentam diversos desafios tecnológicos para uma operação mais eficiente, não somente do tratamento, mas também da eficiência energética. Com foco nesses desafios, este trabalho utilizou uma abordagem de dinâmica dos fluidos computacional (CFD) para analisar as distribuições das vazões entre os decantadores primários (DPs) da ETE de Barueri, SP. Os modelos e as simulações foram desenvolvidos utilizando-se o Ansys Fluent, que utiliza o método dos volumes finitos para a condição de regime permanente. Foram utilizadas malhas do tipo híbrida, compostas por elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos. O modelo de turbulência *kappa-epsilon* padrão com funções de parede foi adotado. Com a determinação da distribuição das vazões entre os DPs, concluiu-se que os DPs mais próximos às entradas têm menor vazão por conta do campo de velocidades dessa região. As simulações mostraram que vazões iguais ou inferiores à vazão de pico prevista para 2040, 17,5 m³/s em cada módulo, não ultrapassam a capacidade da estrutura do canal dos DPs. Simulações com saídas assimétricas mostraram que a posição dos DPs em relação às entradas continua sendo o fator preponderante na distribuição das vazões. Por outro lado, as simulações com entradas assimétricas provaram que uma diferença acentuada entre as vazões das duas entradas do canal de alimentação dos DPs altera a distribuição das vazões entre eles.

Palavras chaves: Estação de tratamento de esgoto. Dinâmica dos fluidos computacional. Distribuição de vazões.

Abstract

Wastewater treatment plants (WWTP) are central facilities in the basic sanitation structure and face several technological challenges for a more efficient operations not only regarding treatment but also energy efficiency. Focusing on these challenges, this study used computational fluid dynamics (CFD) to analyze flow distributions at the entrance of the Primary Settlers (PS) in the Barueri WWTP. The models and simulations were developed using Ansys Fluent,

¹ Universidade de São Paulo – São Paulo – São Paulo – Brasil.

* **Autor correspondente:** jpportiz@usp.br

which employs the Finite Volume Method for steady flow condition. Hybrid meshes composed of prismatic, polyhedral, and hexahedral elements were used. The standard kappa-epsilon turbulence model with wall functions was adopted. This study determined the flow distribution between the PS and concluded that the PS closer to the entrances have lower flow due the velocity field in the region. Moreover, the simulations showed that flows equal to or less than the peak flow forecast for 2040, 17.5 m³/s in each module, remain within the capacity of the PS channel structure. Simulations with asymmetric outlets showed that the position of the PS in relation to the inlets continues to be the preponderant factor in flow distribution. The simulations with asymmetric inlets proved that large difference between the flows of the two inlets of the PS feed channel alters the distribution of flows between the PS.

Keywords: Wastewater treatment plants. Computational fluid dynamics. Flow distribution.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de ampliação de estações de tratamento de esgoto (ETEs) existentes ou de criação de novas nos dias de hoje passa necessariamente pela análise de sustentabilidade da gestão financeira e ambiental dos processos de tratamento nessas estações, tirando o máximo proveito da infraestrutura existente e operacional das ETEs em operação. Além disso, a eficiência energética em ETEs tem sido tema de diversas publicações recentes. Panepinto *et al.* (2016) apresentam um trabalho de eficiência energética para a estação de tratamento de esgoto da região metropolitana de Torino, na Itália, com população de 2,2 milhões de habitantes, para uma planta com vazão de operação de 7,12 m³/s. Longo *et al.* (2016) desenvolveram um estudo de *benchmarking* entre diferentes ETEs, com foco na eficiência energética do tratamento, buscando apresentar um diagnóstico de consumo de energia a partir de um amplo levantamento de dados e focalizando a importância da aplicação de método estatístico e de desenvolvimento de modelagem. O novo marco regulatório do saneamento básico, introduzido pela Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico no Brasil em busca da universalização do tratamento de esgoto no país (Brasil, 2020), deve impulsionar o desempenho operacional das ETEs existentes com exigências no desenvolvimento de novos projetos que tenham metas de desempenho, à luz da liberação de recursos auditados atendendo

a essas exigências. Nesse sentido, a utilização de *computational fluid dynamics* (CFD) na determinação do comportamento e da distribuição hidráulica ao longo dos processos de tratamento, passa a ser uma ferramenta importante na otimização dos projetos hidráulicos de ETEs (Almeida; Ortiz, 2022).

O objetivo deste trabalho é determinar a distribuição de vazões volumétricas nos decantadores primários (DPs) da ETE Barueri da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP), a partir da utilização de CFD (Tu; Yeoh; Liu, 2018; Versteeg; Malalasekera, 2007), buscando subsidiar decisões, do ponto de vista de controle hidráulico, para o embasamento de alternativas operacionais e de novos projetos de expansão, dentro da visão de economia circular e de eficiência energética da ETE.

O esgoto sanitário chega à ETE por meio de um emissário, que está enterrado a 30 metros de profundidade, e é direcionado para o poço distribuidor, a partir do qual é bombeado para o canal de alimentação dos canais de grades pela atuação de até quatro bombas. As grades mecanizadas (GMs) retêm os detritos maiores, que são separados e enviados para um aterro sanitário. O tratamento preliminar dessa estação conta com quatro caixas de areia (CAs) seguidas de quatro tanques de pré-aeração (TPs) e dois vertedores que distribuem a vazão para dois módulos, cada um com oito DPs. Na Figura 1, pode ser visualizada

a estação como um todo, com a identificação dos dois módulos com vazão total de projeto de $16 \text{ m}^3/\text{s}$, que teoricamente podem operar cada um com uma vazão nominal de $8 \text{ m}^3/\text{s}$. Na Figura 2, é possível visualizar a disposição das entradas do canal de alimentação dos DPs para um dos módulos, seu canal de alimentação e a disposição dos próprios decantadores.

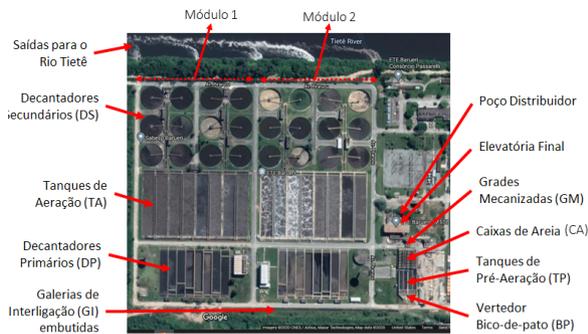


Figura 1 – Vista aérea da Estação de Tratamento de Esgoto Barueri.

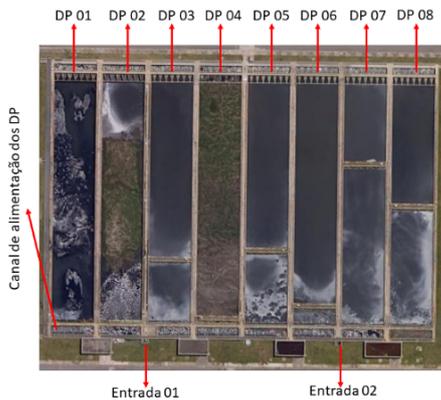


Figura 2 – Vista aérea da região dos decantadores primários.

2 METODOLOGIA

Este trabalho se desenvolveu nas seguintes etapas básicas: a construção das geometrias dos modelos baseados nas dimensões dos protótipos em escala real; a determinação dos modelos com a definição das condições de entrada e saída, com suas respectivas malhas, e das condições de contorno; a validação do modelo; e a simulação *CFD* dos escoamentos (Ansys, 2021a).

2.1 Geometrias dos modelos

Duas simplificações foram feitas em relação à geometria do protótipo para a construção da geometria do modelo computacional, com a finalidade de tornar a simulação do modelo compatível com os recursos computacionais disponíveis neste trabalho: a redução do comprimento dos DPs, de 98 para 5 metros 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.

Nas figuras 3 e 4, podem ser visualizadas vistas isométricas de jusante da geometria da região dos DPs para um único módulo e de montante, com a omissão de duas superfícies para permitir a visualização da geometria interna, nessa ordem.

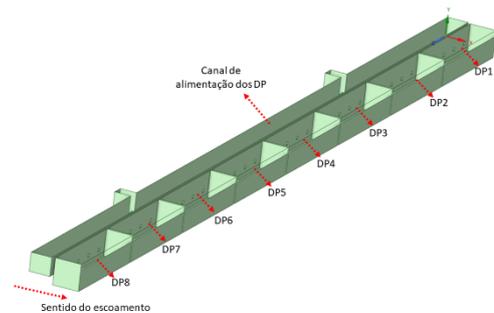


Figura 3 – Vista de jusante da geometria do modelo da região dos decantadores primários.

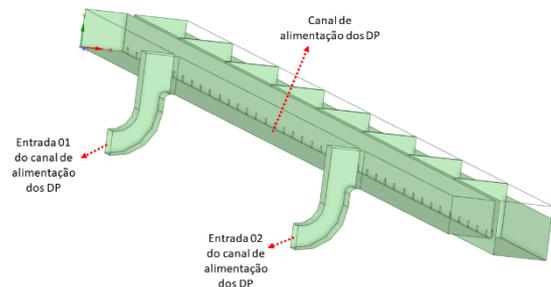


Figura 4 – Vista de montante da geometria do modelo da região dos decantadores primários com a omissão de algumas paredes.

Nas figuras 5 e 6, visualizam-se as regiões simuladas no modelo com as indicações de entrada e saída do escoamento. O modelo é composto basicamente por duas entradas, um canal de alimentação com 40 saídas, cinco para cada DP, e os oito DPs na versão simplificada. 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 decantadores e os níveis d'água (NAs) do canal de alimentação.

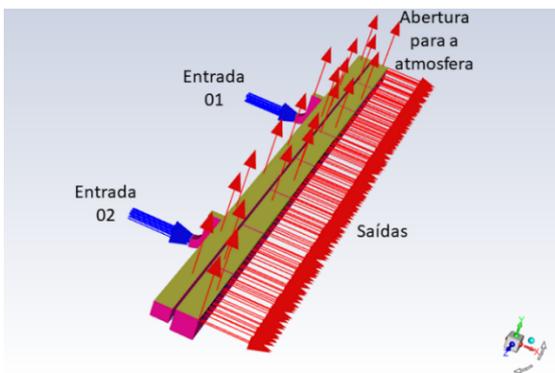


Figura 5 – Modelo para a região dos decantadores primários com as indicações de entradas e saídas.

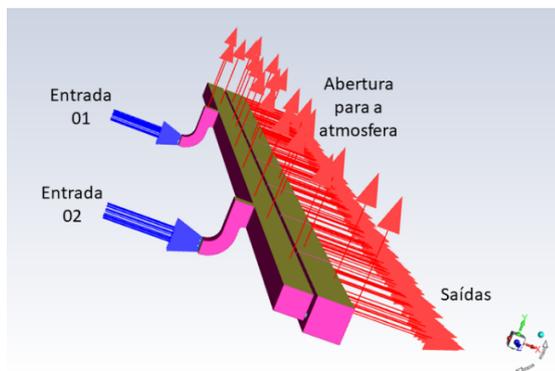


Figura 6 – Modelo para a região dos decantadores primários com as indicações de entradas e saídas - vista lateral.

2.2 Malhas

A malha para as simulações do modelo da região dos DPs é constituída por elementos prismáticos, poliédricos e hexaédricos, como pode ser observado

na Figura 7. O número de elementos é 2.009.460, seus tamanhos variam de 3 a 16 centímetros. Na Tabela 1, é possível verificar os principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo dos DPs. Esses valores satisfazem as boas práticas de simulações *CFD* e as recomendações da Ansys. Na Figura 8, podem ser observados os elementos internos da malha utilizada na simulação da região de entrada dos DPs.

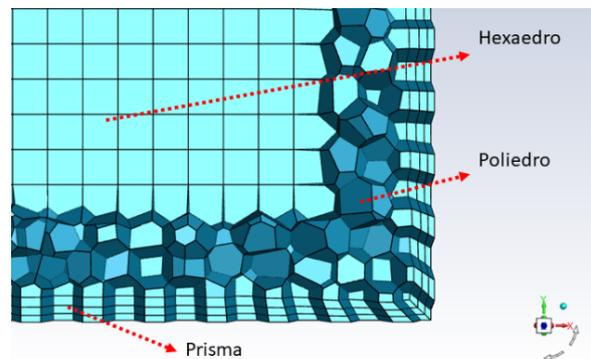


Figura 7 – Malha utilizada na simulação da entrada dos decantadores primários.

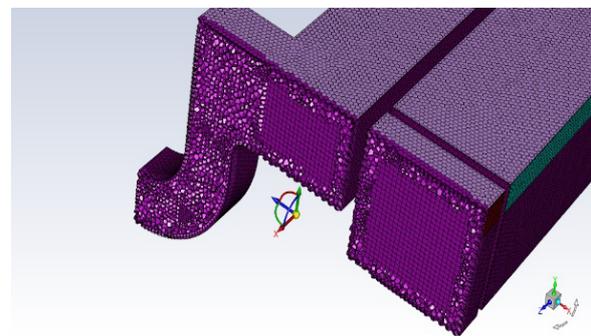


Figura 8 – Detalhe em corte da malha utilizada na simulação da entrada dos decantadores primários.

Tabela 1 – Principais parâmetros de qualidade da malha utilizada nas simulações do modelo da região dos decantadores primários.

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	> 0,1	< 0,5	< 10

2.3 Fundamentação teórica

As equações que modelam o escoamento dos fluidos deste estudo são a equação da continuidade (Equação 1) e a Equação 2, conhecida

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m U_j)}{\partial x_j} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho_m U_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_m U_i U_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(P)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{U'_i U'_j}) \quad (2)$$

Como se trata de um escoamento bifásico (água/ar), as massas específicas e viscosidades dinâmicas da água (ρ_a e μ_a) e do ar (ρ_{ar} e μ_{ar}) são calculadas considerando as respectivas frações volumétricas em cada célula, resultando nas células, ρ_m e μ_m , conforme representado na Equação 3 e na Equação 4 (Ansys, 2021b). Cada célula é representada, portanto, por um volume elementar de fluido, e o método é conhecido por *volume of fluid (VOF)*.

$$\rho_m = \alpha_a \rho_a + \alpha_{ar} \rho_{ar} \quad (3)$$

$$\mu_m = \alpha_a \mu_a + \alpha_{ar} \mu_{ar} \quad (4)$$

Para fechar o problema da turbulência, utiliza-se o modelo de duas equações (Versteeg; Malalasekera,

como *Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)*, que apresenta os tensores de Reynolds, que necessitam ser modelados para tornar a solução do sistema possível.

2007; Wilcox, 1994; Pope, 2000). Adotando-se a hipótese de Boussinesq (Equação 5) para modelar as tensões de Reynolds, surge uma nova variável: a viscosidade turbulenta, μ_t (equação 6) que é uma propriedade do escoamento turbulento, definindo-se a expressão $2\mu_t E_{ij}$ em analogia com a Lei de Newton da Viscosidade. A viscosidade turbulenta μ_t é calculada a partir da energia cinética turbulenta (k) na Equação 7 e da taxa de dissipação turbulenta (ϵ) na Equação 8 (Wilcox, 1994).

$$-\rho U'_i U'_j = 2\mu_t E_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \mathbf{U}) = \text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \text{grad } k \right) + 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - \rho \epsilon \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \mathbf{U}) = \text{div} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \text{grad } \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t E_{ij} \cdot E_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (8)$$

Desde o trabalho de Rodi (1980), são inúmeros os trabalhos publicados de modelagem de turbulência com a aplicação em escoamentos hidráulicos com

superfície livre. Os modelos de fechamento de turbulência de duas equações tipo *kappa-epsilon* (κ - ϵ), resolvidos pelo método de volume de fluido

(VOF), em função de sua relação custo-benefício, tem destacada aplicação em escoamentos em canais, como mostra a literatura recente (Zeng *et al.*, 2017), justificando-se sua aplicação neste trabalho. Os coeficientes das equações 6, 7 e 8 (C_{μ} , C_{1e} , C_{2e} , σ_k , σ_ϵ) já estão inseridos no Ansys Fluent (Ansys, 2021a, 2021b) e correspondem a constantes ajustadas para a aplicação do modelo κ - ϵ padrão com função de parede (Pope, 2000).

As simulações dos escoamentos foram realizadas com a utilização da ferramenta Ansys Fluent, que usa o método dos volumes finitos para calcular o escoamento. As malhas utilizadas nas simulações foram híbridas, compostas por elementos prismáticos, tetraédricos e hexaédricos, e foram limitadas a cerca de 2 milhões de elementos. O modelo de turbulência utilizado foi o *kappa-epsilon* e o modelo multifásico adotado foi o VOF. As condições de contorno estabelecidas foram: velocidade uniforme nas entradas e saídas com pressão atmosférica.

2.4 Configurações do Ansys Fluent

As configurações gerais adotadas nas simulações seguiram o método *pressure based* em escoamento permanente, adotando-se pressão atmosférica de 101.325 Pa e massa específica do ar de 1,225 kg/m³. Na Tabela 2, podem ser visualizadas algumas características dos computadores dedicados ao estudo.

Tabela 2 – 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	18GB

3 RESULTADOS

Almeida e Ortiz (2022) apresentaram um estudo de validação do modelo computacional de distribuição de vazões no vertedor labirinto, conhecido como bico de pato, de um módulo do tratamento

preliminar da ETE Barueri. Essa validação foi possível a partir de trabalho de medição de vazão em protótipo (FCTH, 1995). Neste trabalho, complementa-se a análise com informações de projeto da ETE Barueri e de novas medições de NA no protótipo do canal de entrada dos DPs.

O valor de projeto do NA do canal de alimentação dos DPs para uma vazão de 8 m³/s é de 2,25 m, e o valor obtido na simulação é de 2,28 m, o que implica um erro de 1,3%. Na Tabela 3, são apresentados os valores medidos de NA com medições no protótipo e seus respectivos valores de vazão. Comparando-se os valores obtidos para as simulações de vazões de 8 e 10,5 m³/s com os dados experimentais obtidos para vazões de 8,72 e 10,59 m³/s, obtêm-se erros de 0% e 1,7%, nessa ordem. Os resultados são concordantes, visto que os erros ficam abaixo de 2%, o que é um bom indicativo quanto à confiabilidade do modelo computacional.

O gráfico da Figura 9 permite visualizar as tendências concordantes entre os valores simulados e os valores experimentais.

Tabela 3 – Dados de vazão e nível d'água para o canal de alimentação dos decantadores primários obtidos experimentalmente e por meio de simulações.

Experimental		Simulado	
Vazão [m ³ /s]	NA [m]	Vazão [m ³ /s]	NA [m]
8,72	2,28	8,0	2,28
9,42	2,33	10,5	2,35
9,68	2,34	11,5	2,39
10,18	2,38	13,5	2,45
10,37	2,31	16,0	2,51
10,59	2,39	17,5	2,62

Para o levantamento da curva cota vazão no canal de alimentação dos decantadores primários, foram realizadas simulações com valores crescentes de vazão, de acordo com a seguinte sequência para um módulo: vazão atual nominal (8 m³/s); vazão de pico atual (13,5 m³/s); e vazões previstas para 2030 (média de 10,5 e pico de 16 m³/s) e 2040 (média de 11,5 e pico de 17,5 m³/s).

Na Tabela 4, estão dispostos 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 e 2040.

Na Figura 10, pode ser visualizada a curva cota vazão para valores de vazão de 8 até 17,5 m³/s, que permite a determinação dos valores das vazões a partir do valor do NA no canal.

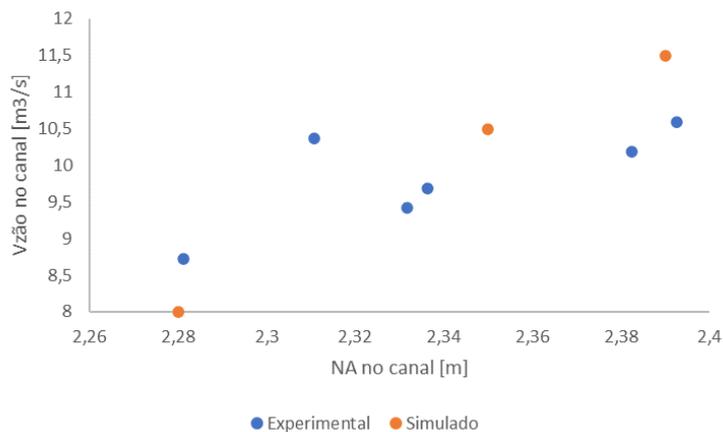


Figura 9 – Comparação entre os resultados obtidos com o modelo computacional e com os dados experimentais.

Tabela 4 – Nível da água no canal dos 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

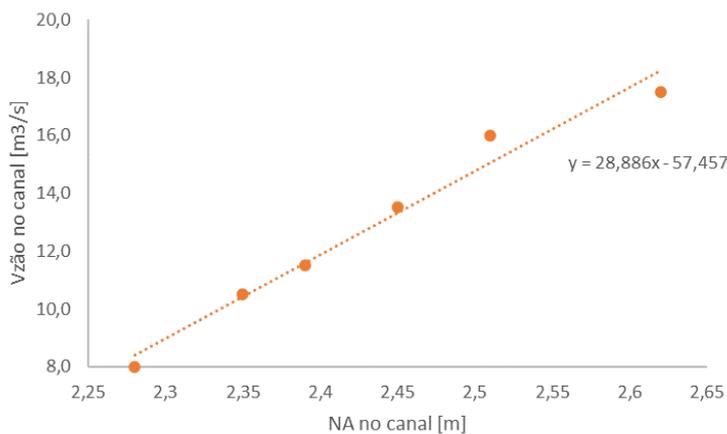


Figura 10 – Curva cota-vazão obtida com as simulações.

Na Tabela 5, estão dispostos os valores e as correspondentes porcentagens das vazões recebidas por cada um dos oito DPs. Esses resultados foram obtidos para simulações com o modelo da entrada dos DPs para uma vazão de 8 m³/s, e as frações volumétricas da água podem ser observadas na Figura 11. Distribuições similares foram encontradas para simulações com 10,5, 11,5, 13,5, 16 e 17,5 m³/s. Os resultados obtidos para a distribuição da vazão entre os oito DPs para todos os valores das vazões simuladas seguem o mesmo padrão, que pode ser observado na Figura 13.

Os DPs 2, 3, 6 e 7 recebem menos vazão quando comparados aos DPs 1, 4, 5 e 8, como pode ser observado na Figura 13. Essas distribuições de vazões decorrem dos campos de velocidades no canal, que podem ser visualizados na Figura 12. Pode-se notar que as velocidades na direção do escoamento (direção do eixo x) são menores nas regiões do canal entre o DP 2 e o DP 3 e, também, entre o DP 6 e o DP 7.

Tabela 5 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão de 8 m³/s.

Tipos de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	4,00	50,00
	Entrada 2	4,00	50,00
Saídas	DP 1	1,06	13,19
	DP 2	0,95	11,88
	DP 3	0,95	11,92
	DP 4	1,05	13,13
	DP 5	1,05	13,09
	DP 6	0,95	11,89
	DP 7	0,95	11,82
	DP 8	1,05	13,09

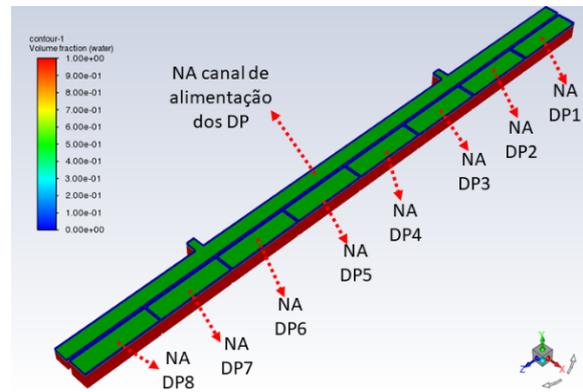


Figura 11 – Resultado para as frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo dos decantadores primários para uma vazão de 8 m³/s.

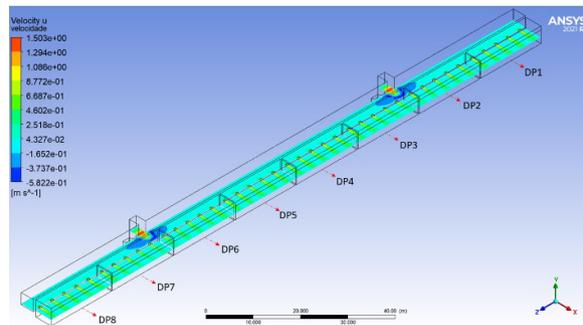


Figura 12 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos decantadores primários para uma vazão de 8 m³/s.

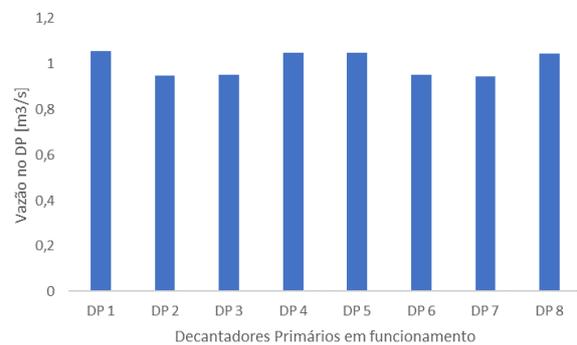


Figura 13 – Distribuição da vazão entre os decantadores primários para a simulação do modelo para uma vazão de 8 m³/s

Nas tabelas 6 e 7, estão resumidos os valores da distribuição de vazão entre os DPs para a simulação com as configurações assimétricas

nas saídas. Esses resultados também estão sintetizados de forma gráfica nas figuras 16 (dados da Tabela 6) e 19 (dados da Tabela 7). As frações volumétricas da água para essas simulações podem ser observadas nas figuras 14

e 17. E, nas figuras 15 e 18, podem ser visualizadas as distribuições das velocidades na direção x ao longo da estrutura para as configurações assimétricas com quatro e cinco DPs nas saídas, respectivamente.

Tabela 6 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s

Tipo de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	4,00	50,00
	Entrada 2	4,00	50,00
Saídas	DP 1	2,04	25,48
	DP 2	1,90	23,81
	DP 3	2,04	25,53
	DP 4	2,01	25,18

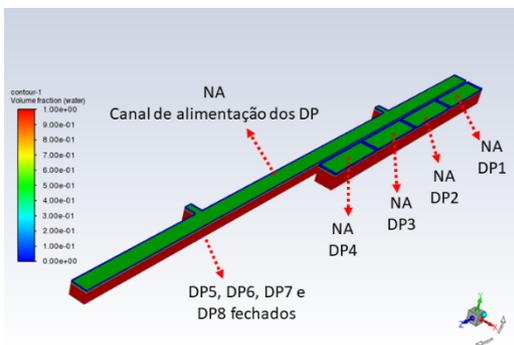


Figura 14 – Frações volumétricas da água obtidas com a simulação do modelo com quatro decantadores primários operando de forma assimétrica para vazão de 8 m³/s.

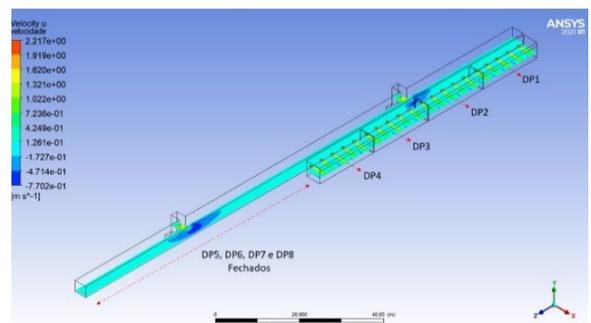


Figura 15 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos decantadores primários numa configuração assimétrica para uma vazão de 8 m³/s.

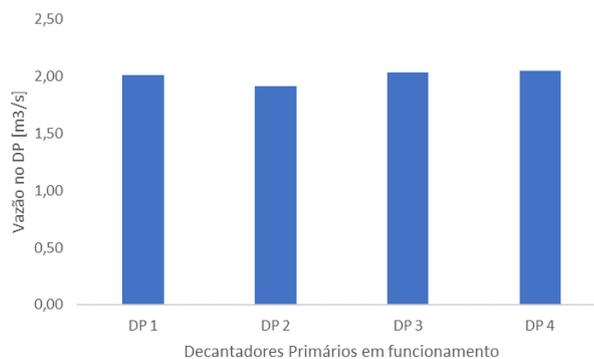


Figura 16 – Vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s.

Tabela 7 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s.

Tipos de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	4,00	50,00
	Entrada 2	4,00	50,00
Saídas	DP 1	1,66	20,78
	DP 2	1,50	18,71
	DP 3	1,62	20,31
	DP 4	1,62	20,30
	DP 8	1,59	19,91

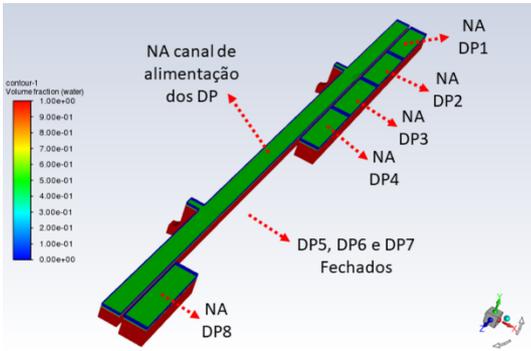


Figura 17 – Frações volumétricas da água obtidos com a simulação do modelo com cinco decantadores primários operando de forma assimétrica para uma vazão de 8 m³/s.

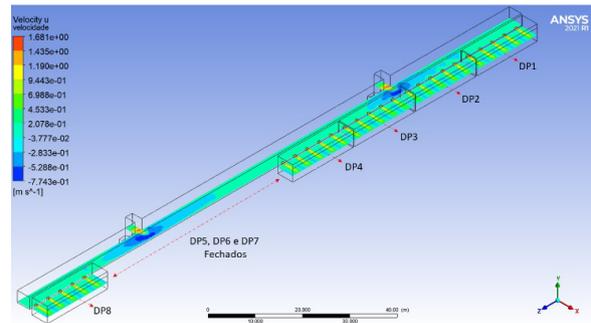


Figura 18 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos decantadores primários numa configuração assimétrica para uma vazão de 8 m³/s.

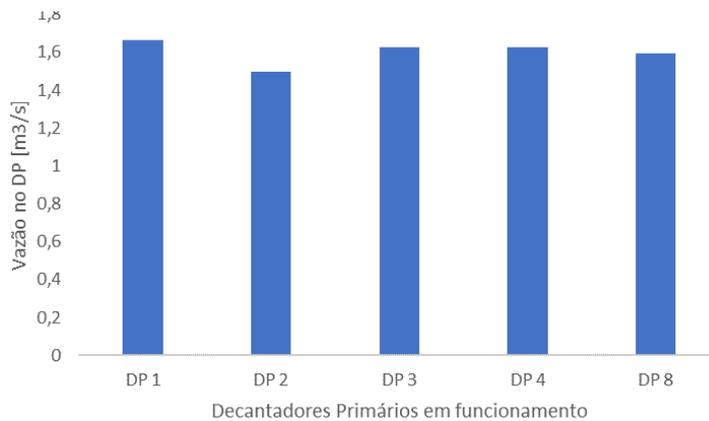


Figura 19 – Vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s

As duas entradas do canal de alimentação dos DPs estão 72,2 m distantes uma da outra, o que significa que a ligação da galeria entre a saída do vertedor bico de pato e a entrada 1 é mais longa do que a ligação para a entrada 2. Essa diferença pode ser aproximada pela própria distância entre as entradas, e isso provoca uma diferença entre as vazões que chegam ao canal por cada entrada. A entrada 1, mais distante, recebe 47%; e a entrada 2, mais próxima, recebe 53% da vazão total que deixa o vertedor bico de pato.

Uma simulação foi realizada com o modelo da entrada dos DPs a partir dessa condição de vazões

assimétricas na entrada para determinar se essa assimetria afetaria a distribuição da vazão entre os oito DPs. Na Tabela 8, estão dispostos os valores das vazões recebidas por cada um dos DPs e, também, suas porcentagens correspondentes.

Na Figura 21, os mesmos resultados apresentados na Tabela 8 podem ser observados na forma de um gráfico. Observa-se que esse gráfico é muito semelhante ao gráfico obtido para uma condição simétrica nas entradas (Figura 13). Na Figura 20, podem ser visualizadas as distribuições de velocidades na direção x ao longo da estrutura para essa condição de assimetria de vazões na entrada.

Tabela 8 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s.

Tipos de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	3,76	47,00
	Entrada 2	4,24	53,00
Saídas	DP 1	1,07	13,37
	DP 2	0,93	11,66
	DP 3	0,95	11,93
	DP 4	1,07	13,41
	DP 5	1,06	13,26
	DP 6	0,90	11,26
	DP 7	0,94	11,69
	DP 8	1,07	13,41

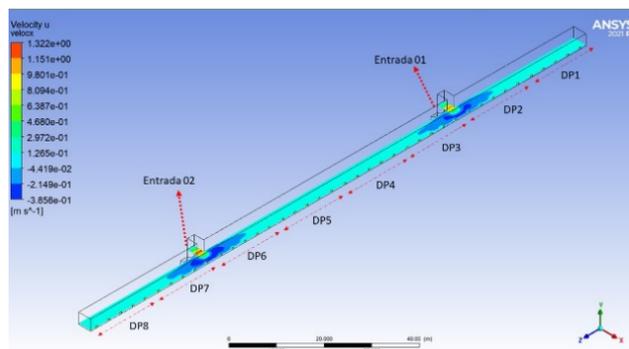


Figura 20 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos decantadores primários - entradas assimétricas 4,24 m³/s, entrada 2, e 3,76 m³/s, entrada 1.

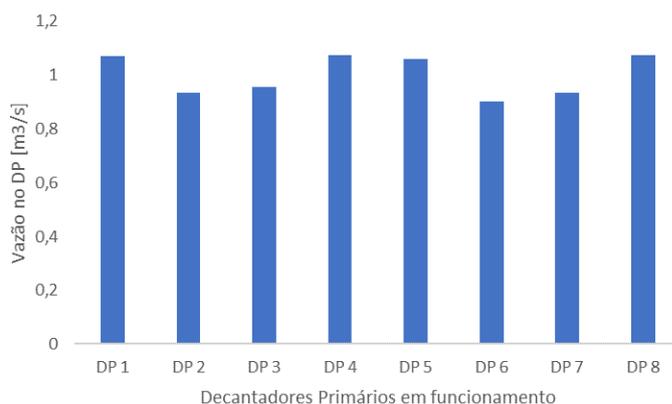


Figura 21 – Vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários - entradas assimétricas 4,24 m³/s, entrada 2, e 3,76 m³/s, entrada 1.

A fim de determinar a influência de entradas assimétricas na distribuição das vazões entre os DPs, foram analisadas mais duas condições: uma condição para a qual a entrada 2 recebe 70% e a entrada 1 recebe 30%; e outra na qual a entrada 2 está totalmente fechada e a entrada 1 recebe toda a vazão. Simulações foram realizadas com o modelo da entrada dos DPs para essas duas condições de vazões assimétricas nas entradas. Os valores das vazões recebidas em cada modelo por cada um dos DPs e suas porcentagens correspondentes estão dispostos nas tabelas 9 e 10.

Nas figuras 23 e 25, os mesmos resultados apresentados nas tabelas 9 e 10 podem ser observados nas formas de gráficos, nessa ordem. Observa-se que esses gráficos são muito diferentes do obtido para uma condição simétrica nas entradas (Figura 13).

Os gráficos de contorno da intensidade das velocidades na direção do eixo x correspondentes aos resultados das tabelas 9 e 10 podem ser observados nas figuras 22 e 24. Pode-se notar que esses gráficos são distintos do gráfico da condição simétrica nas entradas (Figura 12).

Tabela 9 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s.

Tipos de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	2,40	30,00
	Entrada 2	5,60	70,00
Saídas	DP 1	1,05	13,16
	DP 2	0,95	11,89
	DP 3	1,07	13,35
	DP 4	1,07	13,39
	DP 5	1,01	12,58
	DP 6	0,75	9,36
	DP 7	0,97	12,10
	DP 8	1,13	14,16

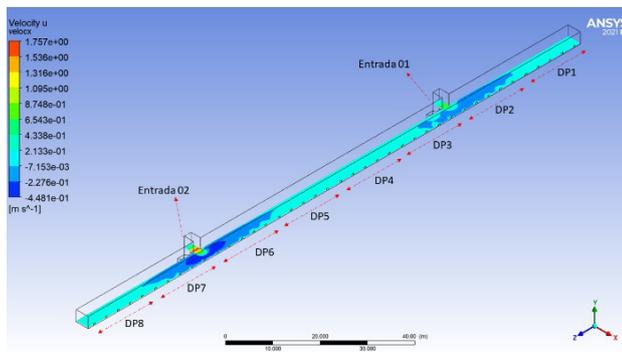


Figura 22 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos DP - entradas assimétricas 5,6 m³/s, entrada 2, e 2,4 m³/s, entrada 1.

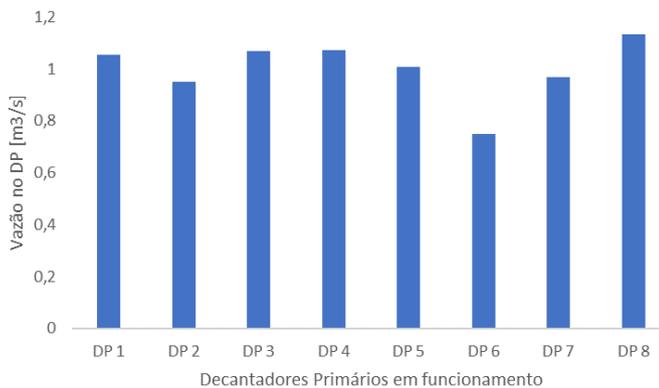


Figura 23 – Vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários - entradas assimétricas 5,6 m³/s, entrada 2, e 2,4 m³/s, entrada 1.

Tabela 10 – Valores das vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários para uma vazão total de 8 m³/s.

Tipos de fluxo	Identificação	Vazão	
		m ³ /s	%
Entradas	Entrada 1	8,00	100,00
	Entrada 2	0,00	0,00
Saídas	DP 1	1,28	15,98
	DP 2	1,07	13,43
	DP 3	0,56	6,99
	DP 4	0,84	10,51
	DP 5	0,97	12,10
	DP 6	1,05	13,12
	DP 7	1,10	13,80
	DP 8	1,13	14,06

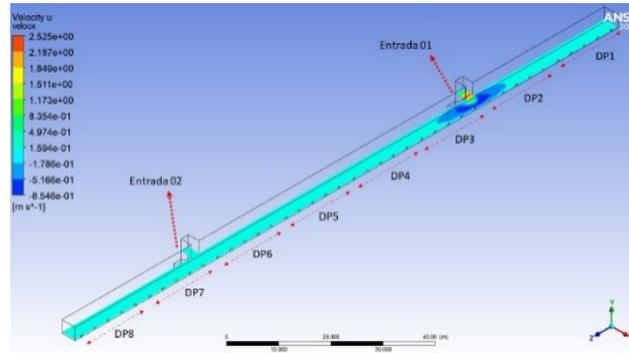


Figura 24 – Intensidade das velocidades na direção x para a simulação do modelo dos decantadores primários - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 2, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 1.

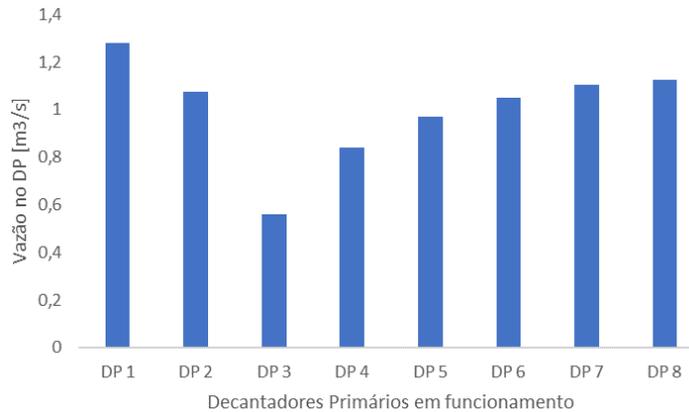


Figura 25 – Vazões recebidas pelos respectivos decantadores primários - entradas assimétricas $0 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 2, e $8 \text{ m}^3/\text{s}$, entrada 1.

4 DISCUSSÃO

A validação dos resultados da modelagem computacional teve como base os trabalhos anteriores de Almeida e Ortiz (2022) e Almeida (2022), e as informações foram complementadas com dados de projeto da ETE Barueri e de medições de NA no protótipo do canal de entrada dos DPs.

As diferenças entre as vazões dos DPs para o caso de entradas simétricas e saídas simétricas com oito DPs operando não é tão significativa e as vazões de cada decantador estão próximas da vazão ideal de $1 \text{ m}^3/\text{s}$, vide Tabela 5. No caso de operações

assimétricas, foram adotadas algumas condições extremas de assimetria, que não necessariamente correspondem às condições normais de operação da ETE. Nesses casos, para as condições estudadas de saídas assimétricas, as diferenças máximas encontradas entre as vazões em dois decantadores foram $0,14$ e $0,16 \text{ m}^3/\text{s}$, como pode ser conferido nas tabelas 6 e 7, respectivamente. Observa-se que, apesar de haver muitos decantadores fora de operação, os valores não diferem muito da diferença encontrada para o caso com saídas simétricas: $0,11 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tabela 5). Já nos casos para os quais as simulações foram

conduzidas com entradas assimétricas, as diferenças máximas encontradas entre as vazões nos decantadores foram de 0,17, 0,38 e 0,72 m³/s, de acordo com as tabelas 8, 9 e 10, nessa ordem. Nesses casos, as diferenças são mais acentuadas e reforçam o papel de destaque que as entradas do canal de alimentação têm na distribuição da vazão entre os DPs.

5 CONCLUSÕES

O levantamento da curva cota-vazão para o canal dos DPs foi possível a partir da instalação de uma régua de NA no protótipo e do desenvolvimento do modelo computacional da entrada dos DPs para um módulo. A faixa de medição da régua engloba a faixa de operação atual da ETE, extrapolando-se, com as simulações computacionais, os valores de vazão até o pico previsto para 2040, portanto com simulações realizadas cujas vazões estão compreendidas entre 3,75 e 17,5 m³/s por módulo. Esses resultados permitiram concluir que a estrutura do canal não é um gargalo hidráulico para a vazão de pico prevista para 2040.

Como se pode notar em todas as simulações obtidas, há uma tendência dos DPs mais próximos das entradas apresentarem vazões menores. Isso decorre do fato de as velocidades na direção longitudinal serem maiores nessas regiões de entrada, o que dificulta o fluxo na direção transversal, e, como consequência, as velocidades transversais nessas regiões são menores. O modelo da região dos DPs para entradas assimétricas mostrou que, para uma diferença moderada entre as vazões nas duas entradas do canal de alimentação dos DPs, não ocorre uma alteração significativa da distribuição das vazões entre os oito decantadores; contudo, para uma diferença mais acentuada, a distribuição de vazões se altera de forma significativa.

Os resultados apresentados mostram que a utilização de CFD como ferramenta adicional na gestão hidráulica dos processos de tratamento da

ETE é bastante importante, auxiliando na tomada de decisão, tanto na operação como no desenvolvimento de novos projetos, dentro da visão de maximização da eficiência energética de tratamento. Em trabalhos futuros, recomenda-se dar continuidade às campanhas de medição de vazão na galeria de acesso aos DPs, assim como na medição de NA no canal dos DPs, convertendo os resultados em unidades de consumo energético para avaliação do custo dessas diferenças na operação da ETE e em futuros projetos.

O novo marco regulatório do saneamento básico no país deve acelerar o desempenho operacional das ETEs existentes e de novos projetos com a otimização de metas de desempenho energético, abrindo a possibilidade de continuidade e aprimoramento da pesquisa aqui apresentada.

6 AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi desenvolvido dentro de um projeto de parceria da Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (SABESP) com a Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE) e a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Nessa parceria, ficam registrados os agradecimentos à SABESP, pelo apoio no desenvolvimento do trabalho, a partir do compartilhamento de dados de operação e informações de projeto da ETE Barueri, e, também, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à FDTE, pela bolsa de mestrado do primeiro autor junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da EPUSP.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Ortiz JP, Almeida AO. **Metodologia:** Almeida AO, Ortiz JP. **Investigação:** Almeida AO. **Redação & Primeira Versão:** Almeida AO. **Redação Final:** Almeida AO, Ortiz JP. **Revisão:** Ortiz JP. **Aquisição de Financiamento e Recursos:** Ortiz JP. **Supervisão Geral:** Ortiz JP.

8 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A. O. **Modelagem computacional para estudo da distribuição de vazão volumétrica na interface entre os tratamentos preliminar e primário de uma estação de tratamento de esgoto**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

ALMEIDA, A. O.; ORTIZ, J. P. Modelagem computacional para estudo de distribuição de vazão volumétrica em vertedores labirintos de estação de tratamento de esgoto. *In*: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA, 30., 2022, Brasil. **Anales** [...]. Madrid: IAHR Publishing, 2022. v. 1, p. 40-51.

ANSYS. **Fluent user's guide**. Canonsburg: Ansys, 2021a.

ANSYS. **Fluent theory guide**. Canonsburg: Ansys, 2021b.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

FCTH – 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: FCTH, 1995.

LONGO, S.; MIRKO D'ANTONI, B. M.; BONGARDS, M.; CHAPARRO, A.; CRONRATH, A.; FATONE, F.; LEMA, J. M.; MAURICIO-IGLESIAS, M.; SOARES, A.; HOSPIDO, A. Monitoring an diagnosis of energy consumption in wastewater treatment plants. A state of the art and proposals for improvement. **Applied Energy**, [s. l.], v. 179, p. 1251-1268, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.043>

PANEPINTO, D.; FIORE, S.; ZAPPONE, M.; GENON, G.; MEUCCI, L. Evaluation of the energy efficiency of a wastewater treatment plant in Italy. **Applied Energy**, [s. l.], v. 161, p. 404-411, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.10.027>

POPE, S. B. **Turbulent flows**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

RODI, W. **Turbulence models and their applications in hydraulics**. IAHR-Monograph, Delft, 1980.

TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics: a practical approach**. 3. ed. Cambridge: Butterworth-Heinemann, 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method**. 2. ed. Essex: Pearson, 2007.

WILCOX, D. C. **Turbulence modeling for CFD**. La Cañada: DCW Industries, 1994.

ZENG, J.; ZHANG, L.; ANSAR, M.; DAMISSE, E.; GONZALEZ-CASTRO, J. A. Applications of computational fluid dynamics to flow ratings at prototype spillways and weirs I: Data generation and validation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 143, n. 1, p. 04016072, 2017.