

ANÁLISE DO PERFIL DE VELOCIDADE EM TANQUE DE FLOCULAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA UTILIZANDO SIMULAÇÕES DE DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD): EFICIÊNCIA DO MISTURADOR E REDUÇÃO DE CUSTOS COM SULFATO DE ALUMÍNIO

Igor Ferreira Passinho Silva⁽¹⁾

Possui graduação em Engenharia Mecânica e Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia pela Universidade Federal do Maranhão - UFMA. Desenvolve estudos com foco em projetos de otimização de processos e modelagem de sistemas mecânicos aplicados ao saneamento ambiental. Atua como engenheiro bolsista no Programa de Aperfeiçoamento em Saneamento na Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão (CAEMA), com ênfase em inovação tecnológica e melhoria de desempenho operacional.

Nathalia Cunha Almeida Pinheiro⁽²⁾

Possui Mestrado em Sustentabilidade de Ecossistemas pela Universidade Federal do Maranhão – UFMA e Bacharelado em Engenharia Ambiental pela Universidade Ceuma – UNICEUMA. É Conselheira do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Maranhão - CREA-MA e Superintendente da Região Norte na Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA.

Fernando Lima de Oliveira⁽³⁾

Professor Adjunto IV da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA. Possui doutorado e mestrado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, e graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade Estadual do Maranhão – UEMA.

Wesley Costa de Assis⁽⁴⁾

Presidente do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Maranhão - CREA-MA, é graduado em Engenharia Mecânica e em Licenciatura em Matemática pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, com especializações em Computação Forense, Perícia Digital e Engenharia Clínica. Mestrando em Engenharia da Computação pela Universidade Estadual do Maranhão.

José Miguel Serra Neto⁽⁵⁾

Graduado em Engenharia Civil pelo Instituto Federal do Maranhão - IFMA e em Ciências com habilitação em Matemática pela Universidade Estadual do Maranhão - UEMA. Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho e em Gestão Pública, com ênfase em pessoas, processos e tecnologia aplicados ao setor público. Diretor de Operação e Manutenção na Companhia de Saneamento Ambiental do Maranhão - CAEMA.

Endereço⁽¹⁾: Rua General Arthur Carvalho, Residencial Turu, Rua 5, Quadra 7, Casa 223 - Miritiua – Paço do Lumiar - Maranhão - CEP: 65130-000 - Brasil - Tel: +55 (98) 98530-2995 - e-mail: igorferreirapassinhosilva@gmail.com.

RESUMO

Este trabalho apresenta as atividades desenvolvidas para otimizar a dosagem de coagulante no processo de floculação da Estação de Tratamento de Água (ETA) da CAEMA no sistema Sacavém em São Luís - MA, com foco na redução de custos operacionais e melhoria da eficiência na formação de flocos. A metodologia combinou simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD) e ensaios Jar Test, utilizando dados de vazão de calha Parshall. As simulações identificaram zonas de estagnação e gradientes de velocidade ideais, enquanto os testes práticos avaliaram o desempenho do sulfato de alumínio sob diferentes agitações. Foram modelados escoamentos em tanque de floculação e realizados ajustes de rotação dos agitadores mecânicos de 5 rpm a 2 rpm. Os resultados apontaram redução de 28,6% na dosagem de coagulante (de 237,72 mL/min para 169,8 mL/min), com economia anual estimada em R\$ 75.847,20, remoção de turbidez de 92,1% e de cor de 93,7%, superando o método convencional. Recomenda-se a recuperação dos agitadores e a aquisição de inversores de frequência para controle dinâmico da agitação, adaptando-se à sazonalidade da qualidade da água. A integração entre tecnologias e práticas operacionais destaca-se como estratégia sustentável e eficiente no saneamento ambiental.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de água, Floculação, Simulações computacionais.

INTRODUÇÃO

O saneamento ambiental consiste em um conjunto de medidas que têm por propósito ampliar serviços de saúde pública e melhorar a qualidade de vida. Essas medidas se referem a ações técnicas e socioeconômicas que promovem níveis de salubridade ambiental, atendendo ao abastecimento de água em padrões de potabilidade, infraestrutura de esgotamento sanitário, manejo de resíduos sólidos e emissões atmosféricas, controle ambiental de uso e ocupação de solo dentre outros serviços que visam à melhoria na condição de vida (Pompeo; Samways, 2020).

No contexto do saneamento ambiental, uma das áreas mais essenciais é o fornecimento de água potável, recurso indispensável para a vida, utilizado diretamente pela população em diversas atividades cotidianas, como consumo, higiene pessoal, preparo de alimentos, além de ser crucial para a manutenção de espaços limpos e saudáveis. A água também desempenha um papel fundamental em setores econômicos, como a agricultura, a indústria e a geração de energia. Portanto, a garantia de uma água com padrões de qualidade adequados é fundamental para que o saneamento ambiental cumpra seu objetivo de promover a saúde pública.

A portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, é a legislação vigente que estabelece os padrões de potabilidade da água no Brasil para o consumo humano. Ela define os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água, incluindo exigências técnicas, competências e responsabilidades, padrões de coleta de amostras, valores máximos permitidos de turbidez, de pH e padrão bacteriológico (Brasil, 2021). Por meio de monitoramentos e aplicação de tecnologias de tratamento de água, os sistemas de abastecimento de água podem garantir que a água distribuída atenda aos critérios estabelecidos pela legislação.

No processo de potabilização da água, as estações de tratamento de água (ETAs) são responsáveis por aplicar tecnologias para alteração da composição qualitativa da água bruta, em termos físicos, químicos e microbiológicos (Marques, 2022). Entre as aplicações de tratamento na estação, a coagulação e floculação são extremamente importantes. O principal objetivo dessas etapas é a aglomeração de partículas presentes na água bruta, encontradas na forma de colóides ou soluções, a fim de serem removidas por meio de separação sólido-líquido, através da sedimentação e filtração (Llano-Serna et al., 2019).

Na coagulação ocorre a formação de flocos primários por meio de um processo físico-químico. No fenômeno químico, um coagulante é adicionado para desestabilização das partículas coloidais, já no fenômeno físico ocorre uma agitação rápida para transporte e choque para agregação das partículas hidrolisadas. Os sais de alumínio e ferro são os coagulantes mais utilizados, estes alteram a força iônica da mistura e facilitam etapas posteriores de sedimentação e filtração (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2011).

A etapa de floculação é subsequente à coagulação, e nela ocorre a mistura lenta onde os flocos maiores são formados. A quantidade de partículas em suspensão é reduzida por choque e aglutinação das mesmas. Através da agitação lenta, tempo de detenção e do gradiente de velocidade gradativo e decrescente, ocorre a redução do número de partículas na solução e aumento da massa dos flocos sem a ruptura dos mesmos (Libânio, 2010).

O processo de floculação em estações de tratamento de água convencionais é realizado em floculadores mecanizados, que utilizam agitadores mecânicos para a movimentação de massa líquida no reator, ou em floculadores hidráulicos, que aproveitam a energia hidráulica do fluido para promover a dispersão e contato do coagulante com as partículas em suspensão. Sistemas mecanizados apresentam vantagem em relação à perda de carga dentro do reator, além de maior flexibilidade para variações das características da água bruta. Porém, apresentam desvantagem frente aos floculadores hidráulicos pelo grande consumo de energia elétrica e maior taxa de manutenção (Manfio et al., 2018). Em contrapartida, os floculadores hidráulicos apresentam desvantagens na falta de flexibilidade na mudança da qualidade da água, além dos parâmetros de floculação que são função da vazão e muitas vezes não podem ser ajustados de forma independente (Richter, 2009).

A floculação é um processo complexo que envolve muitos mecanismos atuantes não compreendidos em sua totalidade. Portanto, não existe um modelo universal com a capacidade de previsão da formação de flocos para quaisquer condições. O principal critério utilizado para projetos de floculadores ainda é o gradiente médio de velocidade, pois permite uma estimativa da potência necessária para a mistura de forma simples (Marques, 2022). A NBR 12.216 de 1992 evidencia a importância do valor do gradiente de velocidade médio e o tempo de detenção para o projeto de floculadores (ABNT, 1992).

A Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) apresenta-se como uma ferramenta aliada na otimização e análise de sistemas hidráulicos, como os floculadores. Essas utilizam equações matemáticas para descrever os processos hidráulicos. Essas simulações transformam o problema em uma equação matemática não linear, resolvida através de cálculos computacionais, utilizando equações diferenciais parciais para resolução do sistema. A modelagem CFD divide o sistema em uma malha de pequenos volumes, conhecidos como elementos finitos, que se aproximam da geometria modelada (Zapata Rivera et al., 2020).

Sua importância reside na capacidade de simular, de forma detalhada e precisa, os fenômenos hidrodinâmicos que ocorrem no interior dessas estações, fornecendo informações que seriam difíceis de obter com métodos experimentais tradicionais. No caso dos floculadores, a simulação CFD permite identificar zonas de ineficiência, além de avaliar o impacto de fatores operacionais, como variações de vazão no desempenho do sistema (Zapata Rivera et al., 2020). Essa tecnologia possibilita a realização de ajustes e melhorias no projeto e operação em menor tempo e com custos reduzidos, aumentando a eficiência e a confiabilidade das estações de tratamento de água.

O uso de simulações numéricas de dinâmica de fluidos oferece uma oportunidade valiosa para aprimorar o desempenho de sistemas de tratamento, permitindo a análise detalhada de fenômenos hidrodinâmicos e possibilitando intervenções mais precisas e econômicas. Porém, necessitam de acompanhamento com análises experimentais para validação de resultados. Em foco na ETA do Sacavém, o floculador atualmente em operação apresenta desafios no ajuste do tempo de floculação e do gradiente de velocidade, dificultando a otimização do processo.

A problemática deste projeto concentra-se na necessidade de otimizar o processo de floculação na Estação de Tratamento de Água (ETA) do Sacavém, visando reduzir o consumo de coagulante (sulfato de alumínio) sem comprometer a eficácia na remoção de turbidez e impurezas da água. Atualmente, o sistema da ETA opera com um floculador que enfrenta dificuldades para ajustar parâmetros fundamentais, como o tempo de floculação e o gradiente de velocidade, comprometendo a eficiência do tratamento.

Esse desafio é particularmente relevante, pois o consumo elevado de coagulante impacta os custos operacionais e a sustentabilidade da operação. Diante disso, o estudo busca, por meio de simulações de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) e de ensaios experimentais de Jar Test, identificar configurações de fluxo e dosagem que promovam uma mistura eficiente e reduzam o uso de insumos, promovendo um processo de tratamento de água mais econômico e ambientalmente sustentável.

OBJETIVOS

OBJETIVO GERAL

Analisar o fluxo e perfil de velocidade no tanque de floculação da Estação de Tratamento de Água da CAEMA no Sacavém em São Luís – MA, com foco na eficiência na mistura e na redução de custos com coagulante, utilizando simulações de dinâmica de fluidos computacional (CFD).

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

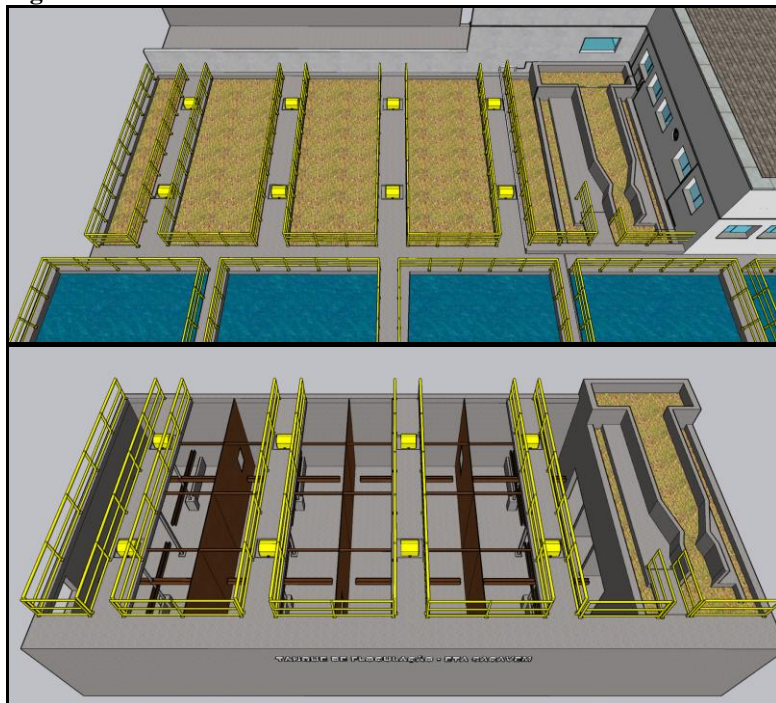
- Determinar o perfil de velocidade dentro do tanque de floculação da Estação de Tratamento de Água do Sacavém através de simulações CFD.
- Analisar como diferentes configurações de vazão influenciam o perfil de velocidade e a distribuição de energia no fluxo no tanque de floculação.
- Determinar a dosagem ideal que maximize a formação de flocos e minimize os custos associados ao uso de coagulante.
- Comparar os resultados das simulações CFD com dados experimentais coletados no Jar Test do laboratório da ETA do Sacavém.

METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho caracteriza-se por uma abordagem quantitativa e experimental, estruturada como um estudo de caso na Estação de Tratamento de Água do Sacavém, localizada em São Luís –

MA. Para a análise da eficiência do processo de floculação sob diferentes configurações operacionais, foram empregados ensaios laboratoriais (Jar Test) e simulações computacionais por meio da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Neste projeto, a CFD foi utilizada como principal ferramenta para a simulação do perfil de velocidade no tanque de floculação da ETA da CAEMA, conforme ilustrado no modelo tridimensional apresentado na Figura 1. Essa abordagem permitiu avaliar com maior precisão o comportamento hidrodinâmico do sistema, contribuindo para a otimização do processo de floculação.

Figura 1 - Modelo 3D da calha Parshall e floculador da ETA Sacavém



Fonte: Autores (2024).

Atualmente o floculador da ETA localizada no Sacavém está em operação apenas com as chicanas que dividem 4 seções, e não apresenta os agitadores mecânicos em funcionamento, configurando o floculador como do tipo hidráulico. O mesmo apresenta vazão máxima de projeto de 600 L/s com medidor de vazão por calha Parshall, porém, está operando com vazão de entrada de água bruta em cerca de 260 L/s, visto que metade dos filtros da ETA estão em manutenção.

A Tabela 1 mostra as seções principais e o volume do floculador da ETA do Sacavém baseadas nas dimensões reais obtidas durante a etapa de coleta de dados. As seções foram segmentadas de acordo com as propriedades geométricas do floculador, oferecendo uma análise do volume de sua estrutura interna. Essas informações são cruciais para a execução das simulações, uma vez que possibilitam uma avaliação precisa do comportamento hidrodinâmico em cada área do floculador, auxiliando na detecção de eventuais ineficiências no processo de floculação. A inclusão do volume total do floculador, que tem um impacto direto na dinâmica do escoamento, garante que os parâmetros operacionais sejam devidamente levados em conta nas simulações.

Tabela 1 - Volume aproximado do tanque de floculação da ETA do Sacavém

Seção do Floculador	Dimensões (m)	Área (m ²)	Comprimento (m)	Volume (m ³)
1ª Seção do Floculador	10,00 x 5,00 m	50,00 m ²	3,71 m	185,50 m ³
2ª Seção do Floculador	10,00 x 4,84 m	48,40 m ²	3,71 m	179,60 m ³
3ª Seção do Floculador	10,00 x 4,68 m	46,80 m ²	3,71 m	173,60 m ³
4ª Seção do Floculador	10,00 x 4,77 m	47,70 m ²	3,71 m	177,00 m ³
Total	-	-	-	715,70 m ³

Fonte: Autores (2024).

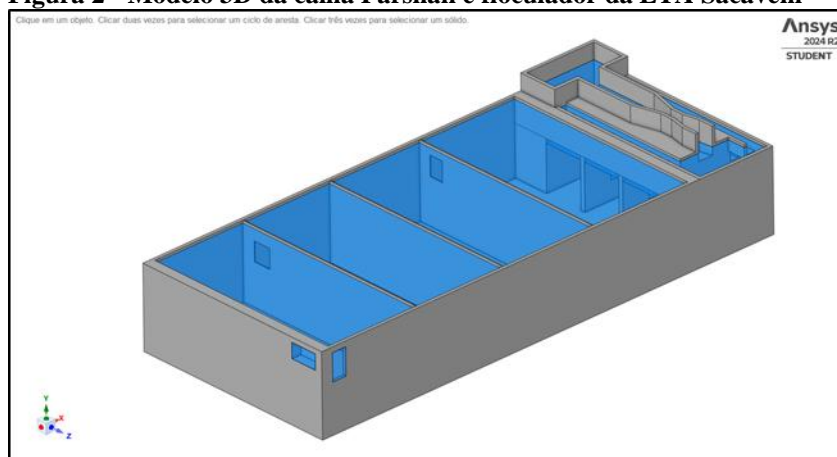
SOFTWARE DE SIMULAÇÃO E ESPECIFICAÇÕES COMPUTACIONAIS

Os softwares escolhidos para as simulações CFD neste projeto foram o *ANSYS Fluent* e o *ANSYS Discovery*, ambos integrantes do pacote acadêmico *ANSYS 2024*, fornecido pela empresa Ansys Inc. A modelagem das geometrias foi realizada utilizando o *SpaceClaim*, enquanto a organização e gerenciamento das etapas de simulação foram conduzidos por meio do *ANSYS Workbench*, todos pertencentes ao mesmo pacote de ferramentas. As análises foram executadas em um notebook ASUS Vivobook 16X, equipado com processador Intel Core i5 de 12ª geração, 16 GB de memória RAM DDR4 e placa gráfica dedicada NVIDIA GeForce RTX 2050, com sistema operacional Windows 11 Home. Para o tratamento e interpretação dos dados obtidos nas simulações e ensaios experimentais, foram utilizados o *MATLAB R2024a*, para análise numérica e criação de gráficos, e o *Microsoft Excel*, para organização de tabelas e dados.

GEOMETRIA

A geometria do floculador, juntamente com a calha Parshall, conforme figura 2, foi modelada no software *ANSYS SpaceClaim* após a obtenção das medidas reais do floculador da Estação de Tratamento de Água do Sacavém. Durante a modelagem, algumas simplificações foram realizadas na geometria para reduzir a complexidade computacional sem comprometer a precisão dos resultados, como a eliminação de detalhes muito pequenos que não influenciam significativamente no comportamento do fluxo. Além disso, a correta definição do volume fluido utilizado na simulação é essencial, pois representa o espaço ocupado pela água dentro do floculador.

Figura 2 - Modelo 3D da calha Parshall e floculador da ETA Sacavém



Fonte: Autores (2024).

CRIAÇÃO DA MALHA

A geração de malha é uma etapa crucial em simulações de CFD, pois define a qualidade e a precisão dos resultados obtidos. A malha divide o domínio de simulação em pequenos elementos (como tetraédricos, hexaédricos, etc.), onde as equações governantes de Navier-Stokes, são resolvidas numericamente (equação 2, 3 e 4). O escoamento de fluidos é regido por três equações fundamentais: a Equação da Conservação de Massa ou Equação da Continuidade (equação 1), as Equações de Navier-Stokes ou Conservação da Quantidade de Movimento e a Equação da Conservação de Energia (equação 5). Para fluidos compressíveis, há a necessidade de acoplamento entre essas equações e as Equações de Estado, enquanto que, para fluidos incompressíveis, a variação da densidade é negligenciada, permitindo o desacoplamento entre elas. Nesse cenário, o escoamento pode ser descrito pelas equações de Continuidade e de Navier-Stokes, sendo que a Equação de Energia é resolvida separadamente quando há troca térmica (Marques, 2022).

Equação da Conservação de Massa (Equação da Continuidade):

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



Equações de Navier-Stokes (Conservação da Quantidade de Movimento):

Para a componente x:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \nabla \cdot (\mu \nabla u) + S_x$$

equação (2)

Para a componente y:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \nabla \cdot (\mu \nabla v) + S_y$$

equação (3)

Para a componente z:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \mathbf{u}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \nabla \cdot (\mu \nabla w) + S_z$$

equação (4)

Equação da Conservação de Energia:

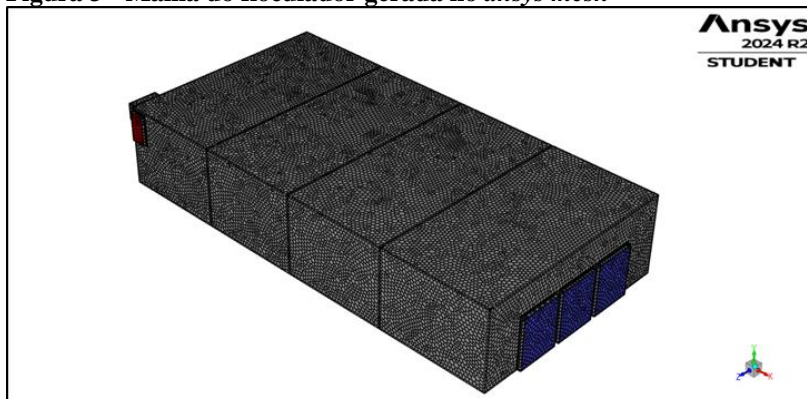
$$\frac{\partial(\rho i)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho i \mathbf{u}) = -p \nabla \cdot \mathbf{u} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi + S_i$$

equação (5)

Para fluidos incompressíveis, a Equação da Continuidade e as Equações de Navier-Stokes são suficientes para descrever o escoamento, e a Equação de Energia pode ser tratada separadamente em simulações que envolvem troca térmica.

A malha da geometria do floculador foi gerada pela ferramenta *Ansys Meshing*, contemplando elementos *polyhedra*, conforme figura 3. A malha apresentou refino com elementos de tamanho 0,2 m e com quantidade de 150053 elementos, 994587 faces e 839340 nós. Devido a limitação do software em versão estudantil, a malha não pode ultrapassar 1 milhão de nós, o que impossibilita um refino mais detalhado.

Figura 3 - Malha do floculador gerada no *ansys mesh*



Fonte: Autores (2024).

CONDIÇÕES DE CONTORNO

A primeira etapa de simulação realizada no floculador foi desenvolvida com base em algumas condições de contorno, visando representar com precisão o comportamento do escoamento. Para tanto, foram utilizados os valores padrão da água, cujas propriedades físicas são adequadas para a temperatura de 20°C, com densidade de 998,2 kg/m³ e viscosidade dinâmica de 1,002 x 10⁻³ N·s/m². Esses parâmetros foram aplicados nas simulações para garantir a precisão nas condições de escoamento.

Na modelagem do escoamento turbulento, optou-se pelo modelo de turbulência k-omega SST (*Shear Stress Transport*), reconhecido em simulações de CFD. Tal modelo se destaca por combinar as vantagens do k-epsilon em

regiões de turbulência elevada com a eficiência do k- ω em áreas próximas às paredes. Isso permite captar, de forma mais precisa, o comportamento complexo dos escoamentos, especialmente em geometrias intrincadas como as dos floculadores.

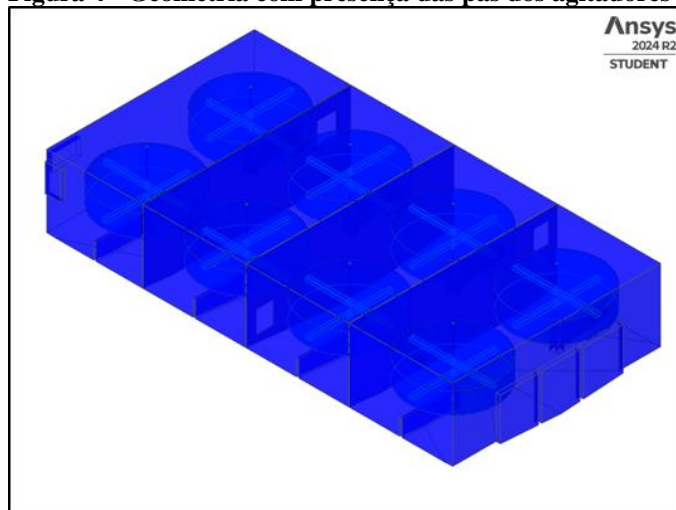
A simulação foi realizada em regime estacionário, com 500 iterações e em regime transiente com 1500 passos e intervalo de 1 segundo. Esse tipo de análise é fundamental para observar as variações temporais no escoamento, oferecendo uma visão detalhada sobre o desenvolvimento do fluxo ao longo do tempo, bem como a evolução de variáveis fluidodinâmicas, como velocidade e pressão, durante o processo de floculação. A força da gravidade foi aplicada na direção vertical descendente (-Y) em todo o domínio da simulação. Para representar corretamente os efeitos gravitacionais no escoamento, uma vez que a gravidade influencia diretamente tanto a distribuição de pressão quanto o comportamento da água, especialmente nas zonas de transição entre as câmaras do floculador.

As condições de entrada foram definidas com base em dados coletados na calha Parshall, com 3 diferentes valores de vazão sendo aplicados ao ponto de entrada do floculador. Isso permitiu simular a variabilidade do fluxo de água, refletindo as condições operacionais da estação de tratamento e seu impacto no processo de floculação. Na saída do sistema, foi definida uma condição de pressão atmosférica, permitindo que o escoamento ocorresse livremente pelo canal de descarga. Isso assegura que o fluido seja liberado sem restrições adicionais, simulando a descarga para os tanques de decantação.

As superfícies internas e as paredes do floculador foram tratadas como paredes de não deslizamento (*No Slip*), onde a velocidade do fluido foi considerada zero, essencial para capturar os efeitos do atrito e das interações entre o fluido e as superfícies sólidas. Por outro lado, a superfície da água em contato com o ar foi modelada com uma condição de parede de deslizamento (*Slip Wall*), permitindo que o fluido se movesse sem resistência, simulando de maneira mais realista a interface água-ar.

Na segunda etapa de simulações utilizou-se um modelo no *ANSYS SpaceClaim* com geometria adicional contendo as pás dos agitadores mecânicos, divididos por 4 seções do floculador sem a calha Parshall, conforme figura 4. Os mesmos foram testados sem a presença de agitação no sistema e posteriormente com agitação lenta e rotação variada em ordem decrescente em cada uma das 4 seções.

Figura 4 - Geometria com presença das pás dos agitadores mecânicos



Fonte: Autores (2025).

As pás modeladas na geometria seguiram em fidelidade com as pás encontradas no floculador da ETA, com diâmetro de rotação de 4 metros, e configuração axial. Cada seção apresenta dois conjuntos de agitadores mecânicos, totalizando 8 no floculador inteiro. A geração de malha e condições de contorno foram semelhantes entre as simulações, apenas ocorreu variação na rotação das pás em 5, 4, 3 e 2 rpm em cada seção do floculador, mantendo fixa a vazão de 260 L/s com presença de rotação e sem presença de rotação.

CÁLCULO DE GRADIENTE DE VELOCIDADE E TEMPO DE DETENÇÃO TEÓRICO

A abordagem apresentada relaciona o parâmetro de projeto G (gradiente de velocidade médio) com as características do fluido, como a viscosidade dinâmica (μ), o volume do reator (V) e a potência fornecida ao sistema (P), seja por um dispositivo hidráulico ou mecânico. O G também pode ser expresso em termos da taxa média de dissipação de energia cinética ($\bar{\epsilon}$) e da viscosidade cinemática do fluido (ν), conforme a equação 6 abaixo:

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{\bar{\epsilon}}{\nu}} \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

G é o gradiente de velocidade médio, P é a potência introduzida no reator, μ é a viscosidade dinâmica, V é o volume do reator, $\bar{\epsilon}$ é a taxa média de dissipação de energia, ν é a viscosidade cinemática do fluido.

Além disso, o tempo de retenção teórico, apresentado na equação 7, pode ser estimado pela relação entre o volume do reator de floculação (V) e a taxa de vazão volumétrica (Q):

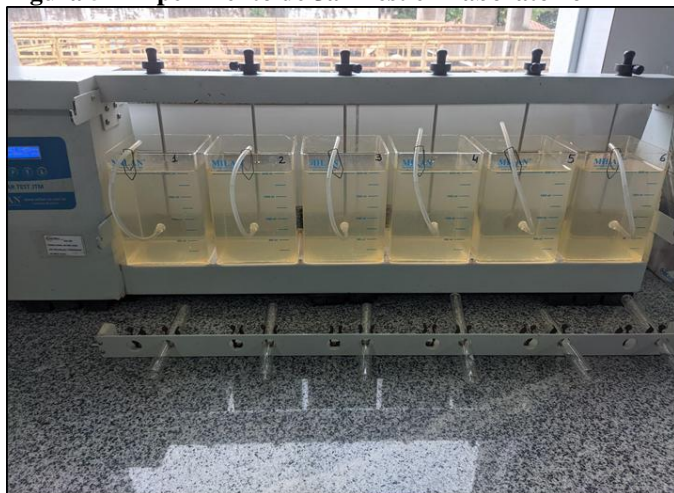
$$t_r = \frac{V}{Q} \quad \text{equação (7)}$$

Esse tempo representa o período em que o fluido permanece no reator, influenciando diretamente o processo de mistura e floculação (Llano-Serna et al., 2019).

JAR TEST E MEDIÇÃO DE PH, COR E TURBIDEZ DAS AMOSTRAS

Foi realizada uma validação experimental dos resultados da simulação por meio do *Jar Test*, que é um método clássico utilizado em laboratórios de tratamento de água para determinar a dosagem ideal de coagulante, como o sulfato de alumínio utilizado na ETA do Sacavém. O teste, conforme figura 5, consiste em simular o processo de coagulação em 6 amostras de água, ajustando diferentes dosagens e velocidades de mistura para observar a eficiência na floculação. Comparando os valores de gradiente de velocidade obtidos na simulação com aqueles empregados no Jar Test, é possível verificar a coerência dos parâmetros simulados com resultados práticos.

Figura 5 - Experimento de Jar Test em laboratório



Fonte: Autores (2025).

Como parte da metodologia, antes dos ensaios de Jar Test, foram analisados os valores de cor aparente, turbidez e pH da água bruta. Em seguida, no procedimento padrão do laboratório, foram testadas seis concentrações de coagulante (0,8 a 1,8 mL em incrementos de 0,2 mL), com agitação rápida de 220 rpm (gradiente de velocidade de 460 s^{-1}) por 30 segundos, agitação lenta fixa de 40 rpm (gradiente de velocidade de 53 s^{-1}) por 20 minutos e decantação por 20 minutos.

Nos testes modificados, duas abordagens foram aplicadas:

- **Primeira modificação:** com base em simulações de CFD, o gradiente de velocidade da agitação lenta foi ajustado para 20 rpm (gradiente de velocidade de 10 s^{-1}), mantendo-se os demais parâmetros.
- **Segunda modificação:** em ensaios realizados ao longo de 7 dias com variação de dosagem de coagulante iguais para ambos os testes, comparou-se o teste padrão (40 rpm fixa) com uma variação programada da rotação lenta.

Nesta abordagem, a agitação lenta foi dividida em quatro etapas sequenciais: 52, 43, 33 e 22 rpm, correspondendo a gradientes de velocidade de 80, 60, 40 e 20 s^{-1} , respectivamente. Cada etapa teve duração de 5 minutos, totalizando os 20 minutos de agitação lenta.

Esta estratégia, com base na literatura de Richter (2009), visou maximizar a formação de flocos por meio da redução gradual da energia de mistura, otimizando o contato entre partículas. Após todos os ensaios (padrão e modificados), foram medidos os valores de turbidez, cor aparente e pH para avaliar a eficiência do tratamento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira etapa da simulação foi realizada considerando a variação das vazões de entrada no floculador, obtidas a partir das leituras da calha Parshall, cujas dimensões analisadas foram de 40 cm, 45 cm e 50 cm, correspondendo às variações reais observadas na ETA. Essa variação de vazão foi implementada no modelo CFD para investigar o impacto nas características de escoamento, como o perfil de velocidade e o gradiente de velocidade no floculador. Além disso, foram calculados os tempos de residência teóricos para cada vazão, conforme apresentado na equação 7, fornecendo uma visão mais clara sobre a eficiência do processo de floculação para diferentes condições operacionais.

Tabela 2 - Vazão volumétrica e tempo de detenção em tanque de floculação da ETA do Sacavém

Altura da água na calha Parshall (cm)	Vazão volumétrica (L/s)	Tempo de detenção teórico (min)
40 cm	208,11 L/s	57 min
45 cm	260,93 L/s	45 min
50 cm	319,43 L/s	37 min

Fonte: Autores (2024).

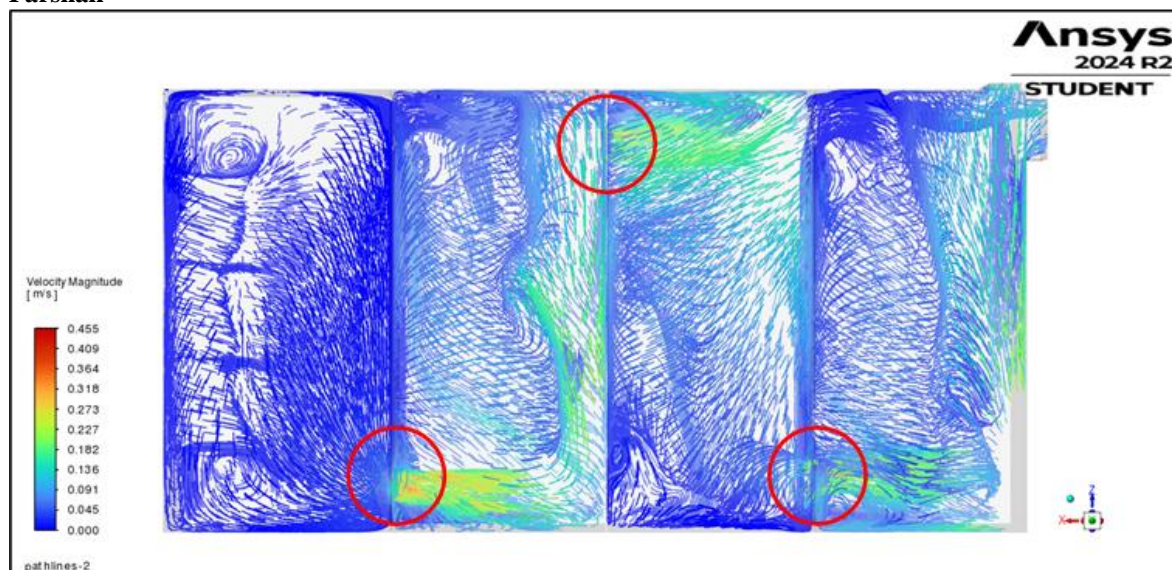
A tabela 2 mostra a relação entre a altura da água na calha Parshall, a vazão volumétrica e o tempo de detenção teórico. À medida que a altura na calha aumenta, a vazão volumétrica também cresce, enquanto o tempo de detenção teórico diminui. Esse comportamento é esperado, pois, com uma vazão maior, o volume de água que passa pelo sistema aumenta, reduzindo o tempo que a água permanece no floculador antes de seguir o processo para a etapa de decantação.

SIMULAÇÃO DO FLUXO DA ÁGUA NO REATOR DE FLOCULAÇÃO

A análise da distribuição da velocidade da água no floculador, conforme mostrado na figura 6, revela que a maior velocidade de cerca de 0,45 m/s está concentrada nas regiões onde a seção da chicana apresenta a janela de abertura para a outra seção. Esse aumento da velocidade é esperado, pois o estreitamento do fluxo na chicana provoca uma elevação da velocidade da água, favorecendo a turbulência. Por outro lado, a vazão de 208,11 L/s apresentou menores valores de velocidade distribuída, velocidades mais baixas podem impactar negativamente a eficácia do processo de floculação, já que um fluxo insuficiente pode não promover uma mistura adequada do coagulante com a água, limitando a interação necessária para a formação de flocos eficientes.



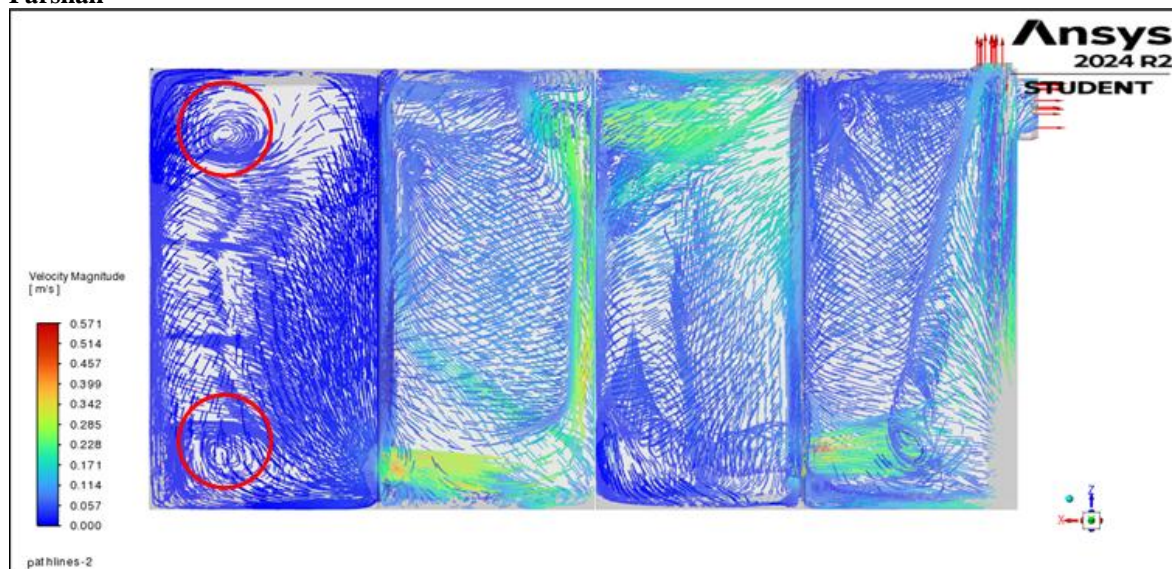
Figura 6 - Fluxo da água e distribuição da velocidade no floculador com medição de 40 cm da calha Parshall



Fonte: Autores (2024).

Na Figura 7, observou-se que a vazão de 260,93 L/s resultou em um valor de velocidade máxima superior ao da simulação anterior. Isso indica uma maior eficiência na movimentação da água, favorecendo a mistura do coagulante. No entanto, apesar do aumento da velocidade máxima, o fluxo demonstrou-se relativamente próximo ao observado na condição anterior. Além disso, a presença de zonas de estagnação nos cantos do floculador é evidente. Essas áreas de fluxo lento podem comprometer a eficiência do processo de floculação, pois a estagnação pode dificultar a formação e crescimento dos flocos, limitando a eficácia da remoção de impurezas da água.

Figura 7 - Fluxo da água e distribuição da velocidade no floculador com medição de 45 cm da calha Parshall

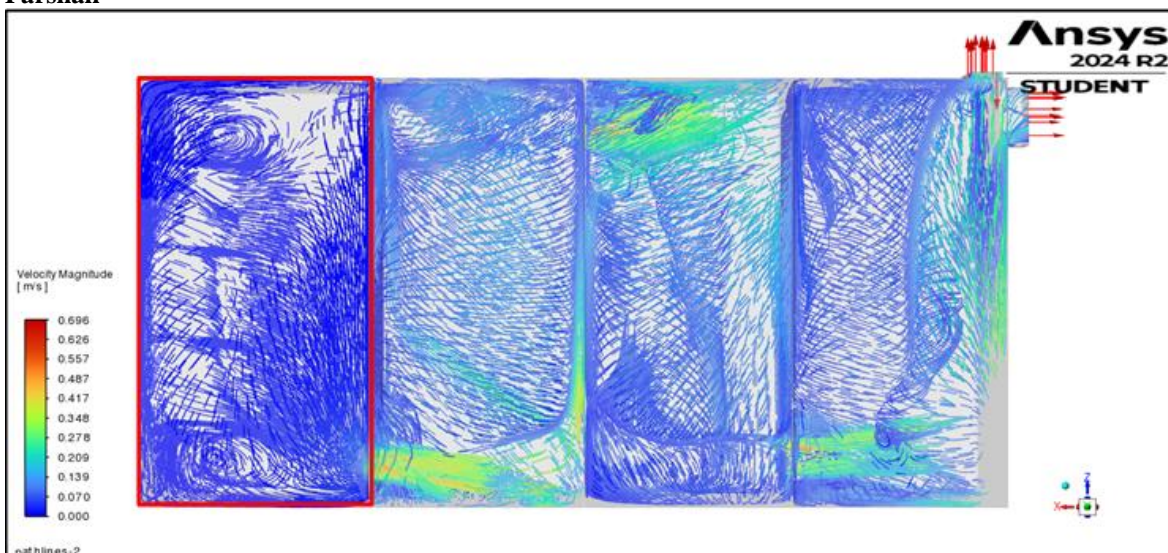


Fonte: Autores (2024).

Na figura 8, com a configuração de maior vazão de 319,43 L/s, a velocidade máxima da água atingiu 0,696 m/s, especialmente nas janelas de transição entre as seções do floculador, onde a geometria promove um aumento do fluxo. Contudo, a figura também revela a presença de zonas de estagnação, particularmente na entrada do floculador, onde a velocidade se mostra mais baixa. Isso ocorre logo após a mistura rápida proporcionada pela vazão na calha Parshall, indicando que a velocidade do fluido não está sendo adequadamente distribuída. Essas áreas de

baixa velocidade podem comprometer a eficiência do processo de floculação, uma vez que limitam a interação do coagulante com as partículas suspensas. Para mitigar esses problemas e garantir uma distribuição mais uniforme do fluxo, a implementação de agitadores mecânicos é recomendada, pois eles podem ajudar a reduzir as zonas de estagnação e otimizar a eficácia do tratamento da água com ajustes de velocidade de gradiente.

Figura 8 - Fluxo da água e distribuição da velocidade no floclador com medição de 50 cm da calha Parshall

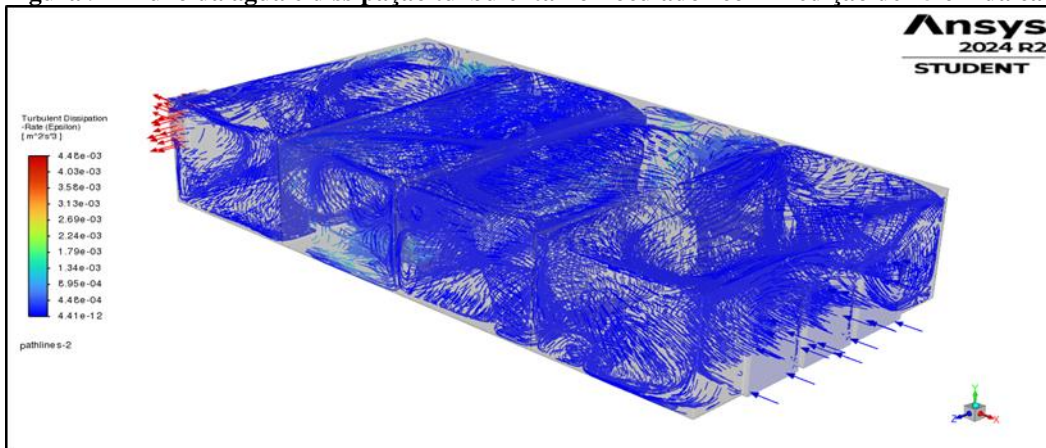


Fonte: Autores (2024).

SIMULAÇÃO TRANSIENTE NO REATOR DE FLOCULAÇÃO COM VALORES DE DISSIPAÇÃO TURBULENTA

Na análise da taxa de dissipação de turbulência apresentada na figura 9, observa-se que a mesma se mostrou constante ao longo de todo o floclador, mesmo em regime transiente com 1500 passos e intervalo de 1 s, a taxa se manteve próxima do estacionário.

Figura 9 - Fluxo da água e dissipação turbulenta no floclador com medição de 45 cm da calha Parshall



Fonte: Autores (2024).

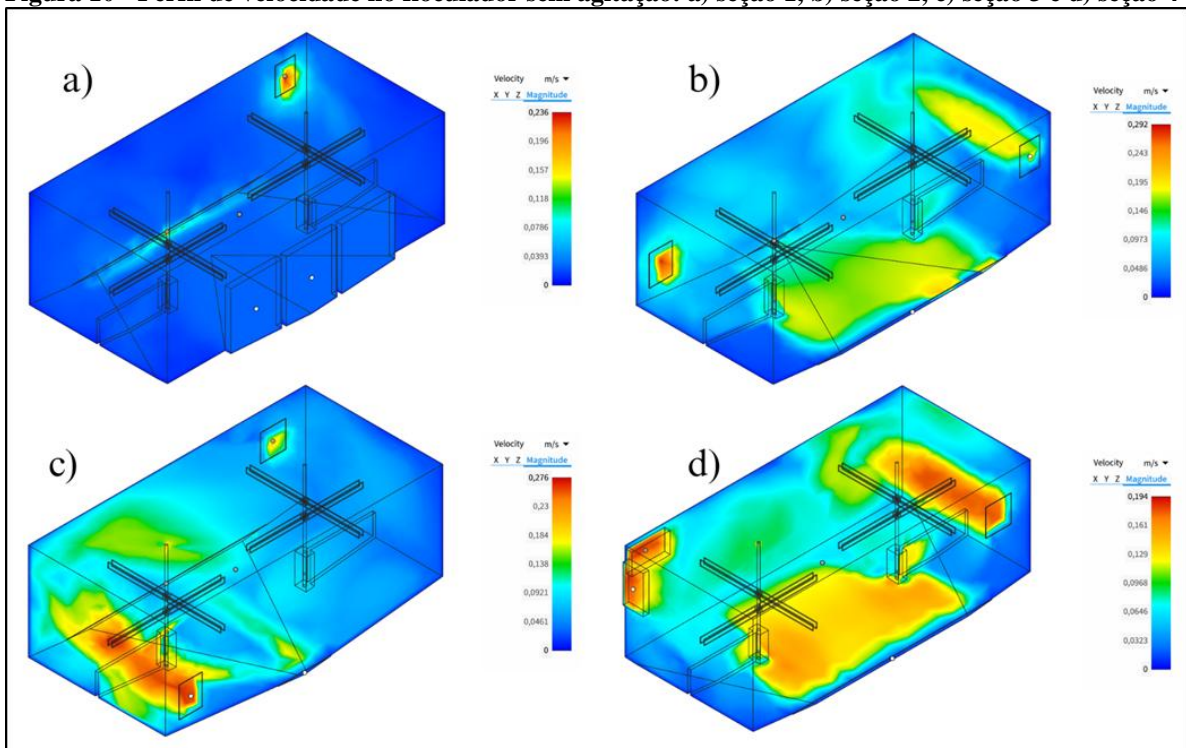
Onde a taxa de dissipação é maior, observamos também um gradiente de velocidade local mais acentuado. Isso se deve ao fato de que a turbulência, ao dissipar energia, cria variações mais pronunciadas na velocidade do fluido. Essa relação é fundamental, pois um gradiente de velocidade elevado indica que há uma intensa troca de energia entre as camadas de fluido. Durante as simulações CFD, regiões onde a taxa de dissipação é mais elevada costumam estar localizadas em áreas de transição, como nas janelas entre as seções de chicana. Essas áreas, ao promover uma maior turbulência, ajudam na redução das zonas de estagnação e melhoram a homogeneidade do fluxo.

SIMULAÇÃO NO REATOR DE FLOCULAÇÃO POR SEÇÃO

Conforme a figura 10, a simulação do floculador sem agitação mecânica revela um cenário crítico para a formação de flocos. As velocidades do fluido variam entre 0,0023 m/s e 0,294 m/s, com valores próximos a zero em várias regiões, indicando zonas de estagnação. Essas áreas comprometem o processo de floculação, pois a ausência de movimento impede colisões eficientes entre partículas, essenciais para a formação inicial de flocos. Além disso, a distribuição heterogênea de velocidades, sem padrão organizado, dificulta a criação de um gradiente de energia controlado. Sem redução gradual da agitação, os flocos formados em estágios iniciais não têm oportunidade de crescer ou se consolidar, resultando em estruturas frágeis e de baixa sedimentação. Essa condição ilustra a importância de um gradiente de velocidade decrescente, que equilibra energia para agregação e estabilização, evitando tanto a estagnação quanto a ruptura dos flocos.

Essa distribuição irregular também favorece o curto-circuito hidráulico, em que parte do fluxo atravessa o floculador rapidamente, reduzindo o tempo de residência necessário para a formação de flocos. Os pontos de alta velocidade entre as seções evidenciam uma limitação crítica de sistemas sem agitação: a incapacidade de controlar dinamicamente o ambiente de mistura, resultando em processos desiguais e incompletos, com flocos heterogêneos e baixa eficiência de sedimentação. A introdução de agitação mecânica, ajustada para criar um gradiente decrescente, seria essencial para corrigir essas falhas, direcionando a energia de forma estratégica ao longo das seções.

Figura 10 - Perfil de velocidade no floculador sem agitação: a) seção 1, b) seção 2, c) seção 3 e d) seção 4

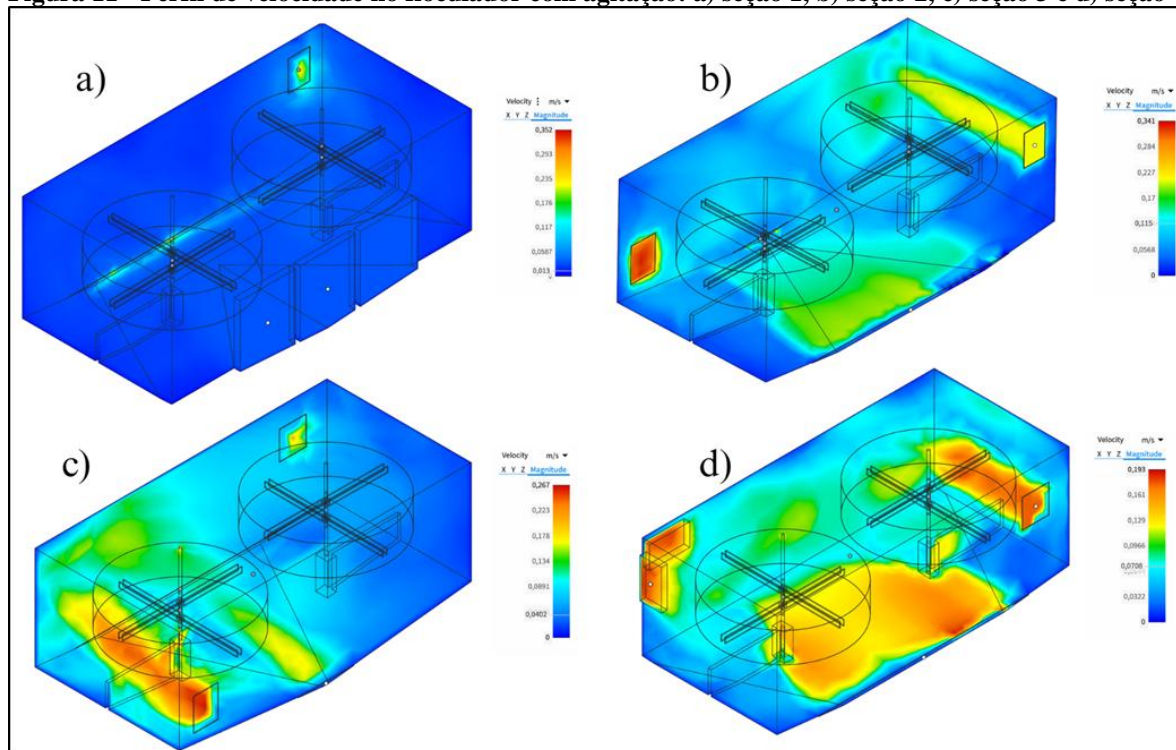


Fonte: Autores (2025).

A simulação com agitação mecânica decrescente de 5 rpm a 2 rpm, conforme figura 11, demonstra a aplicação prática do gradiente de velocidade decrescente, fundamental para otimizar a floculação. Na seção a) com rotação de 5 rpm, a velocidade máxima de 0,35 m/s fornece energia suficiente para promover colisões iniciais entre partículas, iniciando a formação de flocos. Na seção b) com 4 rpm, a velocidade de 0,4 m/s mantém um ambiente de agitação moderada, ideal para continuar a agregação sem danificar estruturas já formadas. A seção c) com 3 rpm, com velocidade de 0,267 m/s, apresenta uma diminuição que garante a integridade dos flocos. Já na seção d) com 2 rpm, a velocidade cai para 0,19 m/s, criando condições de baixa energia para estabilização e crescimento final dos flocos, permitindo que atinjam tamanhos adequados para sedimentação. Apesar disso, as magnitudes máximas com agitação não superam significativamente a simulação sem agitação, sugerindo que as rotações adotadas podem estar abaixo do ideal, isso pode ocorrer devido às limitações do software em termos de refinamento da malha.

O gradiente de velocidade decrescente é fundamental para equilibrar as etapas de formação, crescimento e estabilização de flocos. Na fase inicial, altas velocidades garantem mistura vigorosa, essencial para colisões eficientes. À medida que o gradiente diminui, a energia reduzida permite que os flocos se agreguem sem serem fragmentados, enquanto a fase final de baixa velocidade protege o flocos, preparando para sedimentação.

Figura 11 - Perfil de velocidade no floculador com agitação: a) seção 1, b) seção 2, c) seção 3 e d) seção 4



Fonte: Autores (2025).

CÁLCULO DO GRADIENTE MÉDIO DE VELOCIDADE NO FLOCULADOR

Os resultados obtidos a partir das simulações CFD realizadas no floculador foram analisados em relação ao gradiente médio de velocidade e à taxa média de dissipação de energia cinética. A tabela 3 a seguir apresenta os valores encontrados para diferentes alturas vazões na calha Parshall, com as respectivas medições do gradiente médio de velocidade e da taxa média de dissipação de energia cinética, calculados conforme a equação 6.

Tabela 3 - Gradiente médio de velocidade do floculador da ETA do Sacavém

Altura na calha Parshall (cm)	Gradiente médio de velocidade (s-1)	Taxa média de dissipação de energia cinética (ϵ)
40 cm	5,2 s-1	2,7e-5 m ² s ³
45 cm	7,3 s-1	5,3e-5 m ² s ³
50 cm	10 s-1	9,6e-5 m ² s ³

Fonte: Autores (2024).

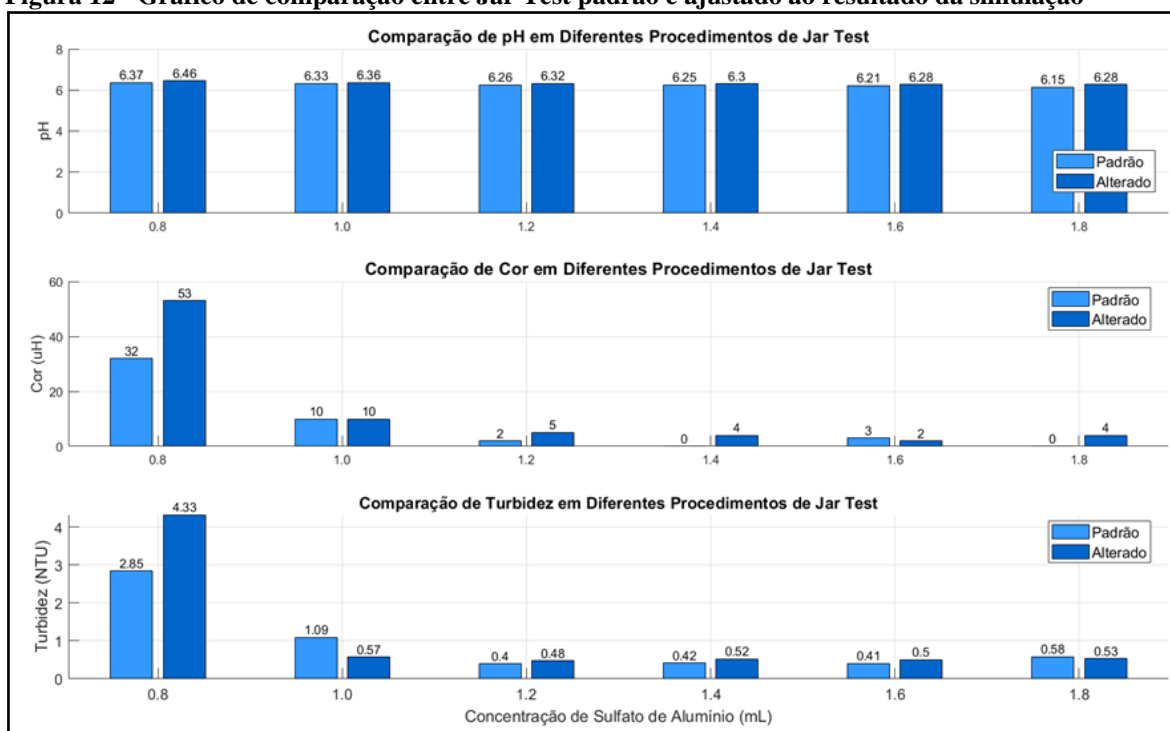
Os resultados indicam que, conforme o gradiente de velocidade médio aumenta, a taxa de dissipação de energia cinética também aumenta, evidenciando a importância de um controle adequado dessas variáveis no processo de tratamento de água. O desafio está em encontrar um equilíbrio, pois gradientes muito altos podem resultar em

quebra dos flocos formados, enquanto gradientes muito baixos podem não ser suficientes para promover a mistura adequada do coagulante (Richter, 2009).

EXPERIMENTAÇÃO NO JAR TEST E ANÁLISES DE COR, TURBIDEZ E PH

Para a metodologia com a primeira modificação nos experimentos com o Jar Test, o gráfico comparativo da figura 12 apresenta os dados de pH, cor e turbidez obtidos nos ensaios de Jar Test para dois procedimentos distintos: a agitação lenta constante padrão com 40 rpm e o alterado para 20 rpm conforme os dados de gradiente de velocidade das simulações CFD. Os resultados mostram que, no procedimento alterado, houve uma redução mais acentuada da turbidez com menor concentração de coagulante, atingindo 0,57 NTU com apenas 1,0 mL de coagulante, em comparação aos 1,09 NTU no procedimento padrão para a mesma dosagem. Em contrapartida, a remoção de cor no procedimento padrão foi mais eficaz nas menores concentrações, sendo que, a partir de 1,4 mL, ambos os procedimentos convergiram para valores próximos de 0 uH. A figura 12 ilustra essa comparação visualmente, demonstrando o desempenho mais eficiente do procedimento alterado em relação à turbidez, enquanto o procedimento padrão apresenta melhores resultados iniciais na remoção de cor. O pH se manteve dentro de uma faixa estável em ambos os casos, com variações mínimas entre os dois métodos.

Figura 12 - Gráfico de comparação entre Jar Test padrão e ajustado ao resultado da simulação



Fonte: Autores (2025).

Ao comparar os dois procedimentos, observa-se que no procedimento padrão a melhor concentração de coagulante foi 1,4 mL, onde a cor foi totalmente removida (0 uH) e a turbidez atingiu um valor muito baixo (0,42 NTU). Já no procedimento ajustado pelos valores na simulação CFD, a melhor concentração foi 1,0 mL, com uma turbidez reduzida para 0,57 NTU e uma cor de 10 uH, demonstrando maior eficiência na remoção de turbidez com menor quantidade de coagulante. Assim, o procedimento ajustado para essa amostragem se mostrou mais econômico, enquanto o padrão apresentou melhores resultados para a remoção de cor.

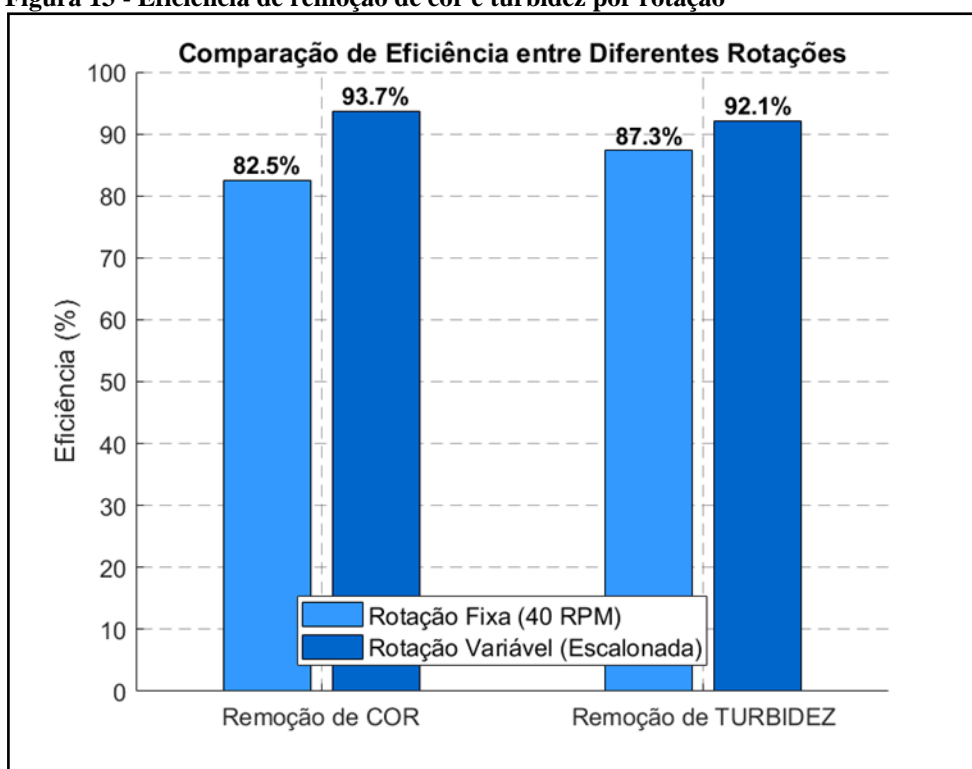
$$\text{Dosagem ETA (mL/min)} = (\text{Dosagem Jar Test (mL)} / 2 \text{ (L)}) \times 0,02 \times \text{Vazão AB (L/s)} \times 60 \quad \text{equação (8)}$$

Os resultados da estimativa de dosagem de sulfato de alumínio no floculador, considerando uma solução a 2%, revelam uma significativa diferença entre os dois procedimentos de Jar Test. Para o procedimento padrão, a dosagem de coagulante na ETA calculada foi de 237,72 mL/min, conforme equação 8, enquanto que para o procedimento alterado, baseado nos dados de gradiente de velocidade das simulações CFD, a dosagem foi reduzida

para 169,8 mL/min. Essa diferença de aproximadamente 28,6% a menos no procedimento alterado, implica em 100 L de redução de coagulante em 24 horas, demonstra não apenas uma maior eficiência no uso do coagulante, mas também uma possibilidade de economia nos custos operacionais, mantendo a eficácia na remoção de turbidez e cor da água tratada.

Seguindo a metodologia com a segunda modificação nos ensaios de Jar Test, os resultados conforme figura 13, demonstram uma clara superioridade do modelo de rotação variável (escalonada) na remoção de cor e turbidez em comparação à rotação fixa. Para a remoção de cor, a eficiência média do modelo variável atingiu 93,7%, superando em 11,2 pontos percentuais o modelo fixo com 82,5%, com destaque para casos específicos onde a eficiência alcançou 100% em dosagem de 2,3 mL. Na redução de turbidez, embora a diferença seja menor, o modelo variável manteve vantagem de 92,1% contra 87,3% da rotação fixa, indicando maior capacidade de adaptação a variações de partículas na água bruta. Essa eficiência elevada e consistente do modelo com rotação variável está associada à otimização do gradiente de velocidade durante a floculação, que favorece a formação de flocos mais densos e a remoção de partículas finas.

Figura 13 - Eficiência de remoção de cor e turbidez por rotação



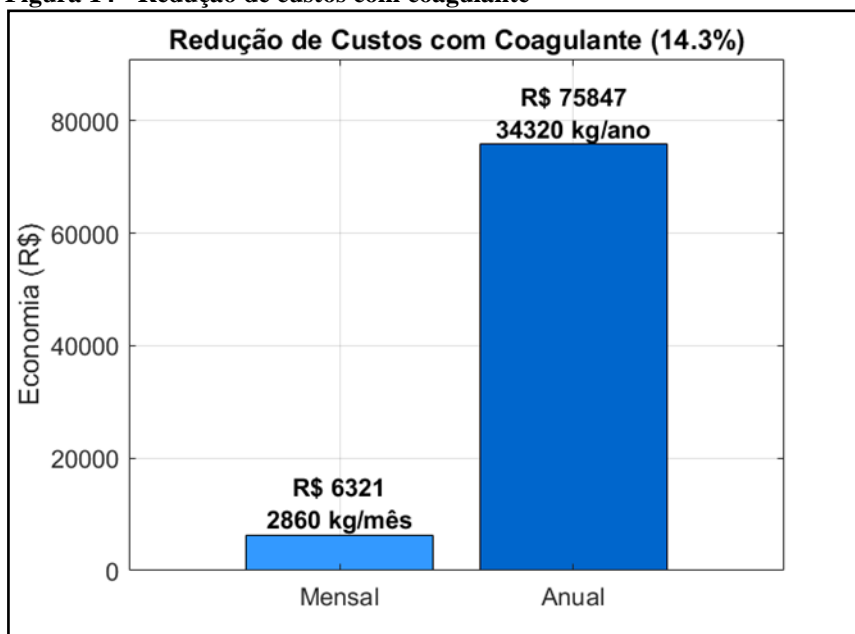
Fonte: Autores (2025).

A adoção do modelo de rotação variável no tratamento de água apresenta uma redução significativa de custos, conforme figura 14, principalmente associada à otimização do uso de coagulantes, com base no preço do sulfato de alumínio de R\$ 2,21 por kg e na economia média entre 14% e 30% no consumo. Tal desempenho se deve à sua capacidade de adaptação à carga de partículas presente na água bruta. Sob condições de baixa carga de partículas com cor aparente menor que 50 uH e turbidez menor que 10 NTU, o sistema de rotação variável atingiu 100% de remoção de cor utilizando apenas 2,3 mL de coagulante, enquanto o sistema de rotação fixa demandou 3,0 mL para resultados equivalentes. Essa diferença representa uma economia de 23,3%, equivalente a aproximadamente R\$ 10.308,60 por mês, considerando um consumo mensal de 20.000 kg de coagulante. Para cargas moderadas com cor entre 50 e 150 uH, turbidez entre 10 e 30 NTU, a economia alcançada pelo sistema de rotação variável chegou a 28,6%, o que corresponde a uma redução de aproximadamente R\$ 13.260,00 por mês.

Mesmo em condições de alta carga de partículas com cor menor que 150 uH e turbidez menor que 30 NTU, nas quais a eficiência do sistema de rotação variável é parcialmente limitada, observou-se ainda uma redução mínima de 14,3% com 3,0 mL contra 3,5 mL do sistema com rotação fixa, gerando uma economia estimada de R\$ 6.630,00 por mês. A flexibilidade operacional do sistema de rotação variável resulta não apenas em benefícios econômicos,

com uma economia anual que pode ser maior que R\$ 75.847,20/ano, considerando a maior carga de partículas na água bruta. Esses dados reforçam a vantagem técnica e sustentável do sistema de rotação variável frente à variabilidade da qualidade da água bruta, além de contribuir para a otimização dos custos operacionais da estação de tratamento.

Figura 14 - Redução de custos com coagulante



Fonte: Autores (2025).

A qualidade da água bruta é um fator crítico para determinar a eficiência da coagulação e os custos associados ao tratamento. Parâmetros como turbidez, cor, pH, concentração de matéria orgânica e tipo de partículas em suspensão variam significativamente entre fontes de água superficial (rios, lagos, reservatórios) e até mesmo sazonalmente na mesma fonte. Essas variações, especialmente em períodos chuvosos, quando há aumento significativo de cor e turbidez devido ao carregamento de sedimentos e matéria orgânica, reforçam a importância de estratégias de otimização, como a rotação variável no processo de floculação. Nessas condições críticas, a eficiência superior do método com rotação variável na redução de cor e turbidez torna-se ainda mais relevante, uma vez que sua capacidade de operar com até 30% menos coagulante compensa as flutuações sazonais da qualidade da água.

Águas com alta turbidez ou carga orgânica elevada, por exemplo, geralmente exigem dosagens maiores de coagulante, mas a aplicação controlada de gradientes de velocidade (G) no floculador permite otimizar a formação de flocos, evitando tanto a subdosagem, que compromete os padrões de qualidade, quanto a superdosagem, que eleva custos operacionais. Assim, a combinação entre a adaptação à sazonalidade por meio da rotação variável e o controle rigoroso dos gradientes de velocidade garante uma resposta eficiente às mudanças nas características da água. Essa abordagem reduz custos, tornando-se essencial para sistemas de tratamento que enfrentam variações abruptas na qualidade da água captada, típicas de fontes superficiais sujeitas a intempéries e cargas orgânicas flutuantes.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados das simulações CFD e ensaios de Jar Test evidenciam a importância crítica do gradiente de velocidade decrescente no processo de floculação.

Em sistemas sem agitação mecânica, a formação de zonas de estagnação e velocidades desbalanceadas compromete a eficiência da agregação de partículas, resultando em flocos frágeis e heterogêneos. Já a introdução de agitação mecânica ajustável, especialmente com rotação variável, demonstrou-se superior ao método convencional, promovendo colisões eficientes na fase inicial e estabilização dos flocos na fase final. Essa abordagem não apenas melhorou a remoção de turbidez de 92,1% contra 87,3% e cor 93,7% contra 82,5%, mas também reduziu o consumo de coagulante em até 28,6%, gerando economia significativa nos custos operacionais.

A adaptação dinâmica às variações sazonais da água bruta, como turbidez e cor elevadas em períodos chuvosos, reforça a necessidade de sistemas flexíveis. A implementação de agitadores mecânicos com inversores de frequência surge como uma solução estratégica, permitindo ajustes precisos na velocidade das pás e no gradiente de velocidade em tempo real. Essa tecnologia otimizaria a distribuição de energia no floculador, eliminando zonas de estagnação, reduzindo o curto-circuito hidráulico e garantindo flocos densos e sedimentáveis. Além disso, a integração com dados de simulação CFD e monitoramento contínuo da qualidade da água permitiria automatizar respostas operacionais, equilibrando eficácia e custos.

Como recomendação final para futuros trabalhos, recuperar os agitadores mecânicos da ETA e adquirir inversores de frequência é essencial para modernizar o processo. Essa medida viabiliza o controle gradual da agitação, adaptando-se a diferentes cargas de partículas e sazonalidades, enquanto reduzirá o consumo de coagulante em até 30%. A economia anual estimada em mais de 75 mil reais, aliada à melhoria na qualidade da água tratada, justifica o investimento, tornando a ETA mais resiliente, sustentável e alinhada às melhores práticas de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 12.216: Projeto de estações de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro ABNT, 1992. 18 p.
2. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria Nº 888, de 04 de maio de 2021.
3. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água. São Carlos: LDiBe, 2011.
4. LIBÂNIO, M. Fundamentos de qualidade e tratamento de água. 3. ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.
5. LLANO-SERNA, C. E. et al. CFD assisted analysis and design of hydraulic flocculators. Revista Mexicana De Ingeniería Química, v. 18, n. 3, p. 995-1015, 2019.
6. MANFIO, Júlia Caetano et al. Avaliação do efeito do gradiente de velocidade na agregação de partículas em unidades mistura completa e de fluxo pistonado. 2018.
7. MARQUES, Rodrigo de Oliveira. Análise do gradiente médio de velocidade em reator de floculação mecanizado com misturador de eixo vertical por meio de simulação de fluido dinâmica computacional. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
8. POMPEO, Raquel; SAMWAYS, Guilherme. Saneamento ambiental. Editora Intersaberes, 2020.
9. RICHTER, Carlos A. Água: métodos e tecnologia de tratamento. Editora Blucher, 2009.
10. ZAPATA RIVERA, Andrés Mauricio; GONZALÍAS MANJARRÉS, Alexander. Caracterización cinética e hidrodinámica del fluido en un floculador hidráulico tipo Alabama localizado en la Ptap “El Arroyo” en Santander de Quilichao, Cauca. LADEE, v. 1, n. 1, p. 43-54, 2020.