

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**

**GUILHERME COSTA DE FELICIO**

**Estudo de caso de uma estação de tratamento de água de filtração direta  
descendente em linha:**

Discussão sobre a necessidade de alteração da tecnologia de tratamento de filtração  
direta descendente em linha pela tecnologia de ciclo completo

São Carlos – SP  
2020



GUILHERME COSTA DE FELICIO

**Estudo de caso de uma estação de tratamento de água de filtração direta  
descendente em linha:**

Discussão sobre a necessidade de alteração da tecnologia de tratamento de filtração  
direta descendente em linha pela tecnologia de ciclo completo

Trabalho de Graduação apresentado à  
Escola de Engenharia de São Carlos da  
Universidade de São Paulo para obtenção  
do título de Engenheiro Ambiental.

Orientadora: Prof. Dra. Márcia Helena  
Rissato Zamariolli Damianovic

São Carlos – SP

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da  
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

C314e Costa de Felicio, Guilherme  
Estudo de caso de uma estação de tratamento de  
água de filtração direta descendente em linha:  
Discussão sobre a necessidade de alteração da  
tecnologia de tratamento de filtração direta  
descendente em linha pela tecnologia de ciclo completo  
/ Guilherme Costa de Felicio; orientadora Márcia Helena  
Rissato Zamariolli Damianovic . São Carlos, 2020.  
  
Monografia (Graduação em Engenharia Ambiental) --  
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de  
São Paulo, 2020.  
  
1. Estação de Tratamento de Água. 2. Filtração  
Direta Descendente em Linha. 3. Ciclo Completo. 4.  
Ensaios de Tratabilidade. I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Guilherme Costa de Felicio**

Data da Defesa: 23/10/2020

Comissão Julgadora:

Resultado:

**Marcia Helena Rizzato Zamariolli Damjanovic (Orientador(a))**

Aprovado

**Gabriel Dibbern Sacchi**

Aprovado

**Gabrielle Migliato Marega**

Aprovado

Prof. Dr. Marcelo Zaiat

Coordenador da Disciplina 1800091- Trabalho de Graduação

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer a Deus por sempre me acompanhar e iluminar meu caminho, e por ter me dado forças para conseguir concluir este trabalho com êxito.

Aos meus pais, João Paulo e Paula, meus maiores incentivadores, meus exemplos de vida. Obrigado por tudo que fizeram e fazem por mim, por sempre me apoiarem a alcançar meus sonhos. Espero ainda encher os de muito orgulho e que possamos compartilhar várias conquistas e momentos felizes. Amo vocês!

À minha irmã Natália, minha melhor amiga e parceira. Obrigado por sempre cuidar de mim! Sou uma pessoa abençoada por ter uma mulher incrível como você em minha vida. Estarei sempre ao seu lado, te amo!

De maneira geral, quero agradecer a toda minha família, meus avós, tios, tias, primos e primas que também estão sempre ao meu lado, acompanhando meu crescimento pessoal e profissional. Amo vocês!

Aos meus amigos, muito obrigado por fazerem parte da minha vida. Foram ótimos os momentos vividos com cada um de vocês, sendo eles em Ribeirão, São Carlos ou em qualquer outro lugar que tivesse uma boa festa!

À Hidrosan Engenharia pelos ensinamentos e experiências práticas adquiridas durante meu estágio. Foi uma honra trabalhar ao lado do Prof. Dr. Luiz Di Bernardo, sua filha Angela Di Bernardo e demais engenheiros e desenhistas que contribuíram para minha formação como Engenheiro Ambiental. Obrigado por proporcionarem o material necessário para elaboração deste trabalho.

Aos professores que tive ao longo da graduação, muito obrigado a todos pelo conhecimento compartilhado! Um agradecimento especial à minha orientadora, Márcia Damianovic, pelo auxílio e paciência para construção deste Trabalho de Graduação.

À USP e CAASO por proporcionarem momentos de alegria, aprendizado e crescimento dentro e fora da sala de aula. É um orgulho estar me formando na melhor universidade do Brasil!

Por fim, muito obrigado a todos que contribuíram direta ou indiretamente para realização deste trabalho!



## RESUMO

**FELICIO, G.C. Estudo de caso de uma estação de tratamento de água de filtração direta descendente em linha: Discussão sobre a necessidade de alteração da tecnologia de tratamento de filtração direta descendente em linha pela tecnologia de ciclo completo.** 2020. 66 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020

Devido a produção de água em desconformidade com os padrões de potabilidade, foi sugerida a reforma e ampliação de uma estação de tratamento de água (ETA) de filtração direta descendente em linha (FDDL), alterando sua tecnologia de tratamento para ciclo completo. A fim de avaliar a real necessidade da alteração da tecnologia de tratamento, foram analisados os dados operacionais do sistema produtor de água ao longo de quatro anos de medição, sendo propostos, em seguida, ensaios na unidade de filtração e de tratabilidade. Os ensaios realizados nos filtros buscaram avaliar as características do meio filtrante, o procedimento de lavagem e o reinício de operação. Os ensaios de tratabilidade em Jarteste simularam o funcionamento do sistema produtor de água vigente para diferentes valores de turbidez da água afluente à ETA, permitindo a proposição de procedimentos operacionais que garantam a qualidade da água filtrada de acordo com a legislação. Ao final de todas as análises e ensaios realizados, foi possível concluir a melhor alternativa para o sistema produtor de água.

**Palavras-Chave:** Estação de Tratamento de Água. Filtração Direta Descendente em Linha. Ciclo Completo. Ensaios de Tratabilidade.

## ABSTRACT

**FELICIO, G.C. Case study of a direct descending inline filtration water treatment plant: Discussion of the need to change the direct descending inline filtration treatment technology by full-cycle technology.** 2020. 66 f. Monograph (Completion of Course Work in Environmental Engineering) – Engineering School of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2020.

Due to the production of water in non-compliance with potability standards, it was suggested the renovation and expansion of a direct descending inline filtration water treatment station, changing its treatment technology to full-cycle. To assess the real need to change the treatment technology, the operational data of the water-producing system were analyzed over four years of measurement, and then, tests on the filtration unit and treatability tests were proposed. The tests carried out on the filters sought to evaluate the characteristics of the filter medium, the washing procedure, and the restart of operation. The treatability tests in Jartest simulated the functioning of the current water producing system for different values of water turbidity affluent to the water treatment station, allowing the proposition of operational procedures that guarantee the quality of the filtered water according to the legislation. At the end of all analyses and tests performed, it was possible to conclude the best alternative for the water-producing system.

**Key-Words:** Water Treatment Plant. Direct Descending Inline Filtration. Full-Cycle. Treatability Tests.



## SUMÁRIO

<b>1. JUSTIFICATIVA .....</b>	12
<b>2. INTRODUÇÃO.....</b>	13
<b>3. OBJETIVO.....</b>	15
<b>4. DIAGNÓSTICO.....</b>	16
<b>4.1. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRODUTOR DE ÁGUA.....</b>	16
<b>4.1.1. Unidade de Pré-Tratamento.....</b>	18
<b>4.1.2. Unidade de Mistura Rápida .....</b>	19
<b>4.1.3. Unidade de Filtração .....</b>	20
<b>4.1.3.1. <i>Lavagem dos Filtros</i> .....</b>	21
<b>4.2. ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS.....</b>	21
<b>4.2.1. Vazão.....</b>	22
<b>4.2.2. pH.....</b>	23
<b>4.2.3. Cor Aparente.....</b>	24
<b>4.2.4. Turbidez.....</b>	26
<b>4.2.5. Alcalinidade.....</b>	29
<b>4.2.6. Cloro Residual Livre .....</b>	30
<b>4.2.7. Íon Fluoreto.....</b>	31
<b>4.2.8. Alumínio Residual .....</b>	32
<b>4.2.9. Considerações da Análise dos Dados Operacionais .....</b>	33
<b>5. METODOLOGIA E RESULTADOS DOS ENSAIOS PROPOSTOS.....</b>	34
<b>5.1. ENSAIO NOS FILTROS .....</b>	34
<b>5.1.1. Batimetria do Meio Filtrante.....</b>	34
<b>5.1.2. Granulometria e Espessura do Meio Filtrante .....</b>	36
<b>5.1.3. Perda de Carga na Carreira de Filtração.....</b>	38
<b>5.1.4. Bolas de Lodo .....</b>	41
<b>5.1.5. Lavagem dos Filtros .....</b>	42
<b>5.1.5.1. <i>Turbidez da Água de Lavagem dos Filtros</i>.....</b>	42
<b>5.1.5.2. <i>Turbidez da Água Filtrada no Reinício de Operação</i>.....</b>	44
<b>5.1.5.3. <i>Expansão do Meio Filtrante</i> .....</b>	46
<b>5.2. ENSAIOS DE TRATABILIDADE.....</b>	47
<b>5.2.1. Série 1 .....</b>	49
<b>5.2.2. Série 2 .....</b>	51
<b>5.2.3. Série 3 .....</b>	52
<b>5.2.3.1. <i>Ensaio de Tratabilidade com Coagulação por Mecanismo de Adsorção-Neutralização de Cargas</i>.....</b>	53

5.2.3.2.	<i>Ensaios de Tratabilidade com Coagulação por Mecanismo de Varredura</i>	55
5.2.4.	Série 4 .....	58
5.2.5.	Considerações dos Ensaios de Tratabilidade.....	61
<b>6.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	62
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	60



## 1. JUSTIFICATIVA

O presente relatório foi baseado em um estudo prático realizado em uma estação de tratamento de água (ETA) com tecnologia de tratamento de filtração direta descendente em linha (FDDL). Este trabalho apresenta a importância da análise dos dados operacionais de uma ETA, assim como a realização de ensaios laboratoriais e em suas unidades operacionais, de forma a garantir subsídios para decisões assertivas e economicamente viáveis.

Em decorrência da ineficiência da ETA de FDDL, no que diz respeito à qualidade da água filtrada e tratada, foi sugerida a ampliação do sistema e alteração de sua tecnologia de tratamento para ciclo completo, a fim de atender aos padrões de qualidade da água exigidos pela Portaria de Consolidação nº 05/2017 (PRC nº 05/2017).

Nos itens subsequentes, será apresentado um diagnóstico do sistema de tratamento, assim como todos os ensaios realizados para proposição de melhorias técnicas e operacionais, de forma a contrapor a necessidade de uma mudança na tecnologia de tratamento. Pretende-se, portanto, o fornecimento de alternativas para o ajuste do sistema existente, visando atender à PRC nº 05/2017.

## 2. INTRODUÇÃO

É sabido que a qualidade da água bruta é um fator decisivo na escolha da tecnologia de tratamento de uma ETA, uma vez que a poluição do meio aquático pode acarretar alteração significativa das características físicas, químicas e biológicas da água. Dependendo do grau de poluição do corpo hídrico que se deseja utilizar para abastecimento humano, recomenda-se a implantação de uma unidade de pré-tratamento.

Fatores como a demanda de água para abastecimento; recursos financeiros disponíveis; espaço físico; e principalmente, a qualidade da água bruta a ser captada apontam a tecnologia de tratamento a ser implementada em uma ETA. No entanto, é recomendada a construção e operação de instalações-piloto, as quais auxiliam na escolha da tecnologia de tratamento, como também na definição de parâmetros operacionais e de projeto (DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN, 2017).

Em se tratando de ETAs já existentes, a água tratada produzida pode não atender aos padrões de potabilidade vigentes, fato associado ao aumento da vazão afluente à estação ou à alteração na qualidade da água bruta (DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN, 2017). Dessa forma, torna-se imprescindível a realização de estudos de tratabilidade para o ajuste dos parâmetros de projeto e de operação.

As principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano são divididas em dois grupos: sem coagulação química e com coagulação química. Além da coagulação, as tecnologias se distinguem pelo número de etapas de tratamento que a água bruta deve percorrer, antes de ser distribuída ao consumidor final. As tecnologias para o tratamento de água comumente usadas no Brasil são listadas a seguir:

- Filtração em múltiplas etapas;
- Dupla filtração;
- Filtração direta ascendente;
- Filtração direta descendente;
- Floto-filtração;
- Tratamento em ciclo completo.

A filtração direta descendente (FDD) surgiu da dificuldade do tratamento de águas com turbidez e cor verdadeira relativamente baixas em ETAs de ciclo completo (DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN, 2017). O tratamento de água por FDD pode

ser dividido nas etapas de mistura rápida, floculação e filtração. No entanto, dependendo da qualidade da água bruta, das características do meio filtrante e da taxa de filtração, a floculação pode ser dispensada, dessa forma após a coagulação, a água é encaminhada diretamente aos filtros. Quando não ocorre floculação a tecnologia de tratamento recebe o nome de filtração direta descendente em linha (FDDL).

Em comparação ao tratamento em ciclo completo, a filtração direta descendente apresenta facilidade no tratamento de água com baixa turbidez; redução no consumo de coagulante e alcalinizante; e produção de menor volume de lodo, além de outras vantagens quanto aos custos de implantação e manutenção. Dentre as desvantagens, destacam-se a dificuldade no tratamento de água com turbidez ou cor verdadeira alta e a necessidade de monitoramento contínuo dos principais parâmetros de qualidade.

A discussão principal deste relatório foca em um sistema de tratamento FDDL, projetado para uma vazão de 450 L/s, com dificuldades em atender aos padrões de qualidade da água estabelecidos pela PRC nº05/2017. Inicialmente, esse sistema de tratamento era composto por uma ETA de filtração direta descendente e apenas um ponto de captação (captação antiga). O aumento da demanda e picos de turbidez na água bruta em períodos chuvosos requereram um novo ponto de captação (captação nova) e uma unidade de pré-tratamento com coagulação, floculação em chicanas e sedimentação em lagoa. Atualmente, a ETA recebe água bruta de ambos os pontos de captação, porém em períodos chuvosos, a captação antiga é desativada e a água proveniente da captação nova passa pela unidade de pré-tratamento antes de ser encaminhada para a ETA. Em decorrência da ineficiência do sistema de tratamento em atender aos padrões de qualidade da água, foram propostas a reforma e ampliação do sistema e a alteração de sua tecnologia de tratamento para ciclo completo.

### **3. OBJETIVO**

Este relatório tem como objetivo apresentar os resultados de um estudo de caso realizado em um sistema produtor de água com tecnologia de tratamento FDDL. Os resultados pretendem auxiliar na proposição de melhorias técnicas e operacionais, de forma que a ETA existente opere em segurança e sem a necessidade de alteração de sua tecnologia de tratamento para ciclo completo.

## 4. DIAGNÓSTICO

### 4.1. APRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRODUTOR DE ÁGUA

O sistema produtor de água a ser analisado é composto por dois pontos de captação denominados no presente trabalho como captação antiga e captação nova (Figura 4.1). Estes estão localizados em um mesmo manancial, sendo a captação nova localizada à montante da captação antiga. A água bruta captada em ambos é encaminhada por gravidade à ETA com auxílio de duas adutoras em ferro fundido. A adutora da captação nova apresenta um “by-pass” que a interliga a unidade de pré-tratamento.

Figura 4.1 – Captações nova e antiga do sistema produtor de água



Fonte: Disponibilizado pelo sistema produtor de água

As unidades de tratamento de água que compõem esse sistema produtor são elencadas a seguir:

- Unidade de pré-tratamento (flocação e decantação);
- Unidade de mistura rápida (vertedor Parshall);
- Unidade de filtração.

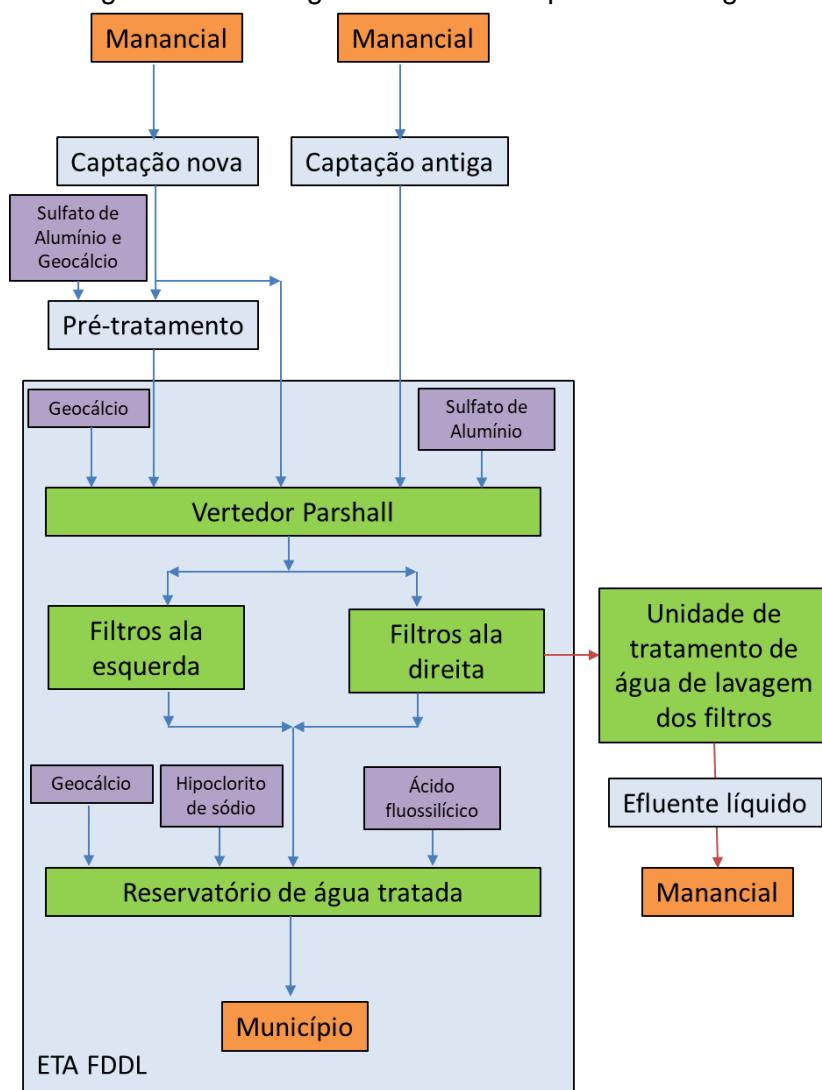
Além dessas unidades, o sistema produtor de água dispõe também de duas unidades de tratamento de resíduos gerados ao longo do tratamento de água. Os bags de geotêxtil são responsáveis pelo desaguamento do lodo acumulado no fundo da lagoa de sedimentação da unidade de pré-tratamento. A antiga unidade de pré-filtragem da água bruta em pedregulho é utilizada como sedimentador da água de lavagem dos filtros.

Ao longo do sistema de tratamento de água, são utilizados diferentes produtos químicos, imprescindíveis para o bom funcionamento do sistema produtor, sendo eles:

- Sulfato de alumínio (coagulante);
- Cal ou Geocálcio (Ajuste do pH de coagulação);
- Hipoclorito de sódio (desinfecção);
- Ácido fluossilícico (fluoretação).

A Figura 4.2 apresenta um fluxograma do sistema produtor de água, destacando os pontos de captação existentes, suas unidades para tratamento de água e resíduos e os pontos de aplicação dos produtos químicos.

Figura 4.2 - Fluxograma do sistema produtor de água



Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.1.1. Unidade de Pré-Tratamento

A unidade de pré-tratamento (Figura 4.3) recebe a água bruta proveniente somente da captação nova e é dividida nas etapas de coagulação, floculação e decantação, possuindo uma área total de 3.249 m<sup>2</sup> e profundidade útil de 3,20 m. Essa unidade é utilizada em períodos chuvosos, intensos entre os meses de novembro e fevereiro, nos quais ocorre aumento significativo da turbidez e cor verdadeira da água bruta.

Figura 4.3 – Unidade de pré-tratamento



Fonte: Disponibilizado pelo sistema produtor de água

Inicialmente, a água bruta afluente ao pré-tratamento recebe a dosagem de sulfato de alumínio (coagulante) e cal (alcalinizante) e, posteriormente, é encaminhada para a etapa de floculação hidráulica em chicanas que apresenta uma área de 523 m<sup>2</sup>. A água floculada segue para a lagoa de sedimentação, com área igual a 2.725 m<sup>2</sup> e, por fim, a água pré-tratada escoa em direção à unidade de mistura rápida da ETA.

Vale ressaltar que durante a dragagem da lagoa de sedimentação, realizada com a unidade em funcionamento, foi observado significativo aumento da turbidez da água pré-tratada afluente à ETA FDDL. Alterações frequentes nas dosagens dos produtos químicos aplicados na unidade de mistura rápida foram necessárias e observou-se diminuição das carreiras de filtração e piora na qualidade da água filtrada.

#### 4.1.2. Unidade de Mistura Rápida

A unidade de mistura rápida é composta por uma calha Parshall (Figura 4.4) com garganta de largura de 61 cm, na qual é realizada a aplicação de coagulante e alcalinizante, além da medição da vazão afluente por meio de um medidor ultrassônico. A partir dos dados históricos de vazão no período de 2015 a 2019, a vazão média da água bruta afluente à ETA resultou em 627 L/s ( $0,627 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

Figura 4.4 – Calha Parshall da unidade de mistura rápida



Fonte: Disponibilizado pelo sistema produtor de água

Essa unidade recebe a água bruta proveniente das captações nova e antiga, porém em períodos chuvosos, nos quais ocorrem picos de turbidez na água bruta, a captação antiga é interrompida e a unidade passa a receber somente a água pré-tratada. A dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) e o ajuste do pH, por meio da aplicação de alcalinizante (cal), dependem da turbidez da água afluente à unidade de mistura rápida.

Vale ressaltar que o sistema produtor de água apresenta dois pontos de aplicação de coagulante (pré-tratamento e calha Parshall), no entanto em períodos de estiagem e de baixa turbidez da água bruta, a dosagem de sulfato de alumínio é realizada somente na unidade de mistura rápida.

Após a etapa de coagulação, a água coagulada é encaminhada à unidade de filtração por meio de canais que alimentam diretamente os filtros existentes na ETA, sendo quatro filtros nas alas esquerda e direita.

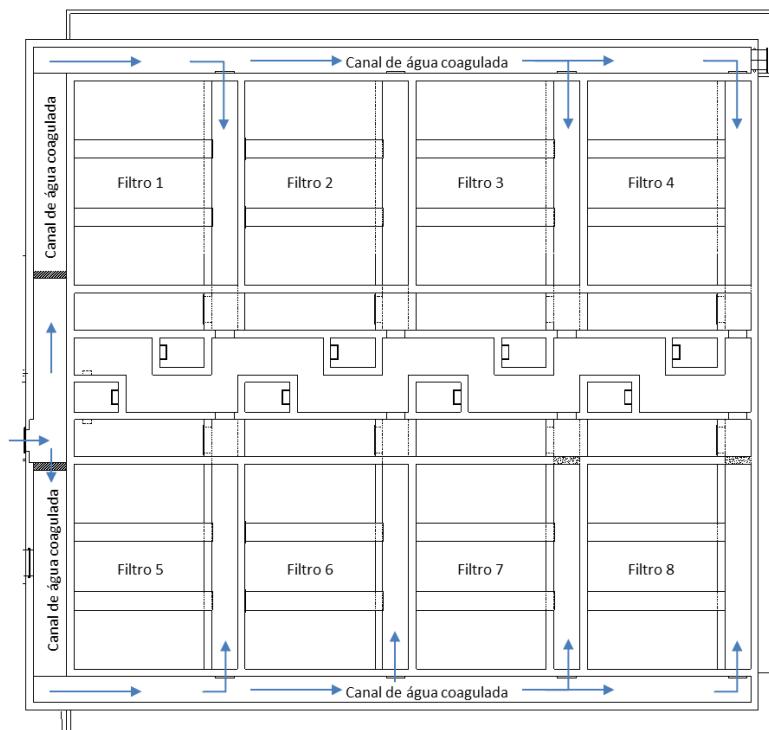
#### 4.1.3. Unidade de Filtração

A unidade filtração é constituída por oito filtros rápidos descendentes de 19 m<sup>2</sup>, os quais possuem câmaras individuais e meio filtrante com espessura de 0,30 m composto por camadas de antracito e areia. Para uma vazão média afluente à ETA igual a 627 L/s, a taxa média de filtração dos filtros resulta em 352 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d.

Os filtros são operados com método de controle de filtração por taxa declinante variável, apresentando uma sequência de lavagem bem definida, com duração das carreiras de filtração em torno de 10 horas.

A água filtrada é coletada em um canal geral e encaminhada à câmara de contato, onde é realizada a etapa de desinfecção por meio da aplicação de hipoclorito de sódio. Antes de ser enviada ao reservatório de água tratada, são dosados o ácido fluossilícico e o geocalcário para a estabilização final da água tratada. A Figura 4.5 apresenta um esquema da unidade de filtração existente no sistema produtor de água.

Figura 4.5 – Esquema da unidade de filtração do sistema produtor de água



Fonte: Disponibilizado pela Hidrosan Engenharia

#### 4.1.3.1. *Lavagem dos Filtros*

A lavagem dos filtros é realizada com ar e depois com a água filtrada proveniente dos demais filtros de uma ala (esquerda ou direita) em operação, uma vez que suas tubulações de saída de água filtrada são interligadas a um canal geral.

Inicialmente, o ar é aplicado ao longo do meio filtrante com uma taxa de 50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.d (dados de projeto), durante 2 minutos. A aplicação de ar para a lavagem é realizada de forma bem distribuída ao longo de todo o meio filtrante, no entanto foi observado que a válvula de entrada de água filtrada não é fechada totalmente, acarretando aumento do nível de água dos filtros durante a lavagem e perda do material filtrante.

Em seguida, ocorre a lavagem com água filtrada no sentido ascensional a uma taxa de, aproximadamente, 0,73 m/min, considerando que toda a vazão afluente à uma ala (esquerda ou direita) da unidade de filtração (313,5 L/s) retorne para a lavagem.

## 4.2. ANÁLISE DOS DADOS OPERACIONAIS

A Tabela 4.1 apresenta os principais parâmetros analisados para as águas bruta, pré-tratada, filtrada e tratada no período de janeiro de 2015 a janeiro de 2019. Nos itens subsequentes, estão apresentados e discutidos estes parâmetros, relacionando-os com os padrões de qualidade da água estabelecidos pela PRC nº 05/2017, como também com as etapas de tratamento do sistema produtor de água.

Tabela 4.1 - Dados operacionais das águas bruta, pré-tratada, filtrada e tratada nos anos de 2015 a 2019

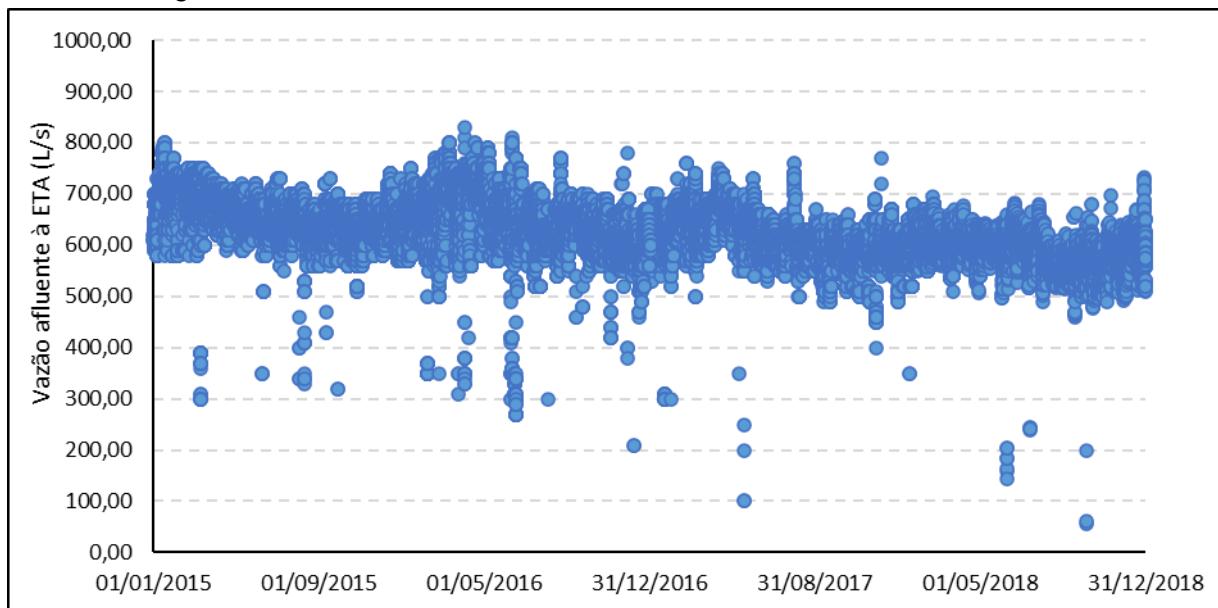
Parâmetros	Amostras de Água
Vazão	Bruta e Pré-Tratada
pH	Bruta, Pré-Tratada e Tratada
Cor Aparente	Bruta, Pré-Tratada e Tratada
Turbidez	Bruta, Pré-Tratada, Filtrada e Tratada
Alcalinidade	Bruta
Cloro Residual Livre	Tratada
Íon Fluoreto	Tratada
Alumínio Residual	Tratada

Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.2.1. Vazão

A Figura 4.6 apresenta os valores de vazão afluente à ETA de FDDL, medidos ao longo dos anos de 2015 a 2019. É sabido que a medição dessa variável é realizada na unidade de mistura rápida e que a ETA foi projetada para operar com uma vazão de 450 L/s.

Figura 4.6 - Valores de vazão afluente à ETA nos anos de 2015 a 2019



Fonte: Elaborado pelo autor

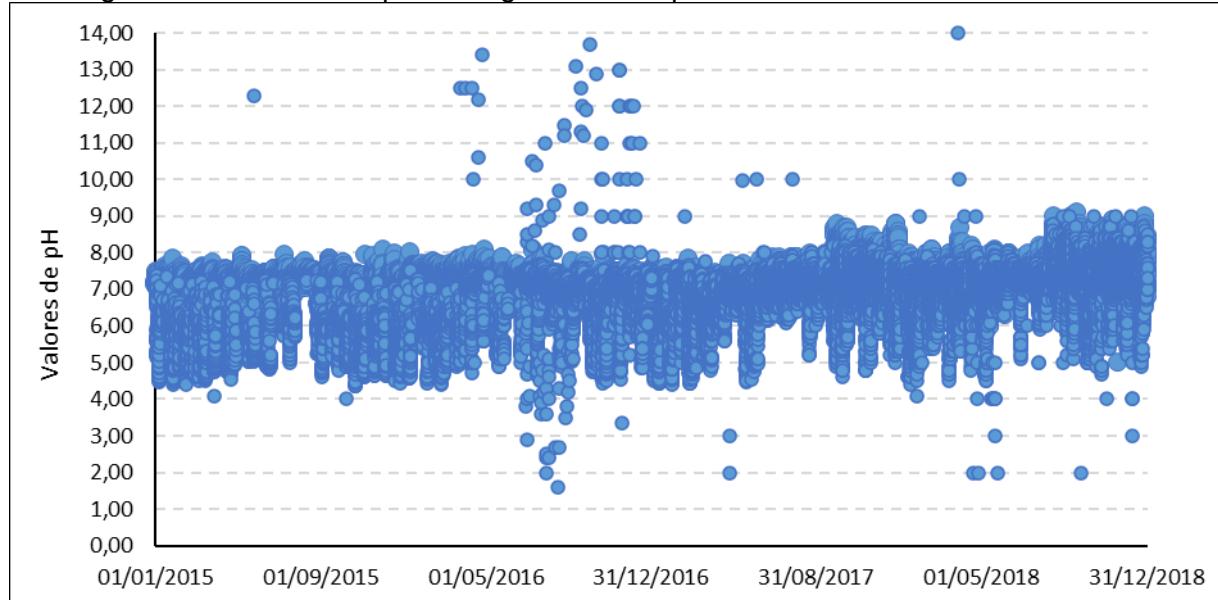
É possível observar que, na maior parte do tempo, os valores de vazão foram superiores ao estabelecido em projeto (450 L/s), sendo a média calculada em torno

de 627 L/s. Essa sobrecarga de vazão acarreta aumento na taxa média de filtração, podendo prejudicar a qualidade da água filtrada, especialmente em um sistema de filtração direta descendente e método de controle de filtração por taxa declinante.

#### 4.2.2. pH

A Figura 4.7 apresenta o gráfico de dispersão dos valores de pH da água afluente à unidade de mistura rápida, onde são realizadas as dosagens de coagulante (sulfato de alumínio) e, quando necessário, de alcalinizante (cal).

Figura 4.7 - Valores de pH das águas bruta e pré-tratada nos anos de 2015 a 2019



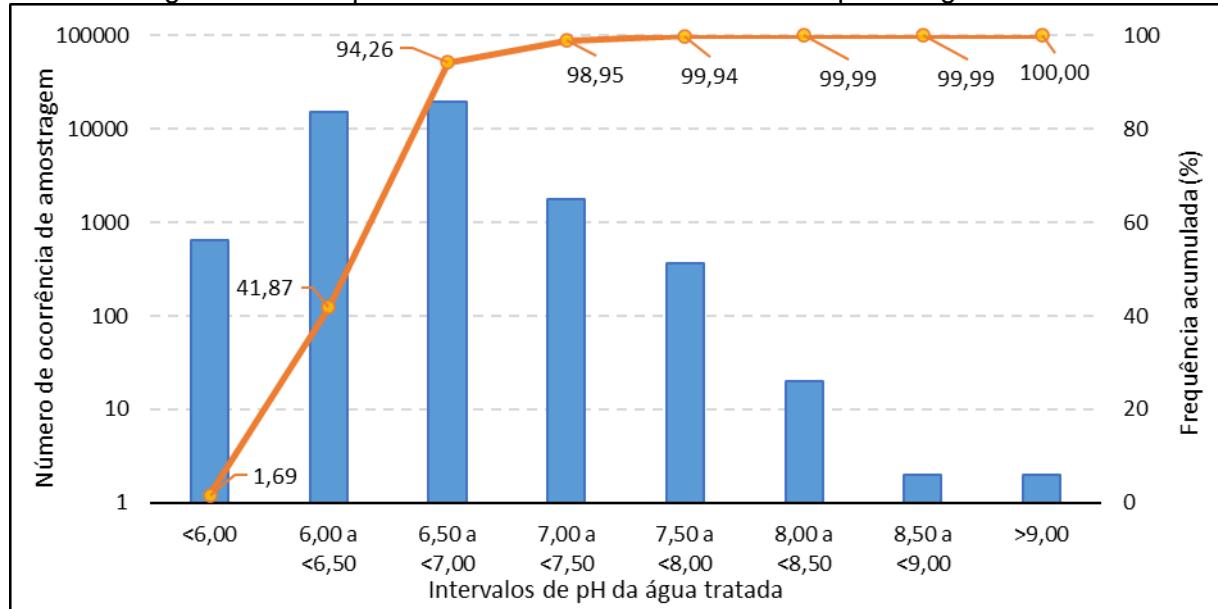
Fonte: Elaborado pelo autor

O mecanismo de coagulação utilizado na ETA é o de adsorção e neutralização de cargas, por meio de espécies hidrolisadas de alumínio. Uma vez que a dosagem de sulfato de alumínio está intimamente relacionada ao pH de coagulação, as variações recorrentes de pH interferem consideravelmente no processo de coagulação, notadamente quando a tecnologia existente é a FDDL, afetando negativamente a qualidade da água filtrada.

A partir da Figura 4.7, nota-se que os valores de pH da água afluente à unidade de mistura rápida foram predominantes no intervalo entre 5,00 a 8,00. Valores inferiores a 5,00 e superiores a 9,00 podem ser explicados por possíveis procedimentos analíticos equivocados ou mudanças bruscas nas dosagens de coagulante e/ou alcalinizante.

A Figura 4.8 apresenta o número de ocorrências (azul) e a frequência acumulada (laranja) dos valores de pH da água tratada, analisados durante o período de 2015 a 2019.

Figura 4.8 - Frequência de ocorrência dos valores de pH da água tratada



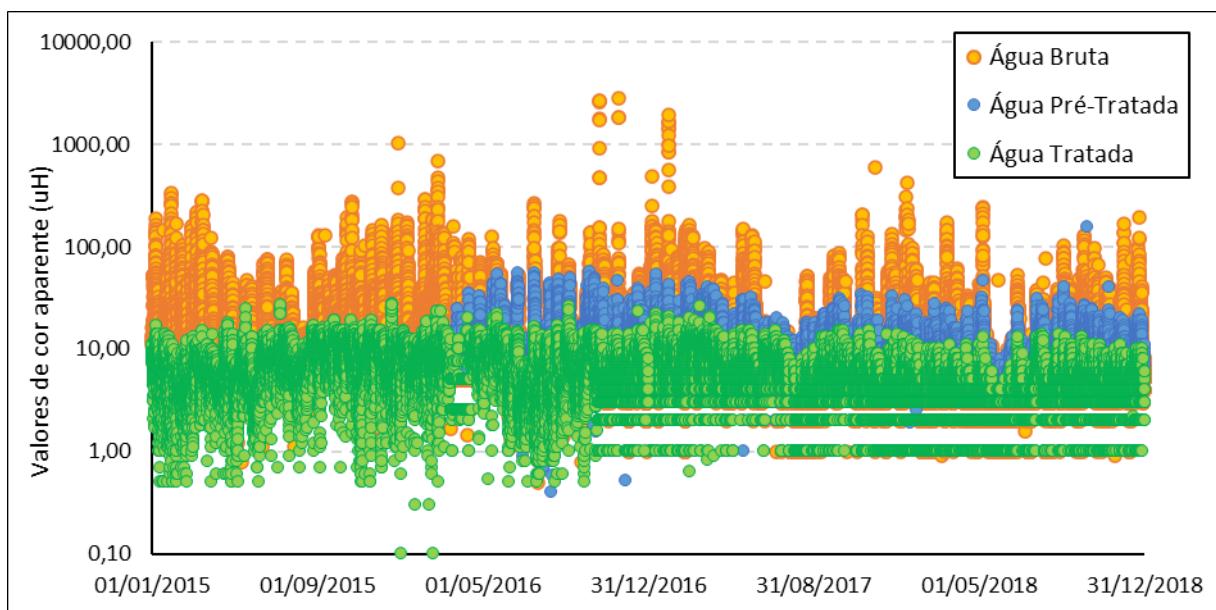
Fonte: Elaborado pelo autor

O Anexo XX da PRC nº 05/2017 estabelece que o pH da água tratada no sistema de distribuição (reservatório e rede de abastecimento) seja mantido na faixa de 6,00 a 9,50. A partir da Figura 4.8, é possível observar que 98% das amostras de água tratada analisadas apresentaram valores de pH de acordo com o exigido pela portaria.

#### 4.2.3. Cor Aparente

A Figura 4.9 relaciona os valores de cor aparente das águas bruta, pré-tratada e tratada medidos nos anos de 2015 a 2019.

Figura 4.9 - Valores de cor aparente das águas bruta, pré-tratada e tratada nos anos de 2015 a 2019



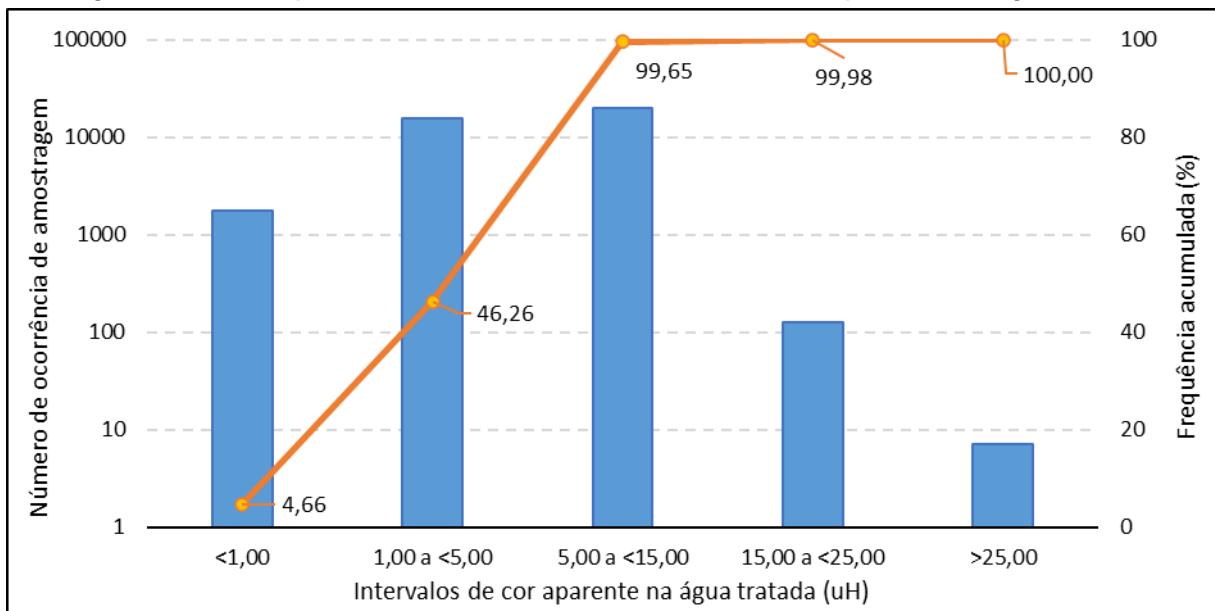
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 4.9, é possível observar a importância da unidade de pré-tratamento, uma vez que os valores de cor aparente da água pré-tratada são inferiores aos da água bruta, ficando na faixa de 0,40 a 158 uH. Propõe-se também a realização de medições de cor verdadeira da água pré-tratada pela equipe operacional do sistema produtor, de forma a observar se as moléculas de substâncias húmicas e fulvícias foram devidamente coaguladas.

Além disso, nota-se picos de cor aparente da água bruta entre os meses de novembro e fevereiro, os quais estão relacionados ao período de chuvas intensas. É sabido que nesses períodos, a captação antiga é desativada e somente a captação nova permanece em funcionamento, encaminhando a água bruta à unidade de pré-tratamento, a qual reduz significativamente os valores de cor aparente da água bruta, como visto no gráfico de dispersão da Figura 4.9.

O Anexo XX da PRC nº 05/2017 estabelece um valor máximo permitido de 15 uH para a cor aparente da água tratada. A Figura 4.10 apresenta o número de ocorrências (azul) e a frequência acumulada (laranja) dos valores de cor aparente da água tratada, analisados durante o período de 2015 a 2019.

Figura 4.10 - Frequência de ocorrência dos valores de cor aparente da água tratada



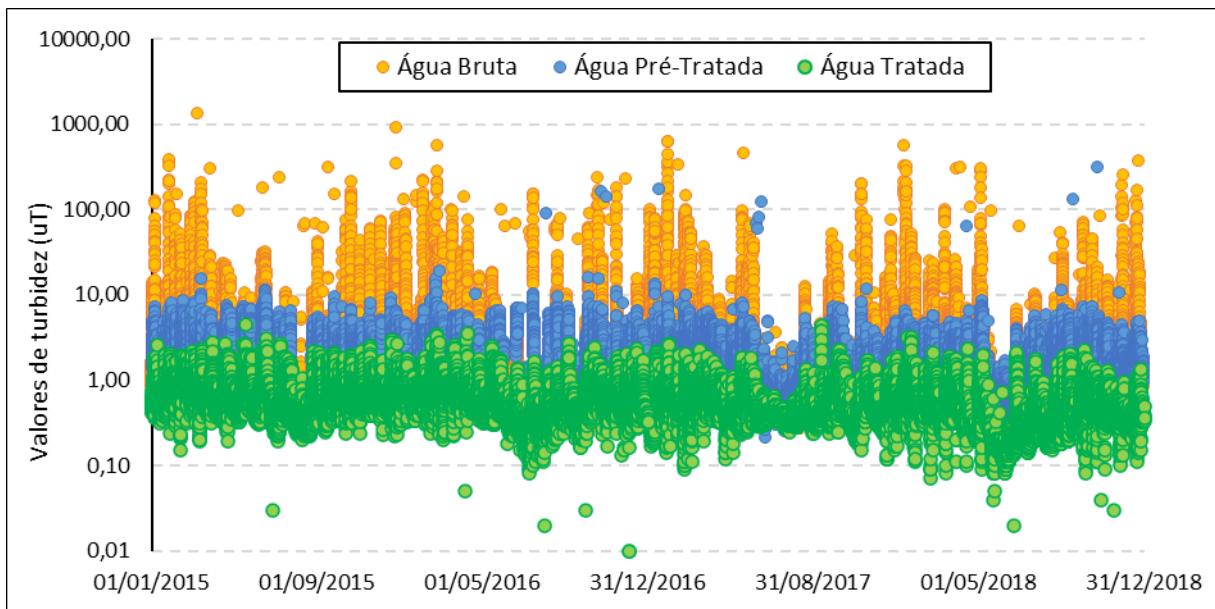
Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no exposto na Figura 4.10, observa-se que 99% das amostras de água tratada analisadas ao longo de quatro anos (2015 a 2019) apresentaram valores de cor aparente iguais ou inferiores a 15 uH, respeitando o que estabelece a PRC nº 05/2017.

#### 4.2.4. Turbidez

A Figura 4.11 relaciona os valores de turbidez das águas bruta, pré-tratada e tratada medidos nos anos de 2015 a 2019.

Figura 4.11 - Valores de turbidez das águas bruta, pré-tratada e tratada nos anos de 2015 a 2019



Fonte: Elaborado pelo autor

Assim como mencionado no item 4.2.3, a unidade de pré-tratamento desempenha papel fundamental na redução da cor aparente da água bruta afluente à ETA. Da mesma forma, é possível observar que os valores de turbidez da água pré-tratada foram inferiores aos da água bruta, como apresentado na Figura 4.11. A redução dos valores dessas variáveis, somada a ajustes em determinados procedimentos operacionais, resulta no encaminhamento de uma água com qualidade superior à água bruta “in natura” para os filtros, acarretando em carreiras de filtração mais prolongadas e uma melhora na qualidade da água tratada produzida.

Foram observados picos de turbidez da água bruta nos meses de novembro a fevereiro, como também nos meses de maio e junho. Esses picos podem ser explicados pela sazonalidade, especialmente na época de chuvas intensas e pelo procedimento de dragagem da lagoa de sedimentação, causando o revolvimento do material sedimentado.

O Anexo XX da PRC nº 05/2017 estabelece que o valor máximo de turbidez para a água filtrada seja 0,50 uT, de forma a ser atendido por, no mínimo, 95% das amostras coletadas. Além disso, a mesma estabelece que o limite máximo de turbidez para qualquer amostra pontual de água filtrada seja inferior a 1,00 uT. A Tabela 4.2 apresenta a frequência de ocorrência dos valores de turbidez da água filtrada individual coletada ao longo dos anos de 2015 a 2019.

Tabela 4.2 - Frequência de ocorrência dos valores de turbidez da água filtrada dos filtros F1 a F8

Faixa de Turbidez (uT)	Porcentagem (%)							
	Filtro 1	Filtro 2	Filtro 3	Filtro 4	Filtro 5	Filtro 6	Filtro 7	Filtro 8
< 0,50	36	35	39	39	39	40	39	43
0,50 a 1,00	50	49	49	48	49	49	48	37
> 1,00	14	16	12	14	12	11	13	10

Fonte: Elaborado pelo autor

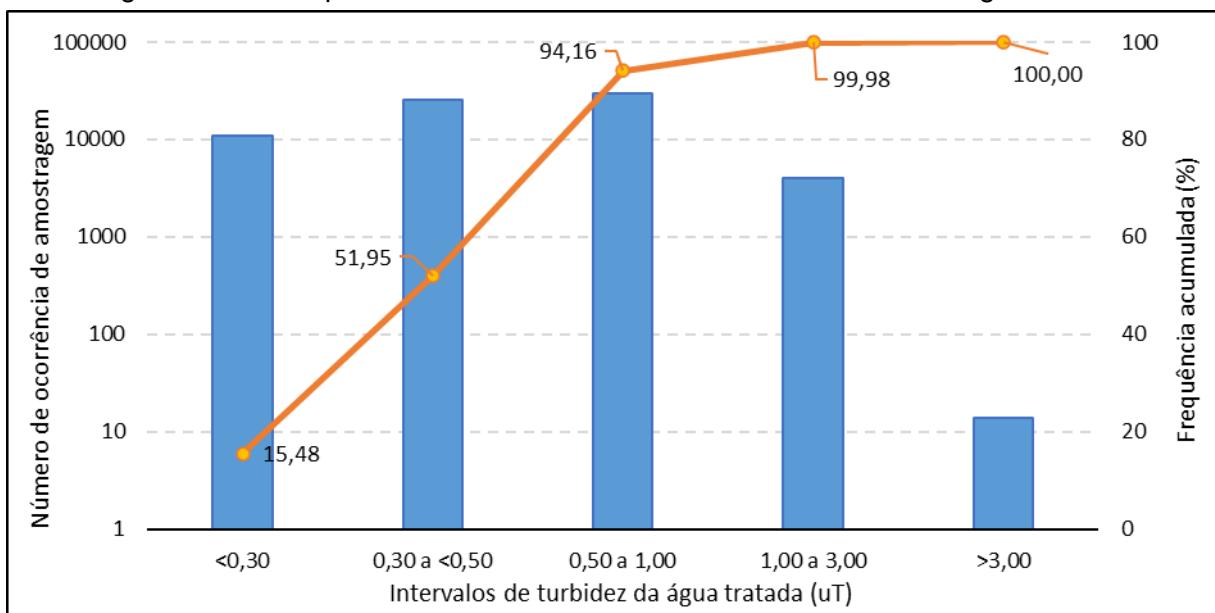
A partir da Tabela 4.2, nota-se que todos os filtros produziram água filtrada com turbidez igual ou inferior a 0,50 uT em no máximo 43% das amostras analisadas, sendo esse valor inferior ao estabelecido pela PRC nº 05/2017, a qual exige um mínimo de 95%. Ademais, os oito filtros apresentaram pelo menos 10% das amostras de água filtrada com valores de turbidez superiores a 1,00 uT, ultrapassando o limite máximo requerido pela portaria.

Valores elevados de turbidez na água filtrada oferecem riscos à saúde pública, uma vez que estão relacionados à presença de microrganismos causadores de doenças na água filtrada, como bactérias, vírus e protozoários *Cryptosporidium*, sendo estes resistentes à desinfecção com cloro livre.

As possíveis causas para que a qualidade da água filtrada não se enquadre nos padrões de potabilidade são as dosagens incorretas de produtos químicos aplicados na ETA de FDDL, coagulação ineficiente e também pelo fato dos filtros possuírem pequena espessura de meio filtrante (0,30 m, conforme citado no item 4.1.3).

No que diz respeito à turbidez da água tratada, a Figura 4.12 apresenta o número de ocorrências (azul) e a frequência acumulada (laranja) dos valores de turbidez da água tratada, analisados durante o período de 2015 a 2019.

Figura 4.12 - Frequência de ocorrência dos valores de turbidez da água tratada



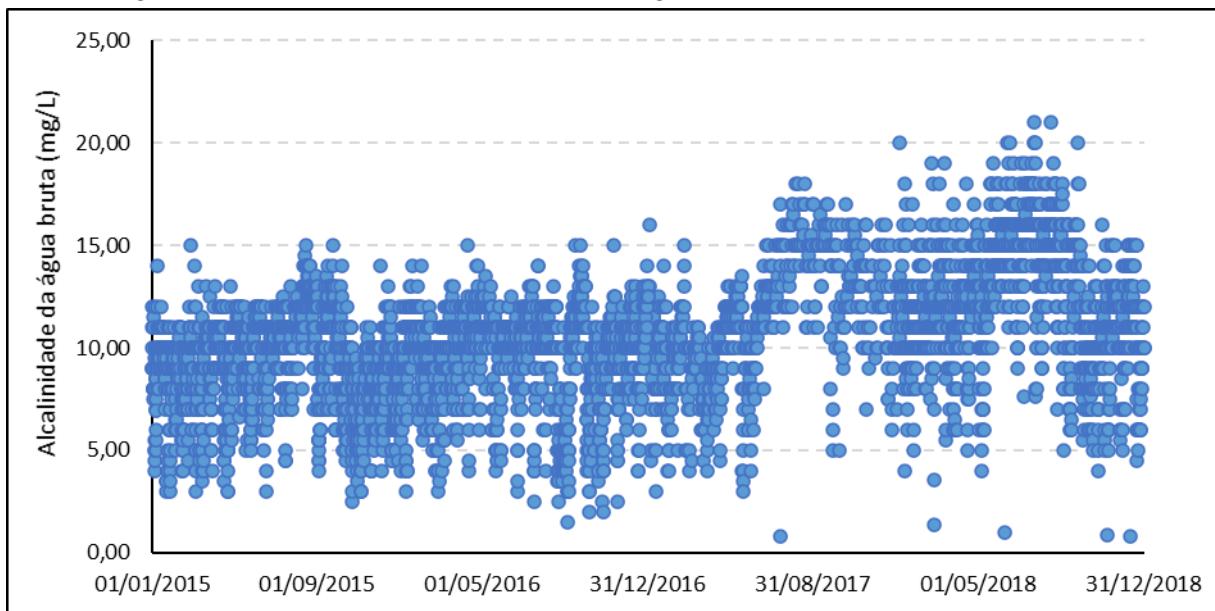
Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Figura 4.12, é possível observar que 52% dos valores de turbidez analisados foram inferiores a 0,50 uT e 94%, inferiores a 1,00 uT. No entanto, nota-se a existência de valores de turbidez superiores a 1,00 uT em 5,84% das amostras de água tratada analisadas.

#### 4.2.5. Alcalinidade

A análise dessa variável é fundamental, pois influencia diretamente na dosagem de alcalinizante para o ajuste do pH de coagulação e, consequentemente, na eficiência do processo. A Figura 4.13 apresenta os valores de alcalinidade da água bruta ao longo dos anos de 2015 a 2019.

Figura 4.13 - Valores de alcalinidade da água bruta nos anos de 2015 a 2019



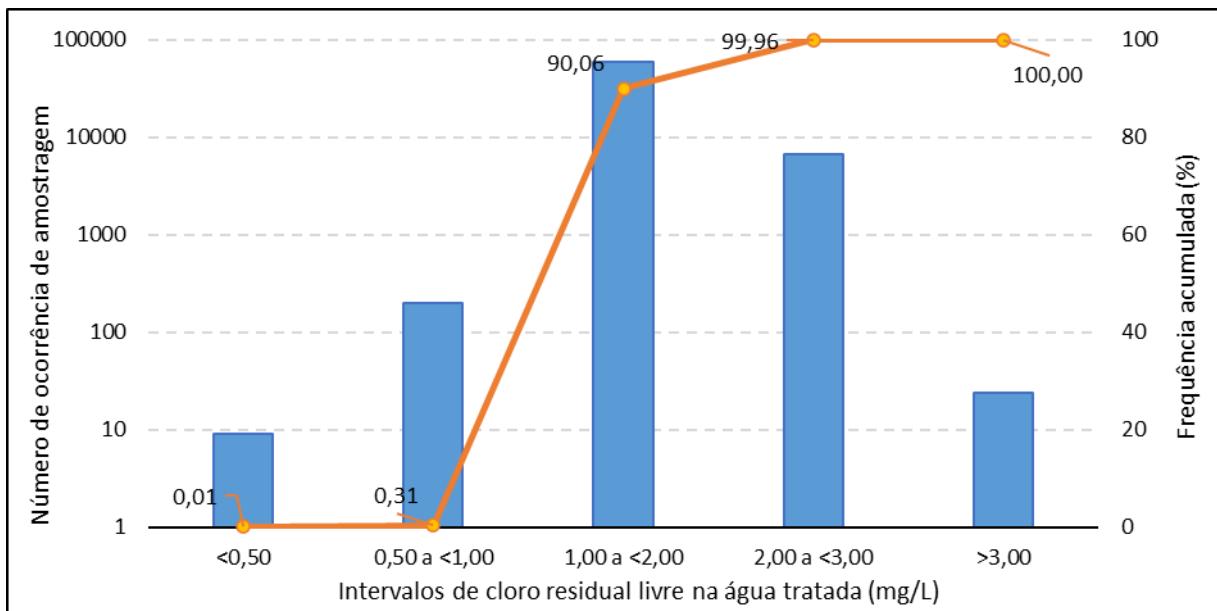
Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os valores de alcalinidade se estabeleceram, predominantemente, abaixo de 15 mg/L. Valores baixos desse parâmetro apontam a necessidade de adição de alcalinizante na água bruta, enquanto para valores elevados de alcalinidade, pode-se utilizar dosagens maiores de coagulante sem a necessidade de adição de nenhum outro condicionante químico para coagulação.

#### 4.2.6. Cloro Residual Livre

A Figura 4.14 apresenta o número de ocorrências (azul) e a frequência acumulada (laranja) das concentrações de cloro residual livre na água tratada durante os anos de 2015 a 2019. O Anexo XX da PRC nº 05/2017 estabelece valores mínimo e máximo para a concentração dessa variável em todo o sistema de distribuição (reservatório e rede de abastecimento), sendo eles iguais a, respectivamente, 0,20 mg/L e 2,00 mg/L.

Figura 4.14 - Frequência de ocorrência das concentrações de cloro residual livre na água tratada



Fonte: Elaborada pelo autor

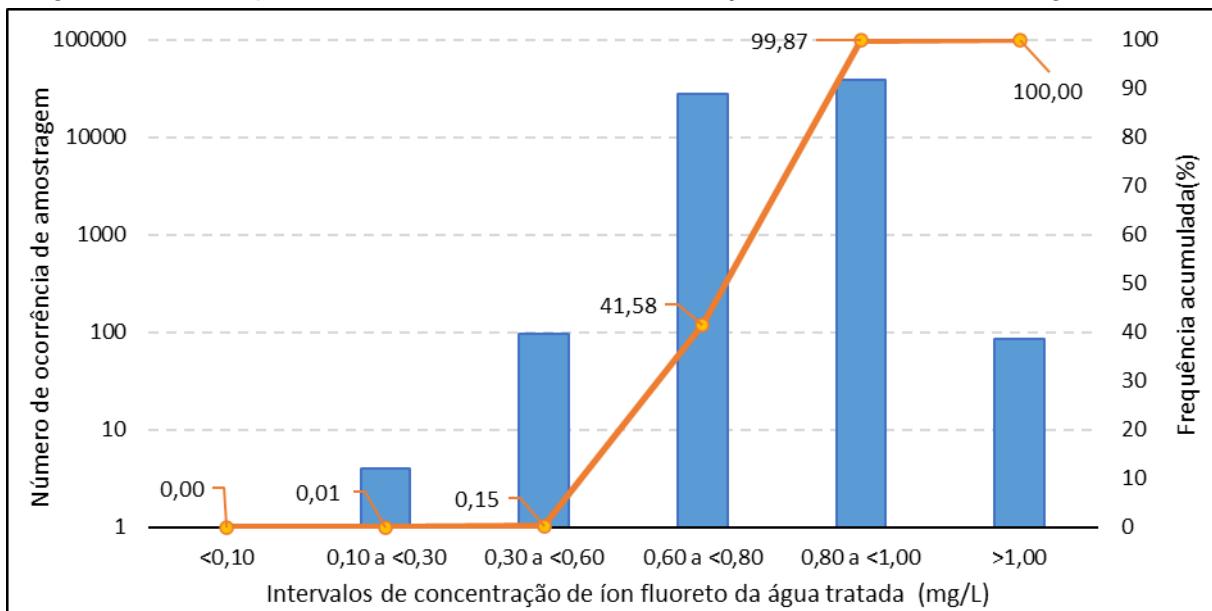
É possível observar que 90% das amostras de água tratada registraram concentração de cloro residual livre de acordo com o estabelecido pela norma, enquanto 9,95% excederam o teor máximo de 2,00 mg/L.

O Anexo 7 do Anexo XX da PRC nº 05/2017 apresenta os valores máximos permitidos para substâncias químicas que representam risco à saúde, determinando um teor máximo de 5,00 mg/L para o cloro residual livre. A partir da Figura 4.14, nota-se que 99% das amostras de água tratada possuem teor desse químico inferior ao VMP, apontando conformidade com o padrão de potabilidade dessa substância.

#### 4.2.7. Íon Fluoreto

A Figura 4.15 apresenta o número de ocorrências (azul) e a frequência acumulada (laranja) das concentrações de íon fluoreto na água tratada durante os anos de 2015 a 2019. O Anexo XX da PRC nº 05/2017 estabelece valores mínimo e máximo para a concentração dessa variável em locais com temperaturas médias entre 26,4 a 32,5 °C, sendo eles iguais a, respectivamente, 0,60 mg/L e 0,80 mg/L.

Figura 4.15 - Frequência de ocorrência das concentrações de íon fluoreto na água tratada



Fonte: Elaborado pelo autor

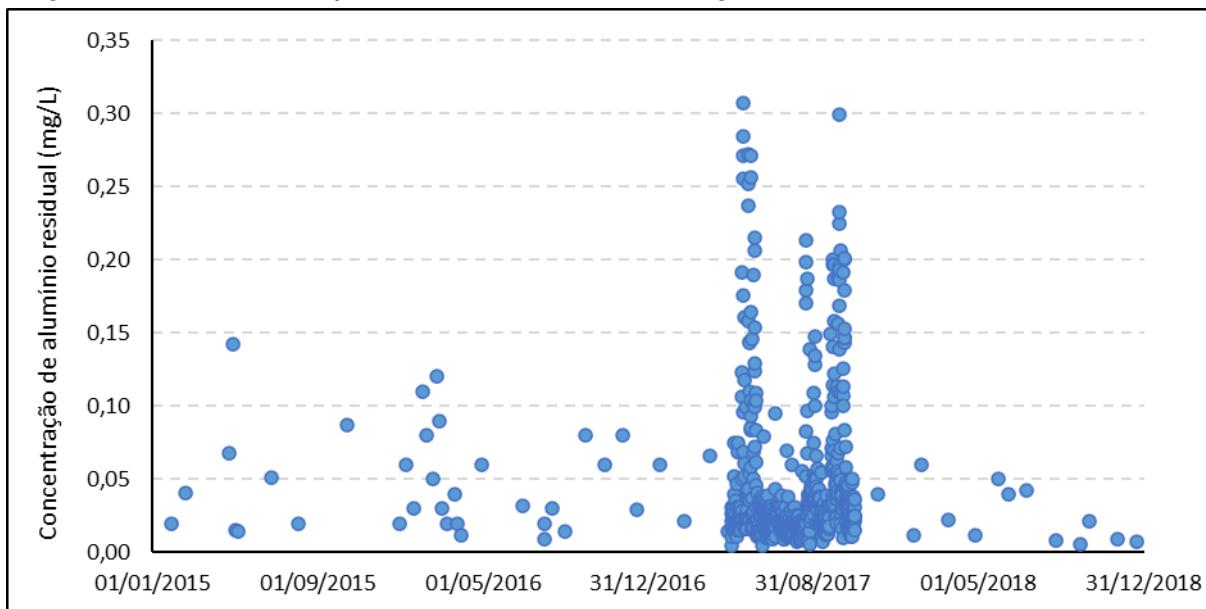
É possível observar que 0,16% das amostras de água tratada registraram concentração de íon fluoreto inferior ao mínimo estabelecido pela norma, enquanto que 58% excederam o teor máximo de 0,80 mg/L.

O Anexo 7 do Anexo XX da PRC nº 05/2017 apresenta os valores máximos permitidos para substâncias químicas que representam risco à saúde, determinando um teor máximo de 1,50 mg/L para o íon fluoreto. A partir da Figura 4.15, nota-se que 99% das amostras de água tratada possuem teor desse químico inferior ao VMP, apontando conformidade com o padrão de potabilidade dessa substância.

#### 4.2.8. Alumínio Residual

Devido ao uso do sulfato de alumínio como agente coagulante, faz-se necessário a análise desse constituinte na água tratada, o qual deve apresentar um teor máximo de 0,20 mg/L, segundo o Anexo 7 do Anexo XX da PRC nº 05/2017. A Figura 4.16 apresenta a concentração de alumínio residual na água tratada ao longo dos anos de 2015 a 2019.

Figura 4.16 - Concentração de alumínio residual na água tratada nos anos de 2015 a 2019



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que os valores de alumínio residual se estabeleceram, predominantemente, abaixo de 0,20 mg/L, conforme norma vigente.

#### 4.2.9. Considerações da Análise dos Dados Operacionais

Diante dos resultados observados no item 4.2, pode-se dizer que a água bruta possui, na maior parte do tempo, qualidade condizente com aquela desejável para o funcionamento adequado da tecnologia de filtração direta descendente, exceção feita à época de chuvas intensas, com o surgimento de picos de turbidez e de cor aparente relativamente altos. Dessa forma, é imprescindível a necessidade de pré-tratamento para que a ETA de FDDL possa funcionar continuamente com produção de água que atenda à legislação vigente.

Os valores de turbidez observados para água filtrada produzida na ETA não foram satisfatórios, uma vez que não atenderam ao estabelecido pela PRC nº 05/2017. Diversos fatores podem estar relacionados a qualidade da água filtrada observada, sendo necessários ensaios na unidade de filtração, como também ensaios em Jarteste.

O item 5 apresentado a seguir descreve a metodologia dos diferentes ensaios realizados na ETA de FDDL, assim como seus resultados, a fim de justificar os valores

dos parâmetros e variáveis que não foram condizentes com a norma vigente, possibilitando futuras melhorias ao sistema produtor.

## 5. METODOLOGIA E RESULTADOS DOS ENSAIOS PROPOSTOS

### 5.1. ENSAIO NOS FILTROS

A fim de analisar a eficiência da unidade de filtração existente, foram realizados diferentes ensaios nos filtros da ETA de FDDL, os quais são listados a seguir:

- Batimetria do meio filtrante;
- Granulometria e espessura do meio filtrante;
- Perda de carga ao longo da carreira de filtração;
- Bolas de lodo;
- Lavagem dos filtros.

Os itens 5.1.1 a 5.1.5 exemplificam as metodologias e resultados dos ensaios realizados nos filtros, de modo a prover informações relevantes quanto ao funcionamento da unidade.

#### 5.1.1. Batimetria do Meio Filtrante

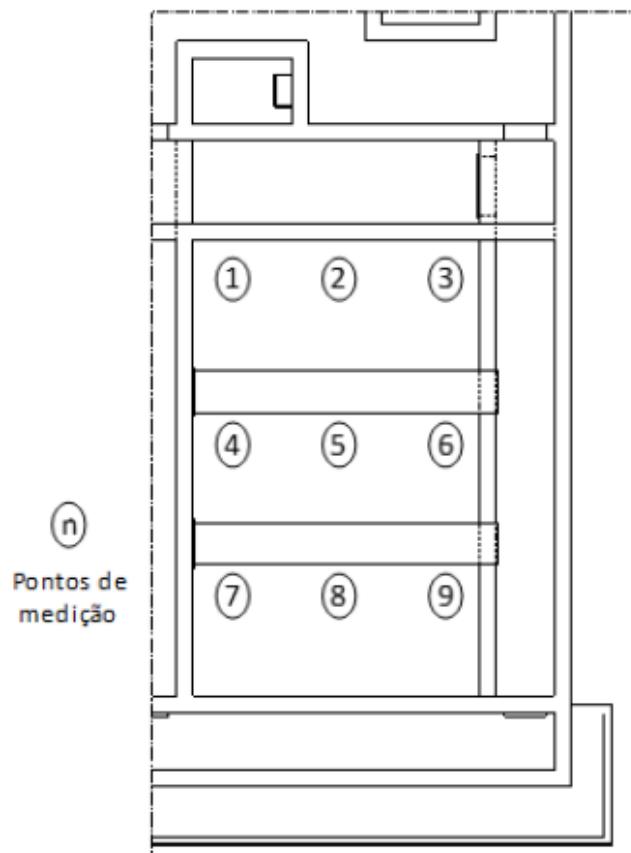
O ensaio de batimetria baseia-se na medida da altura do meio filtrante em relação a um referencial adotado, devendo ser realizado ao longo de toda a área filtrante, de forma a garantir maior confiabilidade dos resultados obtidos.

Este ensaio tem por finalidade avaliar a eficiência do procedimento de lavagem dos filtros, a configuração das camadas suporte e os sistemas de drenagem existentes. A ineficiência ou inadequabilidade desses condicionantes pode ocasionar o carreamento de material filtrante durante a lavagem e, consequente acúmulo do mesmo em um ponto específico do filtro, diferindo, portanto, das condições ótimas para a filtração.

O ensaio de batimetria foi realizado nos Filtros 4 e 8 da ETA de FDDL, os quais pertencem a diferentes alas (esquerda e direita). O meio filtrante de ambos foi dividido em nove pontos distintos em planta (Figura 5.1), medindo-se, a partir da cota inferior

das calhas de coleta de água de lavagem dos filtros, às respectivas alturas do meio filtrante.

Figura 5.1 - Pontos de medição para o ensaio de batimetria do meio filtrante



Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de batimetria realizados nos dois filtros da ETA de FDDL.

Tabela 5.1 - Resultados dos ensaios de batimetria

Parâmetros	Filtro 4	Altura (cm)	Filtro 8
Ponto 1	87,4		89,0
Ponto 2	87,4		89,2
Ponto 3	87,5		88,7
Ponto 4	88,3		88,7
Ponto 5	88,0		88,6
Ponto 6	88,5		89,7
Ponto 7	88,6		84,0
Ponto 8	88,0		88,9
Ponto 9	89,5		90,5

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir da Tabela 5.1, nota-se que as alturas dos Pontos 1 a 9 no Filtro 4 não apresentaram diferenças significativas, assim como no Filtro 8. Entretanto, comparando as alturas de cada ponto de medição entre os filtros, é possível observar uma diferença de até 5,50 cm.

Segundo DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN (2011), filtros que apresentam uma diferença entre seus meios filtrantes superior a 5,00 cm indicam a necessidade de regularização da coleta de água de lavagem e uma distribuição desuniforme do ar e da água durante o procedimento de lavagem, causando o possível carreamento de material filtrante e acúmulo do mesmo em uma determinada região do filtro.

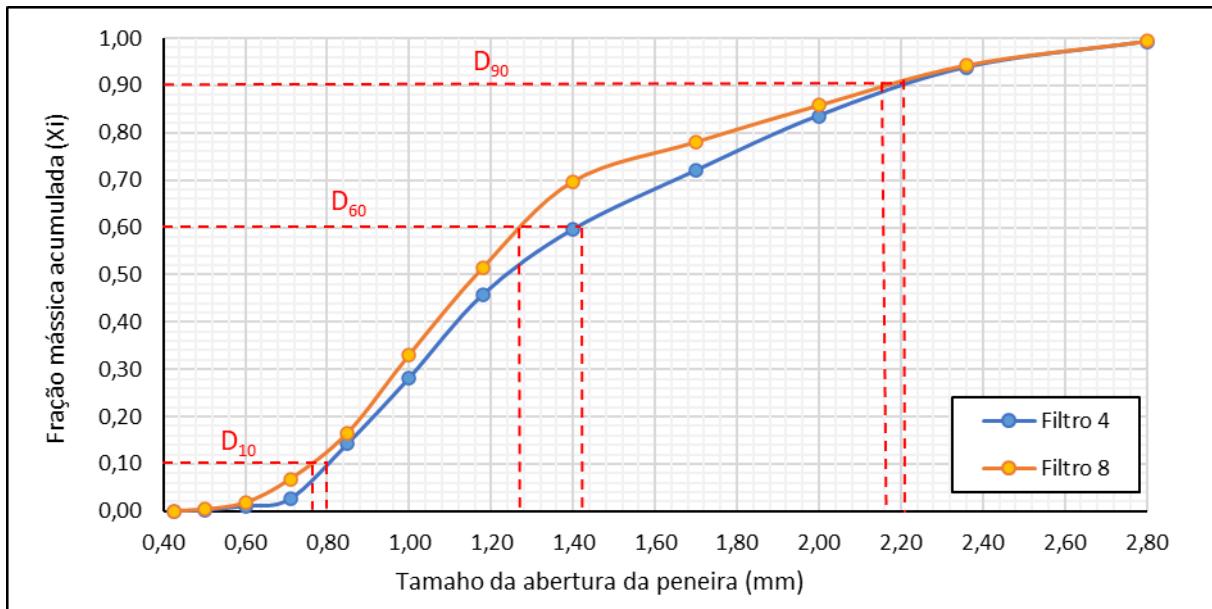
### 5.1.2. Granulometria e Espessura do Meio Filtrante

Os ensaios de granulometria do meio filtrante consistem na retirada de uma amostra do meio filtrante ao longo de sua seção transversal, por meio da utilização de um trado e posterior análise granulométrica pelo método de peneiramento e medição da profundidade. Vale ressaltar que antes da realização deste ensaio, o filtro deve ser submetido ao procedimento de lavagem e drenado, garantindo a coleta da amostra para inspeção.

Os mesmos filtros selecionados para o ensaio de batimetria foram utilizados para a realização do ensaio de granulometria. Foram executados previamente os procedimentos mencionados anteriormente (lavagem e drenagem), possibilitando a coleta de amostras dos respectivos meios filtrantes, as quais foram submetidas à análise. A partir dos resultados obtidos, foram construídas as curvas granulométricas dos meios filtrantes (areia e antracito misturados) de ambos os filtros, além dos respectivos histogramas de distribuição granulométrica.

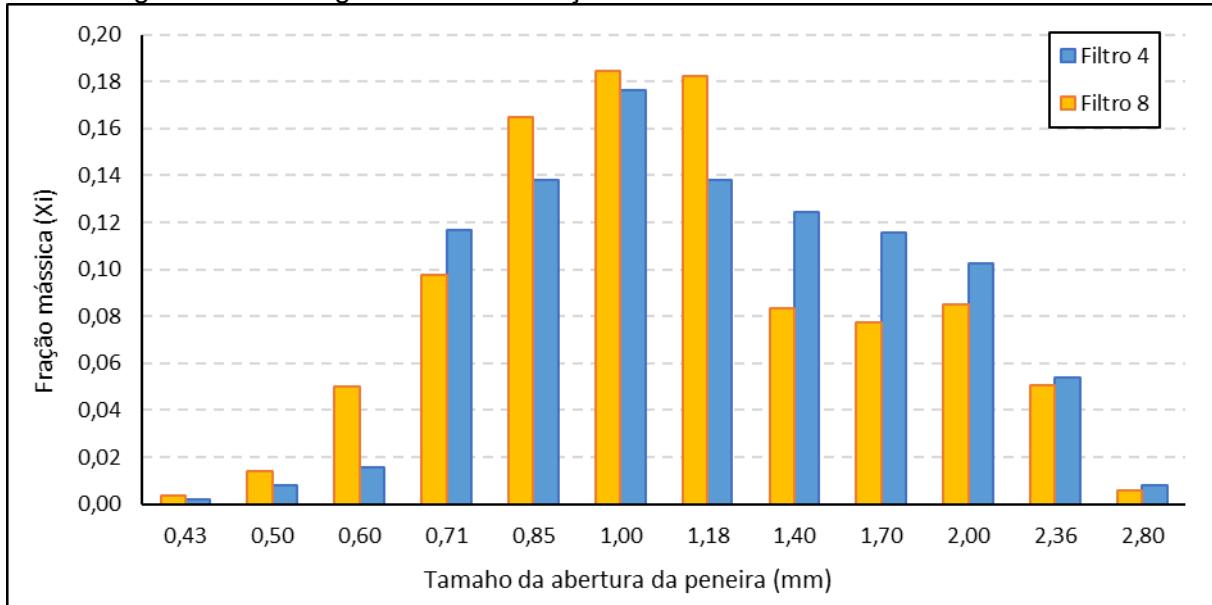
A Figura 5.2 e a Figura 5.3 apresentam as curvas granulométricas de cada filtro estudado, assim como a distribuição granulométrica dos respectivos meios filtrantes.

Figura 5.2 - Curvas granulométricas do meio filtrante dos filtros analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.3 - Histograma de distribuição do meio filtrante dos filtros analisados



Fonte: Elaborado pelo autor

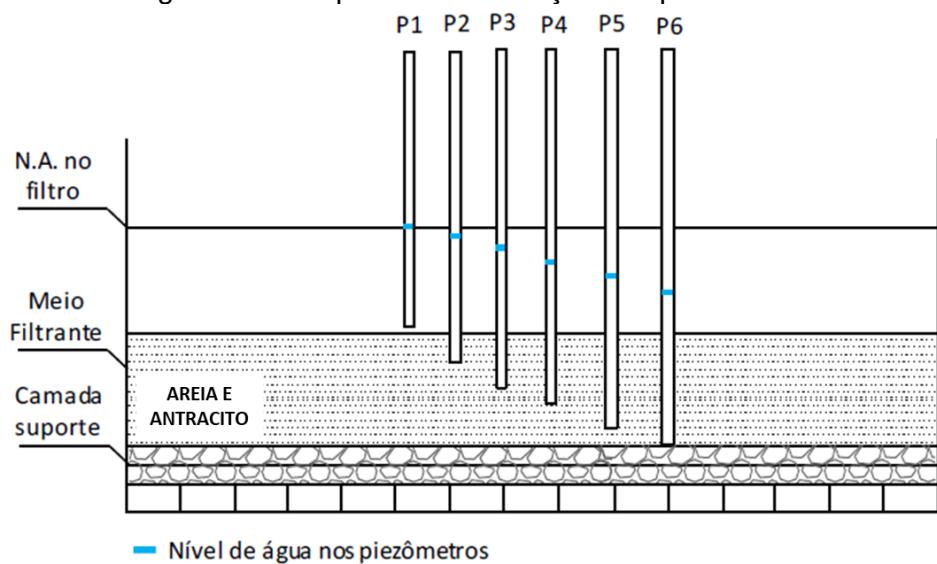
Comparando os resultados apresentados de ambos os filtros, é possível observar que os seus meios filtrantes possuem pouca diferença quanto às suas granulometrias. No entanto, o fato de existir uma variação entre eles interfere significativamente na operação dos filtros com taxa declinante variável, os quais deveriam ser idênticos para seu perfeito funcionamento.

### 5.1.3. Perda de Carga na Carreira de Filtração

O ensaio de perda de carga ao longo da carreira da filtração visa avaliar o desempenho das unidades de filtração em relação à remoção de impurezas, à penetração de impurezas ao longo do meio filtrante e também às etapas de filtração.

Para a realização deste ensaio, foram instalados piezômetros ao longo do meio filtrante com espaçamentos conhecidos, como pode ser observado na Figura 5.4. Em intervalos de tempo pré-determinados, foram medidas a altura do nível d'água no interior de cada piezômetro e a turbidez da água filtrada do Filtro 8.

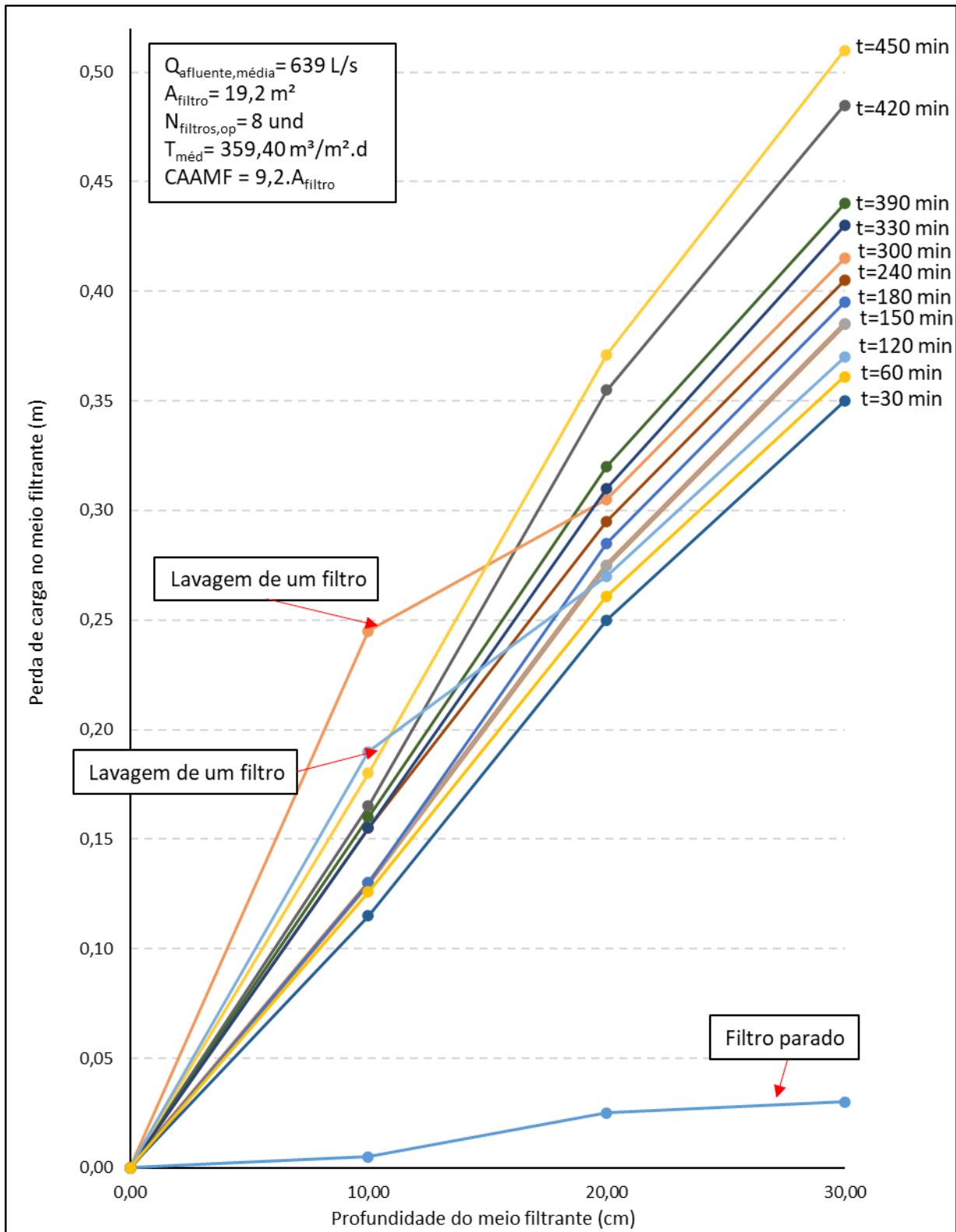
Figura 5.4 - Esquema de instalação dos piezômetros



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5.5 apresenta os resultados de perda de carga do meio filtrante durante a carreira de filtração do Filtro 8.

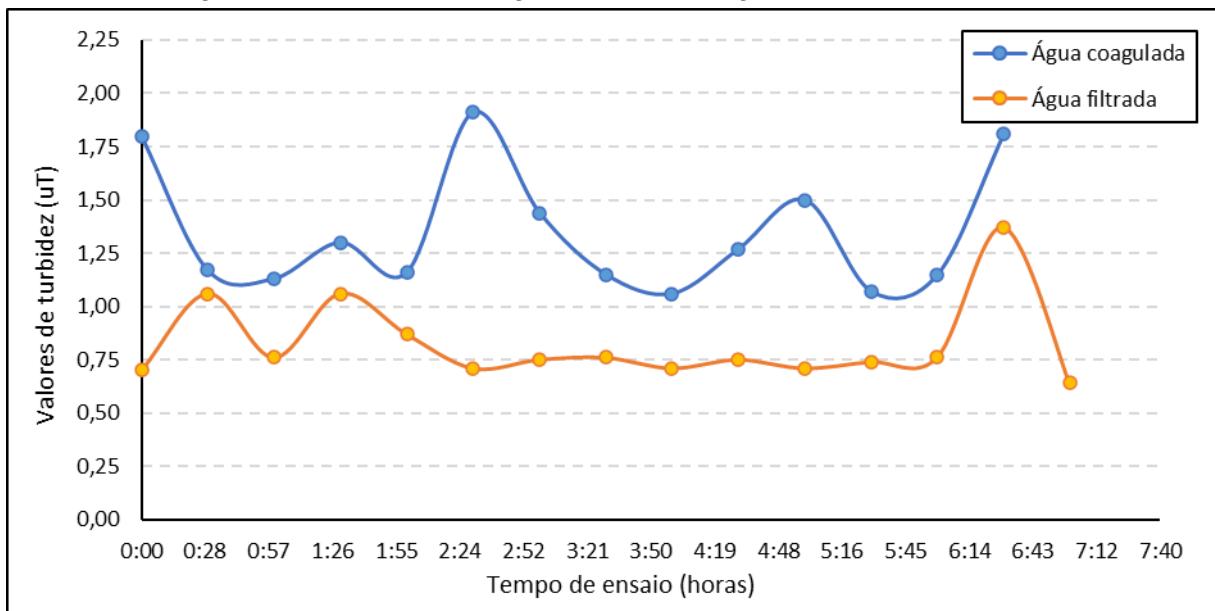
Figura 5.5 - Perda de carga no meio filtrante durante a carreira de filtração



Fonte: Elaborado pelo autor

A turbidez da água filtrada e da água coagulada ao longo do ensaio de perda de carga do filtro é mostrada na Figura 5.6.

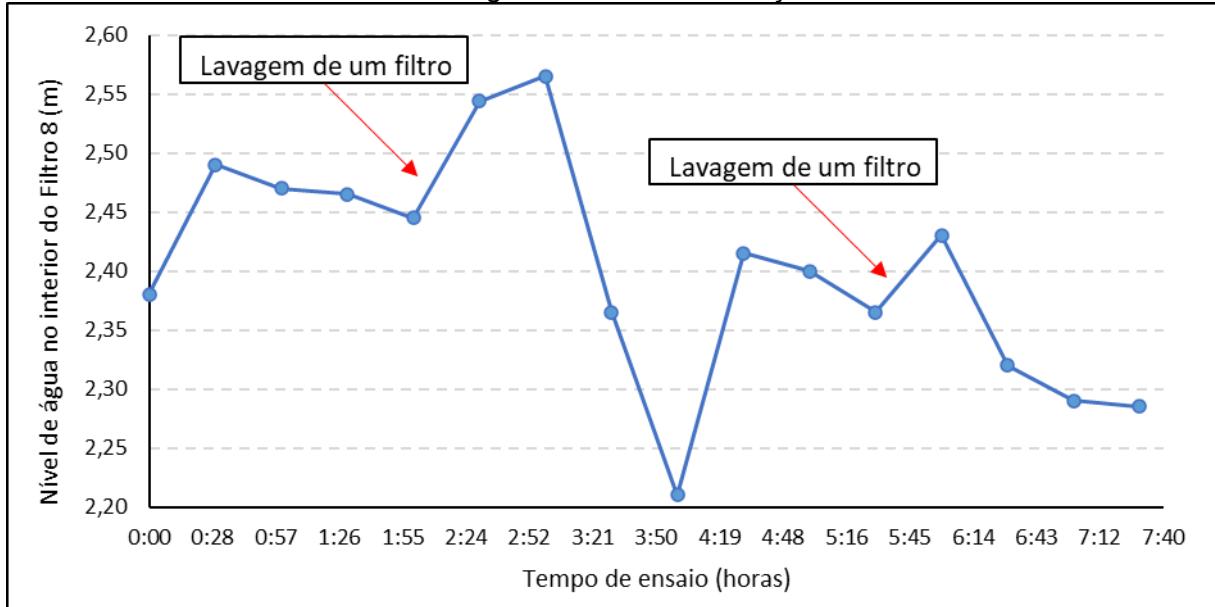
Figura 5.6 - Turbidez da água filtrada e coagulada durante o ensaio



Fonte: Elaborada pelo autor

A seguir (Figura 5.7), é apresentada a variação do nível de água no interior do Filtro 8.

Figura 5.7 - Variação do nível de água durante o ensaio de perda de carga no meio filtrante ao longo da carreira de filtração



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados apresentados, nota-se que durante o ensaio de perda de carga no meio filtrante ao longo da carreira de filtração, houve a retenção de impurezas em todas as subcamadas do meio filtrante (Figura 5.5), porém não suficientemente para o atendimento do parâmetro de turbidez da água filtrada inferior

a 0,50 uT (Figura 5.6). Isso se deve pelo fato da espessura e granulometria do meio filtrante não serem adequadas para a filtração rápida.

É possível observar também que, durante a realização do ensaio, ocorreram duas lavagens de filtros, as quais influenciaram na variação da taxa de filtração do filtro analisado (Figura 5.7), piorando a qualidade da água filtrada.

#### 5.1.4. Bolas de Lodo

Este tipo de ensaio consiste na identificação de bolas de lodo no interior e topo do meio filtrante, permitindo verificar a eficiência da lavagem dos filtros. O ensaio de bolas de lodo é realizado posteriormente à lavagem de um filtro, observando, em seguida, o seu meio filtrante limpo.

Na ETA de FDDL foram observados os meios filtrantes dos Filtros 4 e 8. Em ambos, foram encontradas bolas de lodo em seus meios filtrantes após o procedimento de lavagem (Figura 5.8), caracterizando uma possível ineficiência desse procedimento.

Figura 5.8 – Bolas de lodo identificadas nos Filtros 4 e 8



Fonte: Disponibilizado pelo sistema produtor de água

A presença de bolas de lodo pode ser prejudicial à filtração, uma vez que elas diminuem a oportunidade de encontro das partículas e organismos com os grãos de material filtrante, além de criar caminhos preferenciais, os quais prejudicam a qualidade da água filtrada.

### 5.1.5. Lavagem dos Filtros

O ensaio de lavagem dos filtros foi dividido em três diferentes parâmetros de avaliação, os quais são elencados a seguir:

- Turbidez da água de lavagem dos filtros;
- Turbidez da água filtrada após a lavagem e reinício de operação;
- Expansão do meio filtrante.

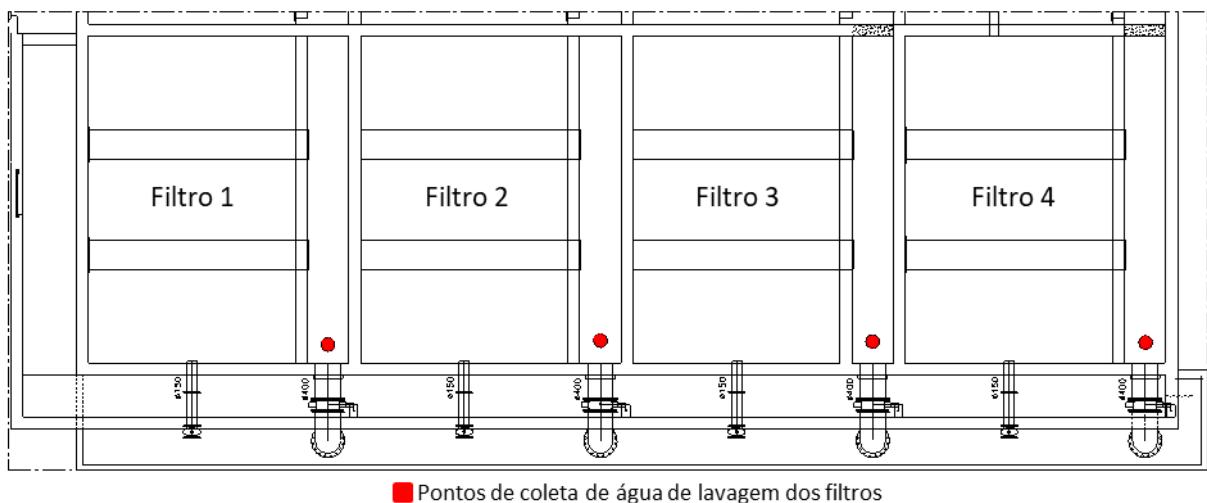
Para a execução deste ensaio foi acompanhada a lavagem dos Filtros 4 e 8, a qual consiste na injeção de ar ao longo do meio filtrante e posterior lavagem com água. Observou-se que durante este procedimento há a perda de material filtrante, podendo estar relacionada aos seguintes fatores: i) não vedação completa da válvula de alimentação de água para a lavagem dos filtros, ocasionando o aumento do nível de água no interior dos mesmos e possível carreamento de meio filtrante durante a lavagem com ar; ii) vazão excessiva de água para lavagem dos filtros, causando o arraste de material filtrante durante a lavagem com água; iii) má distribuição de água e ar durante a lavagem.

#### 5.1.5.1. *Turbidez da Água de Lavagem dos Filtros*

A avaliação da turbidez da água de lavagem dos filtros visa estudar a eficiência da remoção de sólidos presentes no interior das camadas filtrantes em relação ao tempo de lavagem estabelecido para cada filtro.

Para a realização desse ensaio foi utilizado um coletor de água de lavagem dos filtros; cronômetro para monitoramento dos tempos de lavagem e coleta; e copos descartáveis para armazenamento das amostras de água de lavagem. A Figura 5.9 exemplifica os pontos de coleta de água lavagem dos filtros da ETA de FDDL.

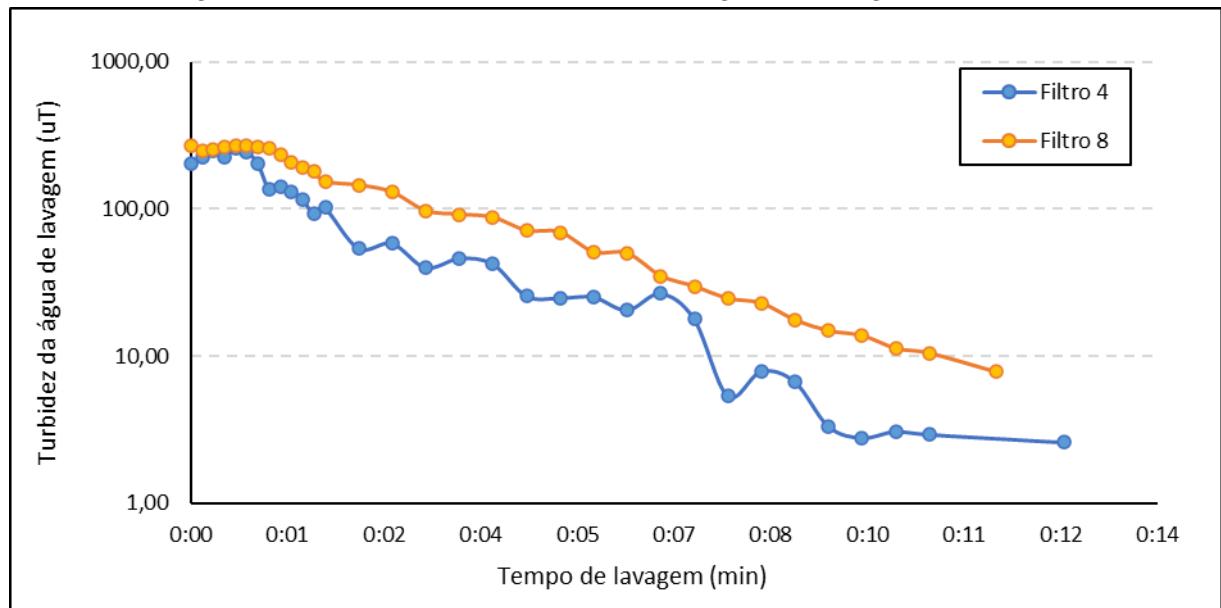
Figura 5.9 - Pontos de coleta da água de lavagem dos filtros



Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5.10 apresenta a variação da turbidez da água de lavagem dos filtros analisados ao longo do tempo de lavagem com água.

Figura 5.10 - Turbidez remanescente da água de lavagem dos filtros



Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN (2017), recomenda-se que a lavagem dos filtros seja realizada até que a turbidez da água de lavagem resulte igual ou inferior a 5,00 uT. A partir do gráfico apresentado na Figura 5.10, é possível observar que o tempo de lavagem requerido em ambos os filtros foi em torno de 12 minutos, resultando em valores de turbidez para a água de lavagem iguais a 2,61 uT e 7,81 uT, respectivamente para os filtros 4 e 8.

Apesar do procedimento de lavagem ser o mesmo, os picos de turbidez da água de lavagem registrados para cada filtro foram distintos (258 uT e 270 uT). Além disso, nota-se uma diferença nos tempos de lavagem com água em ambos os filtros analisados, sendo que um deles não atingiu o resultado de turbidez recomendado (5,00 uT).

Dessa forma, pode-se concluir que não há padronização para os procedimentos de lavagem, o que é prejudicial do ponto de vista da qualidade da água filtrada e do funcionamento da unidade de filtração. Ademais, a deficiência na lavagem de um filtro pode acarretar na piora da qualidade da água filtrada e, por consequência, a qualidade da água tratada, superando os valores estabelecidos pela PRC nº 05/2017.

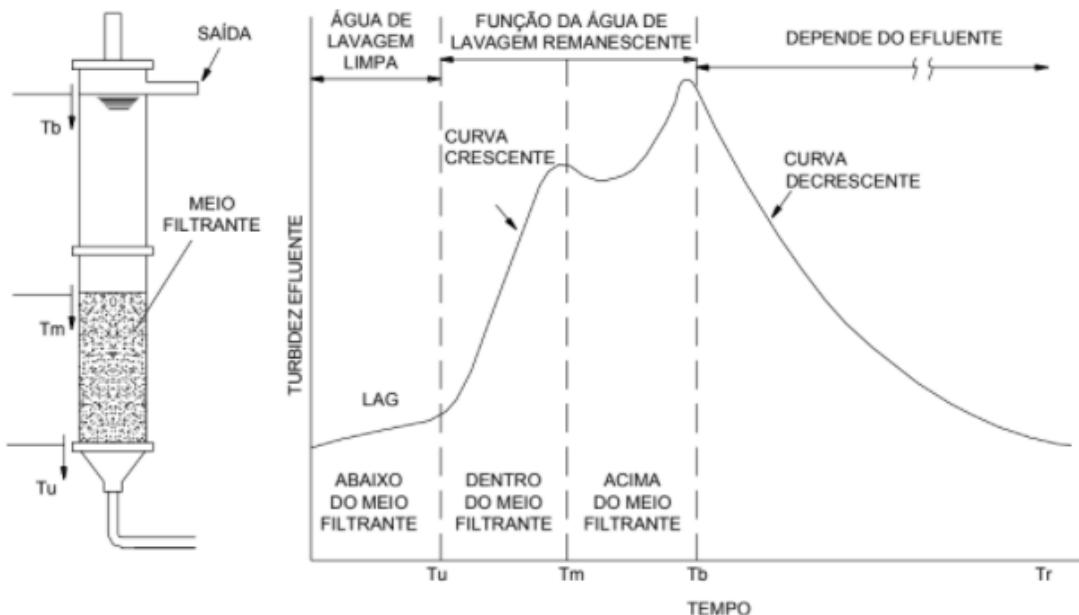
#### *5.1.5.2. Turbidez da Água Filtrada no Reinício de Operação*

A leitura de turbidez de amostras de água filtrada após o procedimento de lavagem objetiva avaliar a eficiência da lavagem dos filtros e a possibilidade de ocorrência de transpasse, bem como a sua duração após o reinício de operação.

Para a realização deste ensaio, foram utilizados copos descartáveis para a coleta de amostras de água filtrada imediatamente após o término da lavagem e reinício de operação; e um cronômetro para o monitoramento dos tempos de coleta pré-definidos.

A Figura 5.11 apresenta a variação da turbidez da água filtrada no reinício de operação de um filtro. O aumento da turbidez pode ser verificado a partir de picos de turbidez na água filtrada, os quais estão relacionados com a presença de partículas indesejáveis no efluente dos filtros, evidenciando o fenômeno do transpasse. A alteração desse parâmetro durante o reinício de operação é explicada por três principais fatores, sendo eles: i) água remanescente em estado limpo, situada abaixo do meio filtrante e nas tubulações de saída; ii) água de lavagem remanescente no interior do meio filtrante e na camada suporte; iii) água de lavagem remanescente situada acima do topo do meio filtrante.

Figura 5.11 - Qualidade da água filtrada remanescente após a lavagem

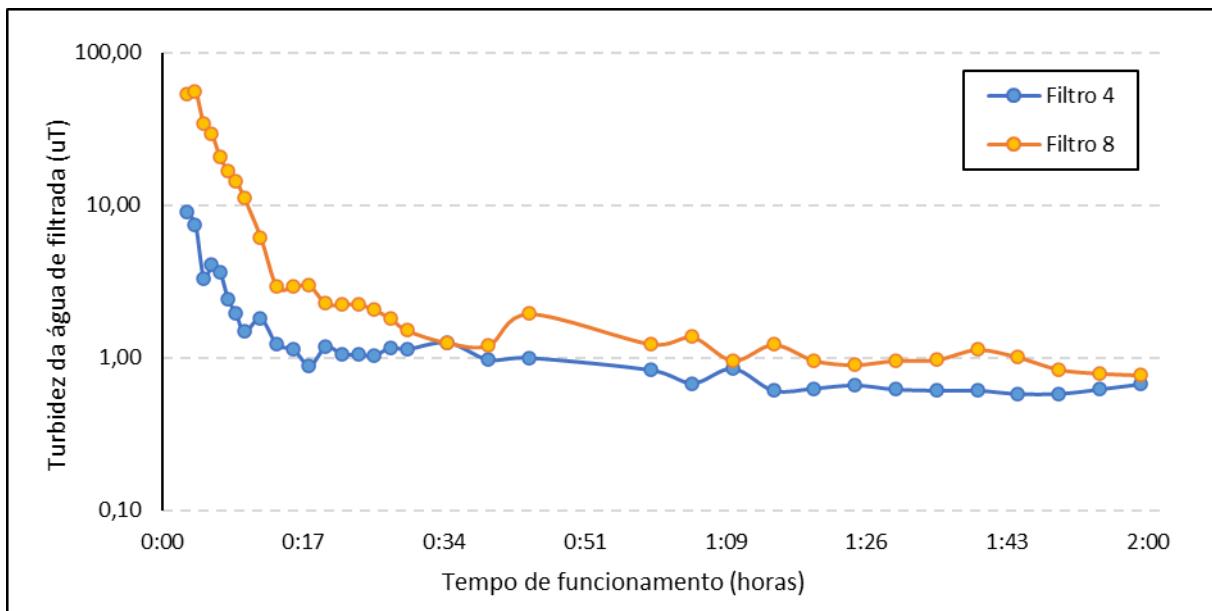


Fonte: AMIRTHARAJAH et. al, 1980; AMIRTHARAJAH, 1985

O reinício de operação é caracterizado por quatro estágios, os quais variam de acordo com a eficiência da lavagem do filtro. O primeiro estágio apresenta um efluente com qualidade satisfatória, relacionado com a água de lavagem limpa situada abaixo do meio filtrante, que sai do filtro até um tempo denominado “ $T_u$ ”. Em seguida, inicia-se um período de degradação da qualidade da água filtrada, ocasionando o primeiro pico de turbidez até o tempo “ $T_m$ ”, o qual representa o deslocamento da segunda fração da água de lavagem localizada dentro do meio filtrante. Entre os tempos “ $T_m$ ” e “ $T_b$ ” ocorre a filtração da terceira fração remanescente da água de lavagem, que é a de pior qualidade, uma vez que contém partículas que não foram removidas durante a lavagem, podendo ser observado um pico de turbidez mais elevado. Por fim, nota-se uma melhora na qualidade da água filtrada ao longo do tempo, evidenciada pela curva decrescente, a qual depende do efluente produzido pelo filtro.

A Figura 5.12 apresenta a variação da turbidez da água filtrada no reinício de operação dos Filtros 4 e 8.

Figura 5.12 - Turbidez da água filtrada após o reinício de operação



Fonte: Elaborado pelo autor

Os picos de turbidez observados (Figura 5.12) após o reinício de operação de ambos os filtros ocorrem nos primeiros minutos de coleta de água filtrada, sendo atribuídos à água de lavagem remanescente nos meios filtrantes e acima deles.

Os maiores valores de turbidez da água filtrada observados para o Filtro 4 e Filtro 8 foram, respectivamente, 9,88 uT e 55 uT. Com o passar do tempo notou-se diminuição da turbidez do efluente, no entanto o valor recomendado de 0,50 uT não foi alcançado, sendo os valores mínimos registrados para os Filtros 4 e 8, respectivamente, 0,58 uT e 0,77 uT, evidenciando deficiência no processo de filtração.

#### 5.1.5.3. *Expansão do Meio Filtrante*

Esse tipo de teste consiste na avaliação da expansão do meio filtrante durante a lavagem com água no sentido ascensional, permitindo observar se ocorre a perda de material filtrante durante a lavagem ou se a velocidade ascensional utilizada é suficiente para produzir uma expansão eficiente.

Para a realização do ensaio foi utilizado um equipamento denominado expansor, o qual foi instalado no topo do meio filtrante antes do início da lavagem com água. O equipamento consiste em diversas peneiras alocadas verticalmente e igualmente espaçadas, responsáveis pela coleta do material filtrante, o qual permanece retido nas mesmas ao término da lavagem.

A análise da expansão do meio filtrante é determinada medindo-se a base do equipamento até a última peneira com material filtrante acumulado e, em seguida, relacionando essa medida com a altura do meio filtrante. Dessa relação obtém-se uma porcentagem de expansão do meio filtrante durante a lavagem com água, sendo comparada com a desejada, apontada em 30% (DI BERNARDO; DANTAS & VOLTAN, 2011).

A expansão dos Filtros 4 e 8 são apresentadas na Tabela 5.2. Os resultados obtidos confirmam excesso na aplicação de água para lavagem dos filtros, o que acarreta na perda de material filtrante, sendo necessária sua constante reposição.

Tabela 5.2 - Expansão do meio filtrante durante a lavagem com água

Filtro	Altura do Meio Filtrante (cm)	Altura de Expansão (cm)	Expansão (%)
Filtro 4	29	30	103%
Filtro 8	32	30	94%

Fonte: Elaborado pelo autor

A altura de expansão do meio filtrante dos Filtros 4 e 8, medida a partir do expensor, resultou em 30,00 cm. Considerando a espessura do meio filtrante de cada filtro (Filtro 4 = 29 cm e Filtro 8 = 32 cm), tem-se uma expansão dos mesmos em torno de 103% e 94%, diferindo-se do recomendado pela literatura técnica que é de, aproximadamente 30%.

## 5.2. ENSAIOS DE TRATABILIDADE

Os ensaios de tratabilidade visam reproduzir, em escala laboratorial, as operações e processos da ETA de FDDL. A execução desses ensaios possibilita a redução de gastos excessivos com produtos químicos, aumento da duração das carreiras de filtração, menor geração de água de lavagem e melhoria na qualidade da água tratada, de forma a atender o estabelecido pela PRC nº 05/2017.

Os ensaios de tratabilidade realizados na ETA de FDDL foram divididos em 4 séries, as quais são descritas a seguir:

- Série 1: Filtração em filtros de laboratório de areia (FLA) da água coagulada na ETA de FDDL;
- Série 2: Coagulação e filtração direta (em FLA) da água bruta afluente à ETA de FDDL;

- Série 3: Coagulação e filtração direta (em FLA) da água preparada com 10 uT;
- Série 4: Coagulação, floculação e sedimentação da água preparada com turbidez de 100 uT.

Para a realização dos diferentes ensaios foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Equipamento Jarteste com seis jarros de 2,00 L cada e sistema de rotação (20 a 195 rpm);
- 6 unidades de filtros de laboratório de areia (FLA) de acrílico preenchidos com 15 cm de areia;
- Areia tipo II com grãos de tamanho entre 0,42 e 0,84 mm e tamanho efetivo de 0,59;
- Suporte para acoplamento em Jarteste.

Os parâmetros analisados nesses ensaios são apresentados na Tabela 5.3.

**Tabela 5.3 - Parâmetros analisados nos ensaios das Séries 1 a 4**

Parâmetros	Ensaios
pH	Séries 1, 2, 3 e 4
Cor Aparente	Séries 1, 2, 3 e 4
Turbidez	Séries 1, 2, 3 e 4
Fluxo de Corrente	Séries 1, 2, 3 e 4
Alumínio Total	Séries 1, 2, 3 e 4
Ferro Total	Séries 1 e 2
Manganês Total	Séries 1 e 2
Sólidos Suspensos Totais	Séries 1, 2, 3 e 4
Alcalinidade	Séries 1, 2, 3 e 4
Carbono Orgânico Total	Séries 1, 2, 3 e 4
Carbono Orgânico Dissolvido	Séries 1, 2, 3 e 4

Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.2.1. Série 1

A Série 1 consistiu na realização de dois ensaios, ambos com amostras de água pré-tratada coletadas na unidade de mistura rápida. A fim de confirmar a dosagem de coagulante utilizada na prática, os ensaios foram realizados com a água pré-tratada coagulada na ETA e em Jarteste.

O Ensaio 1 analisou o fluxo de corrente da água coagulada para verificar a neutralização de carga das impurezas da água afluente à ETA. O Ensaio 2 avaliou a qualidade da água filtrada por meio dos resultados de cor aparente e turbidez.

A Tabela 5.4 apresenta a característica da água pré-tratada utilizada para os Ensaios 1 e 2.

**Tabela 5.4 - Características da água pré-tratada utilizada nos Ensaios 1 e 2**

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2
Turbidez (uT)	1,00	0,80
pH	7,90	7,00
Cor Aparente (uH)	-	63
Fluxo de Corrente (csu)	- 2,78	-

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 5.5 e a Tabela 5.6 apresentam os resultados dos Ensaios 1 e 2.

Tabela 5.5 - Resultados do Ensaio 1 da Série 1

Jarro	Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	pH de Coagulação	Fluxo de Corrente da Água Coagulada (csu) (***)	
			Início	Final
1	0,00 (*)	7,50	- 2,78	-
2	0,19 (*)	7,20	- 2,41	- 2,72
3	0,19 (*)	-	-	-
4	0,19 (**)	7,00	- 2,61	- 2,91
5	0,19 (**)	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor

(\*): coagulação em Jarteste; (\*\*): coagulação realizada na ETA de FDDL; (\*\*\*): current streaming unit.

Tabela 5.6 - Resultados do Ensaio 2 da Série 1

Jarro	Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	pH de Coagulação	Água Filtrada	
			Turbidez (uT)	Cor Aparente
1	0,00 (*)	6,90	0,70	19
2	0,19 (*)	7,00	0,60	24
3	0,19 (*)	7,10	0,70	21
4	0,19 (**)	7,00	0,70	19
5	0,19 (**)	7,00	0,70	16

Fonte: Elaborado pelo autor

(\*): coagulação em Jarteste; (\*\*): coagulação realizada na ETA de FDDL; (\*\*\*): current streaming unit.

No Ensaio 1, é possível observar que a dosagem utilizada na ETA de FDDL para a coagulação da água pré-tratada não foi suficiente para causar a neutralização de carga das impurezas. Inicialmente, o fluxo de corrente foi -2,41 csu e -2,61 csu (Tabela 5.5), e após a coagulação os valores finais desse parâmetro foram -2,72 csu e -2,91 csu. Esses resultados indicaram uma dosagem de coagulante insuficiente, concorrendo para que a filtração resultasse ineficiente, como observado no Ensaio 2 da Série 1 (Tabela 5.6).

A fim de avaliar a qualidade da água filtrada, no Ensaio 2 foram analisados os valores de cor aparente e turbidez. De acordo com a Tabela 5.4, a cor aparente da amostra de água pré-tratada foi 63 uH, registrando ao final da coagulação em Jarteste e filtração em FLA, valores que variaram de 16 uH a 24 uH. Já a turbidez, inicialmente verificada em 0,80 uT, variou de 0,60 uT a 0,70 uT ao término do ensaio.

Portanto, com base nos Ensaios 1 e 2, notou-se que os valores de turbidez e de cor aparente da água filtrada resultaram maiores que 0,50 uT e 15 uH, respectivamente, não atendendo o estabelecido pela PRC nº 05/2017.

### 5.2.2. Série 2

Na Série 2 foram realizados dois ensaios de coagulação-filtração com amostras de água pré-tratada coletadas à montante do vertedor Parshall, ou seja, antes da adição de produtos químicos. Estes ensaios consistiram na variação da dosagem de coagulante em cada jarro do Jarteste, medindo-se os seguintes parâmetros: pH de coagulação, fluxo de corrente na água coagulada, cor aparente e turbidez da água filtrada.

A Tabela 5.7 apresenta as características da água pré-tratada coagulada em Jarteste utilizada nos Ensaios 1 e 2 desta série.

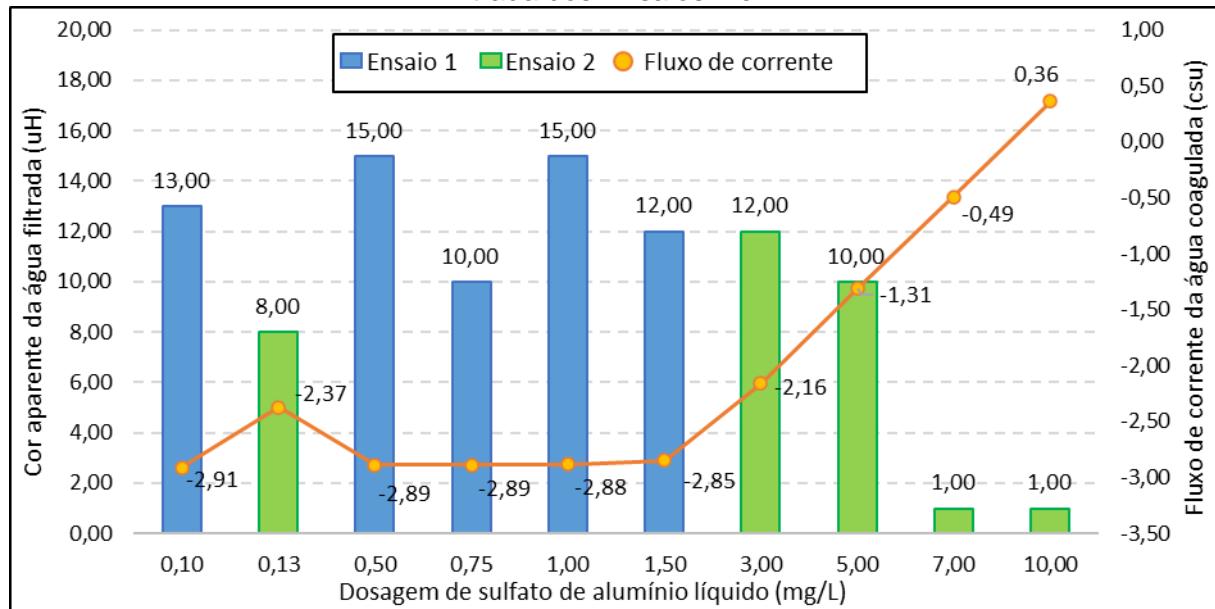
Tabela 5.7 - Características da água pré-tratada utilizada nos Ensaios 1 e 2

Parâmetros	Ensaio 1	Ensaio 2
Turbidez (uT)	1,00	1,61
pH	7,20	8,00
Cor Aparente (uH)	22	37
Fluxo de Corrente (csu)	- 2,91	- 2,38

Fonte: Elaborado pelo autor

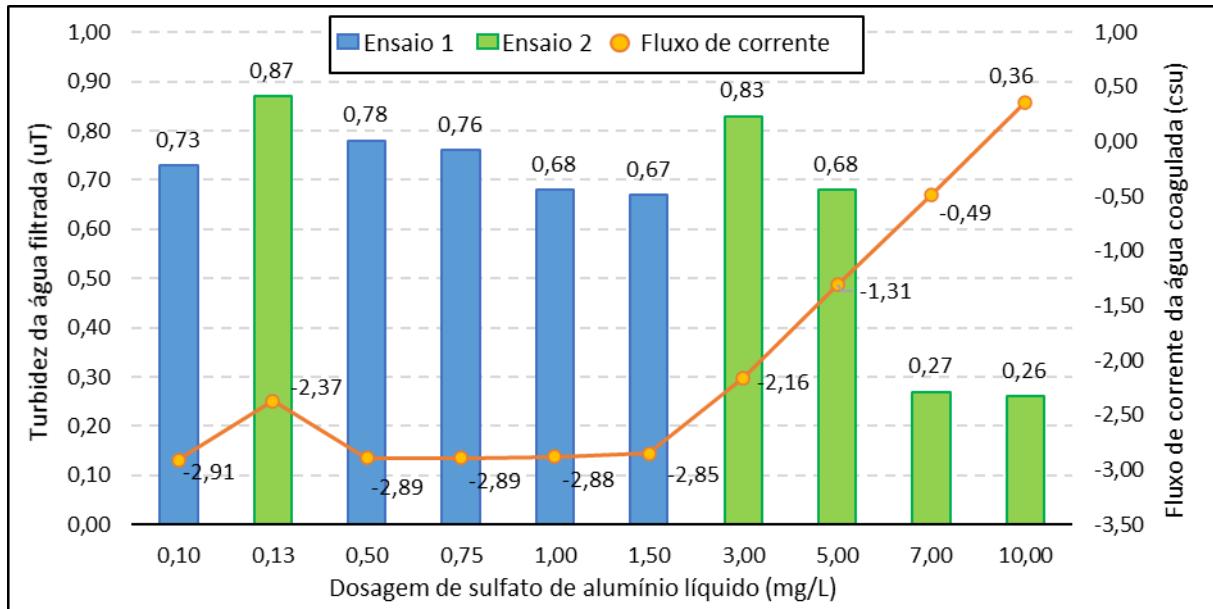
A Figura 5.12 e a Figura 5.13 apresentam, respectivamente, os valores de cor aparente e turbidez da água filtrada, assim como a variação do fluxo de corrente da água coagulada, conforme o aumento da dosagem de sulfato de alumínio.

Figura 5.12 - Resultados de fluxo de corrente da água coagulada e de cor aparente da água filtrada dos Ensaios 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.13 - Resultados de fluxo de corrente da água coagulada e de turbidez da água filtrada dos Ensaios 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados dos Ensaios 1 e 2 revelam a relação da eficiência de remoção de turbidez e cor aparente da água filtrada com o aumento da dosagem de coagulante. Da mesma forma, é possível observar que o fluxo de corrente tende a valores positivos.

Para as dosagens de 7,00 e 10 mg/L de sulfato de alumínio, o fluxo de corrente ainda resultou negativo, no entanto a cor aparente e turbidez da água filtrada foram relativamente baixas, indicando a neutralização parcial de cargas no processo de coagulação. Tais resultados mostram que não houve necessidade de neutralização total de cargas das impurezas presentes na amostra de água de pré-tratada.

### 5.2.3. Série 3

Os ensaios da Série 3 foram realizados a partir da água preparada com turbidez 10 uT, representando uma água bruta afluente à ETA. Para o preparo dessa amostra, foi coletada água do manancial de captação e os sedimentos de sua margem. A adição do sedimento do rio foi realizada após o peneiramento do material sólido, mantendo-se a agitação até que fosse obtida a água com o valor de turbidez na faixa da água real.

Os ensaios simularam a possibilidade de tratamento dessa água bruta pela ETA de FDDL ou a necessidade da utilização do pré-tratamento e posterior filtração.

Para isso, foram estudados os dois mecanismos de coagulação: adsorção-neutralização de cargas e varredura.

Nesta série foram realizados um total de cinco ensaios, dos quais o Ensaio 1 utilizou o mecanismo de coagulação de adsorção-neutralização de cargas e os demais, o mecanismo de varredura. Para ETA de FDDL, recomenda-se a utilização do primeiro mecanismo na unidade de mistura rápida, enquanto o mecanismo por varredura é recomendado para etapa de pré-tratamento.

O mecanismo de coagulação por adsorção-neutralização de cargas requer dosagens menores de coagulante e valores mais baixos de pH na mistura rápida, quando comparado com o mecanismo por varredura. Este (coagulação por varredura) é comumente utilizado em processos de tratamento de água que contemplam as etapas de floculação e sedimentação/flotação, antes da filtração rápida.

A Tabela 5.8 apresenta os parâmetros de mistura rápida, floculação e sedimentação utilizados nesses ensaios e a Tabela 5.9, as características das amostras de água preparada.

Tabela 5.8 – Parâmetros dos ensaios da Série 3

Ensaios	Mistura Rápida		Floculação		Sedimentação	
	Gmr ( $s^{-1}$ )	Tmr (s)	Gmf ( $s^{-1}$ )	Tmf (min)	$V_{s1}$ (cm/min)	$V_{s2}$ (cm/min)
1	300	30	-	-	-	-
2	300	30	15	15	2,00	1,00
3	300	30	15	15	1,00	0,50
4	300	30	15	15	2,00	1,00
5	300	30	15	15	2,00	1,00

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.9 – Características da água preparada

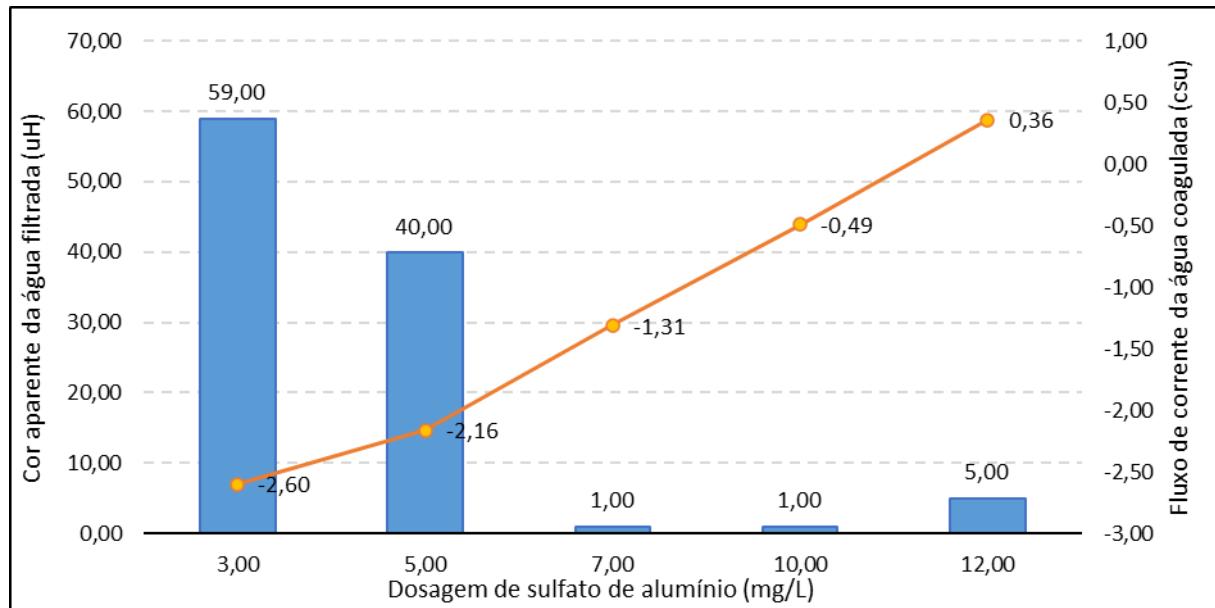
Ensaios	pH	Cor Aparente (uH)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L)	Fluxo de Corrente (csu)
1	6,60	101	9,83	-	- 2,78
2	6,60	101	10	11	- 2,77
3	6,60	101	10	11	- 2,87
4	7,80	93	9,90	10	- 2,97
5	7,80	93	9,90	10	- 2,86

Fonte: Elaborado pelo autor

### 5.2.3.1. Ensaio de Tratabilidade com Coagulação por Mecanismo de Adsorção-Neutralização de Cargas

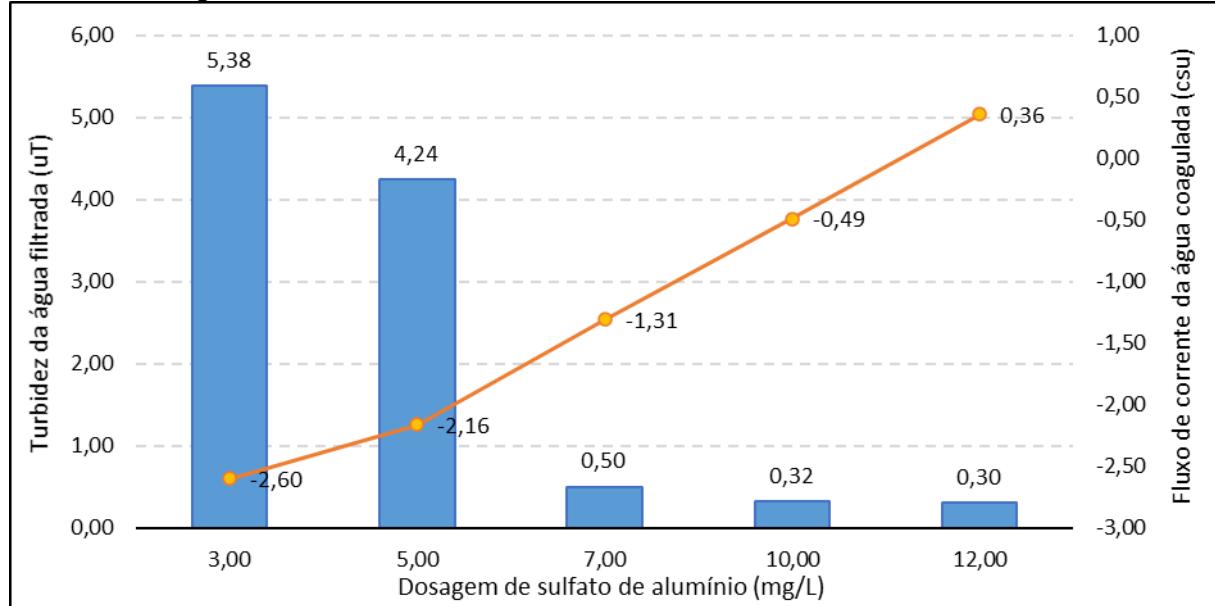
A Figura 5.14 e a Figura 5.15 apresentam os resultados do Ensaio 1, indicando a variação dos valores de cor aparente, turbidez e fluxo de corrente, conforme o aumento da dosagem de coagulante.

Figura 5.14 - Resultados de cor aparente e fluxo de corrente do Ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 5.15 - Resultados de turbidez e fluxo de corrente do Ensaio 1



Fonte: Elaborado pelo autor

O aumento da dosagem de sulfato de alumínio favoreceu a obtenção de valores de turbidez e cor aparente da água filtrada em conformidade com a norma vigente. Ademais, vale ressaltar que a variação da dosagem de coagulante contribuiu para o aumento dos valores de fluxo de corrente, os quais atingem resultados positivos.

Comparando com os resultados dos Ensaios 1 e 2 da Série 2, é possível observar que o aumento da turbidez da água bruta implica em uma dosagem maior de coagulante, a fim de se obter, após a filtração, resultados de turbidez e cor aparente inferiores, respectivamente, a 0,50 uT e 15 uH, respectivamente.

A dosagem de sulfato de alumínio igual a 10 mg/L, assim como na Série 2, resultou em valores de turbidez e cor aparente da água filtrada equivalentes a, respectivamente, 0,32 uT e 1,00 uH, os quais atendem ao estabelecido pela PRC nº 05/2017. Além disso, o fluxo de corrente foi igual a -0,49 scu, evidenciando neutralização parcial de cargas.

Nota-se, portanto, que por meio da otimização da dosagem de coagulante e acompanhamento do fluxo de corrente, a tecnologia de FDDL é capaz de produzir água com qualidade que atenda ao estabelecido pela PRC nº 05/2017. Sendo assim, não é necessária a utilização da unidade de pré-tratamento, desde que os filtros funcionem adequadamente (item 5.1).

#### *5.2.3.2. Ensaios de Tratabilidade com Coagulação por Mecanismo de Varredura*

As Tabelas 5.10 e 5.11 apresentam os resultados dos Ensaios 2 e 3, nos quais a dosagem de sulfato de alumínio variou de 10 a 25 mg/L, de forma a produzir valores de turbidez de água decantada inferiores a 5,00 uT.

Tabela 5.10 - Resultados do Ensaio 2

Jarro	Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	pH de Coagulação	Turbidez (uT)		Cor Aparente (uH)		Fluxo de Corrente (csu)
			$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	
1	10	7,00	7,19	7,27	82	71	0,10
2	12	6,50	8,47	7,80	107	91	0,80
3	15	6,40	8,57	7,54	102	92	1,30
4	20	6,20	8,53	7,86	113	83	1,49
5	25	5,90	7,52	7,43	91	74	1,62

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.11 - Resultados do Ensaio 3

Jarro	Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg/L)	pH de Coagulação	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uH)	Fluxo de Corrente (csu)		
			$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	
1	10	6,10	7,89	7,55	-	-	0,74
2	12	6,10	8,40	8,04	-	-	1,00
3	15	6,00	8,36	8,43	-	-	1,44
4	20	5,90	8,38	8,26	-	-	1,59
5	25	5,90	8,37	8,24	-	-	1,63

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir dos resultados obtidos com os Ensaios 2 e 3, foi possível observar que as dosagens de coagulante foram insuficientes para produzir uma água decantada com turbidez inferior a 5,00 uT. Para o Ensaio 4 a dosagem de coagulante foi fixada em 30 mg/L, alternando a dosagem de hidróxido de cálcio, conforme pode ser observado na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultados do Ensaio 4

Jarro	Dosagem (mg/L)	pH de	Turbidez (uT)	Cor Aparente (uH)	Fluxo de			
	$CaCO_3$ (*)	$Al_2(SO_4)_3$ (**)	Coagulação	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	Corrente (csu)
1	0,00	30	6,30	6,34	6,42	25	26	1,94
2	2,38	30	6,70	6,17	5,32	31	28	1,93
3	3,57	30	6,90	2,93	4,37	16	6,00	0,46
4	4,76	30	7,00	3,31	1,98	28	1,00	0,02
5	5,95	30	7,30	2,29	0,96	18	1,00	- 1,24

(\*): Hidróxido de Cálcio; (\*\*): Sulfato de Alumínio

Fonte: Elaborado pelo autor

Com a obtenção de valores de turbidez da água decantada inferiores a 5,00 uT, foi realizada a filtração em FLA, analisando os valores de turbidez e cor aparente da água filtrada. A Tabela 5.13 apresenta os resultados do Ensaio 5, o qual adotou a dosagem de produtos químicos semelhante ao jarro 4 do ensaio anterior.

Tabela 5.13 - Resultados do Ensaio 5

Jarro	Dosagem (mg/L)		pH de Coagulação	Turbidez (uT)		Cor Aparente (uH)	Fluxo de Corrente (csu)
	$CaCO_3$ (*)	$Al_2(SO_4)_3$ (**)		$V_{s1}$	$V_{s2}$		
1	4,76	30	-	-	-	-	0,78
2	4,76	30	6,80	-	-	-	-
3	4,76	30	6,70	1,32	1,19	0,26	1,00
4	4,76	30	6,80	-	-	-	-
5	4,76	30	7,00	2,96	1,76	0,27	1,00

(\*): Hidróxido de Cálcio; (\*\*): Sulfato de Alumínio; (\*\*\*) Água Filtrada

Fonte: Elaborado pelo autor

Os resultados obtidos nos ensaios de coagulação, floculação, sedimentação e filtração (ciclo completo) variando as dosagens de sulfato de alumínio e de hidróxido de cálcio para diferentes velocidades de sedimentação mostram que, a melhor condição de coagulação ocorreu para os valores de 30 mg/L de coagulante e 4,76 mg/L de alcalinizante.

No Ensaio 5, é possível observar que para essa condição e velocidade de sedimentação de 2,00 cm/min, a turbidez da água decantada foi de 2,14 uT (valor médio), enquanto para a velocidade de sedimentação de 1,00 cm/min, a turbidez da água decantada foi de 1,48 uT (valor médio). No que diz respeito à água filtrada, os valores médios de turbidez e cor aparente foram, respectivamente, 0,27 uT e 1,00 uH.

Quando tais resultados são comparados com os do Ensaio 1 da Série 3, nota-se que a turbidez da água filtrada é da mesma ordem de grandeza, indicando que a utilização da unidade de pré-tratamento é opcional. Entretanto, apesar do menor custo com produtos químicos, é preciso considerar que a tecnologia de FDDL apresentará carreiras de filtração de curta duração, resultando em um maior consumo de água para a lavagem dos filtros e, consequentemente, aumento de resíduos, devido às lavagens mais frequentes.

Por outro lado, o uso da unidade de pré-tratamento exigirá maiores custos com produtos químicos e aumento na geração de massa seca de resíduos, além dos custos com as limpezas da lagoa de sedimentação. Já as carreiras de filtração serão mais longas, diminuindo o consumo de água para lavagem dos filtros, assim como os resíduos gerados nesse processo.

#### 5.2.4. Série 4

Nesta série foram realizados três ensaios com amostras de água preparada com turbidez de 100 uT, de acordo com procedimento explicitado no item 5.2.3.

Os ensaios simularam o tratamento com coagulação no mecanismo de varredura, floculação e decantação no pré-tratamento e filtração na ETA de FDDL, e são discriminados a seguir:

- Ensaio 1: coagulação no mecanismo de varredura com diferentes dosagens de sulfato de alumínio (20 a 40 mg/L), floculação e decantação com velocidades de sedimentação de 2,00; 1,00; 0,50 cm/min;
- Ensaio 2: coagulação no mecanismo de varredura com diferentes dosagens de sulfato de alumínio (30 a 50 mg/L) e de hidróxido de cálcio (2,98 a 5,95 mg/L), floculação e decantação com velocidades de sedimentação de 2,00 e 1,00 cm/min;
- Ensaio 3: coagulação no mecanismo de varredura com dosagens fixas de sulfato de alumínio (30 mg/L) e de hidróxido de cálcio (3,57 mg/L), floculação, decantação com velocidade de sedimentação menor que 1,00 cm/min e filtração.

A Tabela 5.14 apresenta as características das amostras de água preparada com turbidez de 100,00 uT utilizada para os três ensaios da Série 4.

Tabela 5.14 - Características das amostras de água preparada de 100,00 uT

Ensaios	pH	Cor Aparente (uH)	Turbidez (uT)	Alcalinidade (mg/L)	Alumínio Total (mg/L)
1	7,70	> 500	98	10,00	0,10
2	7,64	> 500	97	11	0,13
3	7,33	> 500	100	11	0,11

Fonte: Elaborado pelo autor

As Tabelas 5.15 e 5.16 apresentam os resultados dos Ensaios 1 e 2, os quais auxiliaram na escolha da dosagem de coagulante e alcalinizante para realização do Ensaio 3.

Tabela 5.15 - Resultados do Ensaio 1

Jarro	Dosagem de Sulfato de	pH de	Turbidez (uT)			Cor Aparente (uH)			Fluxo de
	Alumínio (mg/L)	Coagulação	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s3}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s3}$	Corrente (csu)
1	20	5,30	63	42	33	507	404	388	1,43
2	25	5,10	63	52	36	494	440	401	1,66
3	30	5,10	66	50	40	500	451	441	1,68
4	35	5,10	66	49	40	464	449	435	1,68
5	40	5,30	69	40	36	484	440	402	1,67

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5.16 - Resultados do Ensaio 2

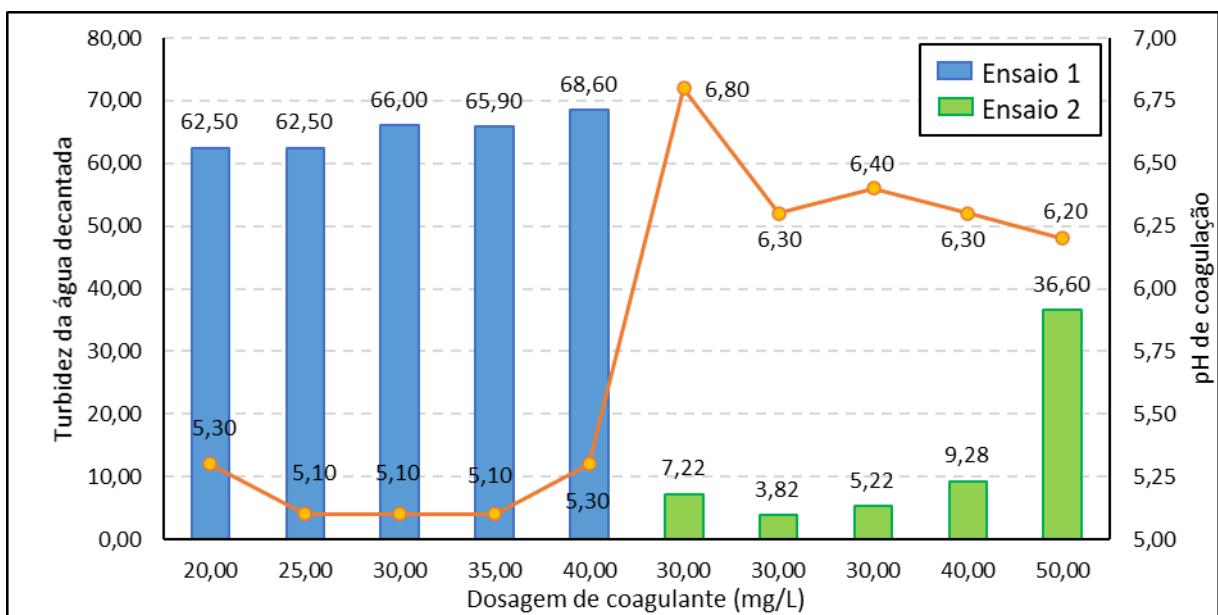
Jarro	Dosagem (mg/L)		pH de	Turbidez (uT)		Cor Aparente (uH)	
	$CaCO_3$ (*)	$Al_2(SO_4)_3$ (**)	Coagulação	$V_{s1}$	$V_{s2}$	$V_{s1}$	$V_{s2}$
1	2,98	30	6,30	7,22	5,83	69	51
2	3,57	30	6,40	3,82	3,80	45	32
3	4,17	30	6,80	5,22	4,16	41	21
4	4,76	40	6,30	9,28	5,43	71	53
5	5,95	50	6,20	37	30	337	193

(\*): Hidróxido de Cálcio; (\*\*): Sulfato de Alumínio

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 5.16 compara os resultados dos Ensaios 1 e 2 para velocidade de sedimentação de 2,00 cm/min, sendo possível observar a influência do aumento do pH de coagulação para obtenção de uma água decantada com turbidez inferior a 5,00 uT.

Figura 5.16 – Valores de turbidez da água decantada para velocidade de sedimentação de 2,00 cm/min e do pH de coagulação em função da dosagem de sulfato de alumínio



Fonte: Elaborado pelo autor

É possível observar que a turbidez da água decantada foi inferior a 5,00 uT para as dosagens de sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio iguais a, respectivamente, 30 mg/L e 3,57 mg/L. Para a velocidade de sedimentação de 2,00 cm/min, a turbidez e cor aparente da água decantada resultaram em 3,82 uT e 45 uH. Já para a velocidade de sedimentação de 1,00 cm/min, esses parâmetros foram equivalentes a 3,80 uT e 32 uH.

A partir das dosagens dos produtos químicos obtidas nos Ensaios 1 e 2, foi realizado o Ensaio 3, no qual a água decantada com velocidade de sedimentação igual ou inferior a 1,00 cm/min foi filtrada em FLA. Os resultados referentes à turbidez e a cor aparente da água filtrada são apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Resultados do Ensaio 3

Jarro	Dosagem (mg/L)		pH de Coagulação	Água Filtrada após Decantação	
	$CaCO_3$ (*)	$Al_2(SO_4)_3$ (**)		Turbidez (uT)	Cor Aparente (uT)
1	3,57	30	6,40	-	-
2	3,57	30	6,50	-	-
3	3,57	30	6,70	-	-
4	3,57	30	6,70	0,26	3,00
5	3,57	30	6,70	0,24	1,00

(\*): Hidróxido de Cálcio; (\*\*): Sulfato de Alumínio

Fonte: Elaborado pelo autor

Os valores médios de turbidez e cor aparente da água filtrada foram, respectivamente, 0,25 uT e 2,00 uH. Tais resultados são inferiores ao valor máximo permitido pela PRC nº05/2017, podendo inferir que a utilização do sistema de pré-tratamento é recomendada para picos de turbidez da água bruta iguais a 100 uT. Ademais, são necessárias adequações nas etapas de coagulação, flocação e decantação do sistema de pré-tratamento, a fim de receber as vazões das captações antiga e nova.

#### 5.2.5. Considerações dos Ensaios de Tratabilidade

Diante dos resultados obtidos com os diferentes ensaios de tratabilidade (item 5.2), é possível concluir que não é necessário alterar a tecnologia de tratamento para ciclo completo, uma vez que a ETA de FDDL é capaz de atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela PRC nº 05/2017. Para isso, é preciso adequar a unidade de pré-tratamento e a ETA, além de consolidar uma metodologia para a realização de ensaios em Jarteste, de forma a otimizar as dosagens de produtos químicos.

Os resultados dos ensaios das Séries 1 a 4 mostraram que as dosagens de produtos químicos praticadas atualmente na ETA de FDDL e no pré-tratamento são inferiores àquelas necessárias para a realização da coagulação no mecanismo de varredura ou de adsorção-neutralização de cargas, tendo em vista as dosagens utilizadas em Jarteste (7,00 mg/L), as quais foram quase 37 vezes superiores às utilizadas na ETA de FDDL (0,19 mg/L).

Os picos de turbidez da água bruta, analisados estatisticamente no item 4.2.3, foram considerados para a realização dos ensaios de tratabilidade com as águas preparadas de 10 uT e 100 uT. Na Série 3, referente aos ensaios com a água preparada de turbidez 10 uT, foi observado que tanto o Sistema Produtor de Água (unidade de pré-tratamento e ETA) quanto somente a ETA de FDDL são capazes de tratar convenientemente a água com essa turbidez, sendo necessária a dosagem de 10 mg/L de sulfato de alumínio e a adequação dos filtros, visando a produção de água filtrada que atenda ao exigido pela PRC nº 05/2017.

Da mesma forma, os ensaios realizados na Série 4 com a água preparada de 100 uT permitiram concluir a total necessidade da utilização da unidade de pré-tratamento. No entanto, há a necessidade de adequações das etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração, considerando:

- Dosagem de sulfato de alumínio: 30 mg/L;
- Dosagem de hidróxido de cálcio: 3,57 mg/L;
- Tempo de mistura rápida: 30 s;
- Gradiente de velocidade de mistura rápida: 300 s<sup>-1</sup>;
- Tempo de floculação: 15 min;
- Gradiente de velocidade de floculação: 15 s<sup>-1</sup>;
- Velocidade de sedimentação: 1,00 cm/min a 2,00 cm/min.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados dos ensaios hidrodinâmicos realizados nos filtros e dos ensaios de tratabilidade, é possível concluir que não há a necessidade da alteração da tecnologia de tratamento para ciclo completo, uma vez que o sistema produtor existente é capaz de atender ao padrão de potabilidade exigido pela PRC nº 05/2017 com proposições menos onerosas.

No que diz respeito à unidade de pré-tratamento, é necessária a adequação do processo de coagulação por varredura com a realização de ensaios em Jarteste para as condições de mistura rápida, floculação e decantação mencionadas anteriormente. Além disso, é recomendada a dosagem de alcalinizante na chegada da água bruta, à montante do ponto de aplicação de coagulante.

Tendo em vista a ressuspensão de flocos e, consequente aumento da turbidez da água afluente à ETA, devido à dragagem da lagoa de sedimentação, é interessante o uso de polímero como auxiliar da floculação para amenizar esse problema.

É recomendada a realização de ensaios em Jarteste, com o uso de FLA e medidor de fluxo de corrente, a fim de garantir a reprodução da filtração direta que ocorre na ETA, como também a adequação do processo de coagulação por adsorção-neutralização de cargas.

A partir dos resultados dos ensaios hidrodinâmicos nos filtros, é fundamental a adequação do meio filtrante de todos os filtros existentes, a fim de se obter uma espessura mínima de 80 cm (20 cm de areia com tamanho dos grãos entre 0,42 e 1,41 mm, tamanho efetivo de 0,59 mm e coeficiente de desuniformidade entre 1,40 e 1,60; 60 cm de antracito com tamanho dos grãos entre 0,84 e 2,00 mm, tamanho efetivo de 1,00 mm e coeficiente de desuniformidade entre 1,40 e 1,60).

Para melhor eficiência do procedimento de lavagem, recomenda-se que a lavagem com ar tenha duração de 3 minutos, enquanto a lavagem com água seja realizada durante 7 a 10 minutos, ou até que a turbidez da água de lavagem resulte igual ou inferior a 5,00 uT. Ademais, é sugerida a manutenção das comportas e válvulas dos filtros, em especial a de saída de água filtrada/entrada de água para lavagem, a fim de ajustar a vazão de água dos demais filtros de uma bateria para o procedimento de lavagem, evitando a perda de material filtrante.

Por fim, recomenda-se a medição e registro da turbidez da água filtrada de qualquer filtro após a lavagem e retorno à operação, com coletas a cada 5 minutos durante pelo menos 1 hora, ou até que seja observada a produção de água filtrada igual ou inferior a 0,50 uT.

## REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação nº 05, de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, 2017.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Métodos e técnicas de tratamento de água.** 3.ed. São Carlos: LDiBe, 2017.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** 1.ed. São Carlos: LDiBe, 2011.