

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE - UNICENTRO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E AMBIENTAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO *STRICTO SENSU* EM ENGENHARIA  
SANITÁRIA E AMBIENTAL

ANDERSON CARLOS DAMICO

OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO COMBINADA DE COAGULANTE E POLÍMERO NO  
TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO PROCESSO INDUSTRIAL

IRATI

2021

ANDERSON CARLOS DAMICO

OTIMIZAÇÃO DA APLICAÇÃO COMBINADA DE COAGULANTE E POLÍMERO NO  
TRATAMENTO DE ÁGUA DESTINADA AO PROCESSO INDUSTRIAL

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental, Curso de Pós-Graduação stricto sensu em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da UNICENTRO.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal

IRATI

2021

Catálogo na Publicação  
Rede de Bibliotecas da Unicentro

D158o Damico, Anderson Carlos  
Otimização da aplicação combinada de coagulante e polímero no tratamento de água destinada ao processo industrial / Anderson Carlos Damico. – – Irati, 2021.  
xii, 94 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos., 2021.

Orientador: Carlos Magno de Sousa Vidal  
Banca examinadora: Carlos Magno de Sousa Vidal, Grasielle Soares Cavallini, Kely Viviane de Souza

Bibliografia

1. Sustentabilidade. 2. Recursos naturais. 3. Coagulação. 4. Floculação. 5. Neutralização de cargas. 6. Otimização. 7. Estação de tratamento de água. I. Título. II. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

CDD 628.4



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO CENTRO-OESTE/UNICENTRO  
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação - PROPESP  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental  
Associação ampla entre a UNICENTRO e UEPG



## TERMO DE APROVAÇÃO

**Anderson Carlos Damico**

### **Otimização da aplicação combinada de coagulante e polímero no tratamento de água destinada ao processo industrial**

Dissertação aprovada em 12/11/2021, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre, no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental, área de concentração em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos, da Universidade Estadual do Centro-Oeste, pela seguinte Banca Examinadora:

*Dr. Carlos Magno de Sousa Vidal*

Universidade Estadual do Centro-Oeste  
Orientador e Presidente da Banca

*Dra. Grasielle Soares Cavallini*

Universidade Federal de Tocantins

*Dra. Kely Viviane de Souza*

Universidade Estadual do Centro-Oeste

Irati-PR, 12 de novembro de 2021.

[www3.unicentro.br/ppgesa](http://www3.unicentro.br/ppgesa)

Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia Sanitária e Ambiental – PPGESA/UNICENTRO – Campus de Irati-PR  
Rua Profª Maria Rosa Zanon de Almeida, Bairro Engenheiro Gutierrez - CEP: 84.505-677 - Irati/PR – (42) 3421-3017

A Deus, aos meus familiares e amigos  
Que sempre me apoiaram em todos os momentos ...

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de dedicar esse trabalho a minha esposa Letícia Raphaela Alves da Silva Belinovski Damico, por ter me acompanhado durante esse longo período que somente nós sabemos das dificuldades e barreiras que juntos superamos.

Agradeço imensamente a tia Josélia Belinovski e a vó Alice Grochovski Belinovski por nos acolher, orientar, por proporcionarem momentos de descontração e alegria em meio a nossas idas e vindas de Telêmaco Borba para Irati.

Agradeço aos meus pais Sueli Spinelli Damico e José Carlos Damico por acreditarem no meu potencial e pelos conselhos dados.

Agradeço a minha irmã Jaqueline Paula Damico, por se espelhar nos bons exemplos e por seguir meus passos com relação a coragem e perseverança.

Agradeço a meu cunhado Lukas Belinovski pelos conselhos “malucos” mais que fazem sentido e por nos acolher durante nossas viagens para Ponta Grossa.

Agradeço aos meus sogros Josélia Alves da Silva Belinovski e Jamil Belinovski pelo suporte dado ao longo desses doze anos em que faço parte da família.

Agradeço a Joelma Fedalto da instituição UNICENTRO, por sua generosidade, por todo o trabalho, dedicação, orientação e suporte que nos prestou desde o primeiro momento.

Agradeço ao Professor Carlos Magno de Sousa Vidal por todo o suporte prestado, pela paciência e compreensão em todos os momentos.

Agradeço aos meus amigos Roberto Strieder e Rogério Issa que somaram esforços para conseguir me liberar da rotina pesada do trabalho para viajar e efetivar o curso.

Agradeço ao Marcelo Ananias do Nascimento pela colaboração, por compreender a situação com relação ao curto prazo e por nos permitir a utilização dos dados da companhia.

Agradeço a todos que de certa forma fizeram parte, direta ou indiretamente tornando possível a conclusão de mais essa etapa de desenvolvimento.

“O segredo de qualquer conquista é a coisa mais simples do mundo: o que fazer com ela”.

**Paulo Coelho**

## RESUMO

Com as crescentes demandas no consumo de água e energia, vem à tona a importância e relevância do tema sustentabilidade, que objetiva o consumo consciente dos recursos naturais, principalmente da água e consequentemente dos processos envolvidos em seu tratamento para posterior utilização. No presente estudo propõe-se avaliar as diferentes dosagens no uso combinado de coagulante e polímero para remoção de turbidez de água com finalidade de uso industrial. O estudo foi realizado em uma estação de tratamento de água industrial não potável, instalada no município de Três Lagoas – MS. Primeiramente, ao longo do mês de maio de 2020, foram avaliados os parâmetros do processo de tratamento, comparando-os com os pré-definidos pelo fabricante da planta. Durante o mês de junho foram identificadas por meio da realização de ensaios em escala laboratorial, utilizando o aparelho *jar test*, algumas oportunidades de aprimorar as etapas de coagulação e floculação, otimizando as dosagens de coagulante e polímero, além da implementação da rotina diária de acompanhamento operacional do processo da estação de tratamento. Com os resultados obtidos após realização de *jar test*, tornou-se possível reduzir as aplicações na estação de tratamento de 20 para 12 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio e de 0,45 para 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de polímero aniônico, ressaltando que a eficiência de remoção de turbidez da água bruta, para os testes laboratoriais nas dosagens apontadas anteriormente permaneceram acima de 80%. Após realização das alterações nas dosagens, foi avaliado o mecanismo de coagulação empregado no processo, em que o mesmo permaneceu como neutralização de cargas e para a floculação ocorreu a formação de pontes, durante todo o período avaliado (fevereiro a novembro 2020), as alterações foram realizadas objetivando atender os limites pré-definidos dos parâmetros para a água tratada, sendo; pH entre 6 e 8, condutividade inferior a 110 µS.cm<sup>-1</sup> e turbidez inferior a 1,0 NTU. Os valores obtidos durante o período de fevereiro a junho (anterior aos ajustes), permaneceram para o pH entre 6,0 e 6,7, condutividade entre 61 e 93 µS.cm<sup>-1</sup> e turbidez entre 0,2 e 0,6 NTU, já para o período de julho a novembro, os valores permaneceram, para o pH entre 6,2 e 6,9, condutividade entre 59 e 90 µS.cm<sup>-1</sup> e turbidez entre 0,1 e 0,4 NTU, mantendo-se em ambos os períodos para as diferentes dosagens combinadas de coagulante e polímero dentro dos limites previamente estabelecidos. Com as adequações realizadas nas dosagens, após o final de novembro tornou-se possível determinar os ganhos com a otimização para cada produto, sendo, redução de 44 toneladas por mês de coagulante (35%) e 300 Kg por mês de polímero (25%). Analisando os consumos otimizados exibidos anteriormente, fica evidente a importância da otimização e implementação de procedimentos de laboratório e rotinas no dia a dia da operação, pois pequenas mudanças podem trazer ganhos econômicos e ambientais extraordinários para o processo.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade, recursos naturais, coagulação, floculação, neutralização de cargas, otimização, estação de tratamento de água.



## ABSTRACT

With the rising demand of the consumption of water and electricity, the importance and relevance of the theme sustainability becomes elicited, which has as objective the conscious consumption of natural resources, especially water, and consequently the processes involved in its treatment for later use. It is proposed to evaluate the different dosages in the combined use of coagulant and Polymer for the removal of water turbidity for industrial purpose. The study was carried out in a non-drinkable water treatment station, situated in a Três Lagoas town – MS. At first, during the month of May 2020, the parameters of treatment process were evaluated, comparing them in sequence to the preset parameters defined by the plant manufacturer. During the month of June, some opportunities to improve the steps of coagulation and flocculation through lab-scale testing using the Jar Test were identified, optimizing the dosages of coagulants and Polymer and adding the implementation of a daily routine of process follow-up. With the obtained results after the Jar Test, it was possible to reduce applications in treatment plant from 20 to 12 mg. L<sup>-1</sup> of aluminum sulfate and from 0,45 to 0,3 mg. L<sup>-1</sup> of anionic polymer, emphasizing that the efficiency in removing raw water turbidity for lab tests in the previous mentioned dosages keep above 80%. After making the changes in dosages, the mechanism of coagulation applied in the process was evaluated, and it continued as charge neutralization and the bridging flocculation happened, during the whole evaluated period (February to November 2020), changes were applied aiming to meet pre-defined parameters limit for treated water, being: pH between 6 and 8, conductivity below 110 µS.cm<sup>-1</sup> and turbidity below 1,0 NTU. The numbers obtained during the month of February to June (before adjustments) kept for were pH between 6,0 and 6,7, conductivity between 61 and 93 µS.cm<sup>-1</sup> and turbidity between 0,2 and 0,6 NTU, while during the months of June to November, the numbers kept for pH were between 6,2 and 6,9, conductivity between 59 and 90 µS.cm<sup>-1</sup> and turbidity between 0,1 and 0,4 NTU, maintaining themselves in both periods for the different dosages of combined coagulants and polymer within the pre-established limits. With the adequations made in dosages, after the end of November it was possible to determine the gains with the optimization for each product, being the reduction of 44 tons of coagulants per month (35%) and 300 Kg per month of polymer (25%). Analyzing optimized consume mentioned before, it becomes evident the importance of the optimization and implementation of lab procedures and routine in daily operation, for small changes may bring extraordinary economic and environmental gain for the process.

**Keywords:** Sustainability, natural resources, coagulation, flocculation, charge neutralization, optimization, water treatment plant.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1:	Principais caminhos para a coagulação por adsorção-neutralização de carga e varredura com a aplicação de sulfato de alumínio .....	24
Figura 3.2:	Curvas de turbidez (NTU) remanescente após adição de sulfato de alumínio líquido e pH de coagulação .....	26
Figura 3.3:	Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio .....	27
Figura 3.4:	Estrutura da dupla camada elétrica.....	30
Figura 3.5:	Mecanismos de biofloculação na aplicação de quitosana em uma solução de fosfato .....	34
Figura 4.1:	Captação água bruta no Rio Paraná.....	41
Figura 4.2:	Unidades de gradeamento .....	42
Figura 4.3:	Medidor de vazão Calha Parshall e sensor medição vazão ultrassônico .....	43
Figura 4.4:	Dosagem de coagulante e recirculação água lavagem filtros TGV .....	44
Figura 4.5:	Canal distribuição água coagulada nas câmaras de floculação.....	45
Figura 4.6:	Entrada câmara floculação e dosagem de polímero .....	45
Figura 4.7:	Decantadores/ Clarificadores de alta taxa lamelares .....	46
Figura 4.8:	Canal água clarificada para distribuição nos filtros TGV .....	47
Figura 4.9:	Filtros tipo TGV .....	47
Figura 4.10:	Tanque armazenamento água tratada .....	48
Figura 4.11:	Fluxograma estação de tratamento de água estudada.....	49
Figura 4.12:	Desenho da Estação de Tratamento de Água .....	50
Figura 4.13:	Consumos setoriais na indústria .....	52
Figura 4.14:	Equipamento <i>jar test</i> utilizado .....	53
Figura 4.15:	Diagrama sequência para definição de dosagem ideal do coagulante	54
Figura 4.16:	Diagrama com sequência para definição de dosagem ideal de polímero .....	54

Figura 4.17: Rotação da paleta em função do gradiente de velocidade médio e a relação entre o fator de correção do gradiente de velocidade e a temperatura da água.....	56
Figura 4.18: Experimentos para definição da dosagem de coagulante.....	58
Figura 4.19: Teste estático para definição da dosagem de polímero.....	59
Figura 4.20: Decantação após testes definição dosagem polímero.....	59
Figura 5.1: Turbidez, condutividade e pH do sobrenadante da primeira etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de coagulante .....	61
Figura 5.2: Turbidez do sobrenadante da primeira etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de polímero.....	63
Figura 5.3: Turbidez, Condutividade e pH do sobrenadante da segunda etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de coagulante .....	65
Figura 5.4: Turbidez do sobrenadante da segunda etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de polímero.....	66
Figura 5.5: Turbidez, Condutividade e pH do sobrenadante da terceira etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de coagulante .....	67
Figura 5.6: Turbidez do sobrenadante da terceira etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de polímero.....	68
Figura 5.7: Eficiências de remoção da turbidez da água bruta por etapa dos ensaios de jar test após dosagem de polímero.....	69
Figura 5.8: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de coagulante antes dos ajustes na ETA .....	72
Figura 5.9: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de polímero antes dos ajustes na ETA.....	73
Figura 5.10: Relação de turbidez da água bruta e tratada antes dos ajustes na ETA .....	74
Figura 5.11: Cloro residual e condutividade da água tratada no período anterior aos ajustes de dosagens na ETA .....	75

Figura 5.12: Dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada antes dos ajustes na ETA.....	76
Figura 5.13: Relação da remoção de turbidez da água bruta e vazão de alimentação antes dos ajustes na ETA .....	77
Figura 5.14: Frequência da dosagem de coagulante aplicada.....	77
Figura 5.15: Dosagem média de polímero mensal.....	78
Figura 5.16: Frequência dosagem de polímero.....	79
Figura 5.17: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de coagulante após os ajustes na ETA .....	80
Figura 5.18: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de polímero após ajustes na ETA.....	81
Figura 5.19: Relação de turbidez da água bruta e tratada da ETA após ajustes na ETA .....	82
Figura 5.20: Cloro residual e condutividade da água tratada no período após os ajustes de dosagens na ETA .....	83
Figura 5.21: Dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada após os ajustes na ETA .....	84
Figura 5.22: Relação da remoção de turbidez e vazão de alimentação após ajustes .....	85
Figura 5.23: Frequência turbidez da água tratada.....	85
Figura 5.24: Frequência turbidez da água bruta .....	86
Figura 5.25: Frequência condutividade da água tratada .....	87
Figura 5.26: Frequência pH da água bruta e tratada.....	88
Figura 5.27: Condutividade água tratada, pH água tratada, Cloro livre água tratada, Turbidez água bruta e dosagem de sulfato de alumínio.....	89
Figura 5.28: Dosagem de coagulante na estação de tratamento durante o período avaliado.....	90
Figura 5.29: Dosagem de polímero durante o período avaliado na ETA.....	91

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	15
2	OBJETIVOS .....	16
2.1	Objetivo Geral.....	16
2.2	Objetivos específicos.....	16
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	17
3.1	Consumo de água na indústria.....	17
3.2	Qualidade da água .....	19
3.3	Etapas de tratamento da água para atendimento industrial .....	20
3.3.1	Estações de tratamento de água convencionais em ciclo completo.....	20
3.4	Operações unitárias presentes no tratamento de água industrial.....	22
3.4.1	Coagulação .....	22
3.4.2	Floculação .....	32
3.4.3	Decantação e sedimentação .....	36
3.4.4	Filtração.....	37
3.4.5	Desinfecção e oxidação química .....	39
4	METODOLOGIA .....	41
4.1	Dados coletados no acompanhamento do processo da ETA em estudo ...	51
4.2	Monitoramento e ajustes de dosagens de coagulante e polímero na ETA.	53
4.3	Ensaio para definição de dosagens de coagulante e polímero na ETA....	55
4.3.1	Ensaio específico em ciclo completo com sedimentação .....	57
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	60
5.1	Acompanhamento de parâmetros de monitoramento da ETA objeto de estudo.....	60
5.1.1	Procedimento dos ensaios realizados em <i>jar test</i> no laboratório.....	60
5.1.2	Análise dos parâmetros da água bruta e tratada antes dos ajustes realizados nas dosagens de coagulante e polímero na estação de tratamento .....	72

5.1.3	Análise dos parâmetros da água bruta e tratada após os ajustes realizados nas dosagens de coagulante e polímero na ETA.....	80
6	CONCLUSÃO.....	92
7	REFERENCIAS.....	94

## 1 INTRODUÇÃO

Com as fortes demandas relacionadas a sustentabilidade, principalmente o consumo consciente de água, surge a importante necessidade de buscar oportunidades de otimizações, seja no consumo do recurso natural ou na redução dos resíduos gerados em seu tratamento, evidenciando o lodo químico, composto por resíduos de matéria orgânica e inorgânica com subprodutos formados nas etapas de coagulação (sulfato de alumínio, PAC, etc) e floculação (polímeros auxiliares). Esse resíduo é encaminhado para tratamento e posterior destinação em aterro industrial, gerando a longo prazo a ocupação de grandes áreas.

No entanto, uma das formas de minimizar a quantidade de resíduos gerados no tratamento, é garantir que as etapas de coagulação e floculação estejam em perfeito funcionamento, ou seja, com as dosagens ideais para manter a eficácia das etapas de tratamento e garantir a qualidade e os parâmetros da água produzida.

Atualmente existem diversos sistemas de tratamento de água, desde o simples até o mais complexo, a depender da qualidade da água bruta e das necessidades finais do consumidor. A estação de tratamento da água (ETA) de configuração mais simples é a filtração lenta, os sistemas mais sofisticados são denominados como convencionais de ciclo completo, que envolve as etapas de coagulação, floculação, decantação ou flotação, filtração e desinfecção.

Existem ainda as plantas que empregam a tecnologia de aplicação de micro areia junto a etapa de coagulação e flocução. Devido as inovações utilizadas, esse tipo de projeto permite a utilização de plantas de tratamento com áreas compactas, proporcionando menor geração de resíduos, visto que a utilização de micro areia beneficia na redução da aplicação de coagulante e polímero.

Na planta objeto do estudo, utiliza-se o sistema de tratamento de água convencional em ciclo completo, porém, a água produzida pela unidade não tem como objetivo a potabilidade, mas sim o uso em processos industriais.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Avaliar o uso combinado de coagulante e polímero com vistas a diminuição do consumo de produtos químicos na ETA e atender a padrões previamente estabelecidos para água destinada à indústria.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Avaliar a influência de diferentes dosagens de coagulante e polímero nos valores de turbidez, condutividade e pH da água tratada.
- Verificar se a qualidade de água produzida na estação em estudo atendeu os parâmetros previamente estabelecidos, sendo; pH entre 6,0 a 8,0, turbidez inferior a 1,0 NTU e condutividade máxima 110 $\mu$ S/cm.
- Comparar os valores de consumo de coagulante e polímero com relação ao volume de água produzido antes e depois das alterações realizadas na ETA.



### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Consumo de água na indústria

Atualmente diversos seguimentos da indústria estão enfrentando dificuldades em relação a utilização de recursos naturais, principalmente relacionados ao consumo de água.

Um dos mercados mais aquecidos no momento é o siderúrgico, o qual apresenta consumo de água exorbitante. Diversas restrições estão sendo impostas com relação ao consumo de água e emissões, sejam atmosféricas ou de resíduos de processo, com isso as buscas por inovações tecnológicas no processo estão em voga.

Klimes *et al.*, (2020), realizaram simulações computacionais para verificar as oportunidades e alternativas de melhoramento em uma indústria de fabricação de aço e apontaram que em um dos processos, mais especificamente o de resfriamento do aço, que é realizado com spray de água em sistema aberto (em que a água é descartada logo após o uso), poderia ser feito com um sistema misto através do uso de spray de água e resfriamento a seco (através da passagem de água internamente nos rolos que fariam a troca de calor com o aço produzido), transformando parte do circuito de água em um sistema fechado, permitindo a reutilização e sendo assim a alternativa poderia apresentar uma otimização de aproximadamente 50% no consumo de água na etapa, o que representaria cerca de 1,5 m<sup>3</sup>/min de economia sem perder a eficiência do processo.

Outro mercado não menos importante é o de fabricação de celulose, que vem aumentando a cada dia sua capacidade de produção, buscando atender à necessidade e a alta demanda de consumo, principalmente na fabricação de papel, embalagens, etc.

Com o aumento da produtividade e o surgimento de novas fábricas e novas tecnologias de produção vem a crescente demanda no uso da água e geração de resíduos do processo. Fiorentino *et al.*, (2018) realizaram um estudo aplicando processos de simulações computacionais, para apontar melhorias e identificar os setores que geram maior impacto ambiental em uma fábrica de celulose e papel

instalada na Finlândia. Os autores concluíram que a etapa de produção é a responsável pelo maior consumo de água e geração de resíduos.

O setor de produção alimentícia também está entre os maiores consumidores de energia e água. Rezaie *et al.*, (2018), deixaram claro que para garantir o crescimento sustentável do mercado a longo prazo é necessário a adoção de medidas de conservação dos recursos naturais. Os autores realizaram um apontamento sobre estudos realizados com produtores de alimentos na região noroeste do pacífico nos Estados Unidos, concluíram que a utilização de novas tecnologias que permitem o reuso da água, a substituição de equipamentos antigos do processo e a elaboração de planos de gerenciamento, podem desempenhar um papel fundamental para otimizar o consumo de energia e água, mantendo a competitividade e sustentabilidade para os envolvidos.

Colmenar-Santos *et al.*, (2018), realizaram um estudo em uma planta de fabricação de louças sanitárias, mapeando todo o processo de manufatura e quantificando os consumos de cada etapa, com isso conseguiram encontrar oportunidades de melhorias e redução no consumo de energia e de água, o que poderia proporcionar a redução de resíduos emitidos, otimizando assim também os impactos ambientais.

O que todos os mercados citados anteriormente possuem em comum?

O consumo exorbitante de energia e água praticamente em todas as etapas de seus processos. A busca pela otimização, adoção de planos de gerenciamento, emprego de novas tecnologias, trazem à tona e evidenciam a importância da conscientização sobre o uso racional dos recursos naturais. Quando existe a necessidade de produzir grandes volumes de água para consumo, há também diversas exigências de parâmetros de tratamento a se atingir como objetivo, buscando manter os padrões de qualidade do produto final. Grandes volumes de água tratada geram proporcionalmente o consumo de produtos químicos e a produção de resíduos, que podem ser tóxicos a depender do tratamento empregado, impactando diretamente o meio ambiente e os custos com tratamento (água, disposição de resíduos, etc.).

### 3.2 Qualidade da água

De acordo com Von Sperling (2014), a qualidade da água pode ser representada por diversos parâmetros sendo eles físicos tais como; cor, turbidez, sabor, odor e temperatura. Por parâmetros químicos tais como; pH, alcalinidade, acidez, dureza, ferro, manganês, cloretos, nitrogênio, fosforo, oxigênio dissolvido e por parâmetros biológicos, sendo principalmente os microrganismos.

Para usos de abastecimento da população ou industrial a coleta da água é realizada nos corpos hídricos, sendo que para uso industrial se exigem tratamentos específicos, seguindo parâmetros pré-definidos em projeto, principalmente objetivando a proteção de ativos industriais e qualidade do produto final.

Para seleção das tecnologias de tratamento da água ou para operação de uma estação de tratamento, torna-se necessário o profundo conhecimento das características da água bruta em questão (DI BERNARDO *et al.*, 2011).

Ncibi *et al.*, (2017) comentam que para garantir a efetividade do tratamento da água, muitas indústrias estão investindo fortemente em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias, buscando aprimorar as etapas do processo, garantindo a qualidade final de seus produtos e a proteção de equipamentos que exigem alta pureza da água tratada em sua alimentação, como é o caso de equipamentos para geração de energia, caldeiras, trocadores de calor, etc. Investimentos realizados em equipamentos complexos que realizam a remoção de micropartículas sólidas tem sido cada vez mais implementados, como é o caso das membranas de osmose reversa e redução de sólidos dissolvidos realizada em leitos contendo resinas de troca iônica.

Para a estação de tratamento em questão foram estabelecidos alguns parâmetros de qualidade a serem atendidos, visando as etapas posteriores de utilização da água tratada e principalmente a proteção de equipamentos, sendo; pH entre 6,0 e 8,0, turbidez inferior a 1,0 NTU, cloro livre entre 0,2 e 0,5 mg.L<sup>-1</sup> e condutividade máxima 110µS/cm (VWS BRASIL LTDA, 2008; POYRY TECNOLOGIA LTDA, 2007).

### 3.3 Etapas de tratamento da água para atendimento industrial

De acordo com Richter (2009), para se atingir o objetivo de água tratada são definidos uma série de processos, com a finalidade de remoção dos contaminantes da água bruta até se atingir as especificações estabelecidas pelo consumidor final e órgãos competentes. Os processos adequados com cada etapa do tratamento seguem de acordo com o projeto e devem levar em consideração a facilidade de construção, mão de obra operacional, disponibilidade de insumos químicos, segurança e manutenção. Tudo isso impactará diretamente nos custos de construção e operação do sistema.

O processo de tratamento da água pode ser entendido como uma série de manejos da água em suas diferentes formas e características, de modo a torná-la própria para o abastecimento do consumidor, ou seja, estar com qualidade físico-química e microbiológica apta a atender aos padrões de qualidade definidos por agências regulamentadoras (FERREIRA FILHO, 2017).

#### 3.3.1 Estações de tratamento de água convencionais em ciclo completo

Essa é a categoria mais empregada, sendo composta pelas seguintes etapas de tratamento; pré-tratamento químico com objetivo de produzir flocos sedimentáveis contando com unidade de mistura rápida na coagulação, unidade mistura lenta na floculação, decantadores de alta taxa ou fluxo horizontal na decantação, filtração e desinfecção. Devido a sua adaptação as diferentes faixas de turbidez, esse tipo de ETA suporta cargas elevadas de até 1000 NTU. Quando identificado uma alta reincidência na turbidez acima de 1000 NTU, torna-se necessário a instalação de unidades de pré-sedimentação, já para turbidez da água bruta inferior a 50 NTU, devido à falta de peso agregado aos flocos, torna-se necessário a aplicação de um pré-tratamento químico, produzindo um floco favorável à sedimentação.

As estações de filtração direta estão sendo muito utilizadas, principalmente devido ao baixo custo de implantação, pois não necessita da etapa de decantação e suportam tratar águas com até 60 NTU. Algumas contraindicações para aplicação da filtração direta são informadas pelo autor, sendo elas; no caso de dosagens de sulfato de alumínio superiores a  $10 \text{ mg.L}^{-1}$ , quando a quantidade de coliformes for maior que 1.000 (NMP.100mL<sup>-1</sup>) ou ainda quando ocorrer a presença de algas acima de 1.000 UPA.mL<sup>-1</sup> (RICHTER ,2009).

Ferreira Filho (2017) cita que para o tratamento de água bruta com turbidez inferior a 1,0 NTU e cor menor que 5 UC, devido à baixa concentração de partículas coloidais o processo mais indicado nessas condições é a filtração em linha, que conta com as seguintes operações unitárias; coagulação, filtração, desinfecção e correção final de pH. O processo de filtração em linha é uma variante da configuração do tratamento convencional de ciclo completo. O autor deixa bem claro que para garantir o bom funcionamento da filtração em linha, o processo de dosagem do coagulante deve ser eficaz, garantindo exatamente que a dosagem não seja superior a demanda do sistema, caso contrário a massa de sólidos precipitada oriunda do coagulante tenderá a ser significativa podendo comprometer a eficiência das etapas posteriores. Pode-se também adotar uma pré-floculação, com a aplicação de polímero entre as etapas de coagulação e filtração, possibilitando um ganho com relação as carreiras de filtração, esse processo é denominado filtração direta.

### 3.4 Operações unitárias presentes no tratamento de água industrial

#### 3.4.1 Coagulação

A água bruta possui uma grande variedade de partículas que agregam impurezas, dentre elas as suspensões coloidais, matéria orgânica na forma dissolvida e outros microrganismos, que geralmente possuem em sua superfície cargas negativas, fazendo com que as partículas sejam repelidas. Dessa forma, surge a necessidade de se aplicar algum produto para neutralizar ou desestabilizar essas cargas negativas e fazer com que as partículas se aproximem através da reação química de hidrólise ou pela precipitação do metal ou ainda pelo fenômeno físico de transporte das espécies hidrolisadas, promovendo o contato com as partículas da água (DI BERNARDO *et al.*, 2011).

Yu *et al.*, (2020), afirmam que a coagulação é o processo fundamental para obtenção da eficiência no tratamento de água. Os autores especificam que o mecanismo de coagulação pode ocorrer de três formas, seja por neutralização/desestabilização de cargas, através da formação de precipitados e complexos insolúveis ou ainda pela adsorção físico-química na superfície das espécies hidrolisadas de alumínio.

Cheng *et al.*, (2007) esclarecem que uma das reações mais importantes que ocorrem durante a desestabilização das partículas em suspensão é a hidrólise dos íons metálicos do coagulante aplicado. Os autores descrevem ainda que águas com baixa turbidez podem dificultar a efetividade na formação de flocos, devido à redução na taxa de colisão entre as partículas.

Di Bernardo *et al.*, (2011), relatam que na coagulação com sulfato de alumínio podem ocorrer diferentes situações durante a prática da aplicação, sendo elas:

- Dosagem insuficiente de coagulante, a qual implica na reação de hidrólise, porém os metais precipitados ou hidrolisados não são suficientes para neutralizar as partículas da água, sendo essa de baixa turbidez e pouca concentração de partículas coloidais, neste caso a hidrólise ocorre na faixa de pH entre 4,5 e 6,5.

- Dosagem suficiente de coagulante, ocorre a formação ideal de espécies hidrolisadas, sendo suficientes para desestabilizar as cargas presentes nas impurezas, sendo assim ocorre a neutralização das cargas. A hidrólise das espécies ocorre na faixa de pH entre 4,5 e 6,5.

- Excesso na dosagem de coagulante, ocorre a reversão de cargas das impurezas, sendo que as mesmas ficam cobertas com as cargas positivas excessivas das espécies hidrolisadas, devido a isso novamente ocorre a repulsão entre as partículas inexistindo a etapa de coagulação.

- Para uma situação de dosagem de coagulante superior a necessária, com uma água com média a alta turbidez e presença de impurezas elevada, com formação de espécies hidrolisadas no pH entre 6 e 8, nesse caso ocorre o mecanismo de varredura, devido ao excesso de precipitado formado.

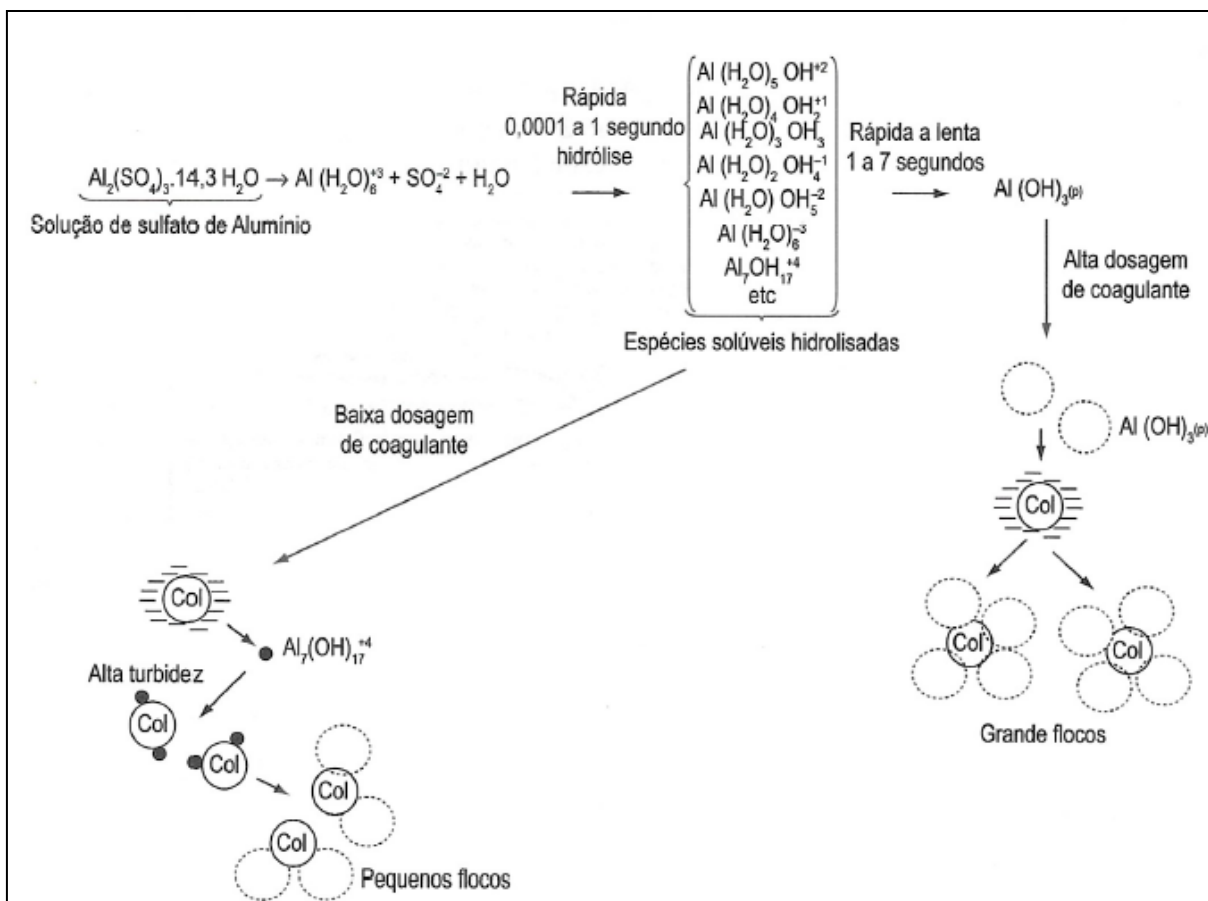
Ncibi *et al.*, (2017), enfatizam sobre a importância do desenvolvimento de novos produtos de origem orgânica e inorgânica, assim como o estudo do emprego de novas tecnologias ao processo, atualmente os produtos mais utilizados são os inorgânicos de bases metálicas, seja de alumínio ou ferro, as reações ocorrem de forma semelhante, envolvendo a dissociação dos íons na forma trivalente carregados positivamente ( $Al^{3+}$  e  $Fe^{3+}$ ), que na sequência hidrolisam e interagem com as cargas negativas da superfície dos coloides.

Yu *et al.*, (2020), defendem ainda que uma coagulação eficiente e otimizada permite uma maior remoção de turbidez e matéria suspensa, com isso, redução na produção de lodo, menor residual de alumínio e conseqüentemente a redução de custos com o tratamento. Os autores também citaram estudos em que descrevem os parâmetros que impactam no desempenho da coagulação, sendo eles: pH, dosagem de coagulante, composição do coagulante, condições da água a ser tratada, temperatura e condições hidráulicas da planta.

Para se ocorrer a etapa com maior eficiência, se é exigido uma ligeira agitação, seja ela mecânica ou hidráulica. A coagulação pode ocorrer de forma individual ou combinada, entre a ação de quatro mecanismos diferentes, tais como; compressão da dupla camada elétrica, adsorção e neutralização, varredura, adsorção e formação de pontes (DI BERNARDO *et al.*, 2011).

A Figura 3.1 ilustra os principais caminhos que ocorrem para os mecanismos de coagulação por adsorção-neutralização de carga e varredura com a aplicação de sulfato de alumínio.

Figura 3.1: Principais caminhos para a coagulação por adsorção-neutralização de carga e varredura com a aplicação de sulfato de alumínio



Fonte: Di Bernardo e Dantas, (2005).

A eficiência da coagulação interfere em todos os processos subsequentes, se o processo não está em equilíbrio com as cargas, as demais etapas consequentemente serão prejudicadas, sendo assim possui desempenho fundamental e predominante na cadeia do processo de tratamento. (DI BERNARDO *et al.*, 2011; RICHTER, 2009).

Ncibi *et al.*, (2017), afirmaram que com a forte demanda global de água tratada, as exigências dos sistemas de tratamentos estão cada vez mais rigorosas, devido a isso se faz necessário melhorar e aprimorar as etapas, sendo que a



coagulação está em evidência, pois com a aplicação do processo torna-se possível a redução de cor, turbidez, sólidos suspensos e organismos patogênicos.

Richter (2009), descreve o parâmetro que influencia diretamente nas etapas de coagulação e floculação, a velocidade em que a mistura ocorre, sendo que para a coagulação existe a necessidade do maior número possível de colisões entre as partículas, ocorre então o denominado gradiente de velocidade rápida ou mistura rápida, geralmente entre 300 e 1000 s<sup>-1</sup>. O autor afirma que a concentração de partículas em uma dada água influencia diretamente na eficiência da coagulação, ou seja, águas de baixa turbidez são mais difíceis de tratar, a solução aplicada é a utilização em alguns casos de um auxiliar, como a bentonita ou a sílica.

A NBR 12.216 (BRASIL, 1992), especifica que para gradientes de velocidade rápida temos os valores entre 700 e 1100 s<sup>-1</sup>, para mistura lenta temos entre 10 e 70 s<sup>-1</sup>.

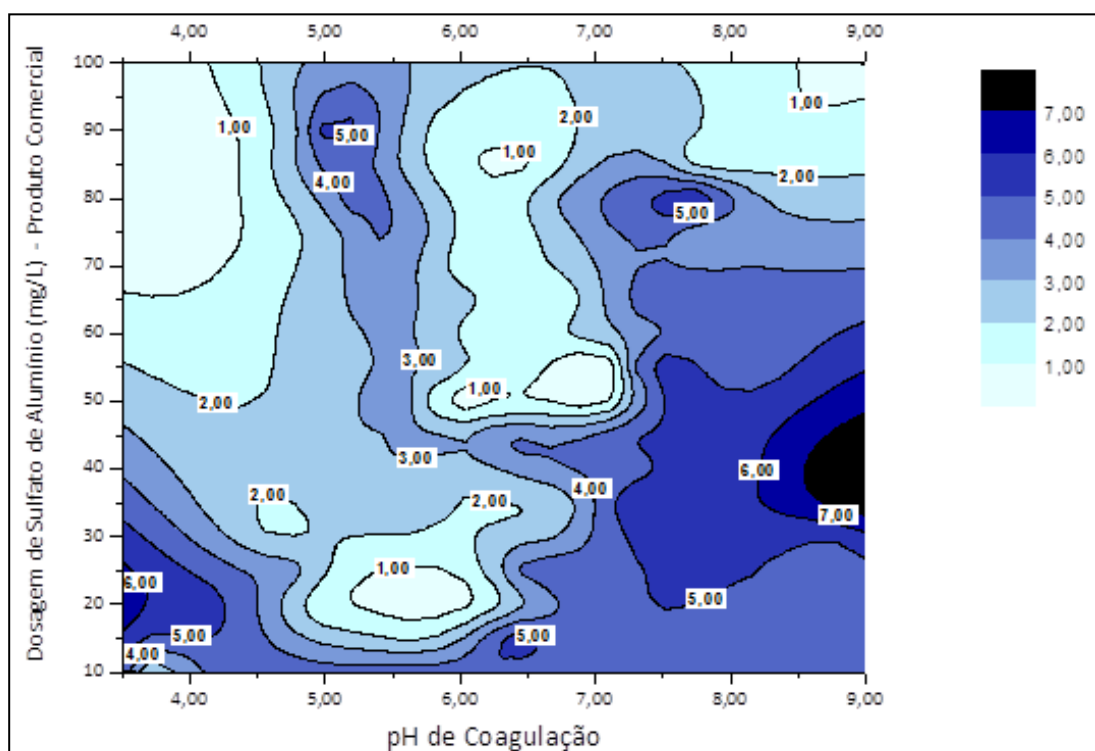
Yu *et al.*, (2020), apontaram alguns estudos que sugerem a importância de se realizar uma pré-oxidação eficaz, pois esse processo também pode interferir na etapa de coagulação, porém a depender do tipo de produto oxidante utilizado. O uso combinado com um floculante pode melhorar o desempenho da etapa.

Os coloides hidrofílicos (amidos, resinas, proteínas e polieletrólitos) resultam das interações entre grupos OH<sup>-</sup> adsorvidos pelas partículas com a água e são termodinamicamente estáveis. Já os coloides hidrofóbicos (íons metálicos), ao contrário dos hidrofílicos, são termodinamicamente instáveis e devido a interações eletrostáticas entre a água e a superfície das partículas, podem permanecer em suspensão (BRITO *et al.*, 2014).

Ncibi *et al.*, (2017), defendem que um processo ineficiente de coagulação pode resultar no aumento de residuais de coagulante na água tratada, como é o caso de sobre dosagens ou ainda o aumento na produção de lodo e redução no pH provocado pelo excesso de coagulante, ressaltando que o pH impactará diretamente na solubilidade do coagulante, podendo gerar mais ou menos compostos precipitados a depender da dosagem.

A Figura 3.2 foi elaborada por Selhorst Filho *et al.*, (2011) apresenta as regiões de turbidez remanescente, como melhor desempenho com residual de 1,00 NTU.

Figura 3.2: Curvas de turbidez (NTU) remanescente após adição de sulfato de alumínio líquido e pH de coagulação



Fonte: Selhorst Filho *et al.*, 2011.

Selhorst Filho *et al.*, (2011) descreveram que para dosagens inferiores a 20  $\text{mg.L}^{-1}$  de coagulante comercial e pH de coagulação entre 5,3 e 6,0, o mecanismo de coagulação predominante é o de adsorção e neutralização de cargas, ressaltaram ainda que a acidez apresentada não é prejudicial para o sistema. Para a faixa de dosagem de coagulante entre 50 e 85  $\text{mg.L}^{-1}$  e pH de coagulação entre 6,5 e 6,8, o processo necessitaria de dosagem de alcalinizante, encarecendo e criando restrições ao processo.

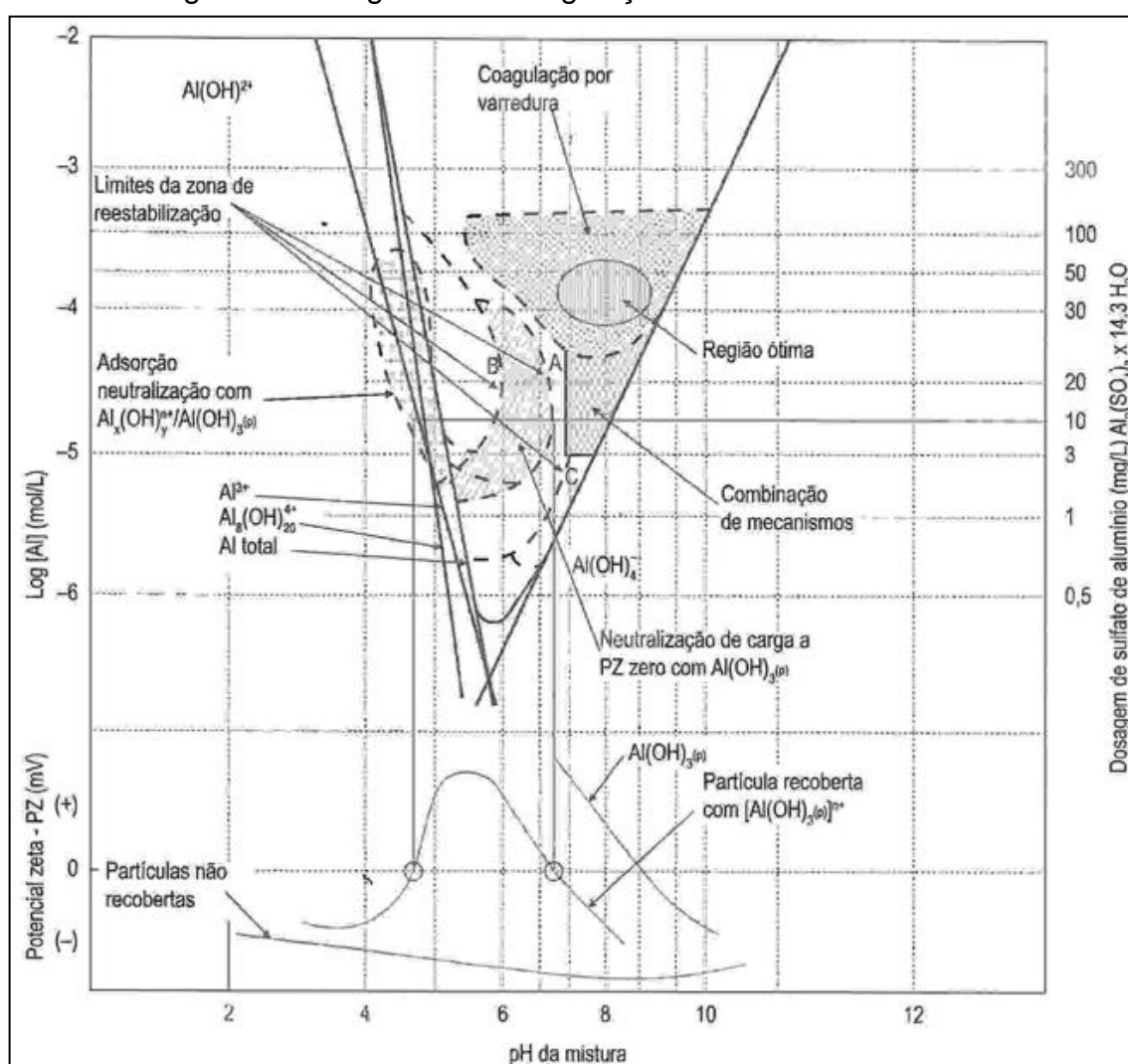
De acordo com Samadi *et al.*, (2018) mais de 70% das estações de tratamento de água empregam coagulantes no processo de tratabilidade, principalmente os inorgânicos, que possuem íons metálicos em sua composição. O problema de maior impacto é com relação ao grande volume de resíduos gerados, elevando o custo do tratamento devido à disposição final, trazendo além disso muitos desafios com relação ao meio ambiente e a saúde da população em geral.

Howe *et al.*, (2016), explicam que o pH durante a coagulação na maioria dos processos de tratamento de água opera com valores entre 6 e 8, evitando o limite inferior buscando evitar a aceleração das taxas de corrosão.

Wang *et al.*, (2008) ressalta que a dosagem excessiva de coagulante proporciona a redução do pH, o que torna a água mais corrosiva, o que aumenta os custos com tratamentos posteriores.

A Figura 3.3 representa o diagrama típico de coagulação com sulfato de alumínio.

Figura 3.3: Diagrama de coagulação do sulfato de alumínio



Fonte: Di Bernardo *et al.*, (2011).

De acordo com Di Bernardo *et al.*, (2011), os mecanismos de coagulação são alterados a depender da dosagem do coagulante e do pH em que a reação ocorre. Os autores explicam que para o pH próximo a 6,0 e uma dosagem de

coagulante entre 3 e 30 mg.L<sup>-1</sup> ocorre o mecanismo de neutralização de cargas, devido aos hidróxidos de alumínio com cargas positiva. Já o mecanismo de varredura ocorre devido a formação excessiva de precipitados de hidróxido de alumínio com pH entre 6 e 8 e dosagens superiores a 30 mg.L<sup>-1</sup>, conforme ilustrado na Figura 3.3. Esclarecem ainda que não existe pH e dosagem ideal e sim correlações entre os parâmetros que são selecionadas em função de alguns aspectos, tais como a não necessidade de aplicação de acidificante ou alcalinizante, faixa de turbidez remanescente, custos, etc.

Xie *et al.*, (2018) explicam que os coagulantes/ floculantes mais utilizados são os de origem química, devido ao custo e elevada eficiência que os mesmos oferecem, porém, apresentam algumas limitações quando o assunto é saúde e meio ambiente.

Yang *et al.*, (2019), esclarecem que o desempenho da etapa de coagulação é dificultado quando a água bruta se origina de fonte com baixa turbidez, devido as baixas concentrações de coloides presentes, o que dificulta a colisão entre as partículas, gerando um consumo maior de coagulante com a formação de flocos de má qualidade, fracos e pouco resistentes.

De acordo com Yan *et al.*, (2017), alguns desafios podem ser encontrados para se garantir a eficiência da etapa de coagulação, como é o caso das fontes de água com dureza elevada, principalmente com relação a Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup>. Segundo o autor ocorre uma competição dos íons de Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> com os íons Al<sup>3+</sup> durante a neutralização das cargas negativas presentes na superfície dos coloides, fazendo com que ocorra o aumento no consumo do coagulante para se manter a eficácia do tratamento.

Mahdavi *et al.*, (2017), realizaram estudos de tratabilidade de água de uma ETA instalada em Isfahan no Iran, em que empregaram nos testes os coagulantes Cloreto de poli alumínio férrico (PaFCl) e o Cloreto férrico (FeCl<sub>3</sub>), o pH se manteve próximo a 8,0 em ambas as aplicações, porém a eficiência de remoção de turbidez foi maior para o PaFCl.

Yamamura *et al.*, (2017), realizaram experimentos com amostras de água de três rios distintos no Japão, aplicaram nos ensaios o cloreto de poli alumínio

comercial (PAC), em que obtiveram ótimos resultados de turbidez com pH se mantendo próximo a 8,0.

Wang *et al.*, (2008), empregaram como coagulante o sulfato de alumínio e polímero catiônico como combinação, para realização dos experimentos com a água do rio Elbow, localizado em Calgary Canadá.

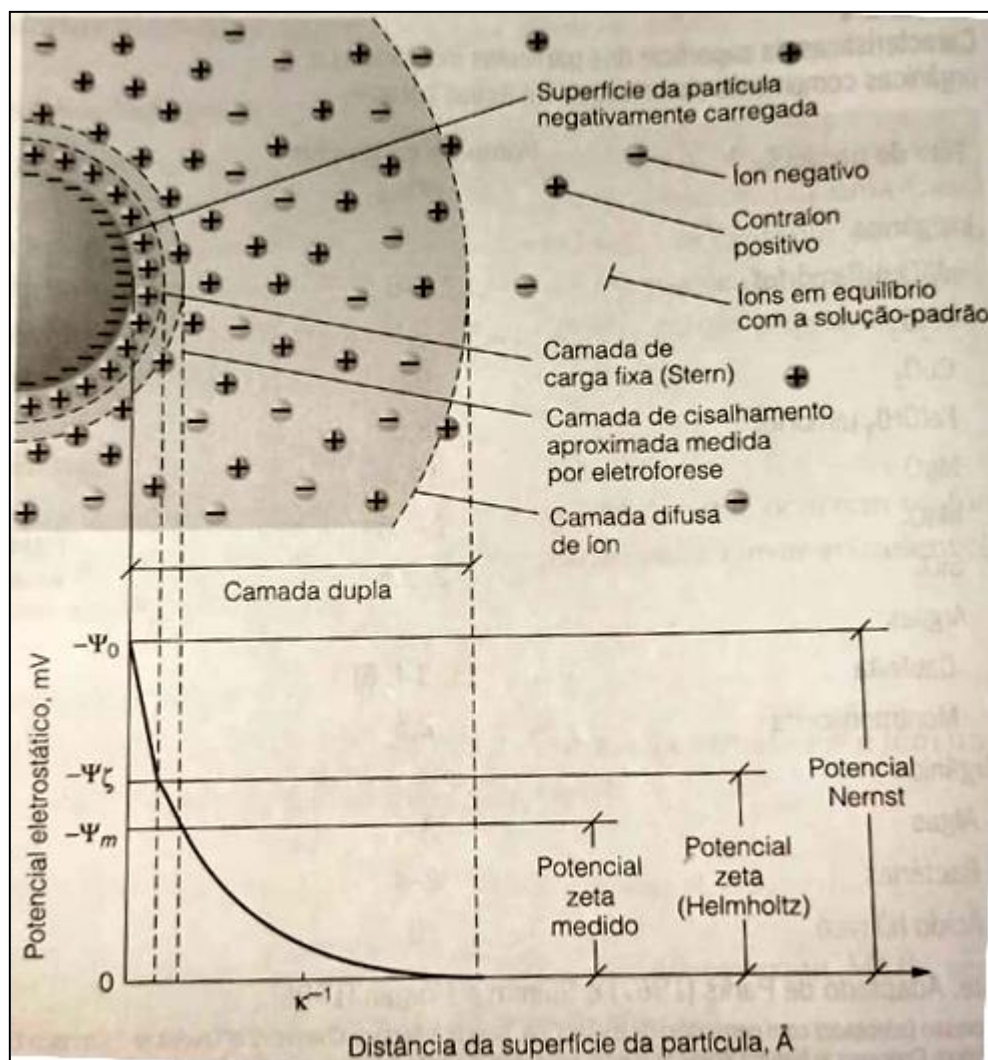
Yu *et al.*, (2020), aplicaram no estudo realizado visando aumentar a eficácia da etapa de coagulação do tratamento de água a micro areia, como coagulante sulfato de alumínio e polímero aniônico.

Ncibi *et al.*, (2017), apresentaram uma lista dos coagulantes empregados no tratamento de água e as eficiências de remoção de matéria orgânica, sendo os principais; base alumínio (Sulfato de alumínio), base ferro (Cloreto férrico), poliméricos orgânicos e inorgânicos (Cloreto de polialumínio "PAC", polidialildimetilamônio "pDADMAC", Sulfato poliférrico "PFS").

### 3.4.1.1 Dupla camada elétrica

Howe *et al.*, (2016), esclarecem que devido a maioria das partículas presentes em uma água natural possuírem cargas negativas em sua superfície, ocorre o acúmulo de íons positivos que tendem a satisfazer a eletroneutralidade. A camada catiônica ligada na superfície negativa da partícula forma a camada de adsorção fixa e é conhecida como camada de Helmholtz ou ainda camada de Stern, conforme descrito na Figura 3.4.

Figura 3.4: Estrutura da dupla camada elétrica



Fonte: Howe *et al.*, (2016).

As colisões ocasionadas pela influencia da difusão provocam a movimentação dos íons presentes, isso faz com que os cátions em excesso na

solução satisfaçam a interação com toda a superfície da partícula ocorrendo a eletroneutralidade. A camada de íons que se estende da camada de Helmholtz para a solução padrão é conhecida como camada difusa. O conjunto da camada de Helmholtz com a difusa formam a chamada dupla camada elétrica.

Devido a maioria das partículas presentes em uma água natural serem negativas, desenvolve-se uma camada de íons oposta ao redor da partícula. No entanto esses íons são bombardeados pelas moléculas de água de modo a gerar um deslocamento dos íons adsorvidos para a fase líquida, gerando um processo de disputa eletrostática, que atrai os mesmos para a superfície da partícula e outro processo difuso que faz a dispersão dos íons no meio aquoso. Com o afastamento da superfície da partícula, com o aumento da distância a concentração dos íons de carga oposta tende a se igualar a quantidade de carga negativa. Assim descrevendo a teoria da dupla camada (FERREIRA FILHO, 2017).

Richter (2009), descreve que não é possível mensurar o potencial na superfície da partícula, porém, pode-se medir o potencial que separa a camada difusa da camada interna, o denominado potencial zeta ou potencial eletrocinético, sendo a medida mais comum a eletroforese, sendo essa representada pelo movimento das partículas, se medindo a velocidade da mesma pode-se determinar a magnitude do potencial zeta.

### 3.4.2 Floculação

A floculação é a etapa em que ocorre a aglutinação ou a aglomeração das partículas fazendo com que o floco ganhe tamanho e peso, porém, sua densidade diminui tornando o floco mais propenso a tensões de cisalhamento. As combinações que ocorrem para aglomerar os flocos são; as colisões causadas pelo movimento dos próprios coloides, também conhecido como movimento browniano e pela movimentação da água. O principal fator que influencia nesse processo é a temperatura (RICHTER, 2009).

A etapa de floculação é definida como um processo físico que proporciona o contato entre as partículas coloidais de modo a atribuir um aumento de tamanho físico que altera sua distribuição granulométrica e aumento do diâmetro médio do floco, garantindo a maior remoção na unidade de separação sólido-líquido. Para garantir que a floculação ocorra de forma eficiente é de extrema importância garantir que a etapa de coagulação seja operada corretamente, pois a coagulação proporciona a desestabilização dos coloides (FERREIRA FILHO, 2017).

Maeng *et al.*, (2017), explicam que o uso combinado de coagulante com polímero pode ser vantajoso pelo fato de se ter uma menor dosagem de coagulante, com isso uma redução significativa no consumo de alcalinidade da água bruta e na geração de lodo. Os autores expressaram ainda que diversos estudos estão sendo conduzidos referentes a dosagem de polímeros catiônicos como coagulante primário, principalmente quando se tem o uso de processos mais sofisticados como é o caso das membranas de microfiltração e ultrafiltração.

Com relação a etapa de floculação é necessário que as interações ocorram de forma mais branda, para evitar a quebra ou cisalhamento dos flocos formados, usualmente aplicado entre 20 e 75 s<sup>-1</sup> (RICHTER, 2009).



### 3.4.2.1 Polímeros auxiliares de floculação

Os polímeros também conhecidos como polieletrólitos, podem ser utilizados como auxiliares de floculação, aplicados após a desestabilização das partículas. Podem ser classificados como, catiônicos (carga positiva), aniônicos (carga negativa) ou ainda como não iônicos. Possuem diferentes configurações de densidade de carga e peso molecular. A aplicação de polímeros não interfere no pH e alcalinidade da água tratada (RICHTER, 2009).

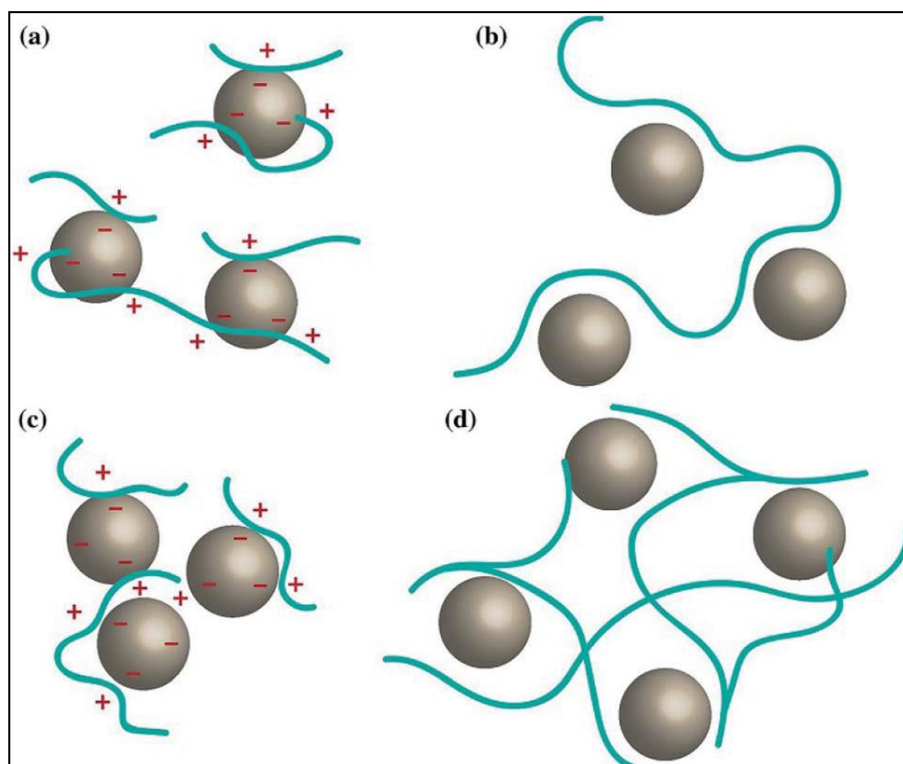
A seleção do polímero a ser empregado na aplicação é empírica. Podem ser aplicados em diversas etapas do processo, como auxiliares de floculação, em que geralmente aplica-se polímeros orgânicos aniônico (-) ou catiônico (-) e até mesmo para aumentar o desempenho da filtração, como é o caso da aplicação frequente de polímero não iônico antes da água adentrar aos filtros granulares. Em alguns casos específicos polímeros catiônicos, são empregados como coagulante primário, em substituição aos coagulantes inorgânicos (HOWE *et al.*, 2016).

Wang *et al.*, (2018), esclarecem que a aplicação de doses corretas de polímeros pode permitir a formação de flocos resistentes, por meio da captura e formação de pontes entre partículas insuficientemente desestabilizadas com a aplicação do coagulante, o que afetaria a eficácia das etapas posteriores, principalmente na filtração.

De acordo com Yu *et al.*, (2020), os polímeros orgânicos têm se mostrado eficientes na substituição de polímeros sintéticos, os mesmos são originados de matéria orgânica como; microrganismos, biomassa, recursos marinhos, etc. Os mais utilizados são tanino e a quitosana. Segundo os autores, os biopolímeros interagem de duas formas, sendo; reações físicas como interações iônicas, criando pontes entre as proteínas e polissacarídeos, e reações químicas tal como a ligação de aldeídos, copolimerização do grafite, esterificação, eterificação, com quensação entre outras interações. Um dos principais parâmetros que interferem na qualidade e eficiência da coagulação é o pH em que a reação ocorre, a temperatura também é um fator relevante e que pode interferir.

A Figura 3.5 Mecanismos de biofloculação na aplicação de quitosana em uma solução de fosfato.

Figura 3.5: Mecanismos de biofloculação na aplicação de quitosana em uma solução de fosfato



Fonte: Yu *et al.*, 2020.

a) Neutralização de cargas, b) Formação de pontes, c) Arranjo eletrostático e d) Varredura.

Xie *et al.*, (2018), estudaram sobre a eficácia de um floculante orgânico extraído da bactéria *Klebsiella variicola* B16, sendo as mesmas capazes de produzir até 6,96 gramas de floculante para cada 1,0 litro de cultura. Os pesquisadores aplicaram o produto em conjunto com um coagulante inorgânico, a aplicação do produto combinado tornou possível reduzir a dosagem do coagulante inorgânico, entre 56,2% e 72% em testes realizados para água bruta com alta turbidez. De acordo com os autores, os mecanismos de coagulação que ocorreram foram a neutralização de cargas e adsorção e formação de pontes.

Maeng *et al.*, (2017), utilizaram polímero de quaternário de amina como coagulante principal o cloreto de polidialildimetilamônio (pDADMAC "C<sub>8</sub>H<sub>16</sub>NCl"), para remoção de matéria orgânica antes da alimentação de membranas de

microfiltração com a finalidade de aumentar os flocos formados para remoção e aumento da eficiência das membranas. Os autores realizaram a comparação entre o cloreto de polidialildimetilamônio (pDADMAC) e o epicloridrina/dimetilamina (epi/DMA "C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>ONCl), ambos de carga catiônica.

Ncibi *et al.*, (2017), explicam que geralmente o polímero catiônico orgânico é empregado como coagulante principal em estações de tratamento de água, aplicados de modo a interagir com as cargas aniônicas presentes na matéria orgânica, promovendo a neutralização e a formação de flocos. Os polímeros catiônicos mais usuais são; cloreto de polidialildimetilamônio (pDADMAC), poliacrilamida (CPAM), epicloridrina/dimetilamina (epi/DMA), a quitosana, tanino e o amido.

### 3.4.3 Decantação e sedimentação

De acordo com Di Bernardo *et al.*, (2011) sedimentação é o fenômeno que ocorre quando algum material está em suspensão em meio líquido, que por interação com a gravidade tende a apresentar movimento descendente devido a massa específica ser maior que a do líquido. Ainda de acordo com o autor a sedimentação ocorre com as partículas e a decantação com a água, com isso ocorre a clarificação, ou seja, a separação das fases sólido e líquido. A etapa de decantação pode ocorrer de forma convencional, com a utilização de tanques extensos devido ao tempo necessário para sedimentação das partículas, ou também pode ser apresentada na forma de alta taxa, em que ocorre a sedimentação dos flocos.

Ritcher (2009) defende que para o cálculo da eficiência de sedimentação deve-se levar em consideração a *Lei de Stokes*, que indicará o desempenho de um reator em manto de lodo será maior quanto maior a concentração de flocos e a altura do leito de lodo e quanto maior forem os diâmetros das partículas, pois partículas de tamanhos e densidades diferentes tendem a apresentar diferentes velocidades de sedimentação. Yu *et al.*, (2020), explicam que os principais fatores que influenciam na qualidade da sedimentação é a formação dos flocos nas etapas anteriores, tamanho dos flocos e as condições hidráulicas. Segundo os autores um floco mais consistente com partículas de maior tamanho e densidade tende a promover uma maior velocidade de sedimentação devido a interações com a gravidade quando comparado a flocos de menores aplicando a *Lei de Stokes*, ou seja, a eficácia da etapa de sedimentação é que garante a qualidade da água tratada.

#### 3.4.4 Filtração

De acordo com Ritcher (2009), a filtração é um processo que teve início na Escócia no ano 1804, a princípio com a construção de um filtro lento de areia. No século XIX a tecnologia foi fundamental para evitar que um surto de cólera atingisse a cidade de Altona, já na cidade de Hamburgo que não possuía a tecnologia implementada no tratamento registrou aproximadamente 8.000 mortes no ano de 1892, vizinhas e ambas as cidades abastecidas pelo rio Elba. Segundo o autor, a filtração é o processo mais importante do tratamento, estando presente como filtração lenta (processo físico, químico e biológico), ou filtração direta (processo físico-químico), sendo classificados em lentos e rápidos. O processo mais utilizado é o de filtração rápida, que operam com taxas superiores a 40 vezes a taxa da filtração lenta. Geralmente a limpeza dos filtros lentos são efetuadas com menor frequência comparada a filtração rápida, por meio da remoção manual da camada superior do leito, suas carreiras podem durar até 60 dias. Já os filtros rápidos são limpos frequentemente com a aplicação de correntes de água em contra lavagens, mantendo suas carreiras em aproximadamente 3 dias. A filtração ocorre por uma série de mecanismos, sendo eles; interceptação, difusão, sedimentação, inércia e ação hidrodinâmica, sendo predominantes os três primeiros. Os materiais aplicados no meio filtrante diferem de tamanho, distribuição de tamanho, forma, peso específico e composição química, esses materiais terão grande influência no desempenho da filtração.

Lima (2019), ressalta que o processo de filtração direta pode ser encontrado em três diferentes configurações, sendo; filtração direta ascendente, filtração direta descendente ou dupla filtração. De acordo com a autora, o processo de filtração que apresenta maior garantia de segurança sanitária é o filtro direto descendente. Quando comparados os processos de tratamento da estação de tratamento de água convencional com as estações equipadas com filtração direta descendente, observaram diversas vantagens da última com relação as convencionais, envolvendo desde o menor custo com instalações, operação e manutenção até a otimização de coagulante e menor geração de impactos ambientais, já que a produção de lodo é proporcional ao consumo de coagulante, sendo o principal ponto

de atenção exigido o controle rigoroso na dosagem de produtos químicos do sistema.

Wang *et al.*, (2018), realizaram estudos sobre a tratabilidade de água com baixa turbidez, baixa concentração de matéria orgânica e temperaturas baixas em Calgary, Alberta, Canadá. O rio fonte de abastecimento da água em estudo passa entre as montanhas Rocky. Os autores verificaram em uma planta piloto, que a filtração direta ou em linha é uma ótima opção para o tratamento de águas com as condições descritas anteriormente. No experimento foram aplicados 3 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio e 0,072 mg.L<sup>-1</sup> de polímero catiônico. O processo testado foi capaz produzir água com turbidez inferior a 0,1 NTU, comprovando que o método de filtração em linha é eficiente para as condições expressas, porém, novamente fica evidente a importância de se aplicar a dose correta de coagulante e polímero, pois que impactará diretamente no processo da filtração e remoção dos flocos. Os autores realizaram ensaios utilizando as dosagens individuais de coagulante (sulfato de alumínio concentração 49%) e de polímero catiônico, em que verificaram que as dosagens ficaram relativamente altas para se obter resultados propostos, para o coagulante 72 mg.L<sup>-1</sup> em que foram observados a formação de flocos leves e frágeis com pouca resistência e 0,58 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, em que não conseguiram atingir o objetivo, já com a aplicação combinada de coagulante e polímero observaram a formação de flocos resistentes e fáceis de serem removidos. Outro ponto importante comentado pelos autores é de que a sobre dosagem de polímero pode provocar o acúmulo na superfície do meio filtrante resultando na redução das carreiras de filtração.

### 3.4.5 Desinfecção e oxidação química

De acordo com Brito *et al.*, (2014), a desinfecção tem por objetivo abranger a eliminação de microrganismos prejudiciais à saúde pública, principalmente os patogênicos. O processo não garante a destruição total como na esterilização. Alguns processos físicos conhecidos que podem ser aplicados, sendo, o calor, a luz solar, a filtração em membranas, a sedimentação, a radiação eletromagnética, ondas de ultrassom. Os processos químicos mais aplicados são, aplicação de halogênios (Cloro, Bromo e Iodo) sendo o cloro e seus derivados os mais empregados, estes além do grande poder de eliminar microrganismos também interagem e extinguem os odores e sabores presentes (residuais entre 0,1 e 0,2 mg.L<sup>-1</sup>). O cloro também contribui com a oxidação do manganês, do ferro e H<sub>2</sub>S. Os agentes desinfetantes interagem diretamente com a estrutura celular inibindo a proliferação dos microrganismos. As aplicações devem seguir uma série de parâmetros para garantir a boa funcionalidade do agente oxidante, sendo; pH, dosagem, temperatura, etc.

Segundo Lima (2019), a aplicação de cloro tem suas vantagens como a praticidade no manuseio, baixo custo e inativação de microrganismos principalmente os patogênicos, porém, o mesmo também apresenta desvantagens devido a interação com a matéria orgânica e geração de compostos halogenados, que são prejudiciais à saúde, sendo os principais os trihalometanos, ácidos halo acéticos, halocetonas, etc. A autora citou ainda que a pré-oxidação com cloro ou dióxido de cloro da água bruta aumentou a eficiência da coagulação e floculação. Em ambas as aplicações foram observadas formações de compostos halogenados.

Assim como Lima (2019), Ncibi *et al.* 2017 esclarecem que a presença de matéria orgânica contribui diretamente na formação de subprodutos oriundos da desinfecção, principalmente em sistemas de tratamento convencionais que utilizam a cloração na etapa.

Yu *et al.*, (2020) afirmam que a oxidação realizada de forma efetiva auxilia na eficiência da coagulação. Em muitos países a etapa de pré-oxidação é realizada com permanganato de potássio, com a finalidade de minimizar os subprodutos formados que posteriormente passam para as demais etapas do tratamento.

Segundo os autores muitos produtos são utilizados de forma combinada para realizar a pré-oxidação e desinfecção, sendo eles; cloro e dióxido de cloro, sendo o cloro um oxidante forte que ataca principalmente algas, removendo também a cor e sabor. Quando aplicado na pré-oxidação o reagente auxilia positivamente na etapa de coagulação, o dióxido de cloro geralmente aplicado na água potável, por oxidar algas, íons complexados, manganês entre outros benefícios, segundo os pesquisadores o produto só é recomendado para dosagem na pré-oxidação quando há presença de algas.



## 4 METODOLOGIA

Os dados aqui apresentados são de uma estação de tratamento de água instalada em uma indústria, localizada no município de Três Lagoas – MS. A planta é operada com processo convencional de ciclo completo, passando pelas seguintes operações unitárias; coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção.

A água produzida não tem por finalidade o consumo humano, apenas atendimento ao processo industrial.

A captação é realizada no rio Paraná, próximo ao município citado anteriormente. No percurso do rio nas proximidades do ponto de coleta, temos a presença da barragem da usina hidrelétrica, que represa os rios Tietê, Sucuriú e Paraná.

Devido ao ponto da adutora estar alguns quilômetros abaixo do ponto de instalação da barragem, não ocorrem variações bruscas no nível do rio e em suas características. A largura do rio próximo ao canal de coleta é de aproximadamente 1200 metros.

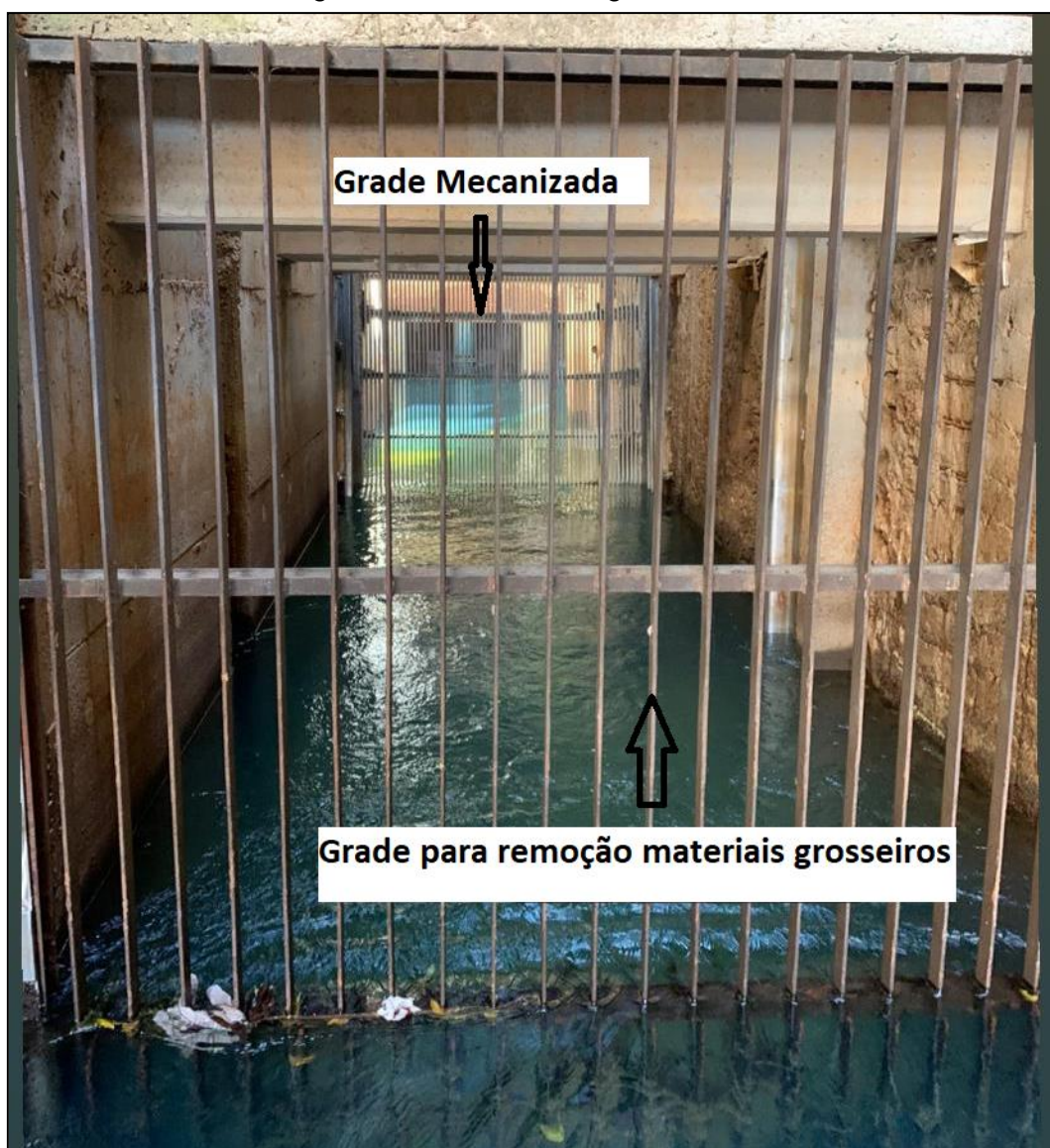
Figura 4.1: Captação água bruta no Rio Paraná



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Após a captação, a água bruta passa pelo gradeamento (Figura 4.2), buscando a remoção de materiais grosseiros, em seguida a água é encaminhada ao processo de pré-oxidação principalmente para oxidação do ferro e manganês, com a aplicação de hipoclorito de sódio (Concentração 12%).

Figura 4.2: Unidades de gradeamento



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Em sequência a água bruta é encaminhada a estação de tratamento pelo canal principal, que direciona o fluxo para a calha Parshall, para medição de vazão com monitoramento online, conforme Figura 4.3. A vazão nominal da estação é de  $6.499 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  ( $6.684 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$  com a água de contra lavagem dos filtros).

Figura 4.3: Medidor de vazão Calha Parshall e sensor medição vazão ultrassônico



Fonte: Acervo do autor, 2020.

No início do canal ocorre a dosagem do coagulante Sulfato de Alumínio líquido comercial (Concentração 48%, densidade  $1,32 \text{ Kg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), no mesmo ponto temos o duto de recirculação da água de lavagem dos filtros gravitacionais de alta taxa (TGV), conforme Figura 4.4.

Figura 4.4: Dosagem de coagulante e recirculação água lavagem filtros TGV



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Posteriormente a dosagem do coagulante, a aproximadamente 15 metros a jusante temos a calha Parshall, conduzindo pelo canal (Figura 4.5) até a entrada dos três tanques de coagulação (área superficial  $19,5 \text{ m}^2$  e volume  $58,5 \text{ m}^3$  cada tanque, dimensões  $3,0 \times 3,0 \times 6,5 \text{ m}$ , tempo de detenção 1,57 minutos), o sistema conta ainda com a opção de recirculação de lodo, que deve ser ligada caso ocorram oscilações significativas na vazão de alimentação, ou quando a turbidez abaixo de 10 NTU, para essa última condição ou caso ocorra a necessidade de manutenção nos três decantadores simultaneamente, a planta conta com um sistema de *By-pass* permitindo a utilização de sistema de filtração direta, isolando-se os decantadores e alimentando diretamente nos filtros TGV, admitindo-se a dosagem de coagulante e polímero, mediante análise prévia em *jar test*.

Figura 4.5: Canal distribuição água coagulada nas câmaras de floculação



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Em seguida a água coagulada é direcionada para a entrada das três câmaras de floculação (Volume útil 899 m<sup>3</sup> cada tanque, dimensões 16,0 x 8,0 x 7,2 m, tempo de detenção 24,09 minutos), em que ocorre a dosagem do polímero de carga aniônica (Figura 4.6), passando pelos agitadores que obedecem a um gradiente de mistura lenta.

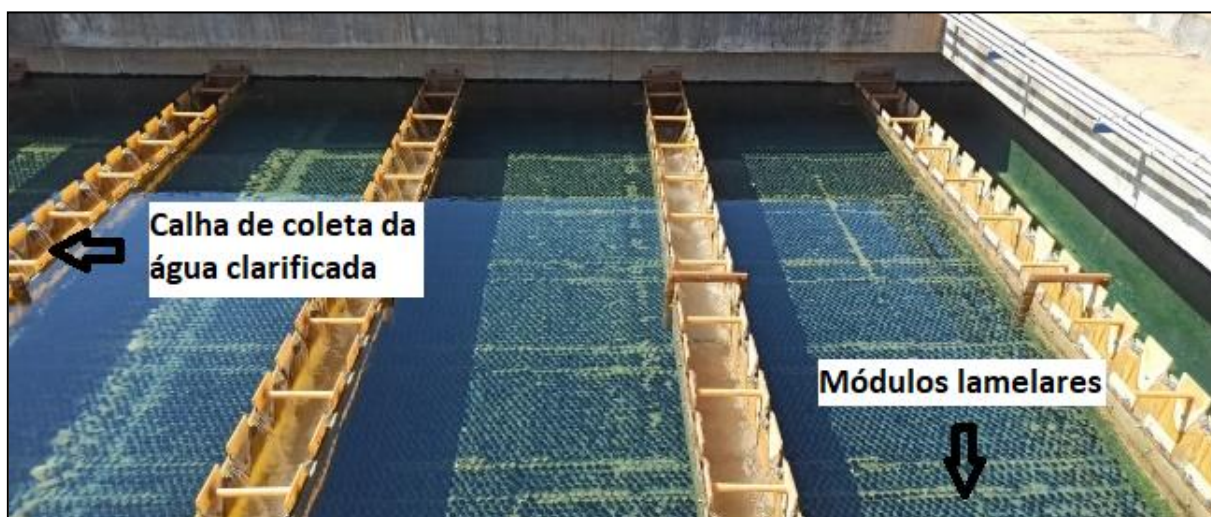
Figura 4.6: Entrada câmara floculação e dosagem de polímero



Fonte: Acervo do autor, 2020.

O fluxo segue de forma ascendente para alimentação dos três tanques clarificadores de alta taxa, que contam com a instalação de recheio no formato lamelar para auxiliar na homogeneidade e captação dos flocos antes que os mesmos atinjam a superfície (Área total de decantação 182 m<sup>2</sup>, velocidade de decantação 12,2 m.h<sup>-1</sup>, velocidade de Hazen 0,80 m.h<sup>-1</sup>), a água clarificada segue para a superfície do decantador sendo coletada em canaletas (Figura 4.7), o lodo decantado é extraído automaticamente pelo fundo do decantador e direcionado para a estação de tratamento de efluentes.

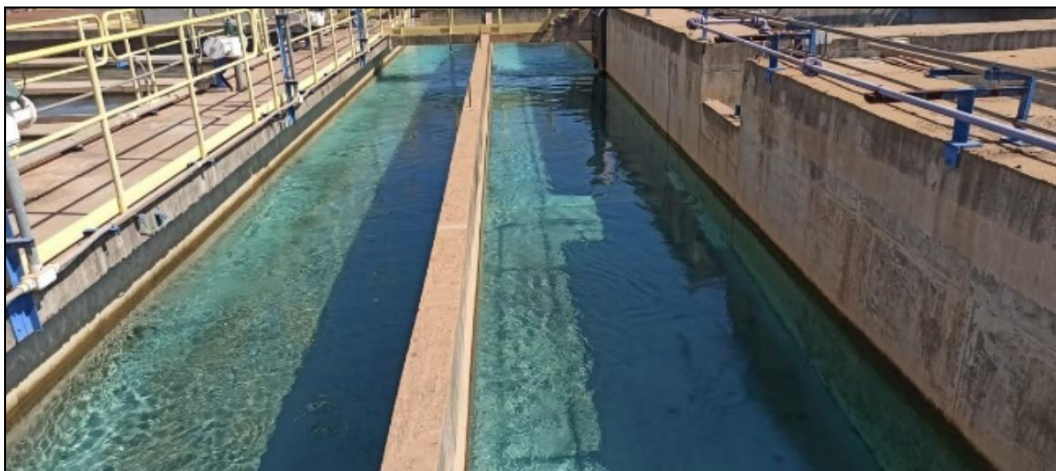
Figura 4.7: Decantadores/ Clarificadores de alta taxa lamelares



Fonte: Acervo do autor, 2020.

O processo sequencial é a filtração, em que o canal (Figura 4.8) direciona de forma descendente a água para os dez filtros tipo TGV com as seguintes configurações, dimensões; largura 3,68 m x comprimento 15,34m x 1,65 m, conforme Figura 4.9. A água de lavagem dos filtros tipo TGV é direcionada para tanque de água suja, com capacidade de 530 m<sup>3</sup>.

Figura 4.8: Canal água clarificada para distribuição nos filtros TGV



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Figura 4.9: Filtros tipo TGV



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Após o processo de filtração a água tratada é coletada por crepinas presentes no fundo dos filtros em toda sua extensão e direcionada para o tanque de armazenamento (Figura 4.10).

O funcionamento dos filtros se dá através do princípio de filtração rápida com fluxo descendente, em que a água escoar pelo leito de material filtrante com auxílio da pressão atmosférica, são compostos por uma camada de areia com altura de 1,5 m (granulometria 1,35 mm) e uma fina camada de pedregulho (tamanho efetivo 6,0 mm). A lavagem dos filtros ocorre por contracorrente, utilizando em suas etapas água e ar.

O bom funcionamento das etapas anteriores, principalmente da coagulação e floculação é de fundamental importância para garantir a eficiência dos filtros TGV, mantendo a carreira dos mesmos e evitando o desperdício de ar e água com antecipação de lavagens.

Na saída da filtração ocorre a oxidação com a dosagem de hipoclorito de sódio, que logo após segue para armazenamento no tanque pulmão de 20.000 m<sup>3</sup> (Figura 4.10), que visa manter a alimentação da fábrica estável, livre de oscilações.

Figura 4.10: Tanque armazenamento água tratada

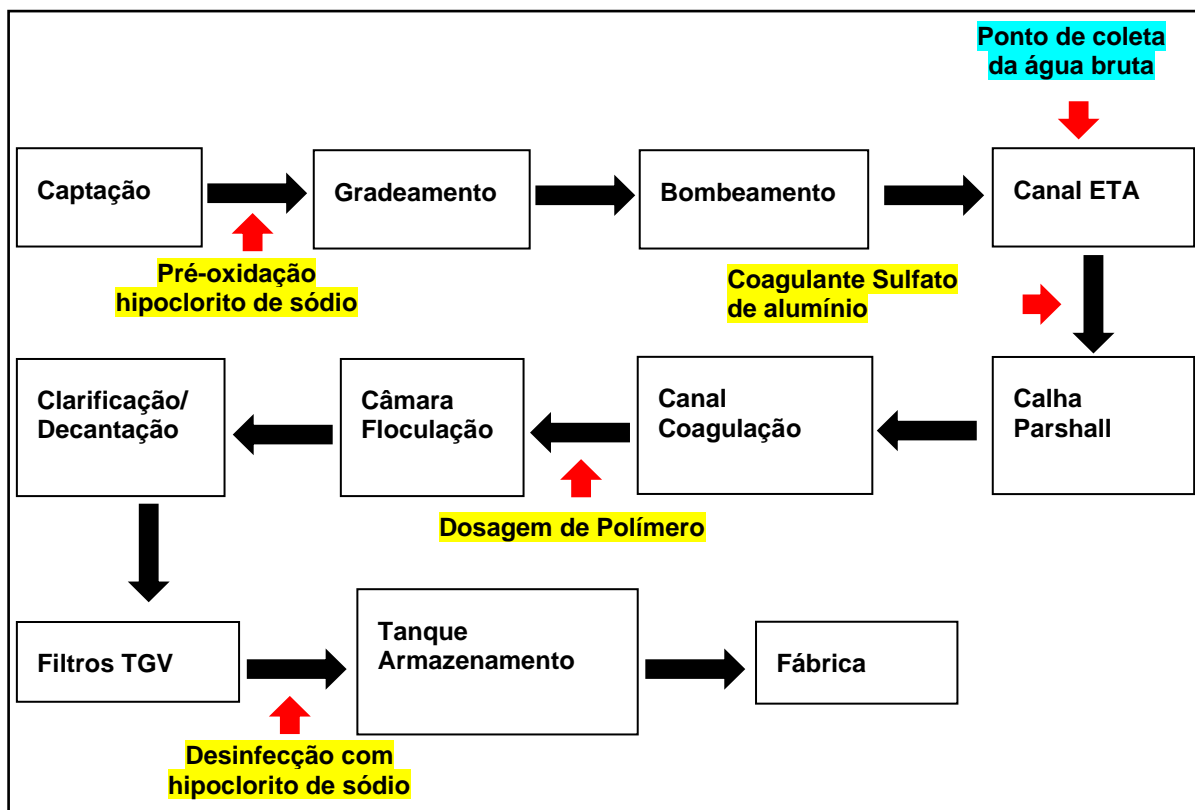


Fonte: Acervo do autor, 2020.



A Figura 4.11 descreve o fluxograma com a sequência de tratamento, com a descrição dos produtos químicos dosados e seus respectivos pontos.

Figura 4.11: Fluxograma estação de tratamento de água estudada.



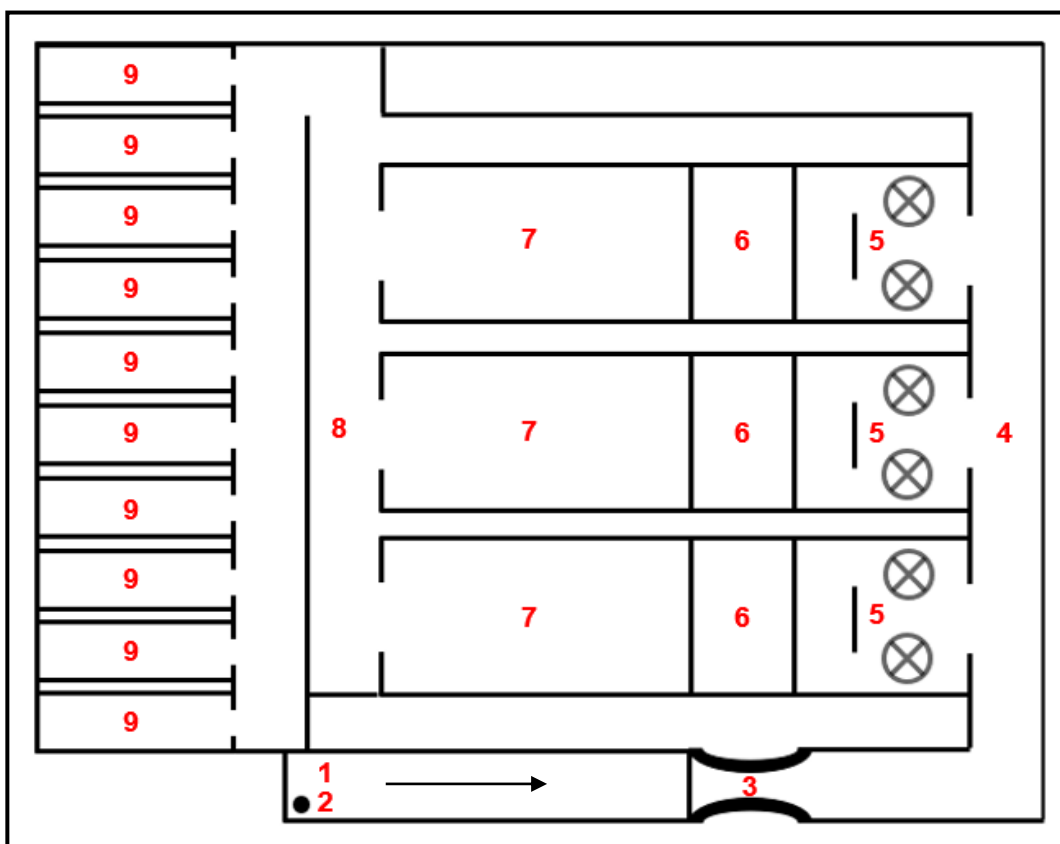
Fonte: Acervo do autor, 2020.

Os processos descritos na Figura 4.11 são monitorados em tempo real por meio dos instrumentos online, sendo os medidores de vazão, pHmetros, condutivímetros, analisador de cloro residual e turbidímetros, todos com sistema de alarmes, visando mantê-los dentro dos limites.

Os parâmetros também são mensurados diariamente em laboratório, buscando identificar falha e necessidade de calibração dos instrumentos.

A Figura 4.12 demonstra o layout real da estação de tratamento de água.

Figura 4.12: Desenho da Estação de Tratamento de Água



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Notas: 1 – Canal de entrada, 2 – Tubulação água lavagem filtros TGV, 3 – Calha Parshall, 4 – Canal água coagulada e by-pass, 5 – Câmara de floculação, 6 – Maturação floco, 7 – Decantadores lamelares, 8 – Canal água clarificada e 9 – Filtros TGV.

#### 4.1 Dados coletados no acompanhamento do processo da ETA em estudo

A princípio, durante o mês de maio, foram realizadas coletas de informações de parâmetros do processo de tratamento (pH, condutividade, turbidez, dosagens de coagulante e polímero). Na sequência os parâmetros foram avaliados e comparados com os pré-estabelecidos pelo fabricante da ETA.

Na planta, foi imposta a rotina de acompanhamento diário do processo, através da análise de dados e verificação de instrumentos de medição em tempo real. A verificação da eficiência das dosagens de coagulante e polímero é realizada sempre que o parâmetro de turbidez da água tratada atinge o valor de segurança estipulado (0,5 NTU), com a realização de testes em laboratório utilizando o equipamento *jar test*.

Para realização das análises desta pesquisa foram coletados aproximadamente 30 litros de água bruta, 1 litro de coagulante e 300 mL polímero, as diluições dos produtos foram realizadas em laboratório. A metodologia aplicada para realização do *jar test* segue conforme especificado na Tabela 4.3 procedimento operacional.

As dosagens aplicadas nos jarros de 2 litros já abastecidos com as amostras de água para definição da melhor dosagem de coagulante (sulfato de alumínio) seguiram conforme especificado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Referência de dosagens de coagulante utilizadas no *jar test*

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	10	12	14	16	18	20
Dosagem de polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45

Fonte: Acervo do autor, 2020.

Após verificação da dosagem de coagulante, foram realizados testes para definição da melhor dosagem de polímero, seguindo as dosagens especificadas na Tabela 4.2

Tabela 4.2: Referência de dosagens de polímero utilizadas no *jar test*

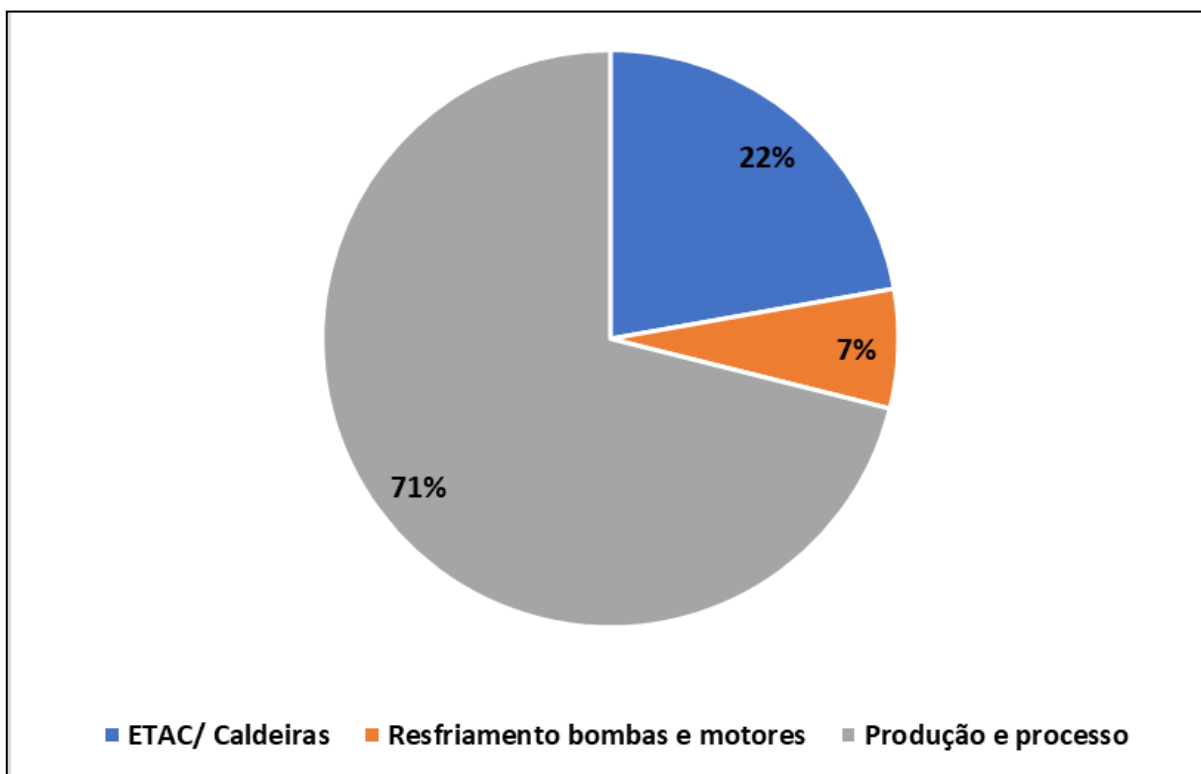
Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de Sulfato de Alumínio (mg.L <sup>-1</sup> )	12	12	12	12	12	12
Dosagem de polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Fonte: Acervo do autor, 2020.

A água tratada na ETA tem como destino a alimentação setorial dentro da indústria, sendo que cada uso pode exigir ainda tratamentos específicos, como a adição de agentes dispersantes para evitar a formação de depósitos e incrustações que podem resultar em pontos de corrosão em tubulações e equipamentos, dosagem de sequestrantes para evitar a corrosão com a presença de oxigênio ou outro agente oxidante como o cloro, etc.

A Figura 4.13 a seguir representa o histórico de consumo setorial na indústria.

Figura 4.13: Consumos setoriais na indústria



Fonte: Acervo do autor, 2020.

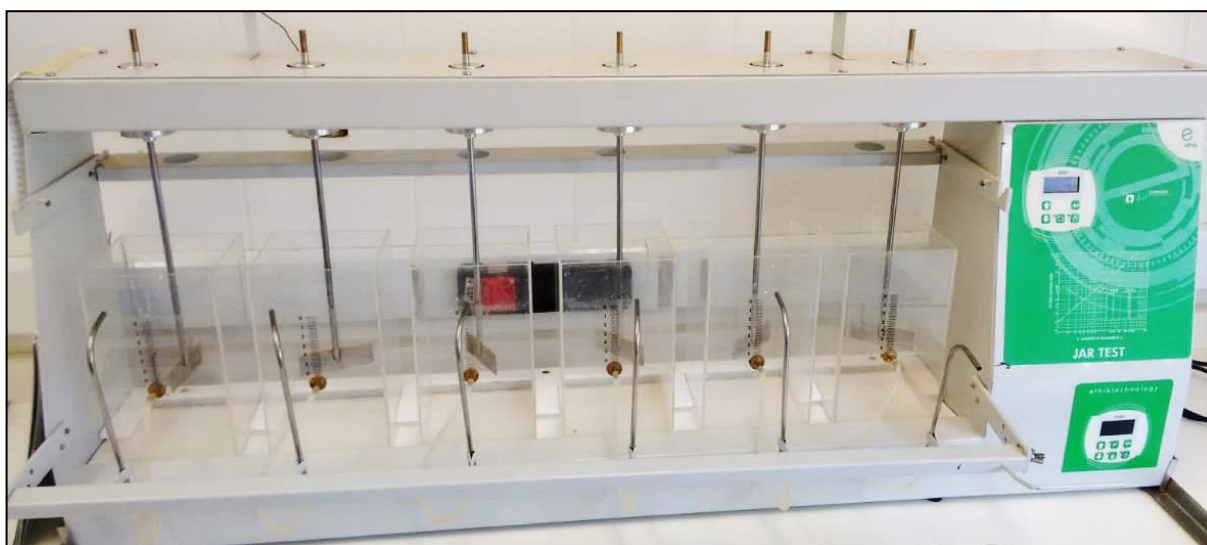
Na Figura 4.13 fica evidente que o maior responsável pelo consumo industrial é o processo de produção, em seguida vem a ETAC, com as seguintes especificações do fabricante; pH de 6,0 à 8,0, Condutividade máxima  $110 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , Turbidez máxima de 1,0 NTU.

## 4.2 Monitoramento e ajustes de dosagens de coagulante e polímero na ETA

Os monitoramentos são realizados diariamente através da verificação em campo, diretamente na planta pela operação envolvida, observando-se os parâmetros de qualidade da água e condições da estação de tratamento. Quando observado oportunidade de melhorias ou necessidades de ajustes são realizados os ensaios em laboratório, mais conhecido como *jar test* ou teste de reatores estáticos.

O equipamento *jar test* é constituído por agitadores, jarros e controle da rotação, alguns equipamentos equipados com cronômetro e o ajuste automático da rotação. Existem diversos modelos de equipamentos, sejam eles para uso fixo em bancada ou portátil. A Figura 4.14 ilustra o modelo de equipamento utilizado para realização dos experimentos realizados.

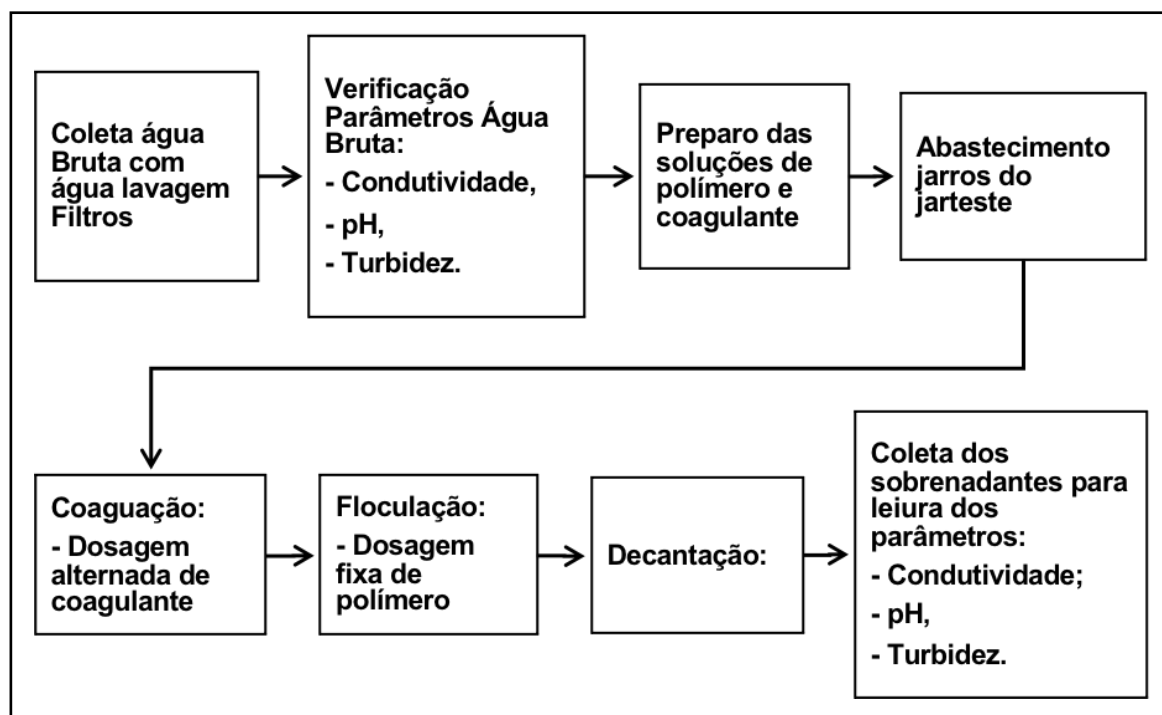
Figura 4.14: Equipamento *jar test* utilizado



Fonte: Acervo do autor, 2020.

A Figura 4.15 a seguir descreve as sequências para realização do *jar test* para definição da dosagem ideal do coagulante sulfato de alumínio.

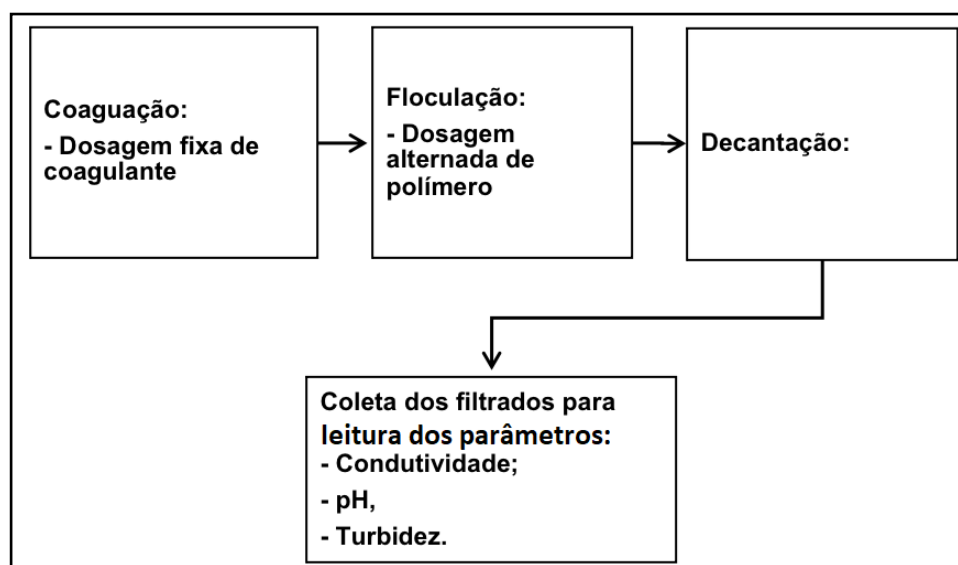
Figura 4.15: Diagrama sequência para definição de dosagem ideal do coagulante



Fonte: Acervo do autor, 2020.

A Figura 4.16 a seguir descreve as sequências para realização do *jar test* para definição da dosagem ideal do polímero.

Figura 4.16: Diagrama com sequência para definição de dosagem ideal de polímero



Fonte: Acervo do autor, 2020.

### 4.3 Ensaio para definição de dosagens de coagulante e polímero na ETA

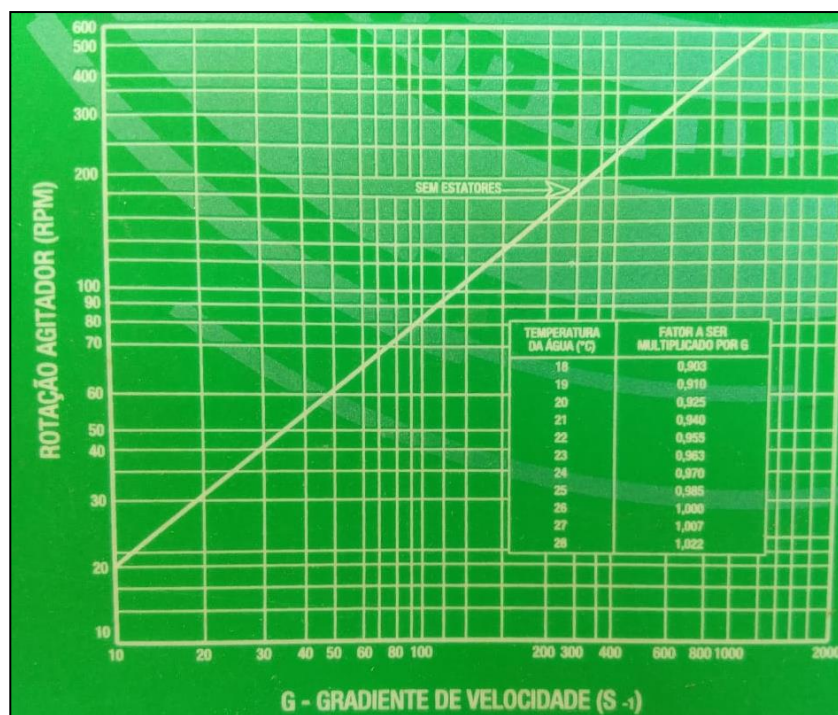
As dosagens de coagulante (Sulfato de alumínio líquido comercial, concentração de Alumínio 48% e densidade  $1,32 \text{ Kg.L}^{-1}$ , solução diluída 1%) e polímero (Carga aniônica, densidade  $1,03 \text{ Kg.L}^{-1}$  diluído a 0,1%) foram realizadas seguindo o modelo proposto por Di Bernardo *et al.*, (2011). Sendo preparadas as soluções de coagulante e polímero em laboratório. Na sequência cada solução foi armazenada em recipientes identificados.

Seguindo sempre a orientação de Di Bernardo *et al.*, (2011), para utilizar um volume de no máximo 20 ml, para não ter alterações significativas no volume do jarro provocado pela água utilizada na diluição.

A água é coletada e levada para o laboratório para a realização dos experimentos e análises no mesmo dia, ficando armazenada em recipientes de 20 litros para adequação da temperatura, aproximadamente  $25^{\circ}\text{C}$ .

De acordo com a NBR 12.216 (BRASIL 1992), a mistura rápida ocorre com a finalidade de dispersar o produto dosado na água, em geral aplicado para processo de coagulação, afirmando ainda que as condições ideais em termos de gradiente de velocidade, tempo de mistura e concentração devem ser determinados em laboratório. Quando não for possível as determinações em laboratório devem ser seguidas as seguintes orientações: Para dispersão de coagulantes metálicos o gradiente de mistura rápida deve estar compreendido entre  $700 \text{ s}^{-1}$  e  $1100 \text{ s}^{-1}$ , com tempo de mistura não superior a 5 segundos. A Figura 4.17 mostra a relação entre a rotação da paleta em função do gradiente de velocidade médio e a relação entre o fator de correção do gradiente de velocidade e a temperatura da água do equipamento utilizado para acompanhamento da estação referenciada.

Figura 4.17: Rotação da paleta em função do gradiente de velocidade médio e a relação entre o fator de correção do gradiente de velocidade e a temperatura da água



Fonte: Acervo do autor, 2020.

Após concretização do tempo de decantação estabelecido, a água clarificada foi coletada nas torneiras móveis de cada jarro, sendo descartada a amostra inicial por aproximadamente 5 segundos, logo em seguida foi realizada a coleta de 100mL para realização das análises disponíveis no local, pH, Condutividade e Turbidez.



#### 4.3.1 Ensaios específicos em ciclo completo com sedimentação

Os parâmetros de configuração para realização dos testes em laboratório seguiram conforme a programação do *jar test* sugerida por Di Bernardo *et al.* 2011. Os valores de tempos de agitação e rotação assim como as etapas, são descritos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: Programação no *jar test* com controle automático

Programação no jar teste com controle automático	Ações
Número de segmentos: 7	
R0 = 436 rpm	Início da mistura rápida;
T0 = 19 s	Adicionar coagulante diluído nos jarros;
R1 = 436 rpm	Fim da mistura rápida;
T1 = 1 s	
R2 = 195 rpm	Adicionar o auxiliar de floculação nos jarros de 2L;
T2 = 59 s	
R3 = 195 rpm	Agitação da solução com auxiliar de floculação;
T3 = 1 s	
R4 = 51 rpm	Início da floculação, mistura lenta;
T4 = 899 s	
R5 = 51 rpm	Fim da floculação e início da sedimentação e
T5 = 1 s	
R6 = 0,0 rpm (parado)	Aguardando sedimentação, conforme T6;
Barra de coleta de água decantada instalada	
T6 = 1200 s	
R7 = 0rpm	Descarte amostra inicial 50 mL (3,3 mL/ s);
T7 = 30 s	Coleta 100 mL (3,3 mL/s)

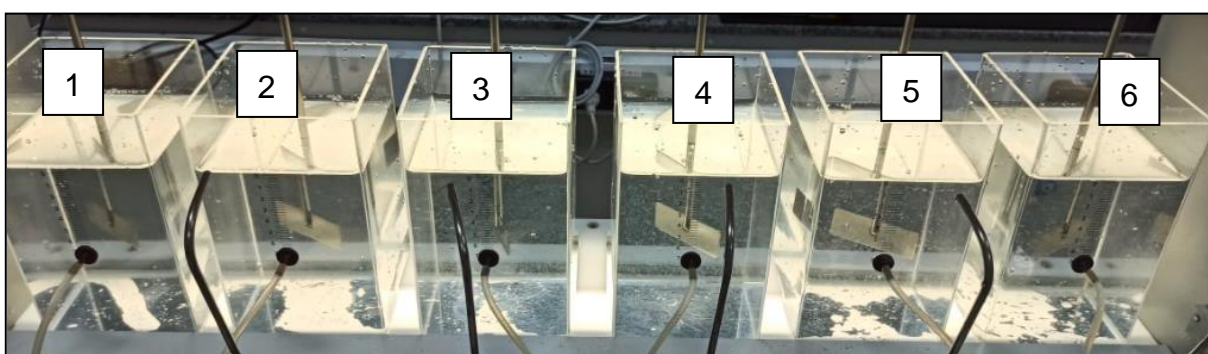
Fonte: Adaptado de Di Bernardo et al, 2011.

Nota: Altura do ponto de coleta nos jarros, 10 cm da superfície do líquido abastecido.

Após finalizar o preparo das soluções diluídas, foram realizados os experimentos para definição da eficiência de dosagem do coagulante, considerando a quantidade de massa de alumínio (referência  $20 \text{ mg.L}^{-1}$ ), de acordo com os passos descritos no diagrama da Figura 4.15, fixando-se a dosagem de polímero ( $0,45 \text{ mg.L}^{-1}$ ), conforme aplicado em planta na data dos testes.

A Figura 4.18 demonstra a disposição dos jarros durante realização do experimento para verificação da dosagem do coagulante.

Figura 4.18: Experimentos para definição da dosagem de coagulante



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

A Tabela 4.4 descreve as dosagens de coagulante aplicadas como referência nos ensaios de *jar test* realizados no trabalho.

Tabela 4.4: Referência de dosagens de coagulante utilizadas no *jar test*

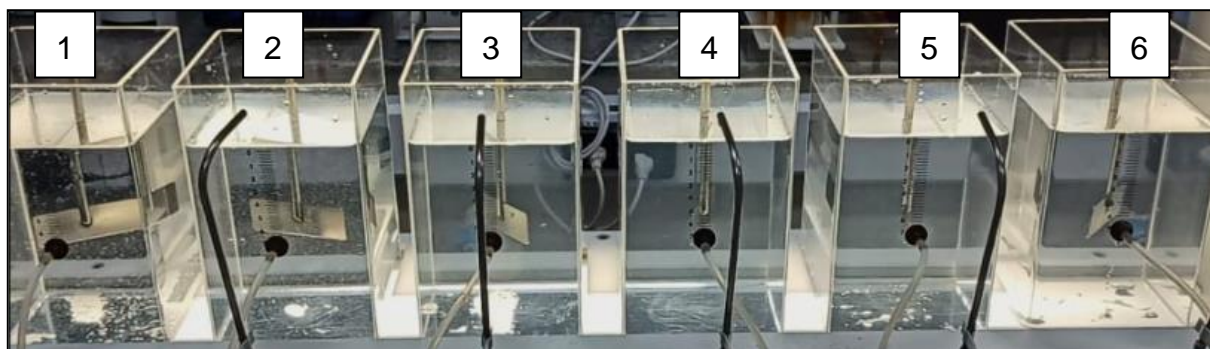
Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem Coagulante (mg/L)	10	12	14	16	18	20

Fonte: Acervo do autor, 2020.

Na sequência, após definir a dosagem que obteve melhor desempenho na aplicação do coagulante, foi realizado o experimento para definição da melhor dosagem de polímero, fixando-se a dosagem de coagulante conforme encontrada na análise anterior, de acordo com os passos descritos no diagrama da Figura 4.16.

A Figura 4.19 demonstra a sequência dos jarros durante realização do experimento para verificação da dosagem do coagulante.

Figura 4.19 Teste estático para definição da dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

A Tabela 4.5 descreve as dosagens de polímero aplicadas como referência nos ensaios de *jar test* realizados no trabalho.

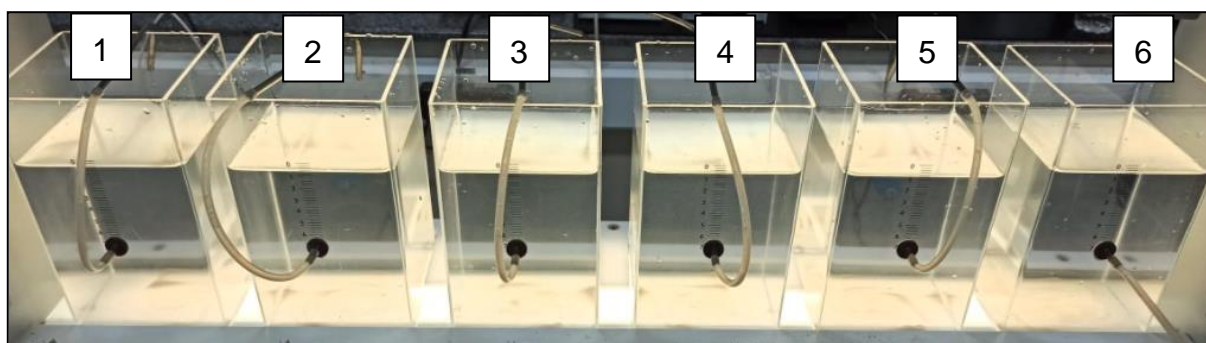
Tabela 4.5: Referência de dosagens de polímero utilizadas no *jar test*

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de Polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6

Fonte: Acervo do autor, 2020.

A Figura 4.20 demonstra o resultado dos experimentos após tempo de decantação definido.

Figura 4.20: Decantação após testes definição dosagem polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Após a decantação e sedimentação segue para a coleta das amostras para posterior análise, conforme descrito na Tabela 4.3.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Acompanhamento de parâmetros de monitoramento da ETA objeto de estudo

A verificação da dosagem ideal de coagulante e polímero é um ponto fundamental para garantir os parâmetros de qualidade da água tratada.

Buscando atender a demanda industrial que exige os seguintes parâmetros de qualidade; pH de 6,0 a 8,0, condutividade máxima  $110 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e turbidez máxima de 1,0 NTU, aliada a necessidade de manutenção da eficiência do tratamento, otimização de dosagens e redução de custos com produtos químicos, foram realizados testes e análises laboratoriais em *jar test*. Os parâmetros para a água bruta e sobrenadante (tratado) analisados em laboratório foram, pH, Condutividade e Turbidez.

#### 5.1.1 Procedimento dos ensaios realizados em *jar test* no laboratório

##### 5.1.1.1 Primeira etapa de testes

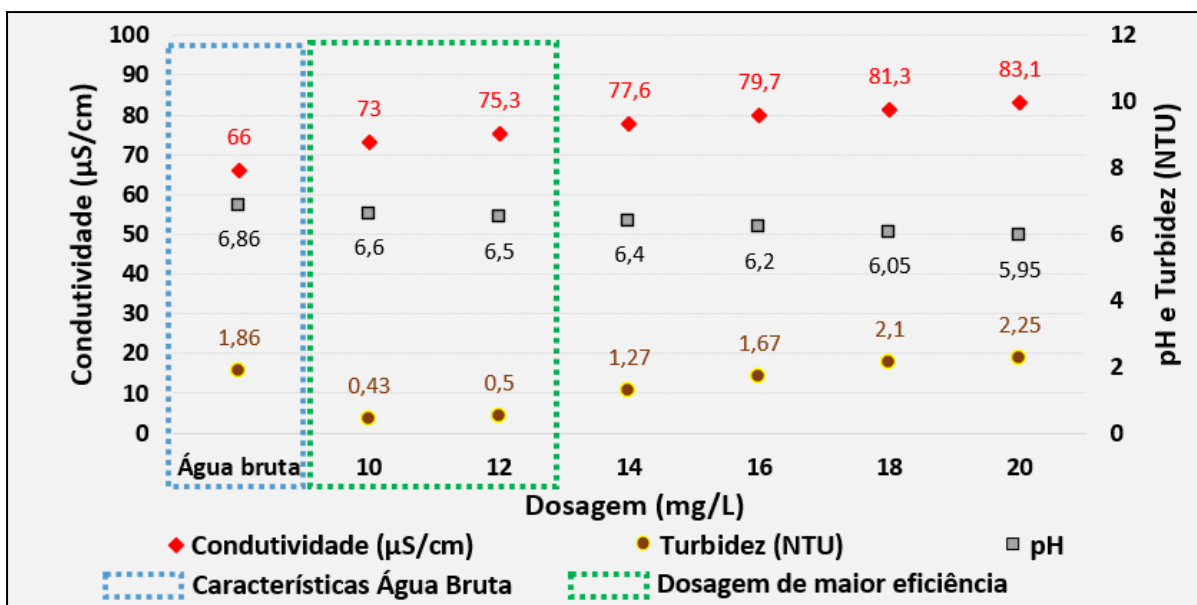
Ao verificar o histórico de turbidez da água bruta (Figura 5.10) e dosagens de coagulante (Figura 5.8) e polímero (Figura 5.9), foram observadas oportunidades de otimizar os consumos dos produtos químicos. Sendo assim, foi implementado na rotina a realização de testes em laboratório.

Após realização do primeiro experimento em laboratório, em que foi fixado a dosagem do polímero em  $0,45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  (praticado em planta) variou-se a dosagem de coagulante de 10 a  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ .

Observou-se que a dosagem de  $20 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de coagulante e  $0,45 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  de polímero estavam superiores a necessária para atender a condição da água bruta no mês de junho, o que foi facilmente constatado em testes laboratoriais, ou seja, as dosagens de coagulante e polímero estavam acima da demanda do sistema, proporcionando o desbalanceamento estequiométrico do meio envolvido,

ocasionando redução na eficiência do tratamento, conseqüentemente aumentando a turbidez da água produzida e no consumo dos produtos, além de gerar um volume maior de resíduos para tratamento e posterior destinação.

Figura 5.1: Turbidez, condutividade e pH do sobrenadante da primeira etapa nos ensaios de jar test após verificação da dosagem de coagulante



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Pode-se observar a redução dos parâmetros avaliados para as dosagens de 10 e 12 mg.L<sup>-1</sup> e principalmente, de forma a atender os parâmetros para turbidez menor que 1,0 NTU, pH entre 6 e 8 e condutividade abaixo de 110 µS.cm<sup>-1</sup>.

Para dosagens superiores a 12 mg.L<sup>-1</sup>, os valores de turbidez, condutividade e pH excederam os limites dos parâmetros pré estabelecidos.

Ficou evidente também a elevação nos valores da condutividade, que se deve ao fato do aumento nas dosagens de sulfato de alumínio, elevando proporcionalmente a quantidade de sais dissolvidos no sistema envolvido.

O pH também apresentou oscilações com a alternância nas dosagens, devido ao consumo de alcalinidade e a geração de íons H<sup>+</sup> durante o processo de coagulação na hidrólise dos cátions de alumínio.

A Tabela 5.1 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro.

Tabela 5.1: Eficiência de remoção de turbidez da água bruta na primeira etapa dos ensaios de *jar test* com diferentes dosagens de coagulante

Dosagem de coagulante (mg.L <sup>-1</sup> )	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>20</b>
Volume dosado (mL)	<b>5,5</b>	<b>6,6</b>	<b>7,7</b>	<b>8,8</b>	<b>9,9</b>	<b>11</b>
Eficiência remoção da turbidez (%)	77	73	32	10	0	0

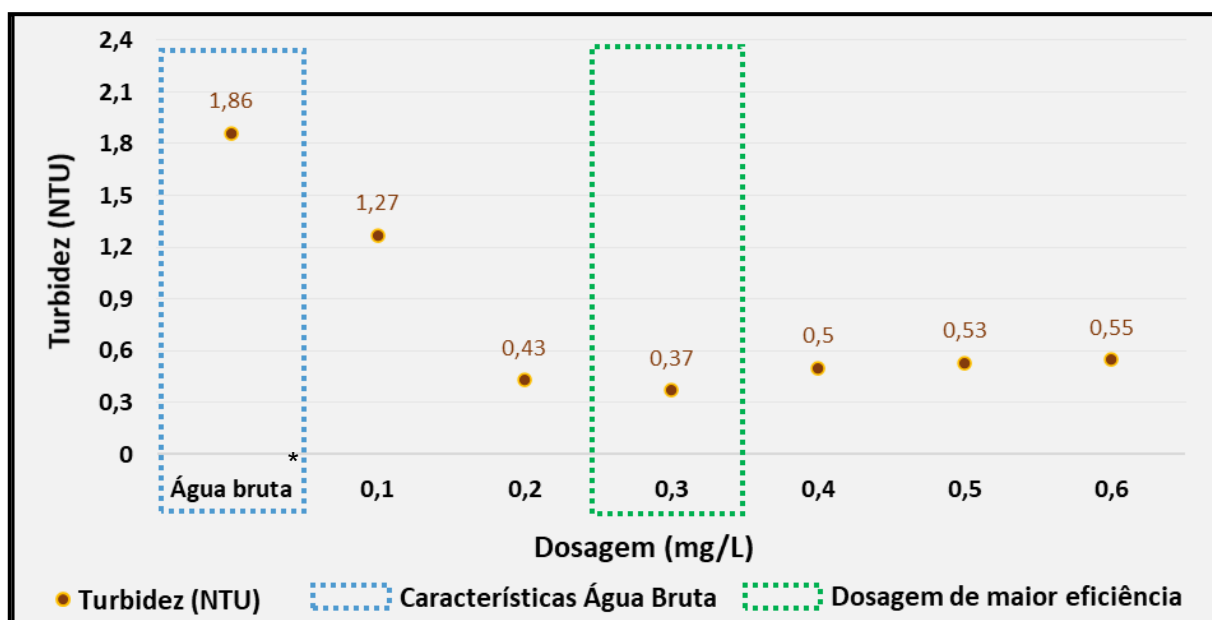
Fonte: Acervo do autor, 2020.

A eficiência de remoção da turbidez obtida na primeira etapa de ensaios em *jar test* deixou em evidencia que para dosagens de coagulante superiores a 12 mg.L<sup>-1</sup>, os flocos formados tenderam a apresentar maior dificuldade na agregação dos coloides e na sedimentação, isso na ETA pode ocasionar o arraste de flocos para os filtros TGV, prejudicando a eficiência dos mesmos devido a obstrução do meio filtrante e redução das respectivas carreiras de filtração, gerando maior consumo de água com a lavagem dos mesmos.

Na verificação da dosagem do polímero, optou-se por fixar a dosagem do coagulante em 12 mg.L<sup>-1</sup>, devido a observação de flocos mais consistentes e resistentes do que na dosagem de 10 mg.L<sup>-1</sup>, considerando que a dosagem seria replicada na estação de tratamento, onde coexistem diversas interações e alterações de processo que não estão presentes no teste estático. Frente a isso, tomou-se tal dosagem de coagulante para os testes posteriores.

Após a dosagem do coagulante, alternou-se as dosagens de polímero entre 0,1 e 0,6 mg.L<sup>-1</sup>, conforme demonstrado na Figura 5.2.

Figura 5.2: Turbidez do sobrenadante da primeira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

\* Água bruta: Turbidez 1,86NTU, Condutividade 66 $\mu$ S/cm e pH 6,86.

Analisando os dados exibidos na Figura 5.2 ficou evidente a oportunidade de redução na dosagem do polímero de 0,45 mg.L<sup>-1</sup> para 0,3 mg.L<sup>-1</sup>, mantendo a turbidez abaixo de 1,0 NTU, com a dosagem de 0,2 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, observou-se redução na eficiência de floculação, justificando a adoção de 0,3 mg.L<sup>-1</sup>.

A Tabela 5.2 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro nos ensaios com diferentes dosagens de polímero.

Tabela 5.2: Eficiência de remoção da turbidez da água bruta da primeira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero

Dosagem de Polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Volume dosado (mL)	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
Eficiência remoção da turbidez (%)	32	77	80	73	72	70

Fonte: Acervo do autor, 2020.

Os valores de eficiência de remoção de turbidez da primeira etapa de ensaios de *jar test* mostrados na Tabela 5.2, evidenciam que a redução para 12 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de polímero foi a situação que se apresentou de forma mais eficaz no uso combinado dos produtos, com possibilidade de se obter resultados de reduções ainda maiores na estação de tratamento industrial, deixando claro a importância da realização de *jar test* para aferição das dosagens aplicadas.

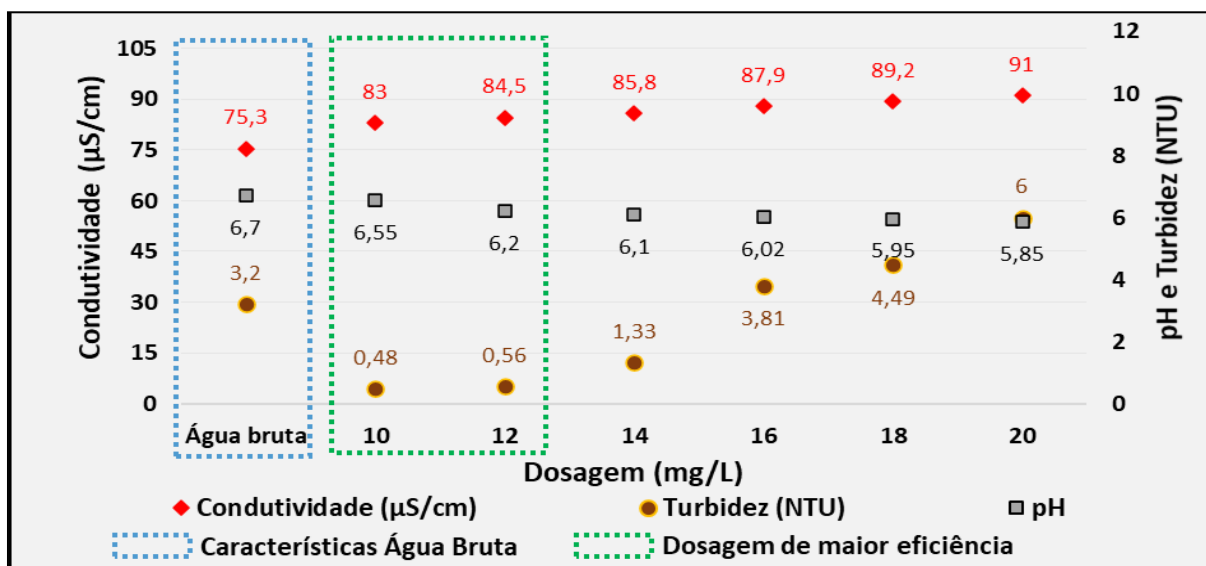
#### 5.1.1.2 Segunda etapa de testes

Devido ao fato do ponto de captação estar próximo da barragem da usina hidrelétrica CTG e a largura do canal próxima de 1200 metros, as condições da água do rio Paraná apresentaram estabilidade durante todo o período de monitoramento, ou seja, devido aos processos naturais de sedimentação dos sólidos suspensos ao longo do rio a turbidez da água bruta se manteve com valores inferiores a 4 NTU. Levando em conta o comportamento estável da água bruta, foi realizado novamente os experimentos sete dias após a primeira etapa de testes. Novamente foi fixado a dosagem do polímero em 0,45 mg.L<sup>-1</sup> (aplicado em planta) e alternando-se a dosagem de coagulante de 10 a 20 mg.L<sup>-1</sup>. Vale ressaltar que esse estudo é importante também no sentido de economizar coagulante e polímero no tratamento.



A Figura 5.3 demonstra os dados obtidos após análise da dosagem de coagulante.

Figura 5.3: Turbidez, Condutividade e pH do sobrenadante da segunda etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de coagulante



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Observou-se a redução dos parâmetros avaliados para as dosagens de 10 e 12 mg.L<sup>-1</sup>.

A Tabela 5.3 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro.

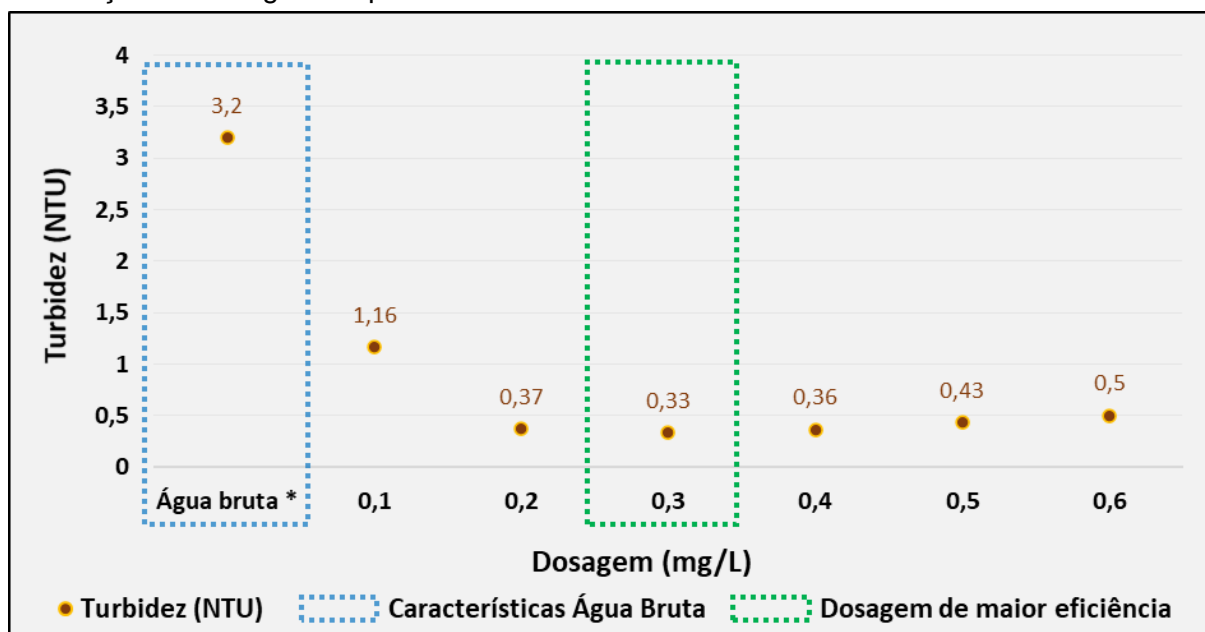
Tabela 5.3: Eficiência de remoção da turbidez da água bruta da segunda etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de coagulante

Dosagem de coagulante (mg.L <sup>-1</sup> )	10	12	14	16	18	20
Eficiência remoção da turbidez (%)	85	83	58	0	0	0

Fonte: Acervo do autor, 2020.

Verificando-se a dosagem do polímero, optou-se por fixar a dosagem do coagulante em  $12 \text{ mg.L}^{-1}$ , alternando-se as dosagens de polímero entre 0,1 e 0,6  $\text{mg.L}^{-1}$ , conforme mostrado na Figura 5.4.

Figura 5.4: Turbidez do sobrenadante da segunda etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

\* Água bruta: Turbidez 3,2NTU, Condutividade  $75,3 \mu\text{S/cm}$  e pH 6,7.

Novamente, a linha tracejada na cor verde deixa claro a oportunidade de redução também na dosagem do polímero de  $0,45 \text{ mg.L}^{-1}$  para próximo de  $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ , mantendo a turbidez abaixo de 1,0 NTU.

A Tabela 5.4 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro.

Tabela 5.4: Eficiência de remoção da turbidez da água bruta da segunda etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero

Dosagem de Polímero ( $\text{mg.L}^{-1}$ )	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Eficiência remoção da turbidez (%)	64	88	90	89	87	84

Fonte: Acervo do autor, 2020.

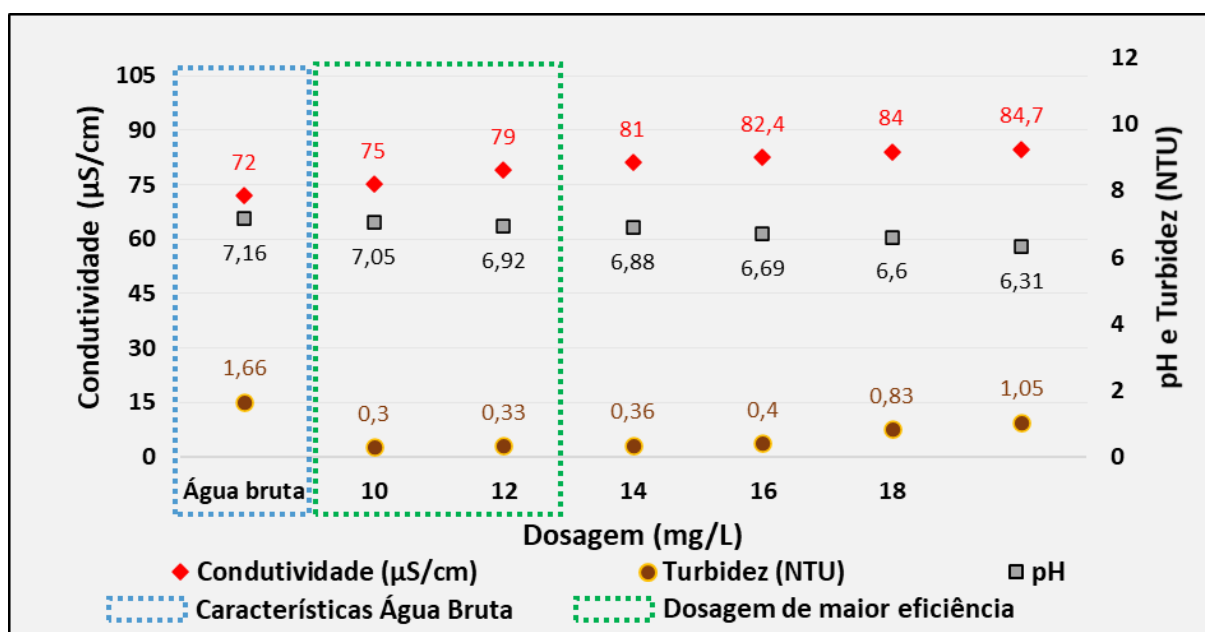
Os valores de eficiência de remoção de turbidez da etapa de *jar test* mostrados na Tabela 5.4, evidenciam as melhores condições encontradas.

### 5.1.1.3 Terceira etapa de testes

Após mais uma semana, com pouca alteração nos parâmetros da água de alimentação da estação de tratamento, foram replicados os procedimentos experimentais.

A Figura 5.5 demonstra os dados obtidos após nova análise da eficiência na dosagem de coagulante. Novamente foi fixado a dosagem do polímero em  $0,45 \text{ mg.L}^{-1}$  (aplicado em planta) e alternando-se a dosagem de coagulante de 10 a 20  $\text{mg.L}^{-1}$

Figura 5.5: Turbidez, Condutividade e pH do sobrenadante da terceira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de coagulante



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Notou-se uma redução nos parâmetros avaliados para as dosagens de 10 e 12  $\text{mg.L}^{-1}$ .

A Tabela 5.5 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro.

Tabela 5.5: Eficiência de remoção da turbidez da água bruta na terceira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de coagulante

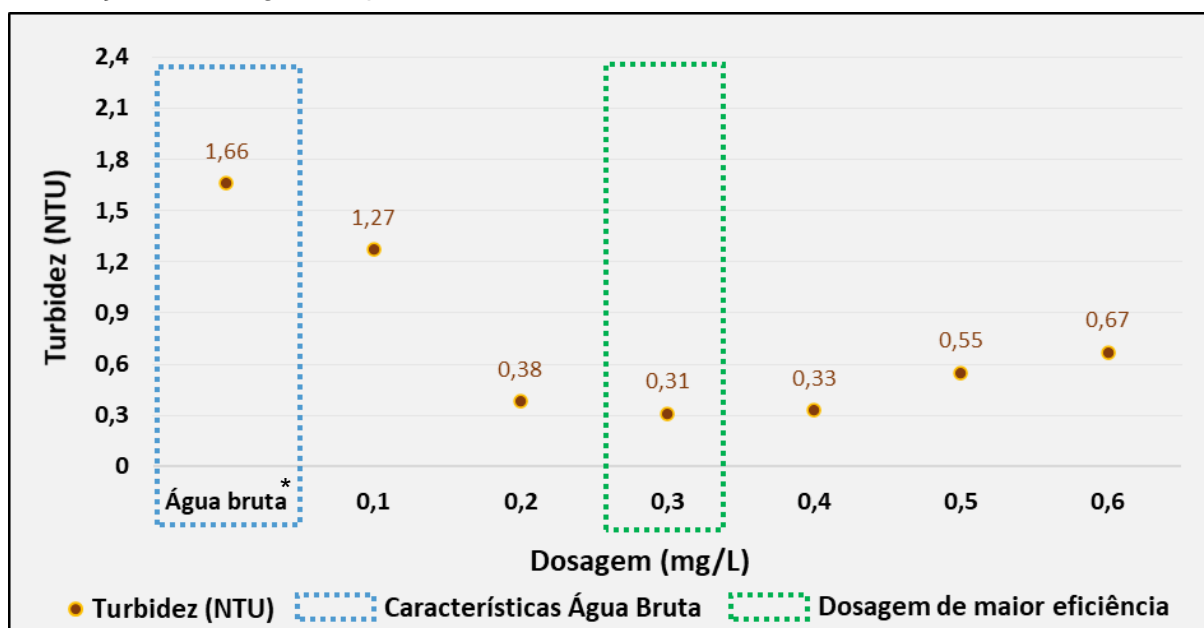
Dosagem de coagulante (mg.L <sup>-1</sup> )	10	12	14	16	18	20
Eficiência remoção da turbidez (%)	82	80	78	76	50	37

Fonte: Acervo do autor, 2020.

A eficiência de remoção da turbidez obtida na terceira etapa de ensaios em *jar test*, deixou claro que para dosagens de coagulante próximas a 12 mg.L<sup>-1</sup>, os resultados foram satisfatórios para turbidez, pH e condutividade.

Na verificação da dosagem do polímero, fixou-se a dosagem do coagulante em 12 mg.L<sup>-1</sup>, alternando-se as dosagens de polímero entre 0,1 e 0,6 mg.L<sup>-1</sup>, conforme mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6: Turbidez do sobrenadante da terceira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

\* Água bruta: Turbidez 1,66 NTU, Condutividade 72  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e pH 7,16.

A Tabela 5.6 descreve os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro.

Tabela 5.6: : Eficiência de remoção da turbidez da água bruta na terceira etapa nos ensaios de *jar test* após verificação da dosagem de polímero

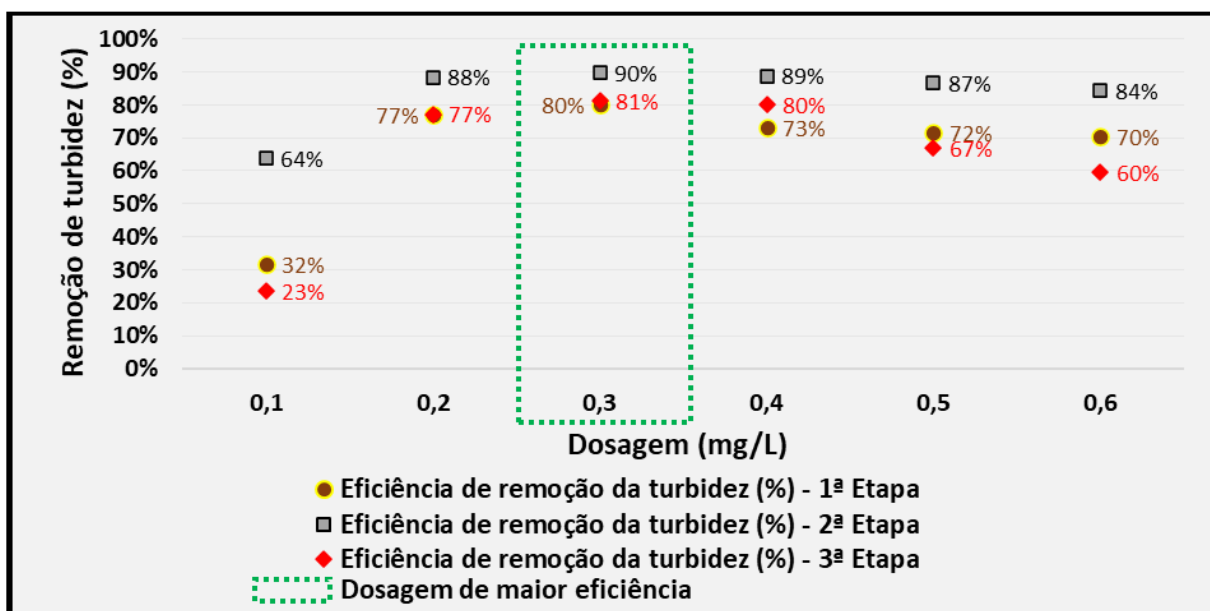
Dosagem de Polímero (mg.L <sup>-1</sup> )	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Eficiência remoção da turbidez (%)	23	77	81	80	67	60

Fonte: Acervo do autor, 2020.

Os valores de eficiência de remoção de turbidez da etapa de *jar test* mostrados na Tabela 5.6 evidenciam que a redução para 12 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e entre 0,2 e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de polímero foram a situação mais eficiente no uso combinado dos produtos.

A Figura 5.7 demonstra os valores das eficiências de remoção de turbidez da água bruta atingidas em cada jarro, em que fora fixada a dosagem de coagulante em 12 mg.L<sup>-1</sup>, alternando-se a dosagem de polímero.

Figura 5.7: Eficiências de remoção da turbidez da água bruta por etapa dos ensaios de *jar test* após dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Após a realização dos experimentos em *jar test* pela terceira semana consecutiva, cujo as três etapas apresentaram resultados semelhantes, acima de 80% de eficiência de remoção de turbidez da água bruta. Considerando a estabilidade nos parâmetros da água bruta, principalmente a turbidez, optou-se por realizar a adequação das dosagens combinadas na ETA.

A alteração ocorreu de forma gradativa, reduzindo 1 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante a cada uma hora, acompanhando a adequação e equalização de cargas no local, ao fim do expediente no dia 25 de junho de 2020, atingiu-se com êxito as dosagens obtidas em laboratório, 12 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, evidenciando mais uma vez a importância do procedimento de realização de testes laboratoriais visando a obtenção de dados de referência muito próximos aos atingidos na ETA.

Atualmente, a estação de tratamento de água emprega em seu processo a dosagem de 10 mg.L<sup>-1</sup> de coagulante e 0,25 mg.L<sup>-1</sup> de polímero, mantendo-se os parâmetros de turbidez, condutividade e pH pré estabelecidos pelo fabricante.

Wang *et al.*, (2018), realizaram análises em laboratório utilizando uma água bruta com pH próximo a 7,7 e turbidez próxima a 1,5 NTU, semelhantes a água bruta estudada. Os autores esclarecem que atingiram turbidez inferior a 0,1 NTU em 99% das análises aplicando 3 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio e 0,072 mg.L<sup>-1</sup> de polímero catiônico (produção na estação de filtração direta), porém, ressaltamos que no experimento realizado pelos pesquisadores os mesmos utilizavam filtros de antracito e areia. Os dados obtidos nos experimentos realizados da estação de tratamento estudada, foram utilizados somente o clarificado após etapa de decantação (sobrenadante), ou seja, sem a filtração, apresentando valores de turbidez próximos a 0,34 NTU aplicando 12 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio e 0,3 mg.L<sup>-1</sup> de polímero aniônico, permanecendo em 100% das análises realizadas abaixo do limite de 1,0 NTU.

Santos *et al.*, (2007), realizaram experimentos em laboratório utilizando uma água bruta com turbidez inferior a 7,0 NTU, coletada em um manancial próximo a Belo Horizonte - MG, aplicando uma dosagem de 8 mg.L<sup>-1</sup> de sulfato de alumínio, em que todas as amostras água filtrada apresentaram resultados inferiores a 0,5

NTU, ou seja, 93% de eficiência na remoção de turbidez da água bruta. Ressalta-se mais uma vez, que ambos os autores utilizaram em seus experimentos módulos de filtração, porém, o equipamento *jar test* utilizado nos experimentos do estudo da ETA em questão não conta com módulo de filtração.

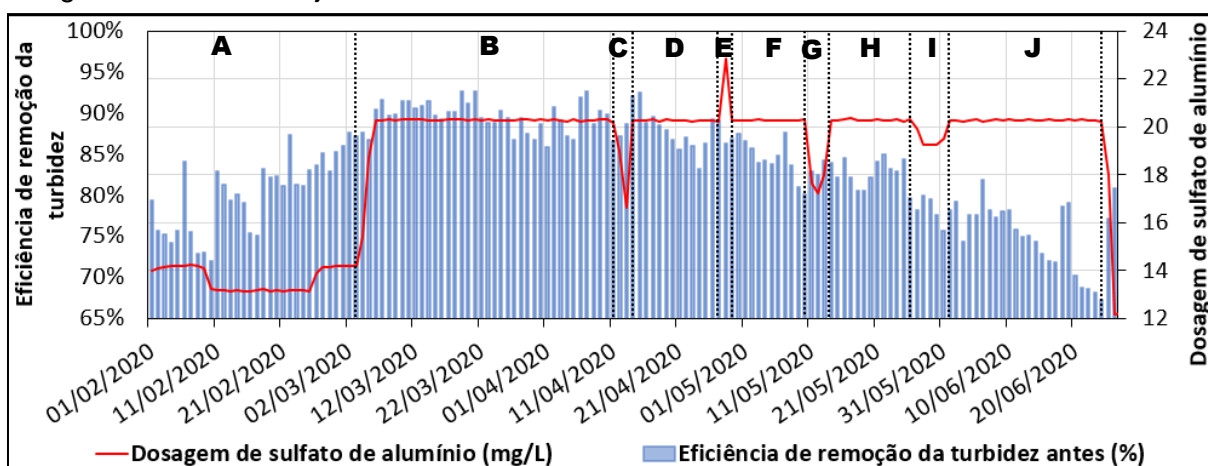
Gao *et al.*, (2014), realizaram experimentos em laboratório utilizando água bruta do rio Xiaoqing na província de Shandong na China com turbidez entre 6,2 e 9,4 NTU, nos experimentos utilizaram a dosagem de sulfato de alumínio como coagulante, os valores de referência com maior eficiência para dosagem de coagulante foram 10 e 15 mg.L<sup>-1</sup> , atingindo respectivamente 1,3 e 1,5 NTU, mantendo a eficiência de remoção para ambas próxima a 80%.

### 5.1.2 Análise dos parâmetros da água bruta e tratada antes dos ajustes realizados nas dosagens de coagulante e polímero na estação de tratamento

Considerando os dados reais da estação de tratamento analisados no período anterior a implantação da rotina de acompanhamento da eficiência do tratamento, através da realização de testes em laboratório, foi possível realizar os cálculos de eficiência e relações entre os parâmetros de; turbidez da água bruta, turbidez da água tratada, cloro livre, vazão de alimentação de água, dosagem polímero, dosagem sulfato de alumínio, condutividade e pH.

A Figura 5.8 mostra a relação da eficiência na remoção de turbidez e dosagem de coagulante antes dos ajustes realizados na ETA.

Figura 5.8: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de coagulante antes dos ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

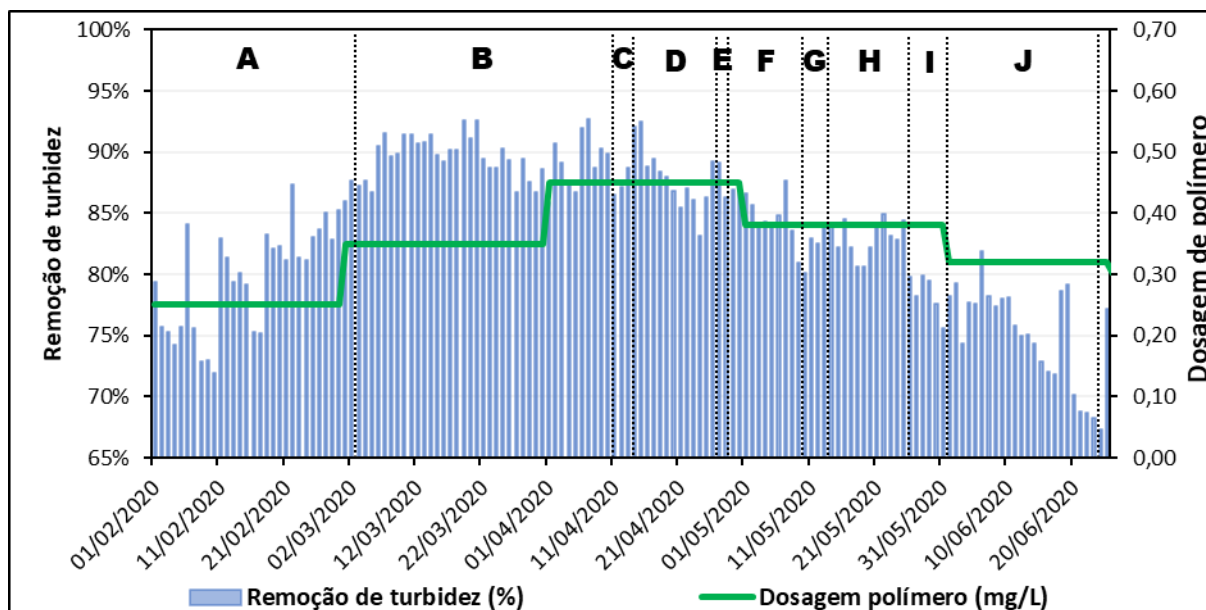
Zonas de alteração: A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.

Com a finalidade de facilitar o entendimento das alterações ocorridas durante o período de fevereiro a junho, foram separadas por zonas, que estão descritas na Figura 5.8, de A até J.

A Figura 5.9 traz a relação da eficiência na remoção de turbidez e dosagem de polímero antes dos ajustes realizados na ETA.



Figura 5.9: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de polímero antes dos ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: **A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.**

Nota-se que no início do mês de março (zona B), ocorreu um aumento considerável na dosagem de coagulante e polímero. O ajuste ocorreu em planta buscando atingir um maior desempenho do tratamento, porém, sem a realização de testes em laboratório para obtenção de dosagens de referência.

No primeiro momento houve melhora no sistema (início de março), porém, pode-se observar que a eficiência de remoção de turbidez foi declinando após o início do mês de maio (zona D), chegando a reduzir de 90% para aproximadamente 65% no final de junho (zona J). Nota-se que houve também um aumento na dosagem de coagulante no final de abril (zona E), no entanto no dia seguinte a dosagem anterior foi retomada.

Observou-se também que houveram algumas reduções nas dosagens de coagulante (zonas C, G e I) e polímero (zonas F e H), porém, o ajuste realizado de forma imediata na planta provavelmente impactou na relação pH x dosagem de coagulante (Figura 5.12), provocando distúrbios na ETA e influenciando na qualidade da água tratada.

O processo mais conveniente para tal condição da água bruta seria a filtração direta, isolando-se a alimentação dos decantadores e abrindo o *by-pass*

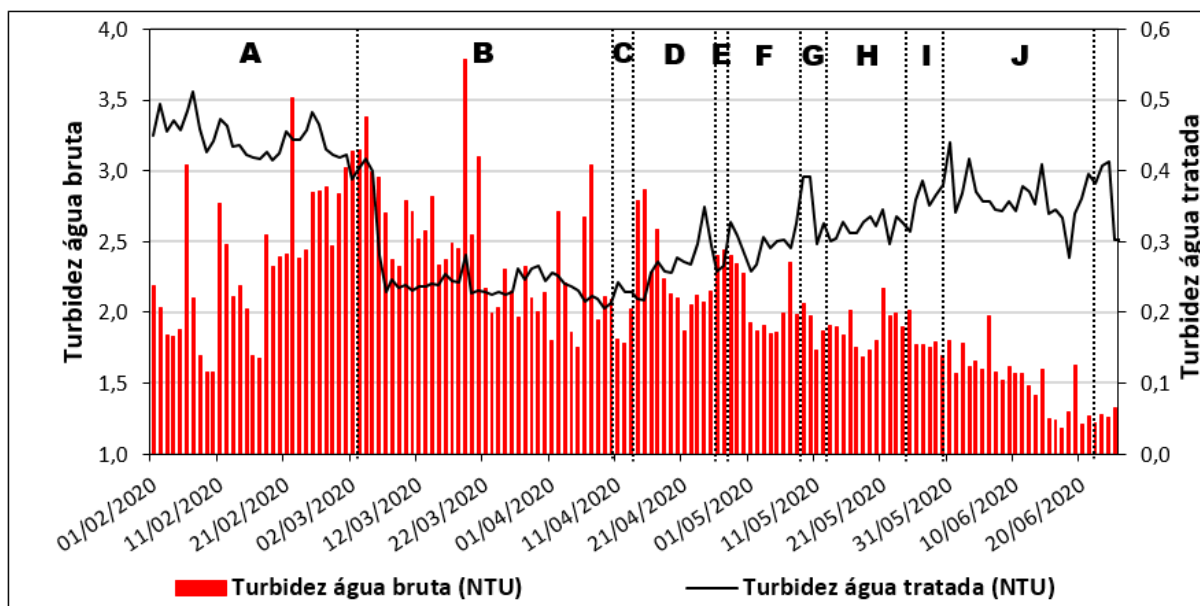
para alimentação da água coagulada diretamente nos filtros TGV (FERREIRA FILHO, 2017; WANG *et al.*, 2018).

A ocorrência de redução da eficiência de remoção de turbidez da água bruta de maio a junho (após zona E) pode estar relacionada a queda da turbidez da água bruta no período (Figura 5.10), devido dificuldade e a minimização na taxa de colisão entre as partículas, dificultando a formação de flocos (YANG *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2007).

A falta de acompanhamento com análises laboratoriais em *jar test* também pode prejudicar o processo, pela falta de valores de referência.

A Figura 5.10 demonstra os valores monitorados de turbidez da água bruta e da água tratada antes dos ajustes realizados na ETA.

Figura 5.10: Relação de turbidez da água bruta e tratada antes dos ajustes na ETA



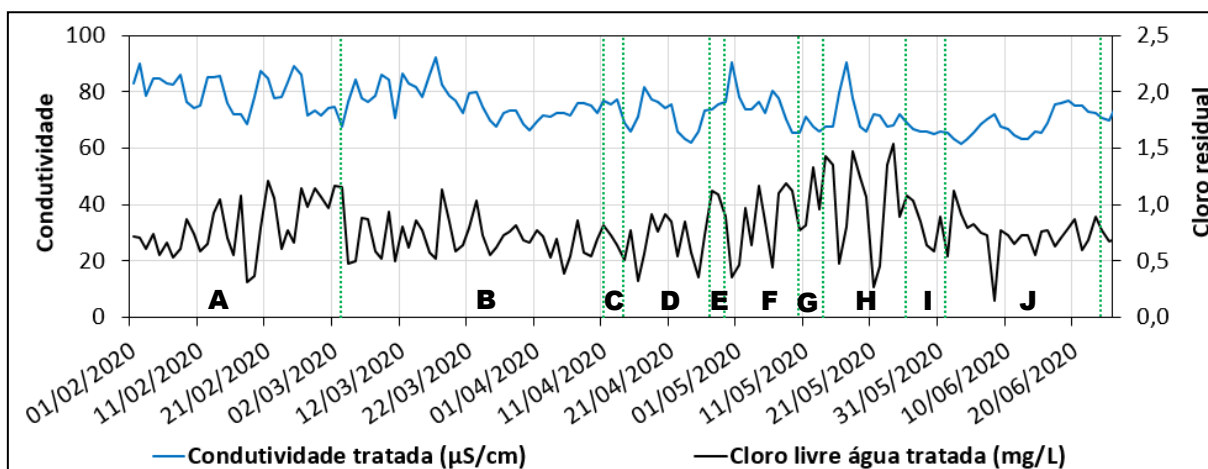
Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.

Foi possível notar que a média dos valores de turbidez da água bruta no período de fevereiro a junho ficou próxima a 2,1 NTU, sendo que houve uma queda acentuada de maio em diante, coincidindo com o período em que houve a redução na eficiência do tratamento, conforme mostrado na Figura 5.8.

A Figura 5.11, mostra os valores monitorados de cloro livre e condutividade da água tratada no período monitorado.

Figura 5.11: Cloro residual e condutividade da água tratada no período anterior aos ajustes de dosagens na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.

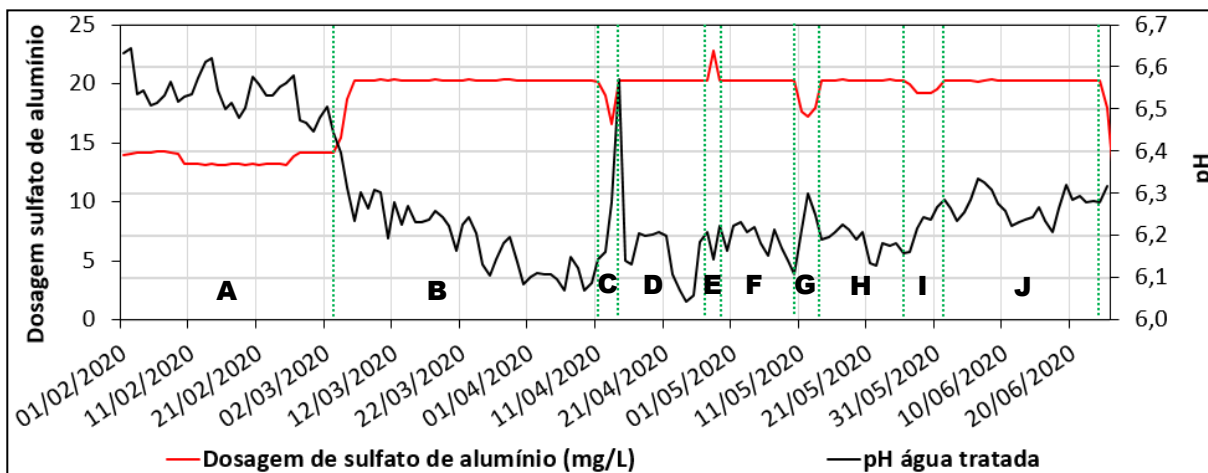
Pode-se observar que a condutividade oscilou entre 60 e 90  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  durante o período avaliado, sendo que o parâmetro citado sofreu influência direta das dosagens de sulfato de alumínio e hipoclorito de sódio, conforme demonstra a Figura 5.11.

Apesar de alterar as quantidades de sais dissolvidos após o aumento na dosagem do coagulante no início de março (zona B, de 14 para 20  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ), a condutividade da água tratada sofreu pouca alteração.

Constatou-se também que foram realizados ajustes na dosagem do hipoclorito de sódio na captação, influenciando na redução do cloro livre, além de impactar na condutividade, conforme citado anteriormente.

Abaixo na Figura 5.12 estão descritos os dados da dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada antes dos ajustes na ETA.

Figura 5.12: Dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada antes dos ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: **A, B, C, D, E, F, G, H, I e J.**

Os valores de pH durante o período de fevereiro a junho permaneceram entre 6,0 e 6,7.

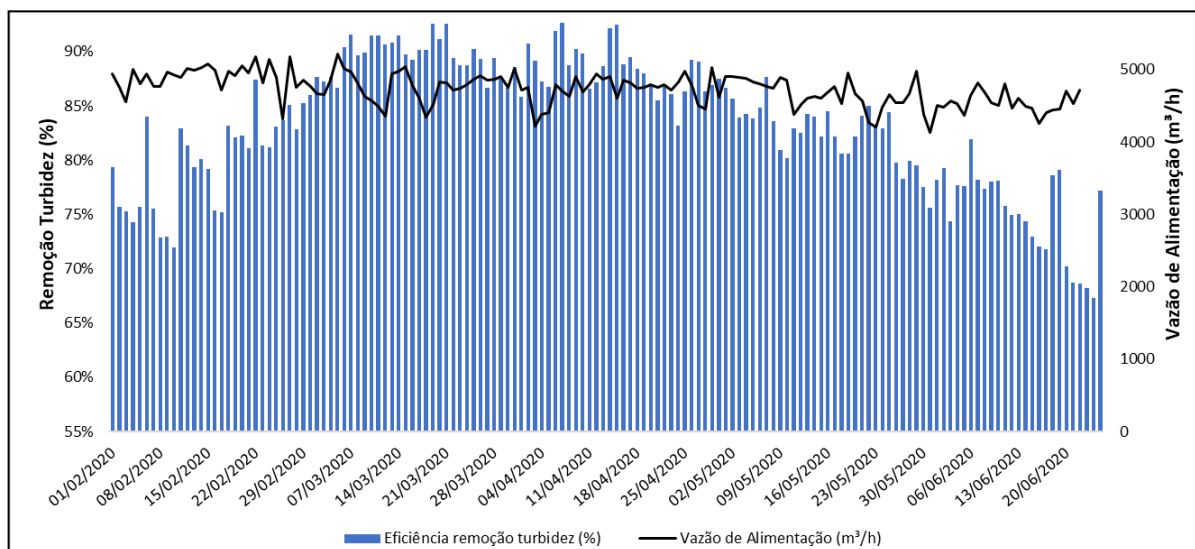
Nota-se que a alteração na dosagem de coagulante realizada no dia no início de março (zona B), também impactou no pH da reação, porém, não alterando os mecanismos de neutralização de cargas, baseando-se na Figura 3.3 proposto por Di-Bernardo *et al.*, (2011), para a coagulação e de formação de pontes para a floculação na aplicação de polímero (YU *et al.*, 2020;. XIE *et al.*, 2018).

Ressaltando que o pH é impactado diretamente pela qualidade da água bruta alimentada, pela dosagem de hipoclorito de sódio (realizada integralmente na captação) e dosagem de coagulante.

Observa-se que o pH se manteve próximo de 6,5, semelhante ao descrito na Situação 2, em que para uma água com baixa turbidez, porém, com uma dosagem suficiente de coagulante, ocorre a formação ideal de espécies hidrolisadas, sendo suficientes para desestabilizar as cargas presentes nas impurezas, sendo assim ocorre a neutralização das cargas. A hidrólise das espécies geralmente ocorre na faixa de pH entre 4,5 e 6,5 (DI BERNARDO *et al.*, 2011).

A Figura 5.13 mostra os resultados de eficiência de remoção de turbidez da água bruta e das vazões de alimentação antes dos ajustes realizados na ETA.

Figura 5.13: Relação da remoção de turbidez da água bruta e vazão de alimentação antes dos ajustes na ETA

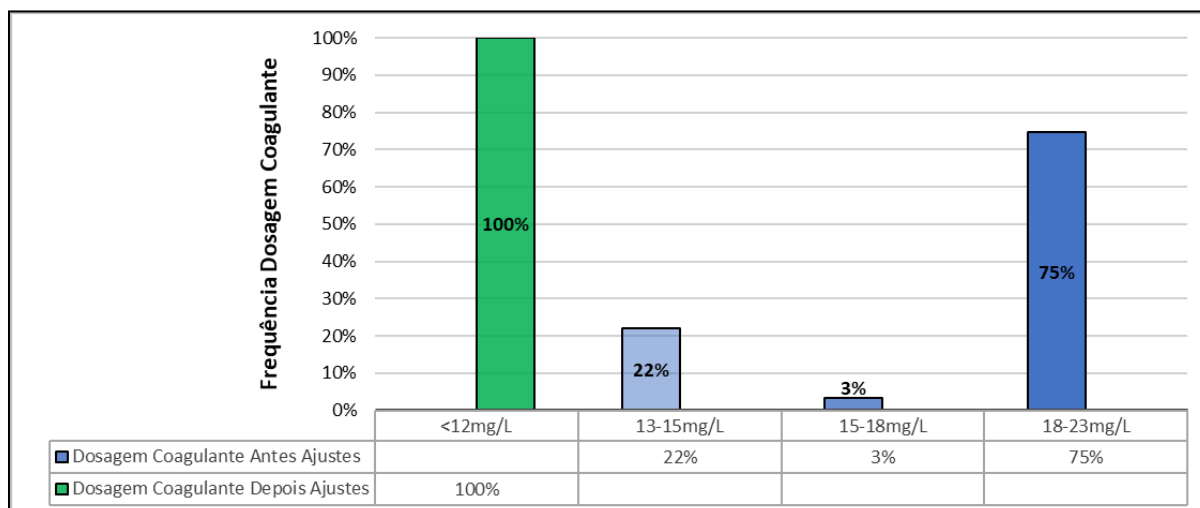


Fonte: Acervo do Autor, 2020.

A vazão média de alimentação no período de fevereiro a junho ficou próxima a 4700m³/h, conforme observado na Figura 5.13, os valores médios da eficiência de remoção de turbidez ficaram próximos de 83%.

A Figura 5.14 abaixo demonstra a frequência da dosagem do coagulante abrangendo todo o período analisado.

Figura 5.14: Frequência da dosagem de coagulante aplicada



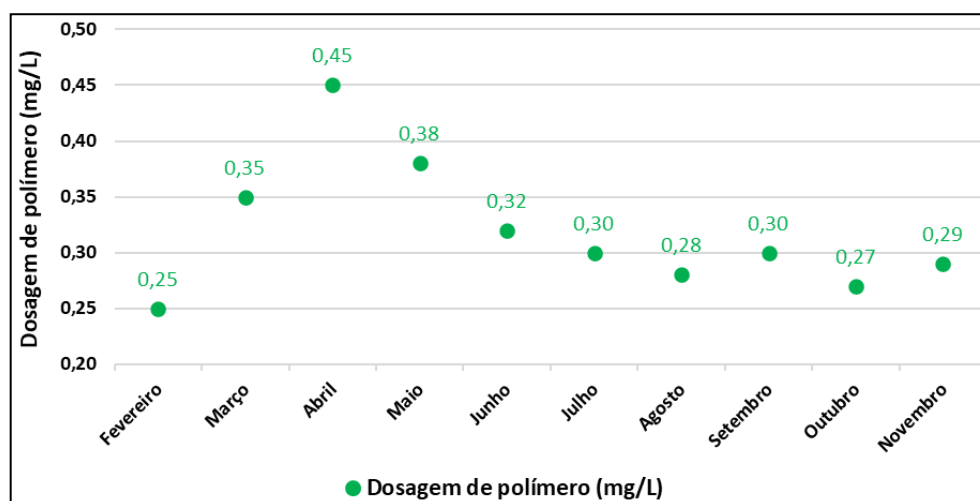
Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Analisando a Figura 5.14 é notável que no período anterior aos ajustes do início de fevereiro até 25 de junho a dosagem de coagulante permaneceu a maior parte do tempo, ou seja, 75% entre 18 e 23 mg.L<sup>-1</sup>.

Após os ajustes a planta atingiu a estabilidade na dosagem, ficando 100% do tempo próxima a 12 mg.L<sup>-1</sup> do produto, mantendo a qualidade da água tratada com turbidez menor que 0,4 NTU (média 0,28 NTU).

A Figura 5.15 descreve os valores médios de dosagem de polímero ao longo dos meses de acompanhamento.

Figura 5.15: Dosagem média de polímero mensal

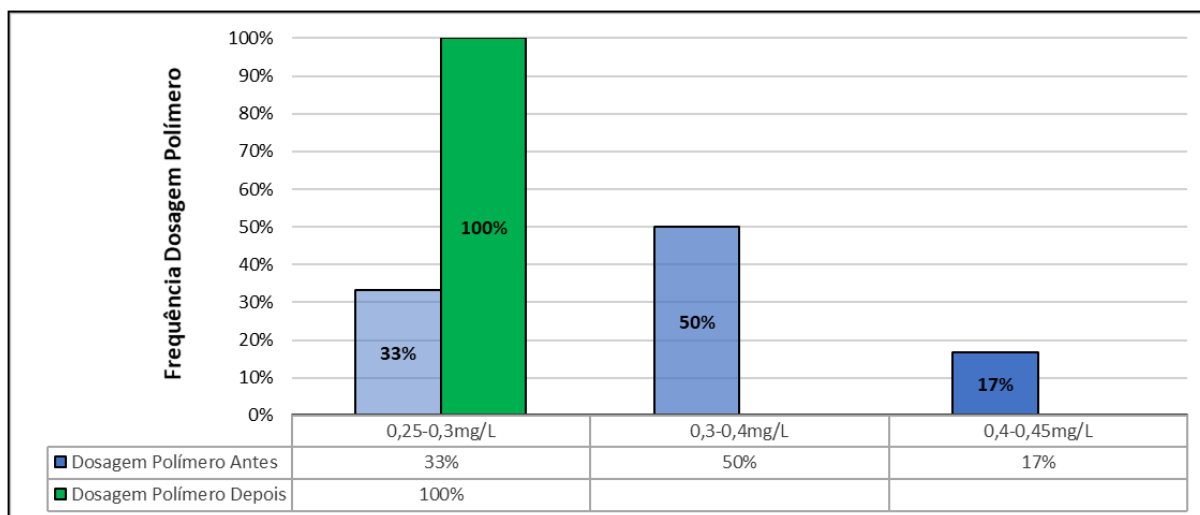


Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Observa-se o aumento na dosagem de polímero persistiu nos meses de março, abril e maio, coincidindo com o período de estabilidade da planta, no entanto, após início do mês de maio houve a queda na eficiência da remoção de turbidez da água bruta, a diminuição da eficácia do tratamento coincidiu com a queda da turbidez da água bruta, o que impõe dificuldades na agregação das partículas e formação de flocos devido à baixa quantidade de coloides associada ainda a falta dos ajustes adequados nas dosagens de coagulante e polímero, principalmente pelo fato de o excesso de polímero ocasionar a colmatação dos filtros de areia, reduzindo as carreiras de filtração, aumentando o consumo de energia e água com a necessidade de realização de lavagens, além da geração de resíduos para a estação de tratamento de efluentes (FERREIRA FILHO, 2017).

A Figura 5.16 demonstra a frequência da dosagem do polímero, abrangendo todo o período analisado.

Figura 5.16: Frequência dosagem de polímero



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Analisando a Figura 5.16, assim como na dosagem do coagulante é notável que no período anterior aos ajustes do início de fevereiro até 25 de junho a dosagem de polímero permaneceu a maior parte do tempo, 50% entre 0,3 e 0,4 mg.L<sup>-1</sup>. Após os ajustes a planta atingiu a estabilidade na dosagem, ficando 100% do tempo próxima a 0,3 mg.L<sup>-1</sup> do produto.

Ressaltando que a etapa de coagulação é a mais importante do processo de tratamento da ETA, pois se a etapa não for realizada com êxito as demais serão comprometidas, principalmente a filtração e sendo assim a qualidade final da água produzida (RICHTER, 2009; DI BERNARDO *et al.*, 2011; FERREIRA FILHO *et al.*, 2011; NCIBI *et al.*, 2017; SELHORST FILHO *et al.*, 2011; YU *et al.*, 2020)

Yu *et al.*, (2020) apontam alguns estudos que sugerem a importância de se realizar uma pré-oxidação eficaz, pois esse processo também pode interferir na etapa de coagulação, devido ao oxidante utilizado na planta (Hipoclorito de sódio) apresentar características alcalinas, podendo alterar a relação pH x dosagem do coagulante, o que resultaria na alteração do mecanismo de coagulação aplicado ou ainda alterando a condutividade da água produzida devido aos sais dissolvidos adicionados.

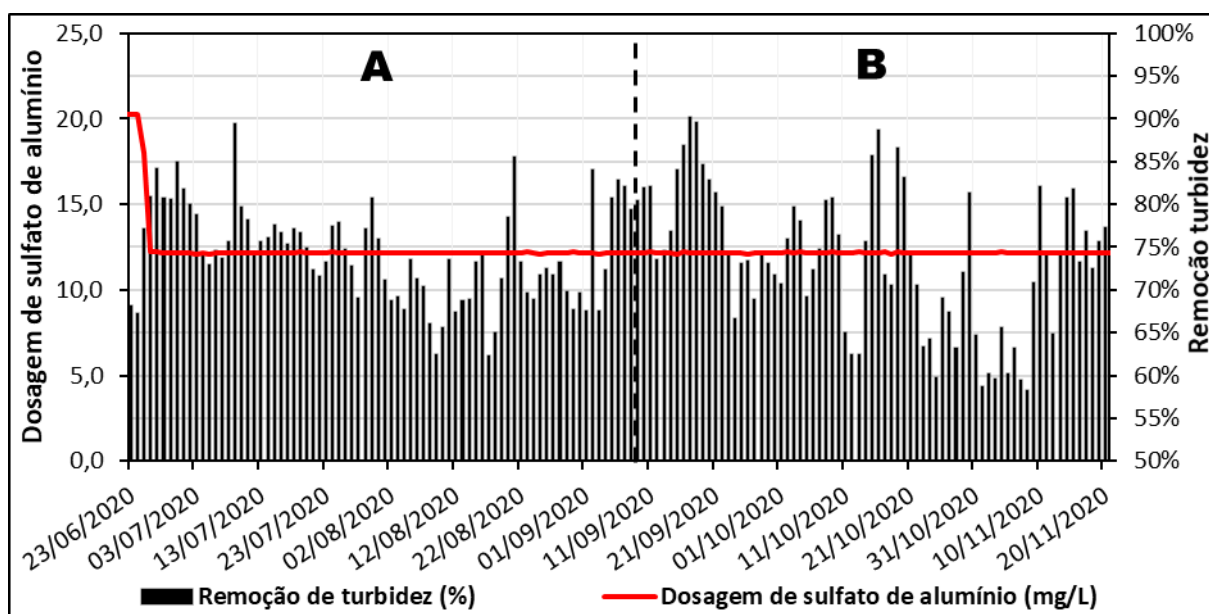
Maeng *et al.*, (2017) defendem que o uso combinado de coagulante com polímero pode melhorar o desempenho do tratamento, além de reduzir a necessidade de aplicação de grandes volumes de coagulante e produzir menos lodo.

### 5.1.3 Análise dos parâmetros da água bruta e tratada após os ajustes realizados nas dosagens de coagulante e polímero na ETA

A seguir serão apresentados os dados obtidos após as alterações nas dosagens de coagulante e polímero na estação de tratamento.

Na Figura 5.17 está demonstrado a relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de coagulante após os ajustes na ETA.

Figura 5.17: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de coagulante após os ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: **A e B.**

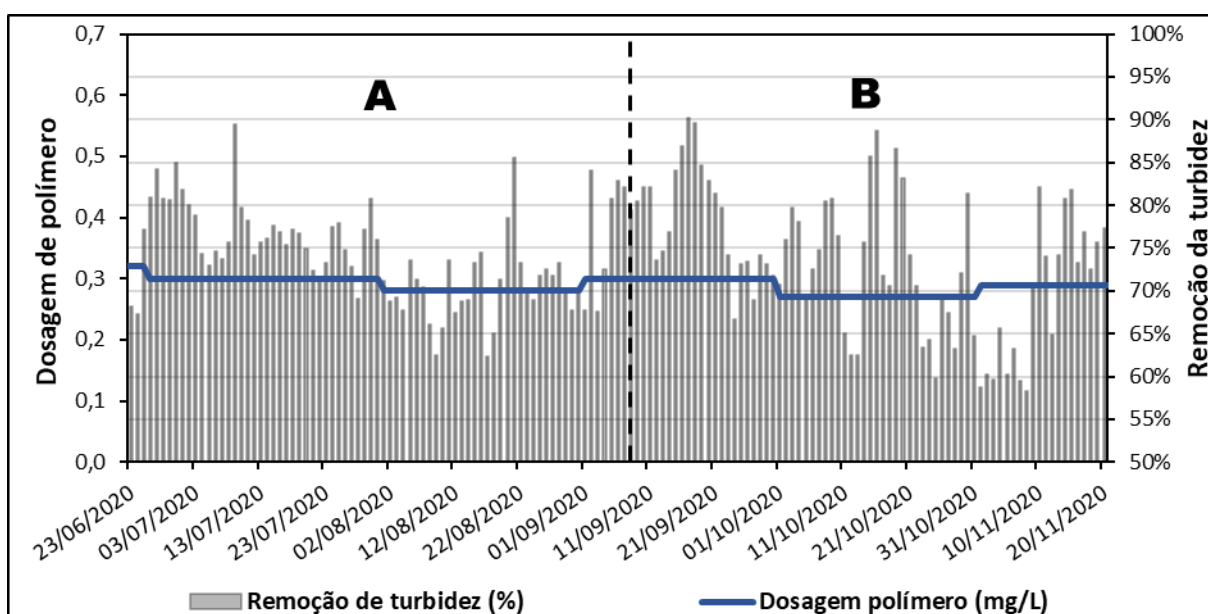
A eficiência média de remoção da turbidez no período ficou próxima a 75%, valores abaixo do período anterior que ficou próximo a 83%.



Com a finalidade de facilitar o entendimento das alterações ocorridas durante o período de julho a novembro, foram separadas em zonas A e B, conforme descritas na Figura 5.17.

A Figura 5.18 demonstra a relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de polímero após ajustes na ETA.

Figura 5.18: Relação da eficiência na remoção de turbidez da água bruta e dosagem de polímero após ajustes na ETA



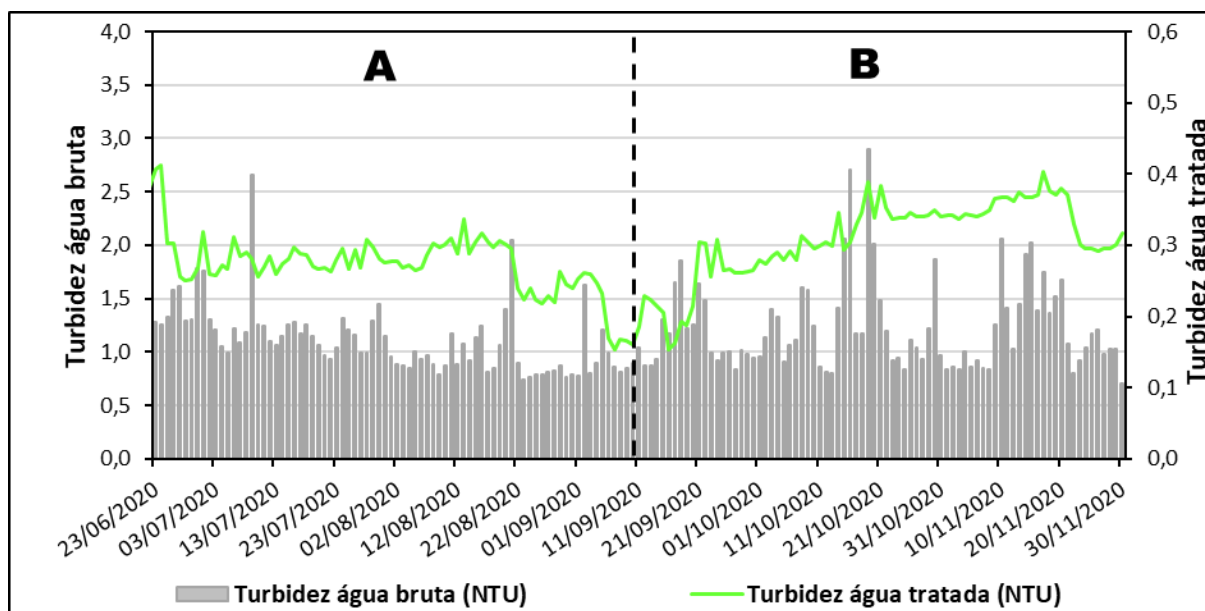
Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Zonas de alteração: **A e B.**

Observa-se que após os ajustes realizados no final do mês de junho, a dosagem de polímero se manteve próxima a  $0,3 \text{ mg.L}^{-1}$ . A taxa de remoção de turbidez permaneceu em média 75%.

A Figura 5.19 traz a relação de turbidez da água bruta e tratada da ETA após ajustes realizados na ETA.

Figura 5.19: Relação de turbidez da água bruta e tratada da ETA após ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Após os ajustes, entre julho e novembro, observou-se que a turbidez da água bruta apresentou grande variação, ficando em média 1,2 NTU conforme Figura 5.19, muito provavelmente devido ao longo período de estiagem na região.

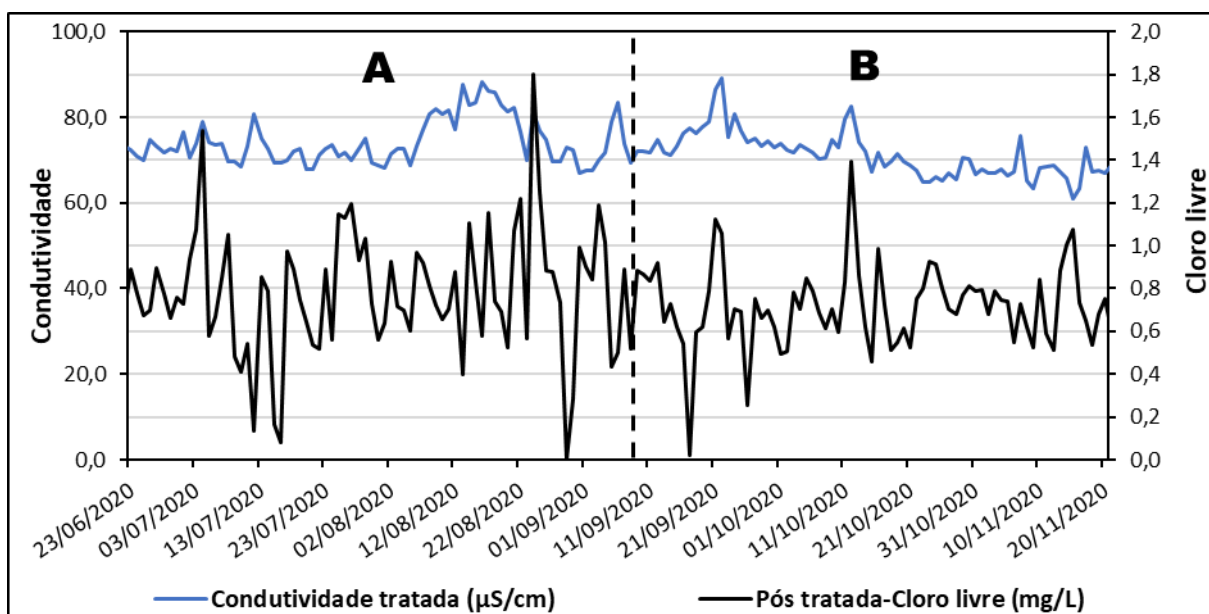
Observa-se que na zona A a turbidez da água tratada se manteve em média próxima de 0,27 NTU, já na zona B houve um pequeno aumento na turbidez da água tratada para em média 0,31 NTU.

Como os valores permaneceram muito abaixo do limite proposto pelo fabricante da planta, optou-se por manter a condição de aplicação dos produtos químicos.

A média da turbidez da água tratada antes dos ajustes estava em 0,33, sendo reduzida para 0,28 NTU no período após ajustes, ou seja, houve uma melhora na eficiência de remoção de turbidez de aproximadamente 15%.

A Figura 5.20 traz os valores monitorados de cloro residual e condutividade da água tratada no período monitorado.

Figura 5.20: Cloro residual e condutividade da água tratada no período após os ajustes de dosagens na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

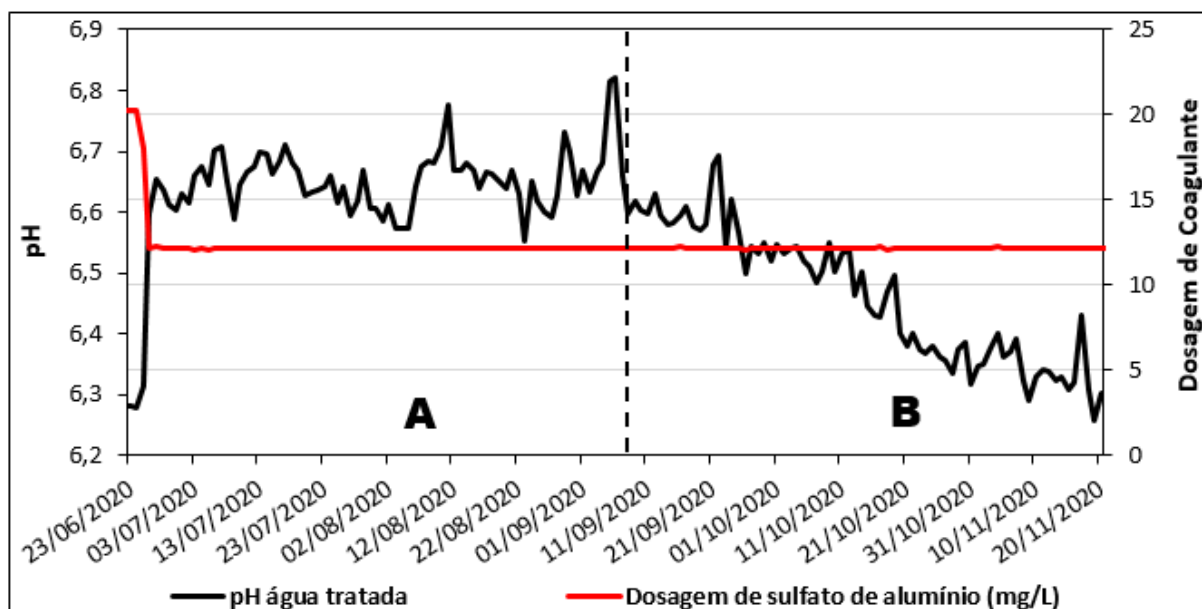
Zonas de alteração: **A e B**.

Pode-se observar que a condutividade oscilou entre 60 e 90  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  durante o período avaliado, assim como no período de fevereiro a junho.

Nota-se também que houve muitos ajustes na aplicação de hipoclorito de sódio, fazendo com que os resultados de cloro livre oscilassem em quase todo o período avaliado, impactando diretamente na condutividade e pH da água tratada, conforme Figura 5.21.

A Figura 5.21 mostra os dados da dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada.

Figura 5.21: Dosagem de sulfato de alumínio e pH da água tratada após os ajustes na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

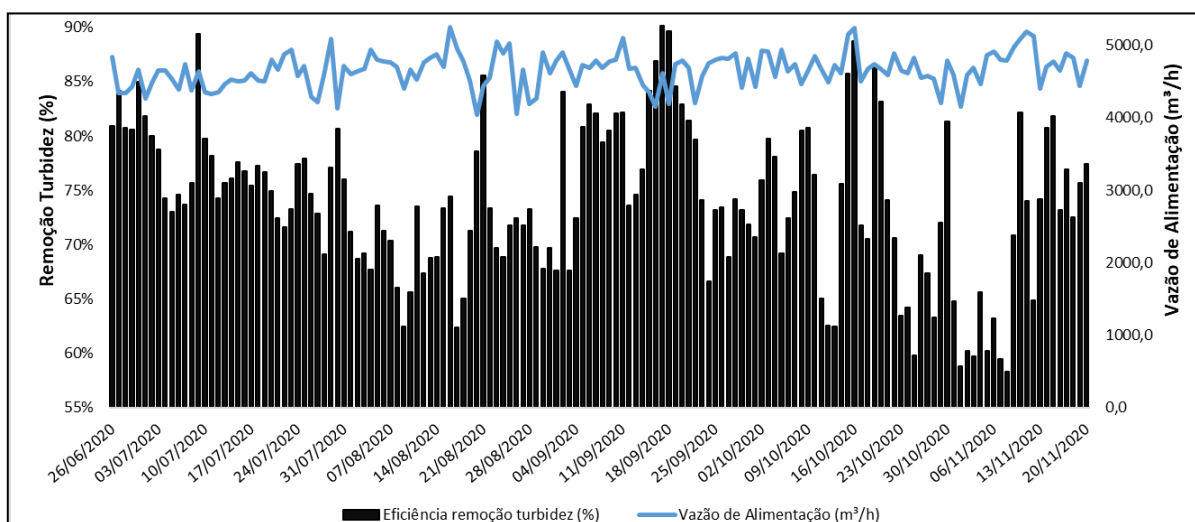
Zonas de alteração: **A e B.**

Nota-se que a dosagem de coagulante se manteve constante durante todo o período avaliado, assim como a turbidez da água bruta mostrada na Figura 5.19, o mecanismo dominante foi o de neutralização de cargas.

O pH se manteve entre 6,2 e 6,9 durante o período avaliado, seguindo a especificação de Howe *et al.*, (2016), de que na grande maioria dos processos se operam entre 6 e 8, evitando o limite inferior buscando evitar a aceleração das taxas de corrosão.

A Figura 5.22 traz os resultados de eficiência de remoção de turbidez da água bruta e das vazões de alimentação antes dos ajustes realizados na estação de tratamento.

Figura 5.22: Relação da remoção de turbidez e vazão de alimentação após ajustes

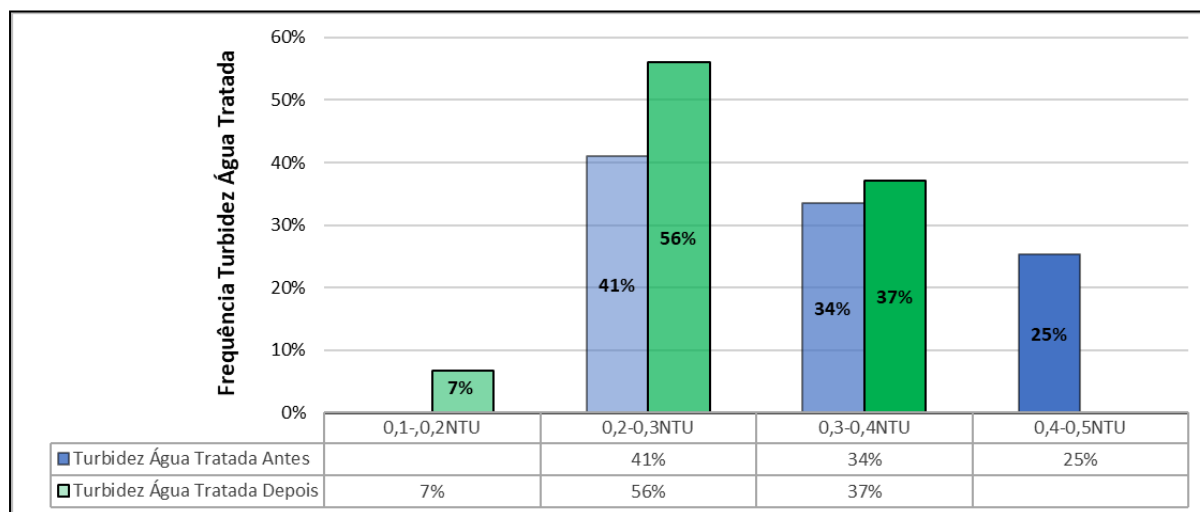


Fonte: Acervo do Autor, 2020.

A vazão média de alimentação no período demonstrado na Figura 5.22, se manteve estável e próxima a  $4.650 \text{ m}^3/\text{h}$ , a eficiência de remoção de turbidez foi de 75%, porém observou-se que houve uma redução considerável na turbidez da água bruta no período avaliado, o que pode prejudicar as etapas de coagulação e floculação, devido à redução na taxa de colisão entre as partículas (YANG *et al.*, 2019; CHENG *et al.*, 2007).

A Figura 5.23 mostra a frequência da turbidez da água tratada, abrangendo todo o período analisado.

Figura 5.23: Frequência turbidez da água tratada

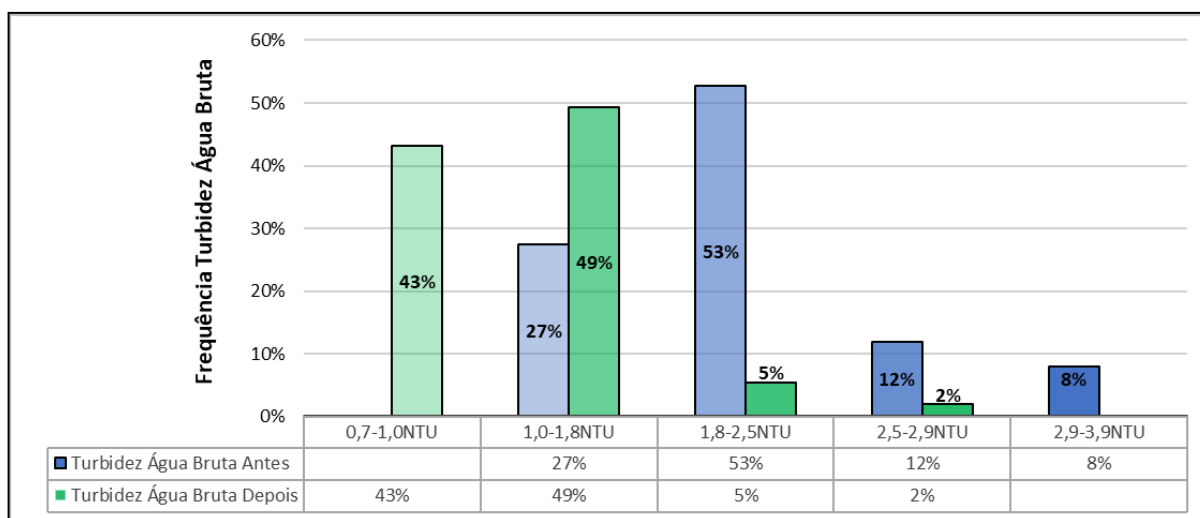


Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Foi possível observar na Figura 5.23 que no período anterior aos ajustes, do início de fevereiro até 25 de junho a turbidez da água tratada permaneceu a maior parte do tempo, cerca de 41% entre 0,2 e 0,3 NTU. Após os ajustes a planta atingiu a estabilidade na dosagem, permanecendo 56% do tempo entre 0,2 e 0,3 NTU e 7% do tempo entre 0,1 e 0,2 NTU, se mantendo em ambos os períodos abaixo do limite proposto pelo fabricante da planta de 1,0 NTU.

A Figura 5.24 mostra a frequência da turbidez da água bruta, durante todo o período analisado.

Figura 5.24: Frequência turbidez da água bruta



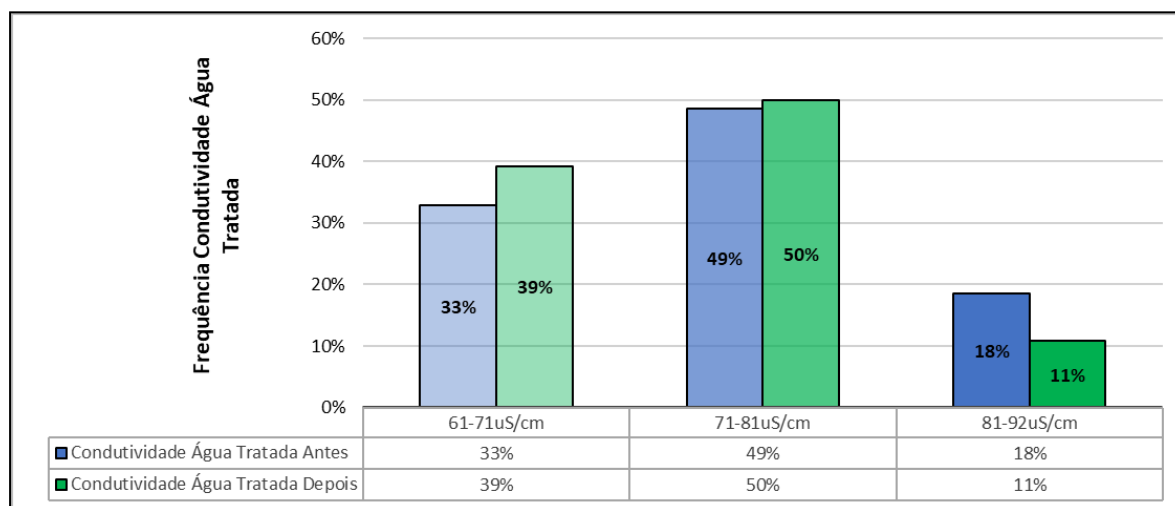
Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Foi possível observar que no período anterior aos ajustes, que a turbidez da água bruta permaneceu a maior parte do tempo, aproximadamente 53% entre 1,8 e 2,5 NTU.

Após os ajustes a planta atingiu a estabilidade, permanecendo 49% do tempo entre 1,0 e 1,8 NTU e 43% do tempo entre 0,7 e 1,0 NTU. Sendo assim, após os ajustes nas dosagens dos produtos químicos, houve uma redução na faixa da turbidez da água bruta, reduzindo a carga de sólidos suspensos e materiais coloidais presentes na água, o que dificulta as etapas de coagulação e floculação (RICHTER, 2009).

A Figura 5.25 mostra a frequência da condutividade da água tratada, abrangendo todo o período analisado.

Figura 5.25: Frequência condutividade da água tratada



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Foi possível observar que no período anterior aos ajustes a condutividade da água tratada permaneceu a maior parte do tempo em aproximadamente 49%, entre 71 e 81  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

Após os ajustes na planta os valores permaneceram muito próximos aos anteriores, sendo 50% do tempo entre 71 e 81  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e 39% do tempo entre 61 e 71  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , se mantendo abaixo do limite pré-estabelecidos pelo fabricante da planta que é de 110  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .

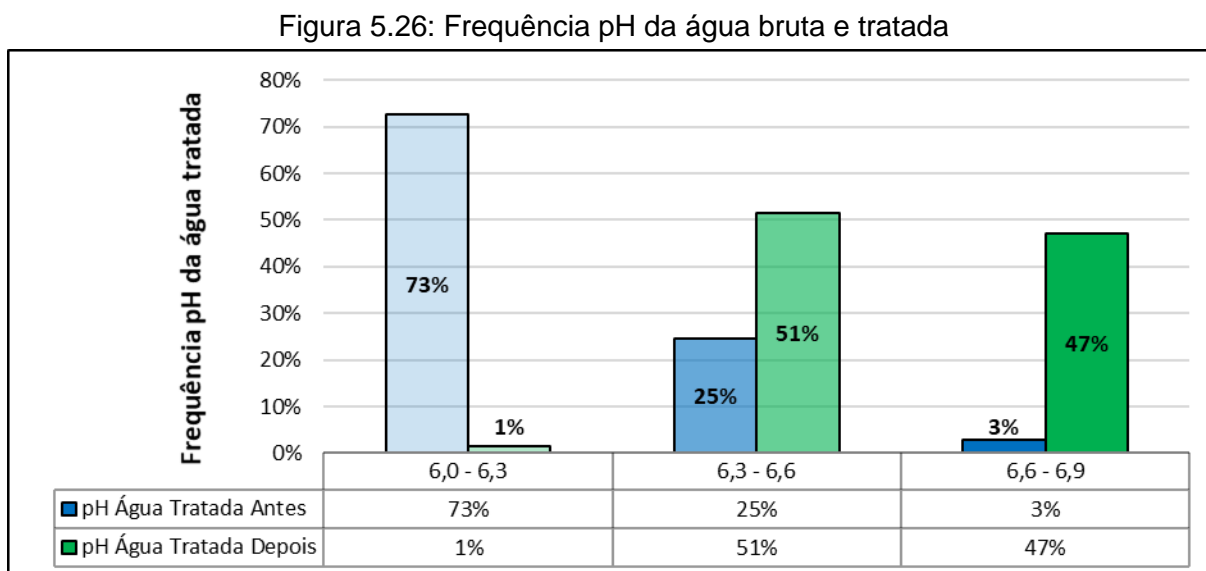
Richter, (2009) defende que para garantir o mecanismo de coagulação por neutralização de cargas, o pH da reação deve estar entre 4,5 e 6,5 visando a produção de espécies hidrolisadas de alumínio na quantidade necessária para desestabilizar os colóides presentes na água bruta.

O pH interfere diretamente na solubilidade do alumínio, sendo assim deve ser obedecido os limites especificados para garantir a eficácia da etapa (NCIBI *et al.*, 2017).

Visando obter a redução de custos para a indústria, optou-se por operar a estação de tratamento com o mecanismo de neutralização de cargas, conforme expressa Di Bernardo *et al.*, (2011), que a definição da faixa de pH x dosagem de coagulante é definida em função de alguns aspectos, tal como a não necessidade de

aplicação de acidificante ou alcalinizante, faixa de turbidez remanescente, custos, etc

A Figura 5.26 mostra a frequência de pH da água tratada, abrangendo todo o período analisado.



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Observa-se que no período anterior aos ajustes o pH da água tratada permaneceu em 73%, entre 6,0 e 6,3, o que pode ser prejudicial ao sistema devido a aceleração das taxas de corrosão com pH próximo a 6,0 (HOWE *et al.*, 2016).

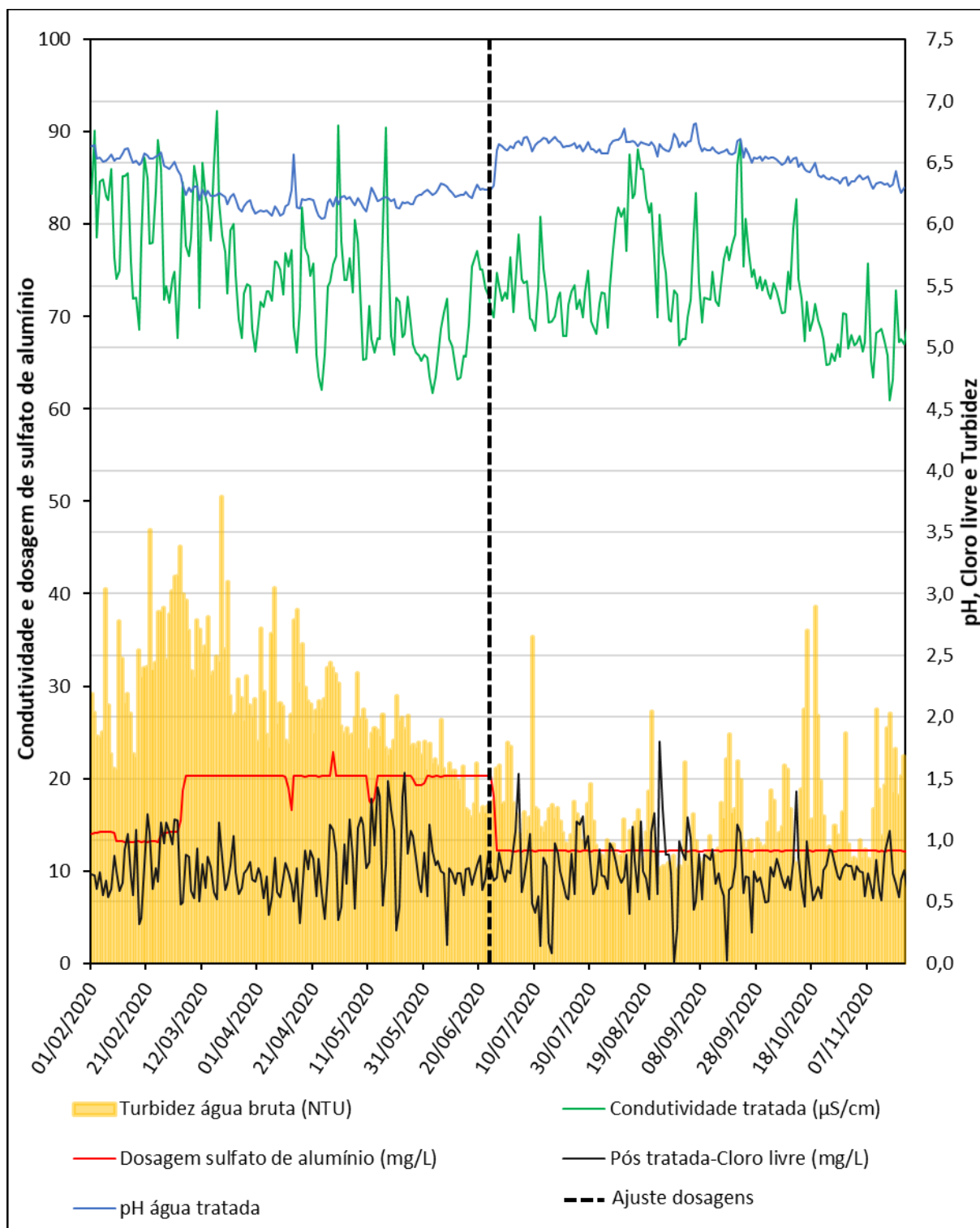
Após os ajustes na planta os valores permaneceram a maior parte do tempo acima de 6,3, devido à redução na dosagem de coagulante e com isso menor consumo de alcalinidade e atendendo a faixa de pH especificada, produzindo as espécies hidrolisadas de alumínio e garantindo a ocorrência do mecanismo de neutralização de cargas (RICHTER, 2009).

Com relação aos 47% em que o pH se manteve acima de 6,6, o que de acordo com Di Bernardo *et al.*, 2011 não seria um problema, já que os autores explicam que para o pH próximo a 6,5 e dosagem de coagulante aplicada de 12 mg.L<sup>-1</sup> ocorre o mecanismo de neutralização de cargas, que é o desejado.

As oscilações de pH, condutividade, cloro livre, turbidez da água bruta e dosagem de coagulante durante todo o período avaliado são exibidos na Figura 5.27.



Figura 5.27: Condutividade água tratada, pH água tratada, Cloro livre água tratada, Turbidez água bruta e dosagem de sulfato de alumínio.



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

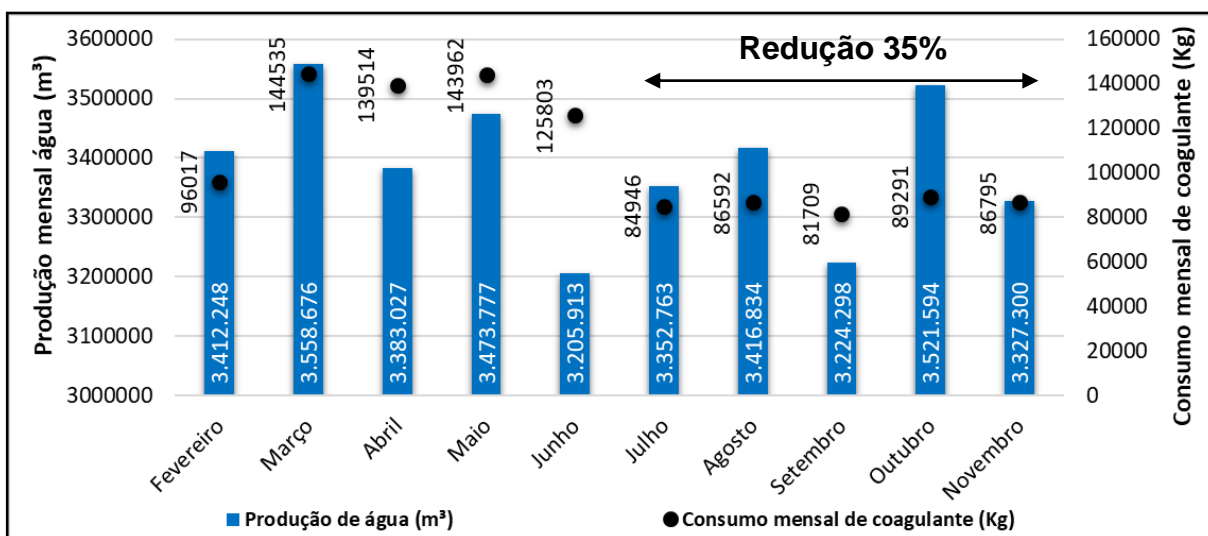
Conforme abordado anteriormente, a otimização de coagulante e polímero além de trazer redução de custos mantendo a qualidade da água tratada, também reduz a produção de resíduos a serem tratados.

Avaliando a Figura 5.27 fica claro a questão proposta por Wang *et al.*, (2008), de que a dosagem excessiva de coagulante proporciona a redução do pH, fato observado durante o período anterior aos ajustes, o que torna a água mais corrosiva e aumentando os custos com tratamentos posteriores.

Considerando a produção média de água no período de fevereiro a junho de  $3.406.728 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$  e de julho a novembro de  $3.368.557 \text{ m}^3.\text{mês}^{-1}$ , significando uma produção de 1,1% menor que no primeiro período.

A proporção média de coagulante consumido era de 38:1 (gramas coagulante por  $\text{m}^3$  de água produzida) e passou a ser de 25:1, dessa forma pode-se afirmar que foi possível otimizar aproximadamente 35%, ou seja de  $130 \text{ T.mês}^{-1}$  (fevereiro a junho) de coagulante para  $86 \text{ T.mês}^{-1}$  (Julho a novembro conforme Figura 5.28) e polímero de 40 Kg para aproximadamente 30 Kg.dia<sup>-1</sup>.

Figura 5.28: Dosagem de coagulante na estação de tratamento durante o período avaliado



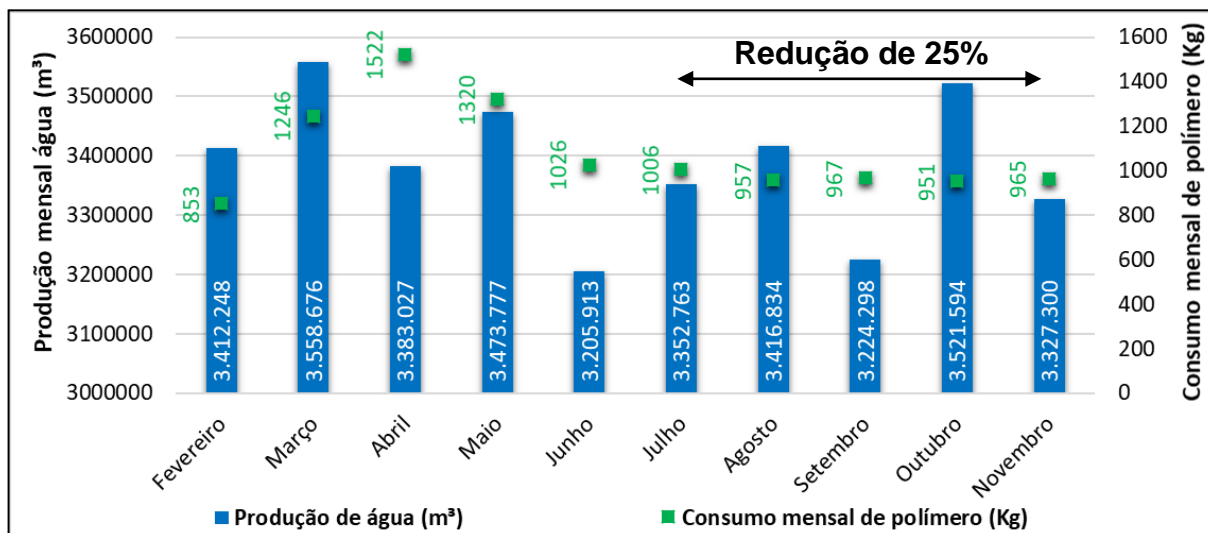
Fonte: Acervo do Autor, 2020.

Após a concretização da redução na dosagem do coagulante, ficou notável a importância da realização dos testes em laboratório para adequar as dosagens sempre que houver a necessidade, pois uma dosagem com baixa eficiência (sub ou sobre dosagem) é prejudicial as etapas de tratamento interferindo diretamente nos custos de tratamento da estação, considerando o volume de água produzido. A economia com a aplicação de coagulante foi de aproximadamente U\$ 30.000,00 para o período após redução.

Dólar cotado R\$ 5,20 na ocasião, em 01 de janeiro 2021.

A Figura 5.29 apresenta os consumos de polímero durante todo o período avaliado.

Figura 5.29: Dosagem de polímero durante o período avaliado na ETA



Fonte: Acervo do Autor, 2020.

A economia com a aplicação de polímero realizada após os ajustes, foi de aproximadamente U\$ 3.800,00, para o período após redução.

Assim como a redução de coagulante, a otimização no consumo de polímero também foi expressiva, impactando diretamente nos custos da estação de tratamento (YU *et al.*, 2020).

A turbidez média da água tratada antes dos ajustes realizados em planta estava em 0,33 e reduziu para 0,28 NTU após, conforme apresentados na Figura 5.10 e Figura 5.19.

Devido a falta de instrumentos de medição de vazão e analisadores de consistência nas linhas de extração de lodo, não foi possível determinar os ganhos reais com relação a redução na geração de resíduos da unidade de tratamento.

Não foram observados alteração no comportamento dos filtros TGV's da estação de tratamento, sendo que as carreiras de filtração foram mantidas idênticas em ambos os períodos avaliados.

## 6 CONCLUSÃO

Avaliando o impacto da dosagem de coagulante e polímero na estação de tratamento durante o período de fevereiro a novembro, podemos afirmar que a redução na aplicação do coagulante (sulfato de alumínio), influenciou diretamente no pH, devido ao consumo de alcalinidade e proporcionalmente na condutividade da água tratada, já que ao reduzir a dosagem do produto se reduz a quantidade de sais dissolvidos agregados a solução, minimizando também a produção de lodo gerado no tratamento.

A redução no consumo de polímero, além de impactar nos custos de tratamento da estação, influenciou diretamente na eficiência das etapas de floculação e decantação, além do principal benefício quando utilizado em conjunto com o coagulante que é proporcionar a redução na dosagem do mesmo, minimizando também os riscos de colmatação e comprometimento das carreiras de filtração.

Verificou-se que a qualidade da água produzida durante o período de fevereiro a junho (anterior aos ajustes), apresentaram valores para o pH entre 6,0 e 6,7, condutividade entre 61 e 93  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e turbidez entre 0,2 e 0,6 NTU. Para o período de julho a novembro (posterior aos ajustes), os valores permaneceram, para o pH entre 6,2 e 6,9, condutividade entre 59 e 90  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e turbidez entre 0,1 e 0,4 NTU, mantendo-se em ambos os períodos para as diferentes dosagens, porém com uso combinado de coagulante e polímero, dentro dos limites pré-definidos de pH entre 6 e 8, condutividade inferior a 110  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  e turbidez inferior a 1,0 NTU.

Considerando a produção média de água no período de fevereiro a junho de 3.406.728  $\text{m}^3\cdot\text{mês}^{-1}$  e de julho a novembro de 3.368.557  $\text{m}^3\cdot\text{mês}^{-1}$ , o que significa uma produção de 1,1% menor que no primeiro período. A proporção média de coagulante consumido era de 38:1 (gramas coagulante por  $\text{m}^3$  de água produzida) e passou a ser de 25:1, dessa forma pode-se afirmar que foi possível otimizar aproximadamente 35%, ou seja de 130  $\text{T}\cdot\text{mês}^{-1}$  (fevereiro a junho) de coagulante para 86  $\text{T}\cdot\text{mês}^{-1}$  (Julho a novembro) e polímero de 1200 Kg para aproximadamente 900  $\text{Kg}\cdot\text{mês}^{-1}$ .

Analisando os resultados dos consumos otimizados exibidos anteriormente, ficou evidente a importância da implementação de procedimentos de realização de ensaios em laboratório (*jar test*), da análise diária dos dados de leitura dos instrumentos de medição em tempo real e da rotina de acompanhamento em campo para verificação de anomalias do processo.

## 7 REFERENCIAS

BRASIL. NBR 12.216 de 1992. Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público. Rio de Janeiro. ABNT, 1992.

BRITO, A. G.; OLIVEIRA, J. M.; PEIXOTO, J. M. Tratamento de água para consumo humano e uso industrial. 2 ed., Porto. Engenho e Média, Lda| Grupo Publindústria. 2014.

CHENG, W. P.; CHI, F. H.; LI, C. C.; YU, R. F. A study on the removal of organic substances from low-turbidity and low-alkalinity water with metal-polysilicate coagulants. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 312 (2-3), p. 238–244. 2008.

COMPTON, M.; WILLIS, S.; REZAIE, B.; HUMES, K. Food processing industry energy and water consumption in the Pacific northwest. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 47, p. 371–383. 2018.

CORCELLI, F.; FIORENTINO, G.; VEHMAS, J.; ULGIATI, S. Energy efficiency and environmental assessment of papermaking from chemical pulp - A Finland case study. *Journal of Cleaner Production*, 198, p. 96–111. 2018.

CUI, H.; HUANG, X.; YU, Z.; CHEN, P.; CAO, X. Application progress of enhanced coagulation in water treatment. *RSC Advances*, 10(34), p. 20231–20244. 2020.

CUVIELLA-SUÁREZ, C.; COLMENAR-SANTOS, A.; BORGE-DIEZ, D.; LÓPEZ-REY, A. Management tool to optimize energy and water consumption in the sanitary-ware industry. *Journal of Cleaner Production*, 197, p. 280–296. 2018.

DI BERNARDO, L., DANTAS, A.D.B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água, 2 ed., São Carlos: Rima, 2005.

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.

FERREIRA FILHO, S. S. Tratamento de água: concepção, projeto e operação de estações de tratamento. 1 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FOROUGH, M.; CHAVOSHI, S.; BAGHERI, M.; YETILMEZSOY, K.; SAMADI, M. T. Alum-based sludge (AbS) recycling for turbidity removal in drinking water treatment: an insight into statistical, technical, and health-related standpoints. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 20, p. 1999-2017. 2018.

HOWE, J. K. *et al.* Princípio de tratamento de água. 1 ed. São Paulo: Cengage, 2016.

KLIMES, L.; BREZINA, M.; MAUDER, T.; CHARVÁT, P.; KLEMES, J. J.; STETINA, J. Dry cooling as a way toward minimisation of water consumption in the steel industry: A case study for continuous steel casting. *Journal of Cleaner Production*, 123109. 2020.

LIMA, Julyenne Kerolainy Leite. Avaliação da filtração direta descendente no tratamento de água de manancial com baixa turbidez e cor elevada. 2019. Dissertação (Mestrado profissional em uso sustentável de recursos naturais) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. f. 11-18.

LIU, Z.; WEI, H.; LI, A.; YANG, H. Enhanced coagulation of low-turbidity micro-polluted surface water: Properties and optimization. *Journal of Environmental Management*. 233, p. 739-747. 2018.

MAENG, S. K.; TIMMES, T. C.; KIM, H. C. Characteristics of flocs formed by polymer-only coagulation in water treatment and their impacts on the performance of downstream membrane separation. *Environmental Technology*, 38 (20), p. 2601–2610. 2016.

MAHDAVI, M.; AMIN, M. M.; MAHVI, A. H.; POURZAMANI, H.; EBRAHIMI, A. (2017). Metals, heavy metals and microorganism removal from spent filter backwash water by hybrid coagulation-UF processes. *Journal of Water Reuse and Desalination*.

POYRY TECNOLOGIA LTDA. [Correspondência e-mail]. Destinatário: VOTORANTIM CELULOSE E PAPEL. São Paulo, 05 de junho de 2007.

RICHTER, C. A. Água: Métodos e tecnologia de tratamento. 1 ed., São Paulo. Blucher, 2009.

SANTOS, E. P. C. C.; TEIXEIRA, A. R.; ALMEIDA, C. P.; LIBÂNIO, M.; PÁDUA, V. L. Estudo da coagulação aplicada à filtração direta descendente. *Engenharia sanitária e ambiental*, Rio de Janeiro, v. 12, p. 361-370. 2007.

SELHORST FILHO, O.; WIECHETECK, G. K.; ANDRADE FILHO, A. G.; DOLL, M. M. R. Otimização de parâmetros de clarificação de água do sistema de tratamento de Ponta Grossa (PR). *Revista de Engenharia e Tecnologia*, Ponta Grossa, v. 3, n. 2, p. 35-46, 2011.

SILLANPAA, M.; NCIBI, M. C.; MATILAINEN, A.; VEPSALAINEN, M. Removal of natural organic matter in drinking water treatment by coagulation: A comprehensive review. *Chemosphere*, 190, p. 54–71. 2018.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos: Princípio do tratamento biológico de águas residuárias. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMS, 2014. v. 1.

VWS BRASIL LTDA. Descritivo do processo. São Paulo, 2008.

WANG, D.; KUNDERT, K. L.; EMELKO, M. B. Optimisation and improvement of in-line filtration performance in water treatment for a typical low turbidity source water. *Environmental Technology*, p. 1–10. 2018.

XIA, X.; LAN, S.; LI, X.; XIE, Y.; LIANG, Y.; YAN, P.; XING, Y. Characterization and coagulation-flocculation performance of a composite flocculant in high-turbidity drinking water treatment. *Chemosphere*, 206, p. 701–708. 2018.

DING, Q.; YAMAMURA, H.; YONEKAWA, H.; AOKI, N.; MURATA, N.; HAFUKA, A.; WATANABE, Y. 2018. Differences in behaviour of three biopolymer constituents in coagulation with polyaluminium chloride: Implications for the optimisation of a coagulation–membrane filtration process. *Water Research*, 133, 255–263.

YAN, M.; WANG, D.; QU, J.; NI, J.; CHOW, C. W. K. Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: The third way through coagulant optimization. *Water Research*, 42(8-9), p. 2278–2286. 2008.

ZHAO, Y. X.; GAO, B. Y.; ZHANG, G. Z.; QI, Q.B.; WANG, Y.; PHUNTSHO, S.; KIM, J. H.; SHON, H. K.; YUE, Q. Y.; LI, Q. Coagulation and sludge recovery using titanium tetrachloride as coagulant for real water treatment: A comparison against traditional aluminum and iron salts. *Separation and Purification Technology*, 130, p. 19-27. 2014.

ZHOU, Y.; YAN, M.; LIU, R.; WANG, D.; QU, J. Investigating the effect of hardness cations on coagulation: The aspect of neutralisation through Al(III)-dissolved organic matter (DOM) binding. *Water Research*, 115, p. 22–28. 2017.