



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



# Avaliação da eficiência de remoção de turbidez de um sistema de clarificação

*Autor: Luciano Acunha Knevez*

*Orientador: Nilo Sérgio Medeiros Cardoso*

Porto Alegre, julho de 17

## Resumo

O processo convencional de clarificação de água envolve as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Para realizá-lo, é necessário o uso adequado de insumos químicos, sob pena de obter um processo pobre economicamente. Com o intuito de evitar o desperdício e garantir a qualidade da água tratada na usina termelétrica Sepé Tiaraju, situada na cidade de Canoas-RS, o presente estudo investigou o efeito dos parâmetros de coagulação/floculação no processo de clarificação. O estudo comparou diferentes dosagens do coagulante Cloreto de Polialumínio (PACl) e diferentes valores de pH no processo de coagulação/floculação. A eficiência do tratamento foi avaliada em termos de redução de turbidez residual da água tratada, principal especificação do processo de clarificação na usina. Os experimentos foram conduzidos primeiramente em escala de bancada, usando o Jar Test, e na sequência testes na unidade industrial foram realizados para avaliar a aplicação das condições ótimas previamente determinadas. Os resultados apontaram a faixa de pH próxima à neutralidade ( $5,5 < \text{pH} < 7,5$ ) como região mais favorável para realizar o processo de coagulação/floculação, onde boas eficiências de remoção de turbidez ( $\text{ERT} > 80 \%$ ) foram atingidas e sua média foi minimamente afetada pela variação do pH. Em contrapartida, fora desta faixa, os valores de ERT diminuíram acentuadamente quando o pH se afastou dos valores determinados como mais adequados. A pesquisa também indicou o valor de 5 mg/L de dosagem de coagulante PACl como valor mínimo para atender a turbidez requerida da água clarificada ( $< 10 \text{ NTU}$ ), conferindo uma redução de 29 % na dosagem aplicada na unidade industrial.

Palavras chave: tratamento de água, coagulação-floculação, eficiência, dosagem, turbidez, Jar Test.

## Lista de Figuras

<i>Figura 1 – (a) Coagulação: a adição de um coagulante neutraliza as cargas, colapsando a “nuvem” ao redor dos coloides permitindo sua aglomeração. (b) Floculação: Formação de grandes flocos sedimentáveis a partir da conexão de coloides aglomerados pela ação de um agente químico floculante.....</i>	<i>5</i>
<i>Figura 2 – Desprotonação do íon alumínio, passo inicial da hidrólise para formação do coagulante a partir de sais hidratados de alumínio. ....</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3 – Efeito da dosagem de coagulante sal metálico e as restrições de remoção de turbidez causadas pela variação das faixas de pH. ....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 4 – Procedimento simplificado para realização de teste de coagulação em laboratório.....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 5 – Fluxograma do sistema de clarificação da UTE-ST. ....</i>	<i>12</i>
<i>Figura 6 – Desenho esquemático do Floculador da unidade industrial UTE_ST.....</i>	<i>13</i>
<i>Figura 7 – Jar Test do laboratório de controle de qualidade da UTE-ST.....</i>	<i>16</i>
<i>Figura 8 – Três tipos de resposta visual observados no ensaio de Jar Test: (a) floco bem definido e com excelente sedimentação (&lt; 2 min) (pH de coagulação 5,77 e PACl em 20 mg/L); (b) tamanho de floco intermediário e com boa sedimentação (&lt; 5 min) (pH de coagulação 6,64 e PACl em 7 mg/L); e (c) tamanho de floco deficiente onde a sedimentação não ocorreu (pH de coagulação 4,75 e PACl em 20 mg/L).....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 9 - O efeito da dosagem de coagulante na eficiência de remoção de turbidez para cada pH médio de floculação testado. ....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 10 – O efeito do pH de coagulação na eficiência de remoção de turbidez com diferentes dosagens de PACl. ....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 – Teste de operação monitorados online para validação das dosagens de coagulante na unidade de clarificação da UTE-ST. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 12 - Teste de operação monitorados online para repetir validação da dosagem de 5 mg/L de coagulante na unidade de clarificação da UTE-ST. ....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 – Resposta do teste de eficiência de remoção de turbidez com diferentes dosagens de PACl na unidade industrial.....</i>	<i>26</i>

## Lista de Tabelas

<i>Tabela 1—Parâmetros típicos do tratamento de coagulação e floculação instalado na Usina Sepé Tiaraju.</i>	14
<i>Tabela 2— Qualidade da água a ser clarificada, dados do projeto básico. ....</i>	14
<i>Tabela 3 – Dados de caracterização da água bruta utilizada na UTE-ST. ....</i>	15
<i>Tabela 4 – Características da água bruta utilizada nos ensaios de Jar Test. ....</i>	15
<i>Tabela 5 – Descrição dos experimentos realizados no ensaio de Jar Test com variação de dosagem de coagulante. ....</i>	18
<i>Tabela 6 - Descrição dos experimentos realizados no ensaio de Jar Test com variação de pH de floculação e fixadas as dosagens de coagulante. ....</i>	19
<i>Tabela 7 – Descrição do teste no processo industrial da Estação de Tratamento de Água da UTE-ST com variação da dosagem de coagulante (PACI). ....</i>	19
<i>Tabela 8 – Resposta da condutividade frente a dosagem de coagulante. ....</i>	22

## Lista de Abreviaturas e Siglas

**pH** – Potencial hidrogeniônico

**Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>.14H<sub>2</sub>O** – Sulfato de alumínio hidratado

**H<sub>2</sub>O** – água

**Al** – Alumínio

**Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>** – Sulfato de alumínio

**Al(OH)<sub>3</sub>** – Hidróxido de alumínio

**H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>** – Ácido sulfúrico

**FeCl<sub>3</sub>** – Cloreto férrico

**Fe(OH)<sub>3</sub>** – Hidróxido de ferro

**HCl** – Ácido clorídrico

**PAlCl** – Cloreto de polialumínio

**Jar Test** – Teste de bancada efetuado em jarros agitados

**ETA** – Estação de tratamento de água

**UTE\_ST** – Usina termelétrica Sepé Tiaraju

**RS** – Rio Grande do Sul

**OCTE** – Óleo combustível para turbinas elétricas

**REFAP** – Refinaria Alberto Pasqualini

**Base Load** – Carga base

**NTU** – Unidade nefelométrica de turbidez

**NaOH** – Hidróxido de sódio

**ERT** – Eficiência de remoção de turbidez

## Sumário

<b>Resumo</b> .....	<b>ii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas</b> .....	<b>iv</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b> .....	<b>v</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>vi</b>
<b>1 Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>2 Conceitos Fundamentais e Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1 Tratamento de água</b> .....	<b>3</b>
2.1.1 Coagulação e Flocculação .....	4
2.1.2 Sedimentação e filtração .....	6
<b>2.2 Principais tipos de coagulantes</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 Sais metálicos .....	6
2.2.2 Cloreto de Polialumínio .....	8
<b>2.3 Avaliação de coagulantes</b> .....	<b>9</b>
<b>3 Caracterização do problema do caso em estudo</b> .....	<b>11</b>
<b>4 Materiais e Métodos</b> .....	<b>15</b>
4.1 Características da água bruta utilizada na unidade de tratamento .....	15
4.2 Ensaio de coagulação e flocculação .....	16
4.3 Testes de coagulação e flocculação na planta industrial .....	19
<b>5 Resultados</b> .....	<b>20</b>
<b>5.1 Investigação das condições ótimas de coagulação por meio do Jar Test</b> .....	<b>20</b>
5.1.1 Influência da dosagem de coagulante PACl .....	21
5.1.2 Influência do pH na coagulação com PACl .....	22
<b>5.2 Teste da dosagem ótima de coagulante na unidade industrial</b> .....	<b>24</b>
<b>6 Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros</b> .....	<b>27</b>
<b>Referências</b> .....	<b>29</b>

## 1 Introdução

Historicamente o desenvolvimento de grandes civilizações ocorreu em regiões com disponibilidade de água para consumo humano. Sabe-se, ainda, que embora três quartos da superfície da Terra estejam cobertos com água, a sua distribuição pelo planeta é irregular. Em muitos lugares a ocupação do espaço territorial foi dificultada devido à escassez de água, prejudicando seu aproveitamento pelo homem. Igualmente nos dias de hoje, a água é fundamental e precisa estar disponível, e em condições economicamente viáveis de tratamento para permitir o desenvolvimento da sociedade. Portanto, proteger e utilizar de forma sustentável os mananciais deve ser o anseio de uma sociedade consciente (BINDU; MOHAMED, 2016).

Por todas suas características e aplicações, a água é um bem de valor inestimável. Observando que a água doce adequada para consumo, proveniente de lagos e rios, representa apenas uma pequena parte do total de água no planeta, cerca de 0,1%, é exigida uma utilização responsável, de forma a evitar ou minimizar os impactos ambientais da exploração. Porém, esse recurso hídrico vem sendo contaminado de diversas formas. Os reservatórios, independentes de sua origem, estão propensos à poluição. Deste modo, a água oriunda destes mananciais necessariamente passa por estações de tratamento antes de ser enviada para as residências ou processos industriais.

Os mananciais dispõem a água com contaminantes particulados suspensos, que possuem superfície carregada negativamente. Isto impossibilita a aglomeração dessas partículas. Portanto, o tratamento para remover o material particulado deve primeiramente neutralizar a superfície carregada do sólido para, então, permitir sua agregação e separação da água (FREESE, 2003). Para realizar esta tarefa são utilizados coagulantes, normalmente sais hidrolisados de alumínio e ferro, em unidades de clarificação.

O processo de clarificação compõe o tratamento convencional de água bruta. Esta tecnologia é dividida em três etapas: coagulação, floculação e sedimentação. Sabe-se que devido às alterações nas características da água bruta a aplicação desses três processos pode variar conforme a qualidade requerida do efluente do tratamento.

A coagulação e a floculação são amplamente utilizadas em unidades de tratamento de grande escala. A eficiência dos dois processos é afetada por fatores como turbidez, pH, dosagem de coagulante, condições de mistura (LANCINÉ et al., 2008) e tem impacto substancial no desempenho da etapa seguinte, a sedimentação. Sendo a coagulação amplamente afetada por esses fatores, pode resultar em um processo altamente não econômico e prejudicial, operado com sobredosagem de coagulante ou dosagem desnecessária de corretores de pH ou ainda com remoção de partículas insuficiente.

A estação de tratamento de água da usina termelétrica Sepé Tiaraju é um exemplo de uso do processo de coagulação e floculação para condicionamento da água de abastecimento industrial. Nesta estação de tratamento é possível observar a aplicação das distintas etapas que compõem o processo completo de clarificação. Através de seus softwares historiadores e amostras para ensaio em laboratório é, também, possível monitorar parâmetros físico-químicos relativos ao seu desempenho quanto a remoção de turbidez. Porém, esta unidade de tratamento não possui referência estabelecida para especificação dos parâmetros de dosagem de coagulante e pH de floculação, sendo a mesma operada de forma empírica. Assim sendo, não há um compromisso com a relação dosagem de químicos e produção de água tratada no sentido de encontrar seu menor valor.

Para evitar o desperdício e garantir a qualidade da água tratada é necessário investigar os parâmetros de influência chave no processo de clarificação e testar suas respostas para diferentes condições, preferencialmente em escala de bancada antes da escala industrial. Neste contexto, o uso do Jar Test é adequado, ensaio de bancada capaz de indicar o pH mais efetivo para que a coagulação ocorra e otimizar a dosagem de coagulante necessária. Desta forma, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficiência do processo de clarificação para produção de água tratada, de uso industrial, com respeito à remoção de turbidez, em uma usina termelétrica, e investigar relações ótimas de dosagem dos insumos clarificadores e o efeito da variação de pH.



## 2 Conceitos Fundamentais e Revisão Bibliográfica

### 2.1 Tratamento de água

O processo de tratamento de água para abastecimento industrial ou potável constitui-se uma operação meticulosa, pois a qualidade da água obtida pelo tratamento está atrelada a eficiência do seu processo de condicionamento (DI BELLA; GIUSTRA; FRENI, 2014). Uma grande quantidade de químicos é usada para condicionar água para uso ou mesmo para descarte como efluente, tais como: coagulantes de sais inorgânicos e polímeros polieletrólitos; auxiliares de coagulação e desidratação na formação do lodo; soda cáustica para ajuste de pH; carvão ativado para remoção de odor. Desta forma, a otimização dos parâmetros operacionais deve ser uma busca constante para um processo econômico e sustentável (FILHO et al., 2011).

O processo de clarificação é a etapa do tratamento da água na qual se efetua a remoção dos sólidos suspensos, que são definidos como o material particulado capturado em um filtro com membrana de 0,45 µm de abertura de orifício. Aqueles não capturados são considerados coloides ou dissolvidos (KEMMER, 1988). A quantificação dos sólidos suspensos presentes na água (barro, limo, matéria orgânica e inorgânica finamente dividida e microrganismos) é feita, geralmente, de forma indireta, a partir de medidas de turbidez (LETTERMAN, 1999), que é mensurada pela interferência na quantidade de luz transmitida por uma amostra em relação à luz transmitida por uma suspensão padrão. O parâmetro turbidez é um indicador de qualidade muito utilizado no tratamento de água. Portanto, uma boa qualidade de água requer a redução da turbidez a níveis compatíveis com sua aplicação. Por exemplo, a Portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde estabelece valores de turbidez menores que 1 uT para água potável. Para atingir esta especificação em uma estação de tratamento, usualmente uma etapa de coagulação é empregada.

O processo de clarificação tem a separação sólido/líquido como constituinte inicial do tratamento convencional da água. Esse processo pode integrar etapas de gradeamento, flotação, sedimentação e filtração para remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica e desinfecção. Além disso, também pode incluir espessamento e

desidratação de lodo. O processo dito ciclo completo (ou seja, envolvendo as etapas de coagulação, floculação e decantação) é o mais utilizado no Brasil (PADILHA et al., 2011).

Freese (2003) aponta quatro fatores como principais impactantes de desempenho de clarificação, sendo eles: característica da água bruta, condições de mistura, natureza química e dosagem do coagulante. Ainda, segundo Campos, Di Bernardo e Vieira (2005), a coagulação e floculação são as etapas que mais influenciam a efetividade da remoção de sólidos suspensos presentes na água bruta. O processo de coagulação e floculação é aplicado quando a tendência natural de sedimentação do material particulado não é suficiente para separá-los da água.

A seguir são descritas as etapas de coagulação, de floculação, de sedimentação e de filtração.

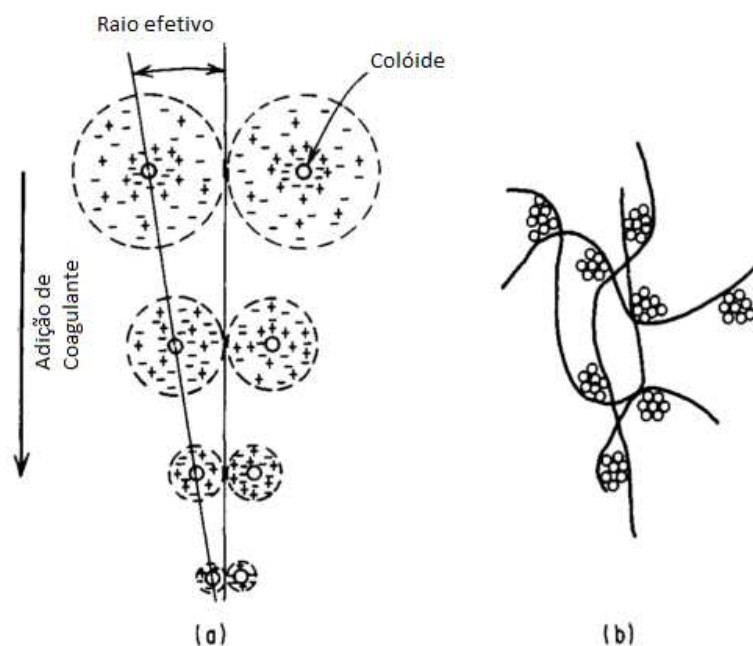
### 2.1.1 *Coagulação e Floculação*

De acordo com Freese (2003), a coagulação é um processo complexo de desestabilização das partículas em suspensão presentes na água (normalmente negativamente carregadas). Devido à repulsão eletrostática, o material particulado não forma agregados. O emprego de um coagulante (carregado positivamente) neutraliza as cargas e eleva a tendência de pequenas partículas na suspensão aquosa, de aderirem umas às outras formando agregados maiores (DUAN; GREGORY, 2003), conforme ilustrado na Figura 1.

O sistema deve promover intensa agitação no início, de forma a homogeneizar rapidamente o agente coagulante e para permitir que as partículas desestabilizadas colidam e agreguem. De acordo com Letterman (1999), o processo ocorre em três etapas essenciais distintas: a formação do coagulante, a neutralização das cargas (Figura 1a) e a colisão interpartículas (Figura 1b).

De acordo com Duan e Gregory (2003), neutralização de cargas e floculação de varredura são considerados os dois principais mecanismos para desestabilização. O mecanismo atuante está atrelado à dosagem de coagulante utilizada e à alcalinidade e turbidez da água a ser tratada (SCHOLZ, 2016).

Figura 1 – (a) Coagulação: a adição de um coagulante neutraliza as cargas, colapsando a “nuvem” ao redor dos colóides permitindo sua aglomeração. (b) Floculação: formação de grandes flocos sedimentáveis a partir da conexão de colóides aglomerados pela ação de um agente químico floculante.



Fonte: Adaptado de KEMMER (1988).

A formação do floco inicia durante a etapa de neutralização de cargas, onde as espécies com ação coagulante, que incluem o coagulante propriamente dito (sal inorgânico ou polieletrólito) na forma hidratada e várias espécies hidrolisadas dele proveniente carregadas positivamente, é eletrostaticamente atraído pelas partículas coloidais (GREGORY; DUPONT, 2001), normalmente carregadas negativamente em águas de superfície com pH entre 5 – 9. Os efeitos resultantes são a quebra da estabilidade e as colisões para crescimento do aglomerado de partículas. Adicionalmente, pode ocorrer o mecanismo de floculação de varredura, quando um excesso de coagulante, além do necessário para a neutralização de cargas, é adicionado, resultando na formação de hidróxidos do metal, no caso do uso de sais inorgânicos como coagulantes. Esses hidróxidos do coagulante são precipitados grandes e pesados, que durante a sua formação envolvem e arrastam os contaminantes coloidais limpando a água pela precipitação do aglomerado (SCHOLZ, 2016), de onde surge a utilização do termo varredura (LETTERMAN, 1999).

A coagulação é o início da formação do floco que ocorre na etapa de mistura rápida (gradiente de velocidades normalmente entre 150 – 1000 s<sup>-1</sup>) onde a adição e

dispersão dos produtos químicos (SCHOLZ, 2016) é efetuada. Porém, o crescimento acentuado do agregado ocorre preferencialmente na etapa de floculação, também chamada de mistura lenta (gradiente de velocidades normalmente entre  $15 - 80 \text{ s}^{-1}$ ) onde polímeros polieletrólitos realizam, através de suas longas cadeias, a união dos coágulos formando agregados ainda maiores. A redução de velocidade de agitação nesta etapa tem como intuito permitir a suspensão e colisão dos flocos evitando a quebra dos aglomerados devido ao gradiente de velocidade (SCHOLZ, 2016).

### *2.1.2 Sedimentação e filtração*

A etapa de sedimentação constitui a última etapa de clarificação. Neste ponto do processo, a água anteriormente floculada está pronta para ser separada dos sólidos através da decantação dos mesmos pela força da gravidade. O parâmetro de interesse nessa etapa é a velocidade média de sedimentação dos flocos. Ela deve, necessariamente, ser maior que a velocidade de ascensão do líquido para haver a separação.

Quando a clarificação não é suficiente para conferir o nível de remoção de particulados requerido para a aplicação da água, é possível agregar uma etapa de filtração após o clarificador para atingir o nível de turbidez exigido. Usualmente são utilizados leitos de areia e cascalho com diferentes granulometrias para realizar este polimento final.

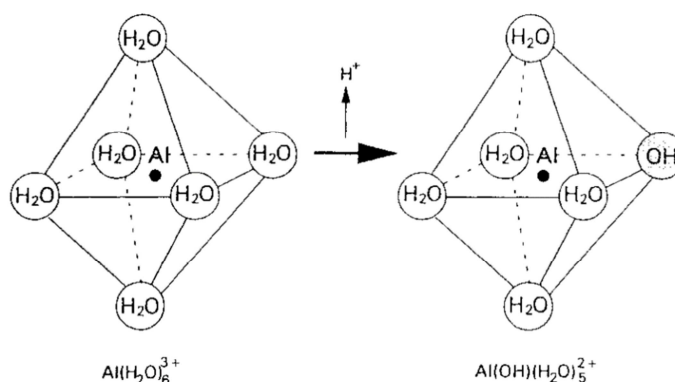
## **2.2 Principais tipos de coagulantes**

Os principais agentes químicos usados como coagulantes no tratamento de águas são sais inorgânicos e polieletrólitos. As características destes dois tipos de coagulantes são discutidas a seguir.

### *2.2.1 Sais metálicos*

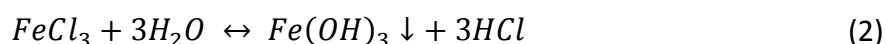
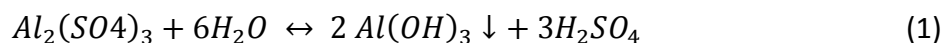
Sais de alumínio e de ferro têm sido amplamente utilizados como coagulantes. Eles são responsáveis por fornecer carga positiva para neutralizar da superfície dos sólidos negativamente carregada. A formação do coagulante, usando o sal  $[\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}]$  (Figura 2), por exemplo, envolve uma série de produtos de hidrólise gerados durante e depois da mistura do sal na água.

Figura 2 – Desprotonação do íon alumínio, passo inicial da hidrólise para formação do coagulante a partir de sais hidratados de alumínio.



Fonte: Adaptado de Letterman (1991).

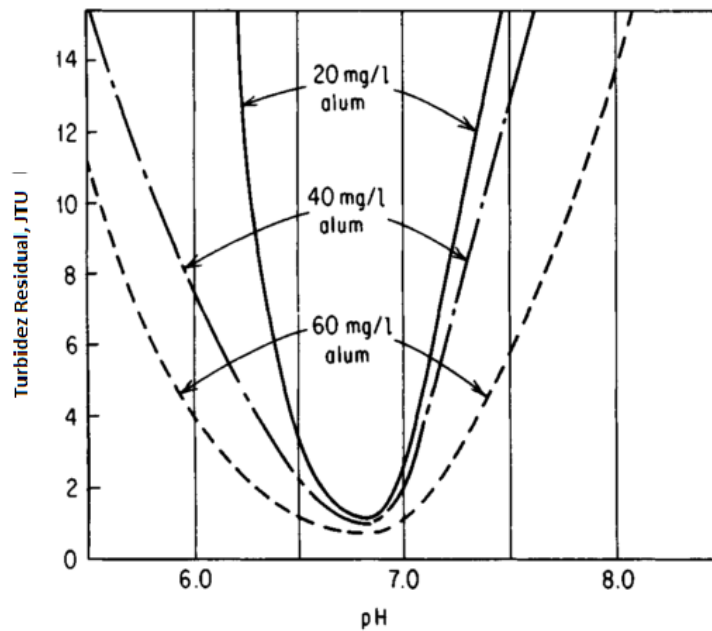
A formação dos compostos gelatinosos de alumínio e ferro carregados positivamente é acompanhada do fenômeno acentuado da redução do pH pela formação concomitante de ácidos minerais conforme observado nas reações dos sais com a água representadas abaixo nas equações (1) e (2).



O efeito da variação de pH e alcalinidade da água é tanto mais prejudicial quanto menor for a concentração de sal coagulante aplicada, como pode ser visto na Figura 3, podendo chegar ao ponto de solubilizar o alumínio ou ferro tornando a clarificação bastante deficiente.

Devido a todas essas restrições, recentemente os sais metálicos têm sido preteridos, sendo substituídos por alguns compostos, como polímeros orgânicos sintéticos, sílica ativada e sais pré-hidrolisados. Destes últimos, o cloreto de polialumínio (PACl) tem sido o mais utilizado.

Figura 3 – Efeito da dosagem de coagulante sal metálico e as restrições de remoção de turbidez causadas pela variação das faixas de pH.



Fonte: Adaptado de KEMMER (1988).

### 2.2.2 Cloreto de Polialumínio

Após um amplo domínio de utilização de sais metálicos, que funcionam tanto como coagulantes e como floculantes nos processos de clarificação (DUAN; GREGORY, 2003), iniciou-se o desenvolvimento de auxiliares de desempenho, a exemplo da sílica ativada. Na década de 50, deu-se início a utilização de polímeros polieletrólitos permitindo um avanço tecnológico relevante no tratamento de águas. Os polieletrólitos carregam em sua longa estrutura de unidades repetitivas sítios carregados que podem realizar a troca de cargas e neutralização de matéria coloidal inclusive (DUAN; GREGORY, 2003).

O cloreto de polialumínio (PACl) é o exemplo de polieletrólito mais comumente utilizado no processo de clarificação, devido às vantagens que ele apresenta em relação aos sais metálicos hidrolisados, floculação mais rápida (GREGORY; DUPONT, 2001), menor influência da variação de pH da água bruta (DUAN; GREGORY, 2003). Além disso, o PACl não apresenta o problema de reduzir a alcalinidade da água, efeito intrinsecamente apresentado pelos sais metálicos de ferro e de alumínio, resultado dos produtos de hidrólise. O floco formado pelo PACl incorpora o íon cloreto em sua estrutura não permitindo a formação do ácido (KEMMER, 1988).

### 2.3 Avaliação de coagulantes

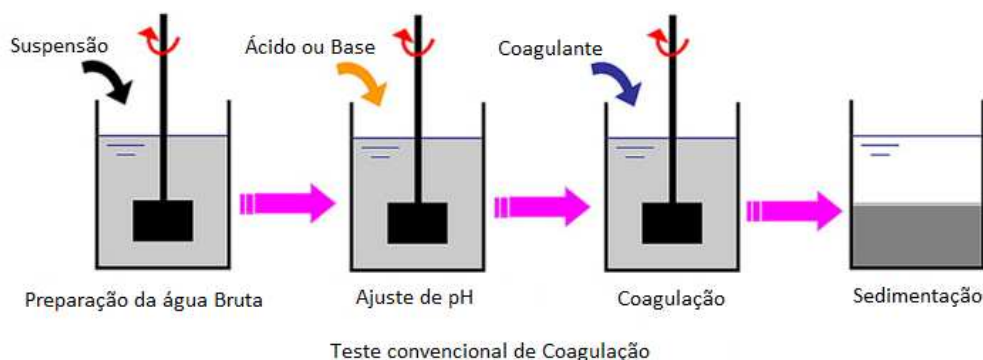
A complexidade do processo de clarificação pode elevar fortemente as chances de realizar a sua operação de forma não econômica e ineficiente. Para conciliar bom desempenho com custo reduzido, a operação de uma unidade de tratamento deve ocorrer com seus parâmetros próximos do ótimo tanto quanto for possível (SATTERFIELD, 2005).

Os coagulantes são avaliados essencialmente em relação à sua performance e custo. Contudo, a elevação da condutividade residual e da produção de lodo, que estão atrelados ao aumento de remoção de matéria presente na água, tornam a tarefa nada elementar. A seleção de um coagulante é dificultada pelos resultados muito similares que diferentes compostos apresentam (ARAGONÉS-BELTRÁN et al., 2009).

Nesse contexto, os ensaios de laboratório que permitam avaliar o desempenho de coagulantes e simular em escala de bancada as condições encontradas em escala industrial são imprescindíveis para determinar pontos ótimos de operação, dosagens adequadas de reagentes e prever ou aprimorá-las (SATTERFIELD, 2005).

Para seleção de coagulante, o ensaio de laboratório mais indicado é o Jar Test (LIBÂNIO; PEREIRA; VORCARO, 1997), representado esquematicamente na Figura 4. Este ensaio visa simular, em bancada, as condições encontradas em um processo de clarificação industrial, a fim de prever ou aprimorá-las.

Figura 4 – Procedimento simplificado para realização de teste de coagulação em laboratório.



Fonte: Adaptado de WANG et al. (2016)

O dispositivo usual de Jar Test consiste em seis frascos igualmente agitados e cheios com água a ser coagulada. Nele é possível variar a rotação dos agitadores de acordo com o gradiente de velocidade correspondente às etapas de mistura rápida e mistura lenta (SATTERFIELD, 2005). É possível simular até seis diferentes condições de dosagens ou pH em cada corrida. Comparando os resultados de qualidade atingidos em cada frasco pode-se determinar o efeito dos parâmetros de tratamento.

Todas as etapas contidas na clarificação (coagulação, floculação e sedimentação) podem ser simuladas no experimento de Jar Test, que também é recomendado para selecionar dosagem, investigar auxiliares de coagulação, identificar pH ótimo e determinar melhor método de sedimentação quando na etapa de projeto ou na busca de pontos ótimos de operação (LETTERMAN, 1999). Embora seja realizado em batelada, diferindo da maioria das unidades de tratamento, frequentemente operadas de modo contínuo, o Jar Test continua sendo a ferramenta mais adequada para essa avaliação devido a sua versatilidade (LETTERMAN, 1999).



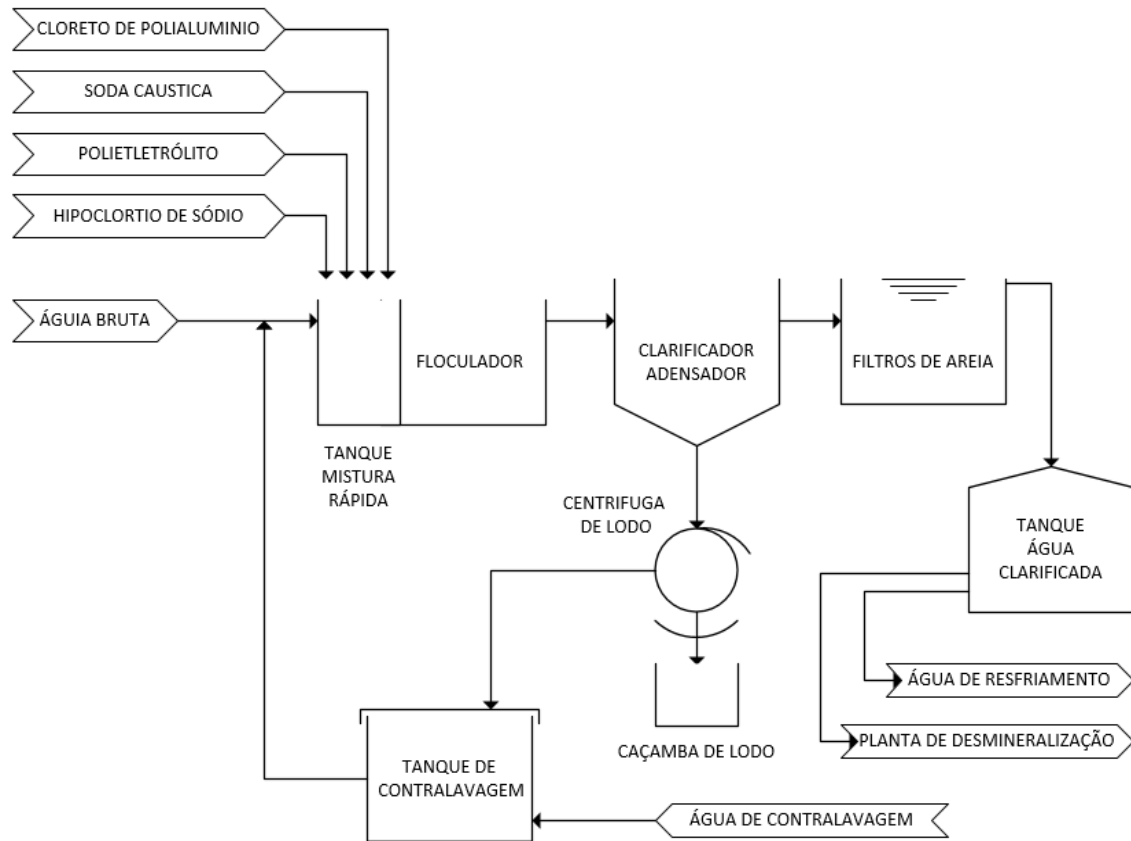
### 3 Caracterização do problema do caso em estudo

A presente pesquisa investigou a eficiência da remoção de turbidez através dos parâmetros físico-químicos da água processada na ETA da Usina Termelétrica Sepé Tiaraju (UTE-ST), situada em Canoas/RS. A produção de energia elétrica na usina está condicionada à demanda energética do país. A capacidade de geração da usina é de 250 MW, em ciclo combinado, alcançados através de uma turbina a gás, uma caldeira recuperadora de calor e uma turbina a vapor. A turbina a gás sofreu alterações no ano de 2007 para operar como bicomustível, com OCTE (Óleo Combustível para Turbinas Elétricas), oriundo da Refinaria Alberto Pasqualini (REFAP), ou gás natural, alimentado através de uma ramificação do gasoduto Bolívia-Brasil. No caso de produção de energia a plena carga (*base load*), o consumo de água desmineralizada e de resfriamento pode chegar, respectivamente, a 1500 e 5600 m<sup>3</sup>/dia.

A unidade industrial em estudo possui uma estação de tratamento que engloba etapas de clarificação e desmineralização de água. O fluxograma completo do tratamento de água bruta realizado nesta indústria é apresentado na Figura 5, enquanto nos parágrafos seguintes são descritas as características operacionais das etapas do processo de clarificação, que constitui o objeto de estudo do presente trabalho.

O processo de clarificação inicia com a captação da água bruta do Rio do Sinos, onde a água é conduzida, através de bombas com capacidade máxima de 575 m<sup>3</sup>/h, até a entrada da ETA. Então, a água é misturada a uma corrente de reciclo de água oriunda do processo de retro limpeza dos filtros de areia para na sequência ser medida sua vazão volumétrica e admitida no tanque de floculação.

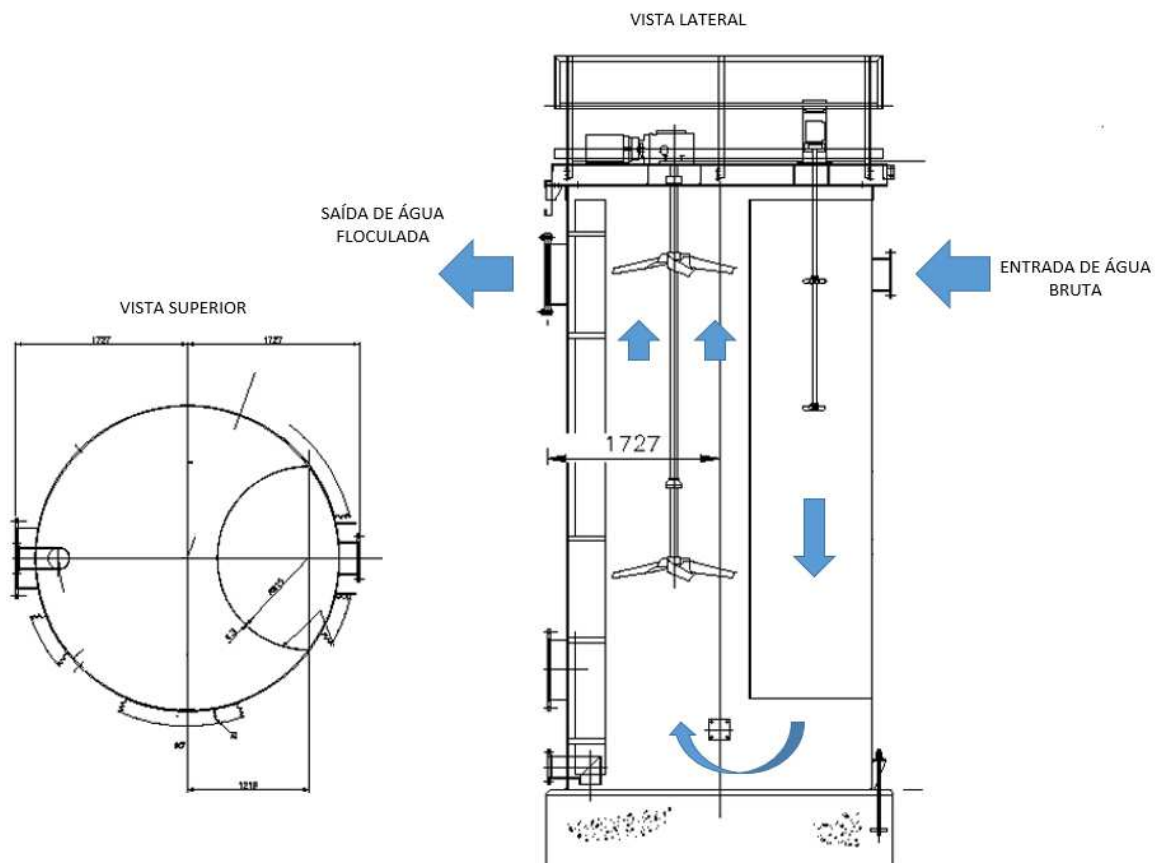
Figura 5 – Fluxograma simplificado do sistema de clarificação da UTE-ST.



Fonte: o autor.

O floculador possui uma placa metálica que divide o tanque em duas regiões com um agitador exclusivo para cada região (Figura 6). A primeira câmara com volume de 6 m<sup>3</sup> e fluxo descendente é denominada zona de mistura rápida, onde são adicionados os produtos químicos para dispersar rapidamente, através da intensa agitação na água, e iniciar a coagulação. Neste ponto são dosados Policloreto de Alumínio (PAC), solução de polímero não iônico e hipoclorito de sódio. Soda cáustica pode ser dosada, se necessário, para ajuste de pH. A mistura avança para segunda região com fluxo ascendente, mistura lenta, com volume de 36 m<sup>3</sup>, por gravidade pelo fundo do tanque. Nesta etapa é possível variar a branda rotação do agitador para permitir apenas adequada suspensão e crescimento dos flocos, sem quebra-los pelo cisalhamento devido ao movimento de agitação. A água floculada segue, também por gravidade, para um decantador lamelar (Clarificador).

Figura 6 – Desenho esquemático do Floculador da unidade industrial UTE\_ST.



Fonte: Adaptado de Enfil (2007).

O clarificador possui volume de  $390 \text{ m}^3$  e está projetado para conferir uma velocidade de ascensão da água inferior à velocidade de decantação dos flocos formados previamente no floculador, permitindo, assim, a separação dos sólidos da corrente líquida. O clarificador possui um espessador gravimétrico que visa concentrar ao máximo, 2% em sólidos, a corrente que alimenta o sistema de desaguamento por centrífugas ( $3,4 \text{ m}^3/\text{h}$ ).

A Tabela 1 apresenta as características básicas do sistema de clarificação da Usina, enquanto a Tabela 2 apresenta os intervalos de valores de algumas propriedades da água a ser tratada para os quais a planta pode operar, de acordo com os dados do seu projeto básico.

Tabela 1—Parâmetros típicos do tratamento de coagulação e floculação instalado na Usina Sepé Tiaraju.

Unidade de Tratamento de água - parâmetros		
<i>Tanque mistura rápida</i>		
Vazão	450	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Tempo de retenção	49	s
Dosagem de coagulante (PAC)	15	mg Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup>
<i>Tanque mistura lenta</i>		
Vazão	450	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Tempo de retenção	4,84	min
<i>Clarificador</i>		
Vazão	450	m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup>
Tempo de retenção	52	min

Fonte: O autor (2017).

Tabela 2— Qualidade da água a ser clarificada, dados do projeto básico.

Parâmetros	Condições Normais	Período de Estiagem	Unidade
Condutividade	94 - 200	67,2 - 419	μS/cm
pH	5,8 - 7,8	4,2 - 7,4	Adimensional
Ferro	1,4 - 2,6	0,62 - 4,14	mg/L Fe
Cloretos	13,26	3,4 - 49,7	mg/L Cl <sup>-</sup>
Sulfatos	2 - 27,5	Não é feito o controle	mg/L SO <sub>4</sub>
Sílica	5 - 33	10,5 - 19	mg/L SiO <sub>2</sub>
Total Alcalinidade	14 - 61	19 - 94	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Dureza Total	16 - 35	15 - 42	mg/L CaCO <sub>3</sub>
Turbidez	10 - 180	2 - 71,4	NTU
Sólidos Totais	125 - 180	89,39 - 557,27	mg/L
Sólidos Dissolvidos	70	Não é feito o controle	mg/L
Sólidos Suspensos	55 - 110	Não informado	mg/L
TOC	3,5 - 7,5	7 - 32,6	mg/L O <sub>2</sub>
Cor	30 - 80	Não é feito o controle	mg/L Pt

Fonte: Enfil (2007).

Esta unidade de tratamento está equipada com sensores online de turbidez e pH na entrada e saída de água do processo e um sensor de pH na saída do floculador. Além disso, amostras são coletadas periodicamente para testes no laboratório para confirmação da qualidade da água processada. Contudo, a unidade de clarificação da UTE-ST não possui referência estabelecida de pH e de dosagem de coagulante. Ela é operada empiricamente através da experiência da equipe de operação. Isto pode resultar em um processo altamente não econômico e prejudicial às etapas seguintes, ou ainda, em caso extremo em grandes descartes de efluentes caso a remoção de partículas seja insuficiente.

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Características da água bruta utilizada na unidade de tratamento

Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados utilizando amostras de água bruta coletadas na corrente de entrada do floculador da Estação de Tratamento de Água (ETA) da usina, está sendo isenta de adição de qualquer produto químico ou reciclo de água de contra lavagem oriunda do processo de retro limpeza dos filtros de areia. A água bruta é proveniente do Rio dos Sinos, em Canoas, RS, Brasil.

As médias históricas das propriedades da água bruta que alimenta a ETA, baseada em dados relativos ao período dos doze meses do ano de 2016, é apresentada na Tabela 3, enquanto a caracterização da amostra de água bruta utilizada nos experimentos de coagulação/floculação é apresentada na Tabela 4. Os dados apresentados nas Tabelas 3 e 4 foram obtidos pelos métodos da Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA/AWWA/WEF, 2012), usando os seguintes equipamentos: turbidímetro 2100P Hach (turbidez), pHmetro Thermo-Scientific VSTAR92 Orion Versastar (pH) e condutivímetro Thermo-Scientific VSTAR92 Orion Versastar (condutividade).

Tabela 3 – Dados de caracterização da água bruta utilizada na UTE-ST.

Parâmetro	Valor médio	Unidade
pH	6,78 ± 0,21	Adimensional
Alcalinidade	31 ± 4,6	ppm CaCO <sub>3</sub>
Condutividade	102 ± 18,7	µS/cm
Turbidez	76 ± 21	NTU

Fonte: UTE-ST (2016)

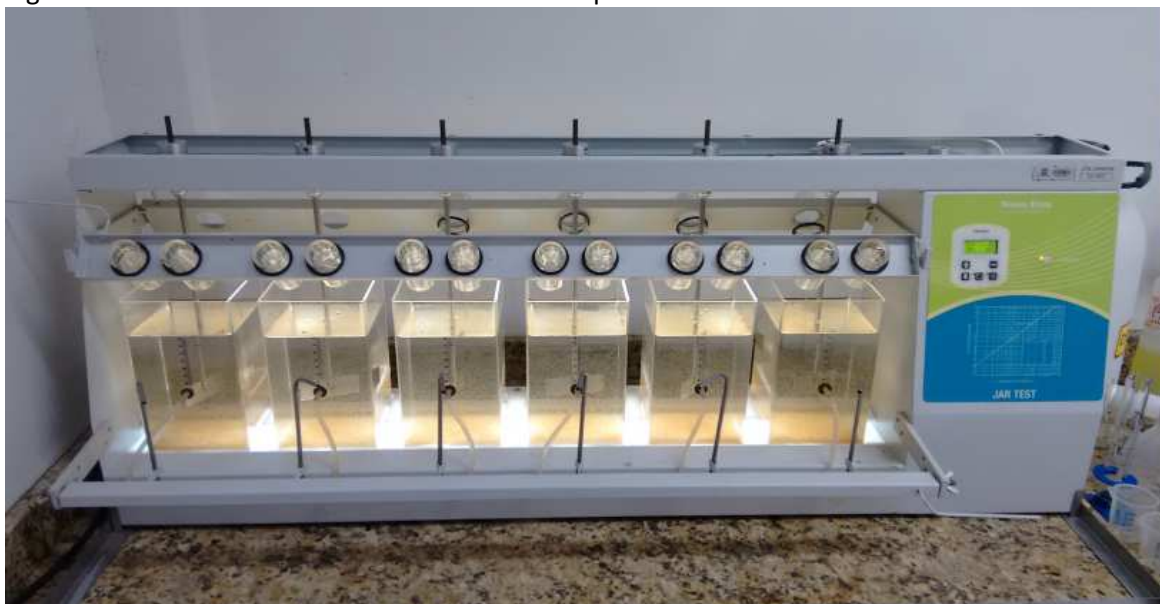
Tabela 4 – Características da água bruta utilizada nos ensaios de Jar Test.

Água bruta	Valor	Unidade
Turbidez	95,5	NTU
Condutividade	62,9	µS/cm
pH	6,41	Adimensional

## 4.2 Ensaios de coagulação e floculação

Os ensaios de coagulação/floculação foram realizados no laboratório de controle de qualidade da Estação de Tratamento de Água (ETA) da usina, usando um Jar Test (Modelo 218/6, NOVA ÉTICA Comp. Ltda, Vargem Gde. Paulista, Brasil) com seis jarros de prova de base quadrada com lado de 150 mm (Figura 7) e agitação provida por turbinas de duas pás finas 50 × 30 (H × W) mm localizadas no centro e 15 cm acima da base de cada jarro. A quantidade de água bruta utilizada em cada jarro foi a de 2 L e os ensaios foram realizados à temperatura ambiente (25 °C ± 3 °C).

Figura 7 – Jar Test do laboratório de controle de qualidade da UTE-ST.



Fonte: O autor (2017).

O teste ficou estruturado com as seguintes condições:  $G = 248 \text{ sec}^{-1}$  durante 2 min para a etapa de mistura rápida,  $G = 15 \text{ sec}^{-1}$  durante 6 min para etapa de mistura lenta e 10 min de sedimentação (FREESE, 2003). Os fatores “G”, gradientes de velocidades, foram calculados a partir da Equação (3), que correlaciona a energia empregada (P) na agitação com o volume (V) e viscosidade ( $\mu$ ) agitados (KEMMER, 1988).

$$\text{Fator } G = \sqrt{\frac{P/V}{\mu}} \text{ s}^{-1} \quad (3)$$

A faixa de pH aplicada nos testes ficou compreendida entre 4 e 8, ajustada com solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1 M e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 0,1 M antes da

adição do coagulante. As quantidades de ácido e base adicionadas foram determinadas por titulação até pH determinado antes de cada corrida realizada.

Após agitação das alíquotas de água bruta durante 1 min, as quantidades de alcalinizante e acidificante pré-determinadas foram adicionadas na suspensão e a mistura agitada por mais 1 min para homogeneização. Então, o coagulante foi adicionado sobre a superfície do líquido dando início a etapa de mistura rápida, seguida pela mistura lenta e sedimentação conforme tempos descritos.

Ao final da mistura rápida, 20 mL de amostra foram coletados para medição de pH. Após a conclusão da etapa de sedimentação, alíquotas de água clarificada foram cuidadosamente coletadas, com pipeta graduada de 20 mL, 10 mm abaixo da superfície do líquido de cada um dos jarros, para realização das medições de turbidez residual.

As dosagens mínimas adicionadas nos ensaios foram adaptadas de Freese (2003) e as máximas baseadas nas dosagens aplicadas na ETA. As quantidades de reagentes utilizadas nos ensaios de Jar Test como variação de dosagem de coagulante estão apresentadas na Tabela 5. Após a descrição destes primeiros ensaios, está também apresentado a descrição dos ensaios com variação de pH (Tabela 6).

Os ensaios foram realizados diariamente, durante 15 dias, entre os dias 30 de maio e 13 de junho de 2017. O período escolhido apresentou dados de qualidade da água bruta dentro das faixas de especificação de projeto e médias históricas do sistema de clarificação, como pode ser observado na comparação dos dados previamente apresentados nas Tabelas 2-4. Os valores de dosagem de coagulante e pH de floculação utilizados para montagem dos experimentos foram baseados na dosagem histórica da ETA. Ainda, investigou-se regiões de pH fora da neutralidade para avaliar seus impactos na eficiência de remoção de turbidez.

O efeito da dosagem de coagulante PACl na eficiência de remoção de turbidez foi investigado usando faixas de pH médios de floculação entre 5,0 e 7,0 para cada corrida. O pH inicial entre os jarros de cada corrida foi equalizado.

Tabela 5 – Descrição dos experimentos realizados no ensaio de Jar Test com variação de dosagem de coagulante.

Jarro	1*	2*	3*	4*	5*	6*
Ensaio 1						
Dosagem (mg/L de PACl)	4	6	8	10	12	14
pH de coagulação	5,36	5,13	5,01	4,92	4,88	4,84
Turbidez (NTU)	15	8,22	5,31	6,89	5,03	6,63
Ensaio 2						
Dosagem (mg/L de PACl)	2	6	10	14	18	22
pH de coagulação	5,93	5,76	5,57	5,43	5,38	5,21
Turbidez (NTU)	58,70	18,92	8,74	9,32	5,14	6,34
Ensaio 3						
Dosagem (mg/L de PACl)	1	2	3	4	5	6
pH de coagulação	6,13	5,96	5,89	5,81	5,77	5,69
Turbidez (NTU)	67,5	66,4	62,7	44	8,6	3,5
Ensaio 4 **						
Dosagem (mg/L de PACl)	3	4	5	6	8	10
pH de coagulação	6,68	6,62	6,57	6,49	6,29	6,14
Turbidez (NTU)	37,9	14,8	4,71	7,06	4,77	6,89
Ensaio 5						
Dosagem (mg/L de PACl)	3	4	5	6	8	10
pH de coagulação	6,56	6,58	6,55	6,47	6,29	6,12
Turbidez (NTU)	42,80	14,80	4,96	6,41	3,96	6,49
Ensaio 6						
Dosagem (mg/L de PACl)	10	12	14	16	18	20
pH de coagulação	7,38	7,03	6,78	6,78	6,7	6,72
Turbidez (NTU)	6,6	4,4	3,1	3,3	3,5	2

\*Utilizado também em todos os ensaios 3 mg/L de hipoclorito de sódio e 0,1 mg/L de polímero não iônico baseado na dosagem histórica da ETA.

\*\*Experimento repetido 3 vezes para estimar o erro experimental.

O efeito do pH na eficiência de remoção de turbidez pelo coagulante PACl foi investigado usando faixas de pH entre 4,5 e 9,5 e dosagens fixadas de coagulante de 5 mg/L, 7 mg/L, 10 mg/L e 20 mg/L de PACl em cada corrida realizada (Tabela 6).



Tabela 6 - Descrição dos experimentos realizados no ensaio de Jar Test com variação de pH de floculação e fixadas as dosagens de coagulante.

Jarro	1*	2*	3*	4*	5*	6*
Dosagem (mg/L de PACl)	5	5	5	5	5	5
pH de floculação	5,54	6,07	6,54	7,08	7,50	8,03
Turbidez (NTU)	10,20	7,80	6,00	8,50	6,10	16,70
Dosagem (mg/L de PACl)	7	7	7	7	7	7
pH de floculação	6,52	6,64	6,86	8,22	9,47	10,14
Turbidez (NTU)	6,52	4,69	5,71	40,40	40,80	46,00
Dosagem (mg/L de PACl)	10	10	10	10	10	10
pH de floculação	4,31	4,72	5,47	5,88	6,06	6,23
Turbidez (NTU)	13,70	29,10	10,30	4,75	3,47	3,79
Dosagem (mg/L de PACl)	20	20	20	20	20	20
pH de floculação	4,48	4,75	5,11	5,36	5,40	5,77
Turbidez (NTU)	46,20	44,59	22,53	22,45	22,48	4,77

\*Utilizado também em todos os ensaios 3 mg/L de hipoclorito de sódio e 0,1 mg/L de polímero não iônico baseado na dosagem histórica da ETA.

### 4.3 Testes de coagulação e floculação na planta industrial

Após a realização dos ensaios em escala de bancada, partiu-se para execução dos testes na ETA, para avaliar se os pontos ótimos de dosagem e pH determinados no Jar Test apresentam respostas de desempenho similares quando testados em escala industrial. A Tabela 7 apresenta o escopo do teste. Foi variada a dosagem de coagulante (PACl), de 10 até 5 mg/L, durante a produção de água clarificada na unidade em estudo para viabilizar a investigação da eficiência de remoção de turbidez em modo contínuo de operação.

Tabela 7 – Descrição do teste no processo industrial da Estação de Tratamento de Água da UTE-ST com variação da dosagem de coagulante (PACl).

Teste	1	2	3	4
PACl mg/L	10	8	7	5
Hipoclorito de Sódio mg/L	3	3	3	3
Polímero não iônico mg/L	0,1	0,1	0,1	0,1
Condutividade água bruta $\mu\text{S}/\text{cm}$	75,1	73,1	79,3	80,9
pH de floculação	5,75	5,96	5,79	6,06
Turbidez (NTU)	10,3	9,83	7,08	8,3

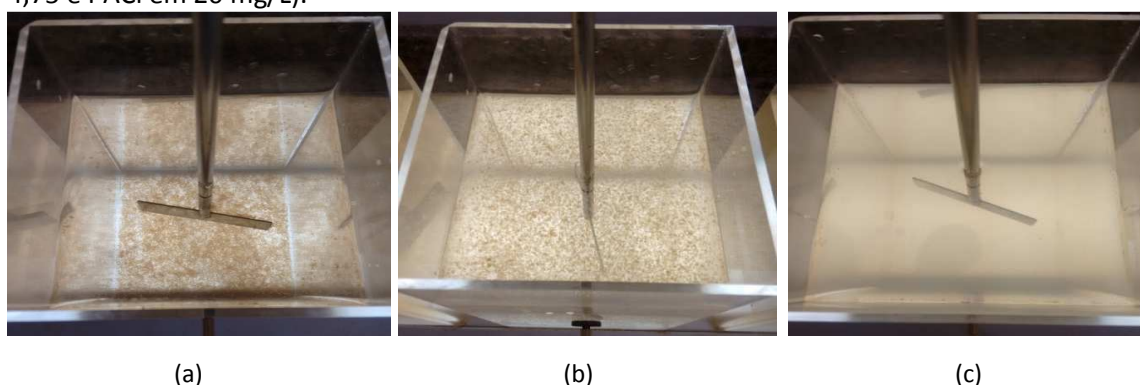
## 5 Resultados

Serão apresentados primeiramente os resultados obtidos os resultados obtidos durante a realização dos experimentos de Jar Test para avaliar parâmetros de coagulação/floculação (Seção 5.1). Posteriormente, é feita análise do teste em escala industrial, realizado na estação de tratamento de água da UTE-ST (Seção 5.2).

### 5.1 Investigação das condições ótimas de coagulação por meio do Jar Test

Os experimentos com variação de dosagem de coagulante permitiram identificar três níveis de respostas visuais com relação à sedimentação: (a) floco bem definido e com excelente sedimentação (tempo de sedimentação < 2 min); (b) tamanho de floco intermediário e com boa sedimentação (tempo de sedimentação < 5 min); e (c) não formação de flocos ou formação de flocos de tamanho insuficientemente para permitir observação visual, sem ocorrência de sedimentação. Exemplos destes três tipos de resposta são apresentados na Figura 8.

Figura 8 – Três tipos de resposta visual observados no ensaio de Jar Test: (a) floco bem definido e com excelente sedimentação (< 2 min) (pH de coagulação 5,77 e PACl em 20 mg/L); (b) tamanho de floco intermediário e com boa sedimentação (< 5 min) (pH de coagulação 6,64 e PACl em 7 mg/L); e (c) tamanho de floco deficiente onde a sedimentação não ocorreu (pH de coagulação 4,75 e PACl em 20 mg/L).

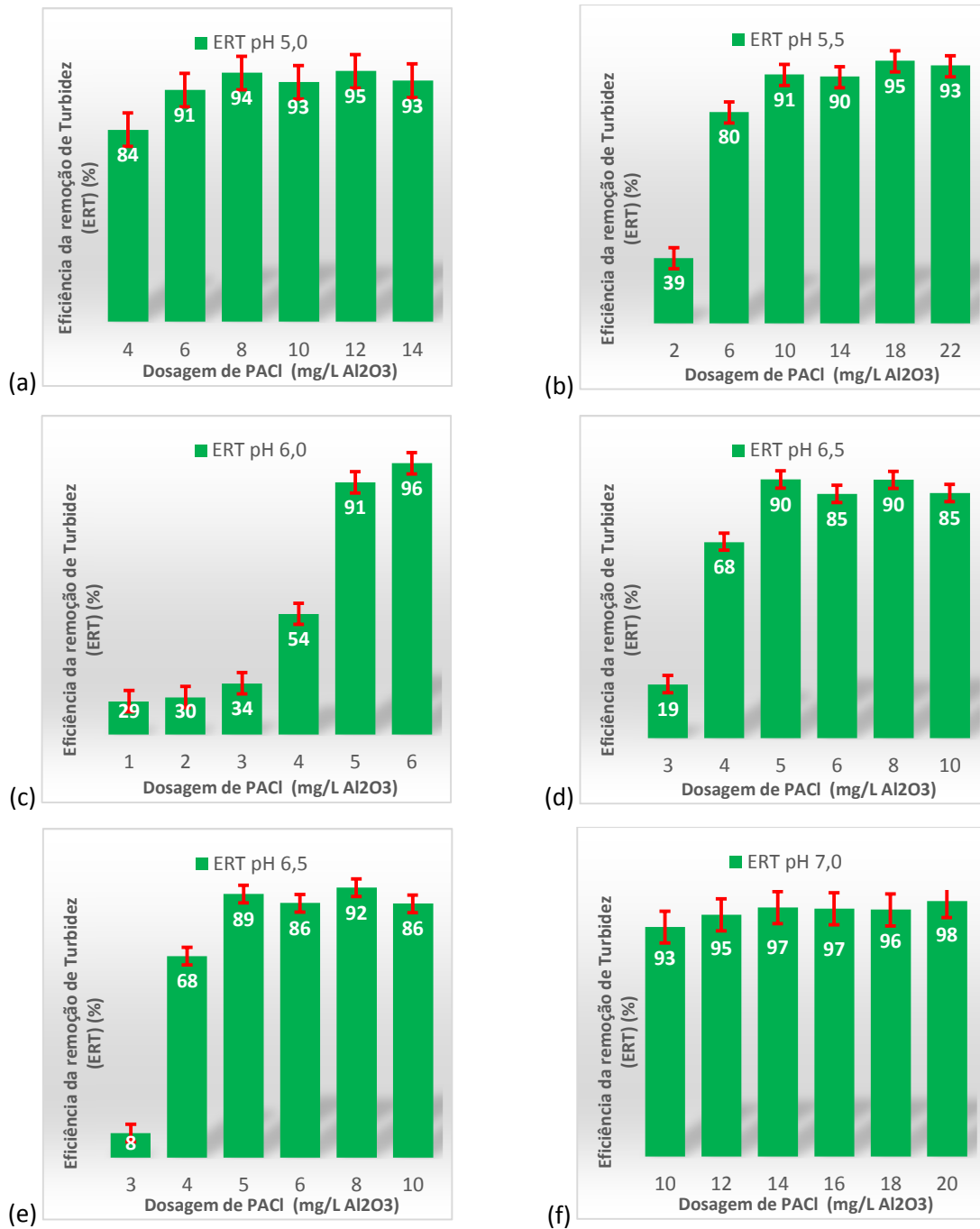


A seguir são discutidos separadamente os efeitos quantitativos da dosagem de coagulante e do pH na etapa de coagulação, utilizando como base de análise a eficiência de remoção de turbidez.

### 5.1.1 Influência da dosagem de coagulante PACI

Após a realização dos ensaios de Jar Test foi possível calcular as eficiências obtidas para cada condição de dosagem de coagulante. Os resultados para eficiência de remoção de turbidez (ERT) estão apresentados na Figura 9.

Figura 9 - O efeito da dosagem de coagulante na eficiência de remoção de turbidez para cada pH médio de floculação testado.



A avaliação dos resultados de ERT permite notar bons níveis de remoção (>80%) de turbidez para grande maioria das concentrações utilizadas. Os resultados expõem notoriamente que, para faixa de dosagem investigada, a eficiência na remoção de turbidez aumenta com o aumento da dosagem de PACl, até atingir um valor limite a partir de aproximadamente 6 mg/L de coagulante (teste T, significância 0,05 - para condição de pH 6,5), o qual está em torno de 90% de remoção.

De acordo com as recomendações do manual de operação da ETA, a turbidez da água na saída do clarificador deve ser menor que 10 NTU para atender a especificação antes de passar pelos filtros de areia. Assim sendo, a dosagem *ótima*, encontrada em escala de bancada, pode ser considerada a de 5 mg/L de PACl, a qual atendeu esta especificação de turbidez para a maioria dos valores de pH investigados. Esta escolha está norteada no fato de que, com esta concentração, foram atingidos valores que atendem a principal restrição operacional da clarificação, turbidez residual abaixo de 10 NTU, e também conciliou o menor consumo de coagulante para suprir esta especificação. É válido lembrar que uma dosagem menor é benéfica além do custo do coagulante, diretamente proporcional ao seu consumo. Dosagens menores de coagulante na clarificação também implicam em menor condutividade no efluente do tratamento (Tabela 8). Isto é profundamente desejável, tendo em vista que um dos processos consecutivos da clarificação é o de desmineralização por resinas de troca iônica.

Tabela 8 – Resposta da condutividade frente à dosagem de coagulante.

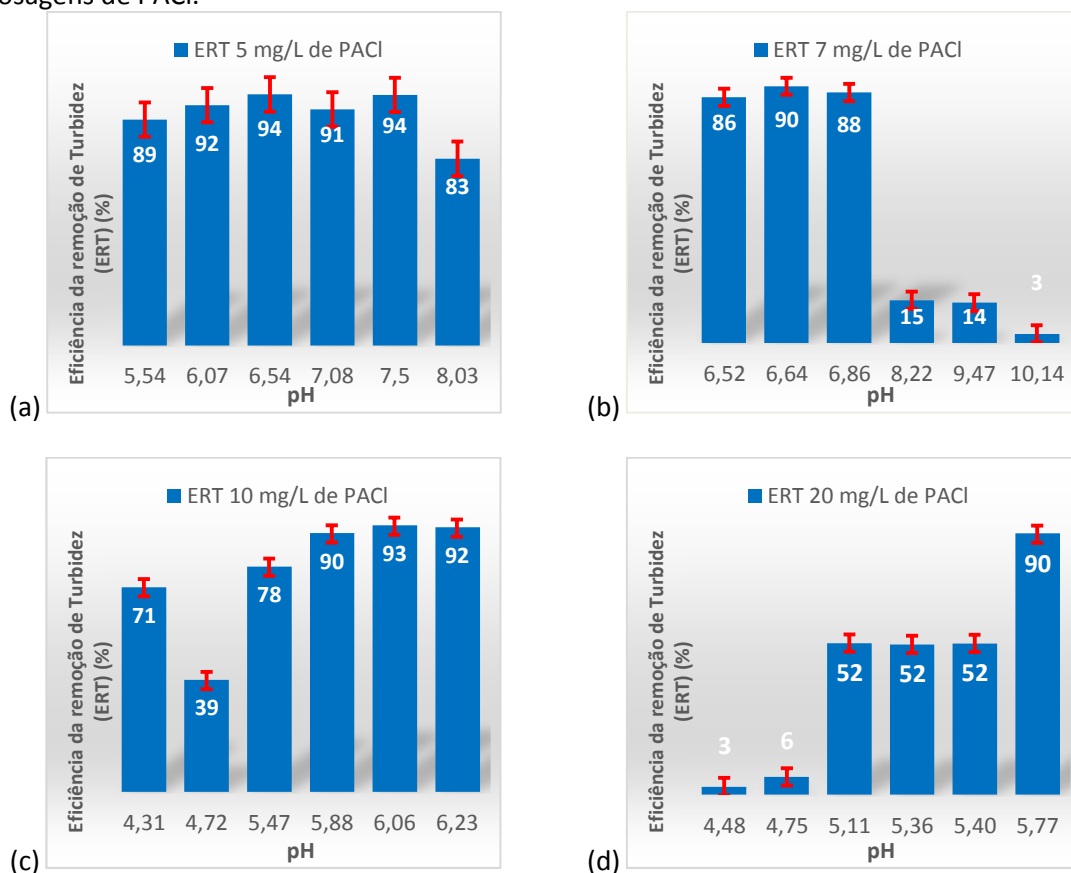
Jarro	Bruta	1	2	3	4	5	6
Dosagem PACl mg/L	0	3	4	5	6	8	10
Condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}$	63,8	84,8	86,1	88,4	92,0	97,0	100,9
Repetição							
Dosagem PACl mg/L	0	3	4	5	6	8	10
Condutividade $\mu\text{S}/\text{cm}$	63,9	83,0	84,9	87,8	90,8	96,1	100,5

### 5.1.2 Influência do pH na coagulação com PACl

Os resultados para eficiência de remoção de turbidez frente à variação de pH estão apresentados abaixo (Figura 10). Observa-se uma grande influência do pH no comportamento de coagulação, principalmente nas regiões distantes da neutralidade. O intervalo de pH entre 5,5 e 7,5 mostrou-se como região mais favorável para realizar a coagulação, pois equivaleu a região com maior regularidade e com maiores eficiências de

remoção como mostrado nas Figura 10. Na faixa de pH de 8 – 10, flocos muito pequenos foram lentamente formados e praticamente não houve sedimentação, com a eficiência de remoção ficando na faixa de 3 – 15 %.

Figura 10 – O efeito do pH de coagulação na eficiência de remoção de turbidez com diferentes dosagens de PACI.



O fato de a região da neutralidade ter proporcionado remoções mais eficientes está de acordo com a conclusão obtida por Matsui et al. (2017) no estudo das características e componentes do PACI que aprimoram a coagulação para remoção de arseniato. Estes autores afirmaram que o PACI tende a produzir bons flocos no intervalo de pH entre 5 e 7, o que resulta em boa separação sólido líquido através da sedimentação. Ainda, é interessante notar que, embora a região de pH considerada satisfatória quanto à remoção de turbidez (>80%), esteja bem definida entre 5,5 e 7,5, boa formação de flocos e razoável eficiência foram também encontrados em pH elevado da neutralidade, como o de 8,03 (Figura 10 a) com 83% respectivamente.

Os menores valores de ERT nas faixas de pH compreendidas entre 4 e 5 (Figura 10d) e entre 8 e 10 (Figura 10 b) estão de acordo com o que foi proposto por Duan e

Gregory (2003), que ressaltaram que condições com valores reduzidos de pH podem causar a inversão de cargas presentes na matéria orgânica e restabilização da eletrosfera em sua revisão de mecanismos de coagulação com coagulantes de sais inorgânicos e compostos pré-hidrolizados, e por Amuda et. al (2006), que enfatizaram que valores pH elevados (acima de 8) podem resultar em contaminantes orgânicos fortemente carregados com cargas negativas, onde a adsorção entre as partículas promovida pela ação de desestabilização da superfície eletrostática pelo coagulante estaria impedida em seu estudo de coagulação no efluente de uma indústria de bebidas.

Foi de suma importância monitorar essas regiões limitantes de pH onde a sedimentação praticamente não ocorreu, como anteriormente observado na Figura 8 (c), para obtenção dos limites operacionais. Limites estes, que não devem ser cruzados durante o processamento na unidade industrial. Desta forma, evitando a operação em região de baixa eficiência (< 80%), sob pena de produzir água clarificada fora de especificação, com turbidez acima de 10 NTU. A consequência imediata dessa condição seria sobrecarga da etapa seguinte de filtração nos leitos de areia, ou ainda, em um pior cenário, a necessidade de grande descarte do efluente de tratamento até seu enquadramento.

Tendo isto posto, a faixa ótima de pH de floculação apontada pelos testes de bancada, pode ser considerada a de 5,5 a 7,5, a qual atendeu a especificação de turbidez para a maioria dos valores de dosagem de coagulante utilizados. Porém, como historicamente a água bruta, que abastece o sistema de tratamento, apresenta pH levemente acidificado (Tabela 3), recomenda-se o uso da faixa de pH de floculação de 5,5 e 6,7 guiada pelo fato de que, com esta faixa de pH, foram atingidos valores de ERT que atendem a principal restrição operacional da clarificação, turbidez residual abaixo de 10 NTU, e também conciliam o menor consumo de compostos químicos para ajuste de pH.

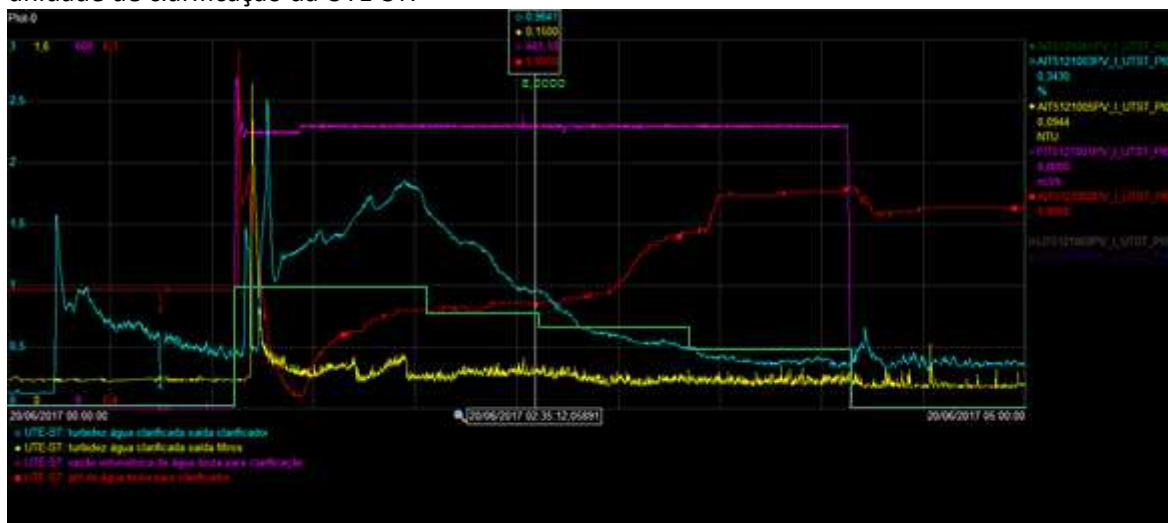
## **5.2 Teste da dosagem ótima de coagulante na unidade industrial**

Abaixo são apresentados os resultados dos testes realizados na estação de tratamento de água da UTE-ST.

O primeiro teste (Figura 11), realizado com variação de dosagem de PACl, permitiu comparar os resultados encontrados em bancada com os da unidade industrial, e

confirmar a boa representatividade dos mesmos para estimar o comportamento do processo, com relação ao coagulante dosado.

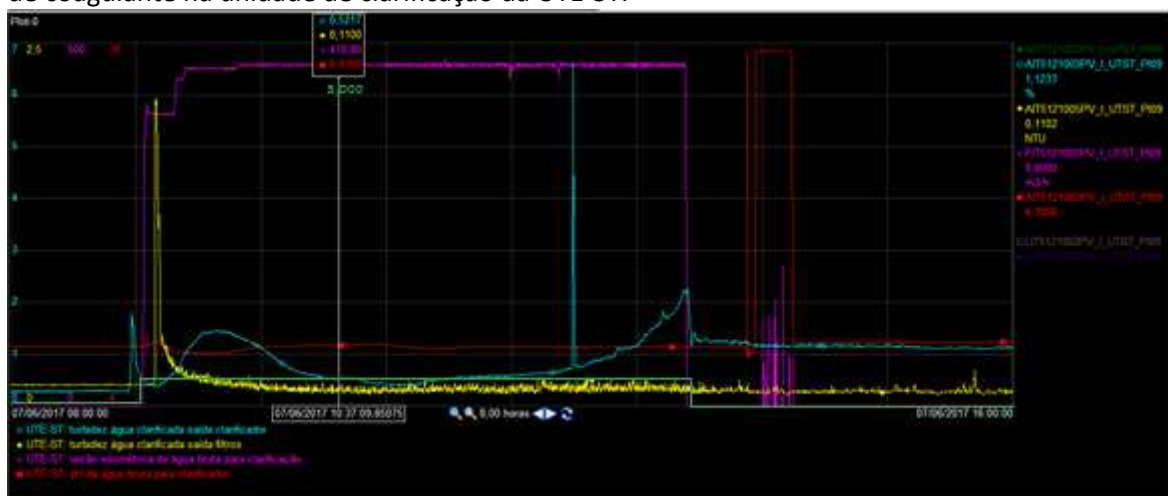
Figura 11 – Teste de operação monitorados online para validação das dosagens de coagulante na unidade de clarificação da UTE-ST.



\*Roxo – vazão de entrada de água bruta no Floculador, azul – turbidez residual, vermelho – pH de floculação, verde – dosagem de coagulante, amarelo – turbidez de saída da clarificação após etapa de filtração.

O segundo teste (Figura 12) operado com pH médio de floculação de 6,06, também monitorado pelo software historiador, foi realizado para repetir apenas a condição única de dosagem de 5 mg/L PACl. Obteve-se uma média de eficiência remoção de turbidez ficou próxima ao valor de 85 % novamente atendendo a especificação de turbidez < 10 NTU.

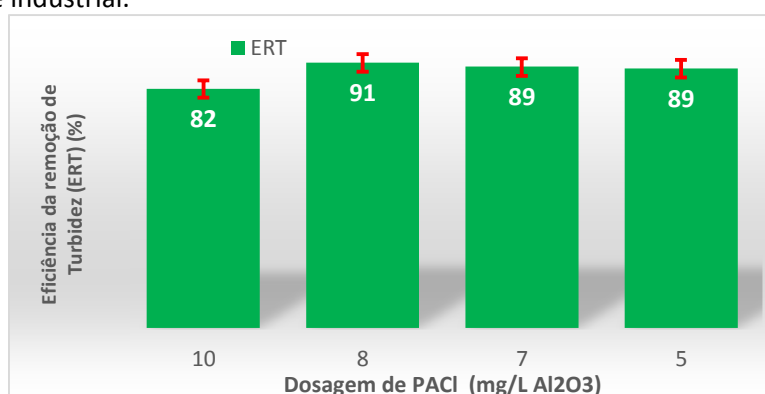
Figura 12 - Teste de operação monitorados online para repetir validação da dosagem de 5 mg/L de coagulante na unidade de clarificação da UTE-ST.



\*Roxo – vazão de entrada de água bruta no Floculador, azul – turbidez residual, vermelho – pH de floculação, verde – dosagem de coagulante, amarelo – turbidez de saída da clarificação após etapa de filtração.

Os resultados obtidos nos testes a unidade industrial com relação a ERT, representados nas Figura 11 e 12, estão demonstrados na Figura 13. Baseado nesses resultados evidenciou-se que as seguintes condições: (i) dosagem de 5 mg/L de coagulante PACl e (ii) pH de floculação entre 5,5 e 6,7 foram suficientes para conferir uma eficiência de remoção de turbidez superior a 80 % com turbidez residual inferior a 10 NTU.

Figura 13 – Resposta do teste de eficiência de remoção de turbidez com diferentes dosagens de PACl na unidade industrial.



É possível notar que em dosagens superiores a de 7 mg/L de coagulante, nenhum aumento relevante de eficiência foi observado durante os novos incrementos de coagulante até 10 mg/L.

Finalmente, a eficiência máxima de remoção de turbidez obtida foi de 91 %, e o valor de 5 mg/L de dosagem de coagulante, estimado em escala de bancada e validado na unidade industrial, permitiu observar uma redução de 29 % na dosagem de coagulante, empregada no período monitorado, para a unidade industrial.



## 6 Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Este trabalho realizou a avaliação do sistema de clarificação de uma estação de tratamento de água bruta de uma termelétrica, situada na cidade de Canoas.

A partir dos dados históricos de operação da unidade de clarificação foi possível caracterizar a água bruta recebida para tratamento e realizar um monitoramento atualizado de dosagens.

A avaliação experimental das condições ótimas de dosagem e de pH foi feita em duas etapas, com experimentos em Jar Test, seguidos de um conjunto adicional de teste na planta industrial.

Os experimentos de Jar Test permitiram avaliar a eficiência de remoção de turbidez nas faixas de pH de coagulação e de dosagem de coagulante PACl historicamente usadas na empresa e ainda identificar fronteiras nos valores de pH que não devem ser ultrapassadas para que ocorra boa formação dos flocos coagulados e consequente sedimentação. Estes experimentos sugeriram como condição ótima de processo, a aplicação de 5 mg/L de coagulante PACl, 0,1 mg/L de polímero não iônico e pH de floculação em 6 aproximadamente. Estes parâmetros foram suficientes para conferir efetivamente remoção de turbidez próxima a 90% e atender a especificação da água clarificada (turbidez < 10 NTU).

A dosagem de 5 mg/L de coagulante permitiu uma redução de 29 % na dosagem de coagulante na unidade industrial. Contudo, eficiências maiores foram observadas também em outras regiões de pH (ERT= 93 %, pH= 7,0). Porém, este aumento de remoção implicou em maior consumo de coagulante (10 mg/L) e uso de alcalinizante para ajuste de pH. Foi possível determinar através dos testes de bancada regiões limites de pH (pH < 5,5 e pH > 8,0) onde o processo pode apresentar forte deficiência de remoção de turbidez e provável impacto nas etapas seguintes de filtração e desmineralização.

De modo geral, uma dosagem baixa de cloreto de polialumínio permitiu uma redução satisfatória de contaminantes na água tratada. Nesse contexto, o uso de PACl associado a um polímero não iônico, operado em faixa de pH levemente acidificado

(próximo a neutralidade) sem adição de corretor de pH, pois a água bruta já apresenta leve acidez, promove uma boa relação de consumo e turbidez residual.

Recomenda-se examinar, em trabalhos futuros, alguns aspectos relacionados à influência do tempo de retenção no floculador, influência da velocidade de agitação, tempo de armazenamento dos reagentes, alcalinidade da água bruta. Ainda, de modo a permitir a redução do uso de compostos com metais pesados e expandir a pesquisa sobre tratamento de água, seria de grande valia analisar a possibilidade de substituir o coagulante inorgânico com alumínio por um de origem orgânica, a exemplo do tanino.

## Referências

AMUDA, O. S.; AMOO, I. A.; AJAYI, O. O. Performance optimization of coagulant/flocculant in the treatment of wastewater from a beverage industry. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1–3, p. 69–72, 2006.

APHA/AWWA/WEF. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. **Standard Methods**, p. 541, 2012.

ARAGONÉS-BELTRÁN, P.; MENDOZA-ROGAB, J.A.; BES-PIÁA, A.; GARCÍA-MELÓN, M.; PARRA-RUIZ, E. Application of multicriteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical-chemical treatment of textile wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 164, n. 1, p. 288–295, 2009.

BINDU, C. A.; MOHAMED, A. R. Water Bodies as a Catalyst to Growth and Development-The Case of Kodungallur Town, Kerala. **Procedia Technology**, v. 24, p. 1790–1800, 2016.

DI BELLA, G.; GIUSTRA, M. G.; FRENI, G. Optimisation of coagulation/flocculation for pre-treatment of high strength and saline wastewater: Performance analysis with different coagulant doses. **Chemical Engineering Journal**, v. 254, p. 283–292, 2014.

DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 100–102, n. SUPPL., p. 475–502, 2003.

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

GREGORY, J.; DUPONT, V. Properties of flocs produced by water treatment coagulant. **Water Science and Technology**, v. 44, n. 10, p. 231–236, 2001.

KEMMER, F. N. **The NALCO Water Handbook**, 1988.

LANCINÉ, G. D.; BAMORY, K.; RAYMOND, L.; JEAN-LUC, S.; CHRISTELLE, B.; JEAN, B. Coagulation-flocculation treatment of a tropical surface water with alum for dissolved organic matter (DOM) removal: Influence of alum dose and pH adjustment. **Journal of International Environmental Application & Science**, v. 3, n. 4, p. 247–257, 2008.

LETTERMAN, R. D. **Water Quality and Treatment: A Handbook of Community Water Supplies**, v. 331, 1999.

LIBÂNIO, M.; PEREIRA, M.; VORCARO, B. Avaliação do emprego de sulfato de alumínio e do cloreto férrico na coagulação de águas naturais de turbidez média e cor elevada. **Sanitária e Ambiental**, p. 1365–1373, 1997.

MATSUI, Y.; SHIRASAKI, N.; YAMAGUCHI, T.; KONDO, K.; MACHIDA, K.; FUKUURA, T.; MATSUSHITA, T. Characteristics and components of poly-aluminum chloride coagulants that enhance arsenate removal by coagulation : Detailed analysis of aluminum species. **Water Research**, v. 118, p. 177–186, 2017.

PADILHA, D. J.; CERUTI, F. C.; VIDAL, M. D.; MARTINS, C. H. Análise Da Utilização De Três

Diferentes Coagulantes Na Remoção Da Turbidez De Água De Manancial De Abastecimento. **VII Encontro Internacional de Produção Científica Cesumar**, p. 5, 2011.

S. D. FREESE, D. L. T. AND D. J. N. Manual for Testing of Water and Wastewater Treatment. n. April, p. 20–30, 2003.

SCHOLZ, M. Coagulation and Flocculation. **Wetlands for Water Pollution Control**, p. 37–46, 2016.

WANG, J.; ZHANG, Z.; LIU, D.; LI, J.; WANG, X.; SONG, B.; YUE, B.; ZHAO, K.; SONGET, Y. Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. **Jes**, n. November, p. 1–8, 2016.

SATTERFIELD, P.E. Jar Testing. **Tech Brief**, v. 5, n. 1, p. 1–4, 2005.

ENFIL. **Manual de Operação da Estação de Tratamento de Água UTE-ST**, 2007.