



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



Padronização do Uso de Policloreto de Alumínio e Poliacrilamida em uma ETA de Porto Alegre

Autora: Larissa Cagliari

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Liliana Amaral Féris

Porto Alegre, dezembro de 2018

Sumário

Agradecimentos	4
Resumo	5
Lista de Figuras	6
Lista de Tabelas	7
Lista de Símbolos	8
Lista de Abreviaturas e Siglas	9
1 Introdução	10
2 Objetivos	12
2.1 Objetivo Geral	12
2.2 Objetivos Específicos	12
3 Revisão Bibliográfica	13
3.1 Remoção de impurezas da água	13
3.2 Parâmetros de qualidade	14
3.2.1 Parâmetros físicos	15
3.2.2 Parâmetros Químicos	15
3.2.3 Parâmetros Biológicos	16
3.2.4 Legislação	16
3.3 Sistema de Tratamento	17
4 Materiais e Métodos	23
4.1 Local e Amostragem	23
4.2 Reagentes	23
4.3 Análises Físico-Químicas	24
4.3.1 Turbidez	24
4.3.2 pH	24
4.3.3 Alcalinidade	24
4.3.4 Cor aparente	24
4.4 Teste de Jarros	25
5 Resultados	29
5.1 Diagnóstico do processo na ETA	29
5.1.1 Turbidez da Água Bruta	29
5.1.2 Dosagem de PAC	30
5.1.3 Aplicação de Polímero	31
5.2 Testes de Jarros	32
5.2.1 Caracterização das Amostras de Água Bruta	32
5.2.2 Definição das Dosagens de PAC a serem analisadas no Teste de Jarros	33
5.2.3 Testes de Jarros com a Amostra 1 (Turbidez inicial = 39,5 NTU)	33
5.2.4 Testes de Jarros com a Amostra 2 (Turbidez inicial = 84,6 NTU)	37
5.2.5 Testes de Jarros com a Amostra 3 (Turbidez inicial = 136 NTU)	39
5.2.6 Testes de Jarros com a Amostra 4 (Turbidez inicial = 262 NTU)	40
5.2.7 Avaliação Geral	43

5.3	Sugestão de Procedimento Operacional	43
5.4	Avaliação Econômica	44
6	Conclusões	46
7	Referências	47
8	ANEXO A	49

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, Susana e Claudio, minha fonte de forças, pela educação, apoio, amor e por me incentivarem a batalhar por meus sonhos.

A minha irmã e melhor amiga, Letícia, que me entende como ninguém e sempre se manteve ao meu lado.

Aos demais familiares, por acreditarem na minha capacidade e torcerem pelo meu sucesso.

Aos meus amigos, por compreenderem minhas ausências, ouvirem meus desabafos e garantirem momentos de alegria.

Aos colegas de trabalho e amigos do DMAE, pelas trocas de plantão e por me cobrirem nas diversas vezes que precisei ir às aulas, estudar para as provas e realizar os experimentos desse trabalho de diplomação.

Aos colegas de UFRGS, por me mandarem os conteúdos das muitas aulas que faltei e me auxiliarem nas dúvidas. Realmente não foi fácil conciliar trabalho e um curso de engenharia química nessa universidade.

A professora orientadora, Dr^a. Liliana Amaral Féris, por aceitar o convite de uma aluna que mal conhecia, pelos abraços carinhosos e reconfortantes, por todo conhecimento compartilhado e pela ajuda inestimável na execução desse trabalho.

Resumo

A água é um recurso natural de valor inestimável, essencial para manutenção da vida na Terra. Aplicada em atividades domésticas, agrícolas e industriais, seu consumo acentua-se com o crescimento populacional. A produção exagerada e a destinação inadequada de resíduos sólidos urbanos e efluentes contribuem para a poluição de muitos cursos d'água. No Brasil, parâmetros de qualidade da água para consumo são definidos pelo Ministério da Saúde na Portaria Nº 2.914/11, visando garantir a segurança e a saúde da população. Para atender esses critérios, existem Estações de Tratamento de Água (ETA's), as quais captam a água bruta de recursos hídricos a fim de torná-la potável. Entre as etapas desse processo encontram-se a coagulação e a floculação, onde se aplicam produtos químicos para remoção de impurezas solúveis e em suspensões oriundas da fonte de captação. Neste contexto, o presente estudo objetivou padronizar o uso do coagulante policloreto de alumínio (PAC) e do floculante poliacrilamida (polímero) em uma ETA de Porto Alegre, baseando-se no valor de turbidez da água captada. Desse modo, buscam-se concentrações que proporcionem um tratamento eficiente e econômico. O objetivo foi alcançado através da análise de dados de operação da ETA no período de junho a setembro de 2018 e da realização de experimentos no equipamento teste de jarros. Amostras de água bruta foram coletadas, testadas e caracterizadas quanto à turbidez, pH, alcalinidade e cor aparente. Os resultados mostraram que, para as faixas de turbidez da água bruta até 50 NTU, de 50 a 100 NTU e acima de 100 NTU, as dosagens de PAC devem ser 18, 21 e 24 mg/L, respectivamente. Ou seja, o aumento da turbidez influencia na dosagem de reagente aplicado. No que se refere ao polímero, os resultados obtidos nos experimentos indicam a utilização da concentração de 0,2 mg/L, mas apenas para casos de turbidez superior a 100 NTU. Comparando esses valores com os dados coletados na operação real, observou-se que a economia de reagente seria de pelo menos 22% para o PAC e de 50% para o polímero. Concluiu-se que é possível tratar a água captada no Lago Guaíba com dosagens mais econômicas de produtos químicos e, ainda assim, garantir uma água potável de qualidade aos habitantes da cidade.

Palavras chave: coagulação, floculação, PAC, poliacrilamida, água potável.

Lista de Figuras

Figura 3.1: Atuação do coagulante e do floculante no tratamento de água.....	14
Figura 3.2: Fluxograma do processo de tratamento de água na ETA.....	18
Figura 3.3: Calha para aplicação do coagulante na ETA.....	19
Figura 3.4: Tubo perfurado para dosagem do floculante na ETA.....	20
Figura 3.5: Decantador superpulsator da ETA.....	21
Figura 3.6: Filtro de areia da ETA.....	22
Figura 4.1: Equipamento teste de jarros Nova Ética.....	25
Figura 4.2: Linhas do tempo dos testes de jarros com adição somente de PAC e com adição de PAC e polímero.....	26
Figura 4.3: Fluxograma da metodologia empregada nos testes de jarro.....	27
Figura 5.1: Gráfico da variação da turbidez média diária da água bruta entre os meses de junho e setembro de 2018.....	29
Figura 5.2: Gráfico da dosagem de PAC em função da turbidez da água bruta entre os meses de junho e setembro de 2018.....	30
Figura 5.3: Amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU) antes do teste de jarros.....	34
Figura 5.4: Início da decantação dos flocos formados pela adição de PAC na amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU).....	34
Figura 5.5: Teste de jarros com aplicação combinada de PAC e polímero na amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU).....	36
Figura 5.6: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) antes do teste de jarros.....	40
Figura 5.7: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) após teste de jarros com PAC.....	41
Figura 5.8: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) após teste de jarros com PAC e polímero.....	42

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Especificações do processo de tratamento de água	17
Tabela 4.1: Programação quanto à agitação no equipamento teste de jarros	25
Tabela 4.2: Classificação quanto ao tamanho dos flocos	28
Tabela 4.3: Classificação quanto a velocidade de decantação dos flocos.....	28
Tabela 5.1: Faixas de PAC aplicadas para diferentes intervalos de turbidez da água bruta	31
Tabela 5.2: Dados operacionais referentes ao processo com e sem aplicação de polímero	31
Tabela 5.3: Caracterização das amostras de água bruta	32
Tabela 5.4: Dosagens de PAC analisadas no teste de jarros.....	33
Tabela 5.5: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 1 (turbidez inicial=39,5 NTU)	35
Tabela 5.6: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 1 (turbidez inicial=39,5 NTU)	36
Tabela 5.7: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 2 (turbidez inicial=84,6 NTU)	37
Tabela 5.8: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 2 (turbidez inicial=84,6 NTU)	38
Tabela 5.9: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 3 (turbidez inicial=136 NTU)	39
Tabela 5.10: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 3 (turbidez inicial=136 NTU)	40
Tabela 5.11: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 4 (turbidez inicial=262 NTU).....	41
Tabela 5.12: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 4 (turbidez inicial=262 NTU)	42
Tabela 5.13: Dosagens de PAC e polímero indicadas conforme turbidez da água bruta... 44	
Tabela 5.14: Dosagens médias de PAC conforme turbidez da água bruta utilizadas entre junho e setembro de 2018	45
Tabela 8.1: Dados operacionais da ETA nos meses de junho a setembro de 2018.....	49

Lista de Símbolos

<	menor que
=	igual a
>	maior que
cm/s	centímetros por segundo
g/L	gramas por litro
h	horas
Kg	quilogramas
Km	quilômetros
L	litros
M	molar (número de mols por litro)
mg/L	miligramas por litro
min	minutos
mL	mililitros

Lista de Abreviaturas e Siglas

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto

EBAB – Estação de Bombeamento de Água Bruta

ETA – Estação de Tratamento de Água

NTU – Unidade Nefelométrica de Turbidez

PAC – Policloreto de Alumínio

pH – Potencial Hidrogeniônico

PRT MS/GM – Portaria do Ministério da Saúde / Gabinete do Ministro

RPM – Rotação Por Minuto

1 Introdução

A água é um recurso natural de valor inestimável, sendo essencial para a ocorrência dos ciclos biológicos, geológicos e químicos na Terra. Cerca de 70% do corpo humano é formado por água, estimando-se que as pessoas não sobreviveriam mais de sete dias sem hidratação. Torna-se importante observar que as condições de saúde dos indivíduos estão vinculadas à qualidade da água ingerida.

Utilizada para ingestão, atividades domésticas e industriais, a água é solvente universal e pode solubilizar incontáveis compostos, tanto benéficos quanto tóxicos. O crescimento populacional aliado à má gestão dos resíduos sólidos e efluentes provoca a poluição dos recursos hídricos. A fim de evitar a contaminação e a propagação de doenças, existem parâmetros de qualidade que definem as características da água para cada fim.

Para que se possa dispor de água potável torna-se necessário tratá-la de forma eficiente objetivando preencher a alta demanda existente. Diversos tipos de sistemas de tratamento podem ser aplicados para alcançar as características desejadas, dependendo principalmente da sua origem. Na cidade de Porto Alegre (RS) e em inúmeros outros locais existem Estações de Tratamento de Água (ETA's), as quais preparam a água para consumo humano. São utilizadas etapas químicas e físicas para transformar água bruta, captada de rio ou lago, em potável.

O Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) é uma autarquia, ou seja, tem autonomia financeira em relação à prefeitura, sendo responsável pela captação, tratamento e distribuição de água em Porto Alegre (RS). O órgão conta com seis ETA's, capacitadas para abastecer a população da cidade. O estudo apresentado nesse trabalho foi desenvolvido em uma dessas estações.

Entre os produtos químicos utilizados no tratamento, encontram-se os coagulantes e floculantes, que atuam na remoção das partículas em suspensão. O uso do coagulante é essencial e sua concentração depende do valor da turbidez da água bruta, que pode ser bastante variável. Já o floculante atua como um auxiliar, sua aplicação é opcional.

A falta de um procedimento padrão para dosagem desses compostos resulta em um modo de operação individualizado conforme convicções de cada operador. Nesse

contexto, o presente trabalho objetiva estabelecer uma padronização quanto ao uso de reagentes em uma das ETA's da cidade para facilitar a operação do sistema, garantindo a qualidade da água tratada e otimizando o uso dos insumos.

2 Objetivos

Esse estudo de caso tem o intuito de tornar o modo de operação de uma ETA no município de Porto Alegre mais padronizado e econômico.

2.1 Objetivo Geral

O objetivo fim desse estudo consiste em padronizar o uso de policloreto de alumínio (PAC) e poliacrilamida (polímero) em uma ETA de Porto Alegre com base na turbidez da água bruta captada.

2.2 Objetivos Específicos

- Avaliar os valores de turbidez da água captada no período de junho a setembro na ETA estudada, a fim de estabelecer faixas de turbidez de estudo;
- Fazer um levantamento das concentrações de PAC utilizadas na ETA de Porto Alegre estudada durante os meses de junho, julho, agosto e setembro de 2018, relacionando-as aos valores de turbidez da água bruta;
- Definir concentrações do coagulante PAC e realizar experimentos no equipamento teste de jarros, buscando determinar as concentrações que mais reduzem a turbidez de cada amostra;
- Mantendo o teor de PAC nos valores selecionados, avaliar experimentalmente a concentração de polímero adequada, com intuito de encontrar a combinação ideal de dosagem dos reagentes nas mesmas amostras;
- Comparar os resultados ideais obtidos nos testes com as dosagens aplicadas na ETA segundo levantamento de dados dos meses de junho a setembro de 2018;
- Criar uma tabela que relacione as concentrações dos produtos químicos às faixas de turbidez da água bruta, visando padronizar suas dosagens no processo de tratamento de água potável.

3 Revisão Bibliográfica

Os itens abordados a seguir visam esclarecer conceitos e técnicas a fim de facilitar a compreensão desse trabalho.

3.1 Remoção de impurezas da água

As impurezas encontradas nas águas superficiais englobam os sólidos dissolvidos em forma ionizada, gases dissolvidos, compostos orgânicos dissolvidos e matéria em suspensão como, microrganismos (bactérias, algas e fungos) e coloides. A maioria dessas impurezas apresenta cargas negativas em suas superfícies, gerando uma repulsão que as mantêm em suspensão estável por longos períodos de tempo (PAVANELLI, 2001).

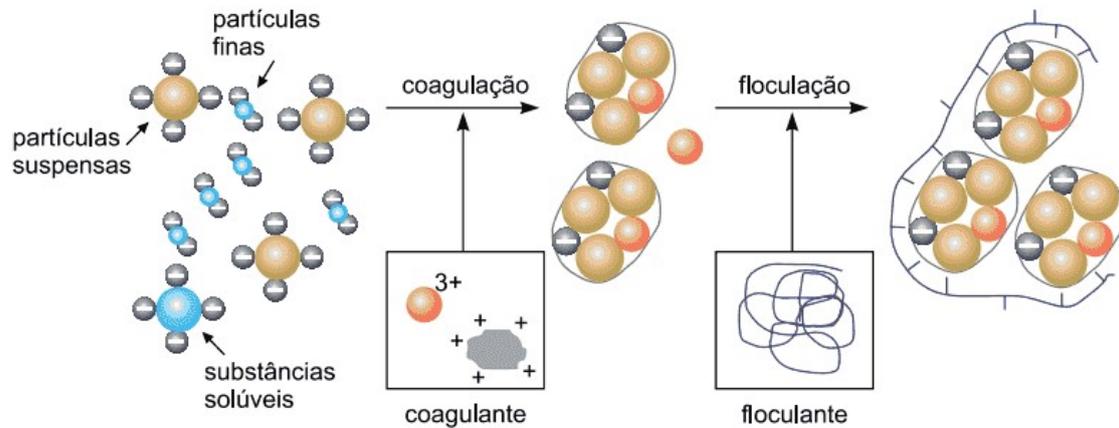
Coagulantes são substâncias adicionadas na água com a finalidade de reduzir as forças eletrostáticas de repulsão. Desta forma, elimina-se ou reduz-se a barreira de energia que impede a aproximação entre as diversas partículas presentes, criando-se condições para que haja aglutinação das mesmas e facilitando sua posterior remoção por sedimentação e/ou filtração. Os coagulantes mais utilizados são sais que, em solução, liberam espécies químicas de alumínio ou ferro com alta densidade de cargas elétricas positivas, eliminando as forças de repulsão eletrostática originalmente presentes na água bruta (FEC, UNICAMP, 2001).

O policloreto de alumínio (PAC) é um coagulante inorgânico, catiônico e pré-polimerizado. Esse coagulante possui cadeias de polímeros pré-formadas, exibindo uma alta concentração de carga catiônica na unidade polimérica. A velocidade de formação dos flocos é superior aos coagulantes tradicionais (sulfato de alumínio e sulfato férrico) não pré-polimerizados, garantindo aos flocos maior peso e conseqüente precipitação mais rápida e eficiente (BARRETO, 2010).

Floculantes orgânicos (polímeros) podem ser utilizados como auxiliares no tratamento, comportando-se como aditivos. Também chamados de polieletrólitos, esses polímeros são essencialmente lineares e solúveis em água, com pesos moleculares que variam de algumas centenas de milhares a dez milhões ou mais. Um exemplo de floculante utilizado com frequência é a poliacrilamida. Sua função é aumentar a eficiência do coagulante e reduzir a sua dosagem (BARRETO, 2010).

A Figura 3.1 ilustra a maneira como o coagulante e o floculante atuam no tratamento de água.

Figura 3.1: Atuação do coagulante e do floculante no tratamento de água



Fonte: Adaptado (KURITA, 1999).

As substâncias solúveis, as partículas finas e as partículas em suspensão apresentam cargas superficiais negativas que resultam em forças repulsivas. O coagulante permite a neutralização e aproximação das impurezas para formação dos flocos. O floculante age posteriormente enovelando-os com suas longas cadeias com intuito de facilitar a decantação.

3.2 Parâmetros de qualidade

A água é uma substância insípida, incolor, inodora e transparente. Entretanto, nunca é encontrada em estado de absoluta pureza, a própria natureza e a composição do solo determinam impurezas adicionais à água. Juntando a expansão demográfica, atividades industriais e agrícolas, não se pode considerar segura nenhuma fonte de água superficial (RICHTER e NETTO, 1991).

As condições climáticas também têm forte influência na qualidade da água. Alterações físicas e químicas são consequências do arraste de compostos solúveis e materiais particulados das margens para dentro do corpo hídrico por meio do escoamento superficial provocado pelas chuvas. Já mudanças biológicas resultam do aumento da incidência de luz e da disponibilidade de nutrientes (BARRETO, 2010).

A qualidade da água é um aspecto que assegura determinado uso ou conjunto de usos. Os padrões de qualidade são geralmente mensuráveis e de natureza física, química ou biológica (DERISIO, 2000). Segundo Almeida (2009), essas características são capazes

de refletir, direta ou indiretamente, a presença efetiva ou potencial de algumas substâncias ou microrganismos que possam comprometer a qualidade da água do ponto de vista de sua estética e/ou salubridade. Por essas razões, é fundamental caracterizar a água através de seus parâmetros físicos, químicos e biológicos.

3.2.1 Parâmetros físicos

As principais medidas físicas analisadas na água são cor e turbidez. De acordo com a FUNASA (2006) a cor é proveniente de matéria orgânica como substâncias húmicas e taninos, resíduos industriais coloridos e íons metálicos como ferro e manganês. A cor não apresenta riscos à saúde, porém é esteticamente indesejável. A cor aparente é medida diretamente, sendo afetada pela presença de material coloidal ou em suspensão. Já a determinação da cor verdadeira exige filtração ou centrifugação prévia para eliminação da turbidez, conforme descrito no Standard Methods (1998).

A turbidez representa o grau de interferência da passagem da luz através da água que fica com aparência turva, pode reduzir a penetração da luz e prejudicar a fotossíntese. Os principais responsáveis pela turbidez são os sólidos em suspensão que podem ser oriundos de rochas, argila, silte, algas e microrganismos, provenientes de despejos domésticos, industriais e erosão. Os sólidos de origem natural não apresentam riscos potenciais diretos, porém podem abrigar microrganismos patogênicos, os de origem antropogênica podem estar associados a compostos tóxicos e organismos patogênicos (BARRETO, 2010).

3.2.2 Parâmetros Químicos

Existem diversos parâmetros químicos que devem ser controlados na água distribuída à população. As características pertinentes ao presente estudo são alcalinidade e pH.

A alcalinidade de uma água refere-se a sua capacidade de neutralização de ácidos, ou seja, corresponde à presença de sais de ácidos fracos, bases fracas e bases fortes, como bicarbonatos, carbonatos, fosfatos, silicatos, sais de ácidos orgânicos fracos, amônia e hidróxidos. A alcalinidade é importante na coagulação química, pois os coagulantes comumente atuam como ácidos em solução, reduzindo seu valor e baixando o pH (PAVANELLI, 2001).

O pH, ou potencial hidrogeniônico, representa a concentração de íons de hidrogênio (H^+), indicativa da acidez, neutralidade ou alcalinidade da água. Seu valor é alterado por sólidos e gases dissolvidos provenientes de dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica, fotossíntese, despejos domésticos ou despejos industriais. Valores de pH muito alto ou baixos, podem causar irritação na pele ou nos olhos, porém não tem implicação de riscos à saúde pública (SPERLING, 2005).

3.2.3 *Parâmetros Biológicos*

Existem três grupos de microrganismos que podem transmitir doenças pela água: vírus, bactérias e protozoários. A água potável não deve conter microrganismos patogênicos e bactérias que indicam contaminação fecal. Essas bactérias pertencem ao grupo coliforme, estão presentes nas fezes de animais e seres humanos, e indicam um tratamento inadequado ou ineficiente (BARRETO, 2010).

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) é um indicador da presença de matéria orgânica, medida em corpos d'água porque sugere o nível de poluição causada pelo despejo de efluentes domésticos e industriais. Esse parâmetro é determinado pelo decréscimo da concentração de gás oxigênio dissolvido, consumido na respiração dos microrganismos presentes (VALENTE, PADILHA, SILVA, 1997).

A desinfecção e a oxidação da matéria orgânica no tratamento de água são realizadas pela aplicação de gás cloro, dióxido de cloro, ozônio, radiação ultravioleta, dentre outros (DI BERNARDO E DANTAS, 2005).

3.2.4 *Legislação*

A Portaria Nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Assim, toda água distribuída à população brasileira deve atender as exigências desse ato jurídico. Diariamente, o DMAE faz cerca de quatro mil análises, a partir de 500 amostras de água coletadas desde a captação até as ligações domiciliares, com o objetivo de garantir a qualidade da água distribuída em Porto Alegre, dentro do padrão de potabilidade estabelecido pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação Nº 5/2017, baseada PRT MS/GM 2914/2011 (DMAE, 2018a).

Esse documento comporta orientações sobre o modo de operação, os órgãos responsáveis pelas fiscalizações, os parâmetros biológicos, físicos, químicos e de radioatividade que devem ser monitorados, seus limites, pontos de amostragem e periodicidade de análises. Esses critérios variam com a população abastecida (<50 mil, 50-250 mil ou >250 mil habitantes) e com o tipo de manancial (superficial ou subterrâneo).

As Estações de Tratamento de Água de Porto Alegre possuem Instruções de Trabalho, documentos internos fundamentados nas Portarias do Ministério da Saúde, onde se encontram as informações apresentadas na Tabela 3.1. A operação das estações deve ter como objetivo atingir os padrões estabelecidos nessas especificações.

Tabela 3.1: Especificações do processo de tratamento de água

Amostra	Análise	Frequência	Especificação
Água Bruta	pH	2 horas	6,0 a 12,0
	Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	12 horas	5 a 100
	Turbidez (NTU)	2 horas	0,1 a 1000
Água Decantada	Turbidez (NTU)	2 horas	0 a 5
Água Tratada	pH	2 horas	6,0 a 9,5
	Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)	12 horas	5 a 30
	Turbidez (NTU)	2 horas	< ou = 1
	Cor (mg Pt-Co L ⁻¹)	2 horas	< ou = 15

Fonte: Adaptado (DMAE, 2018b).

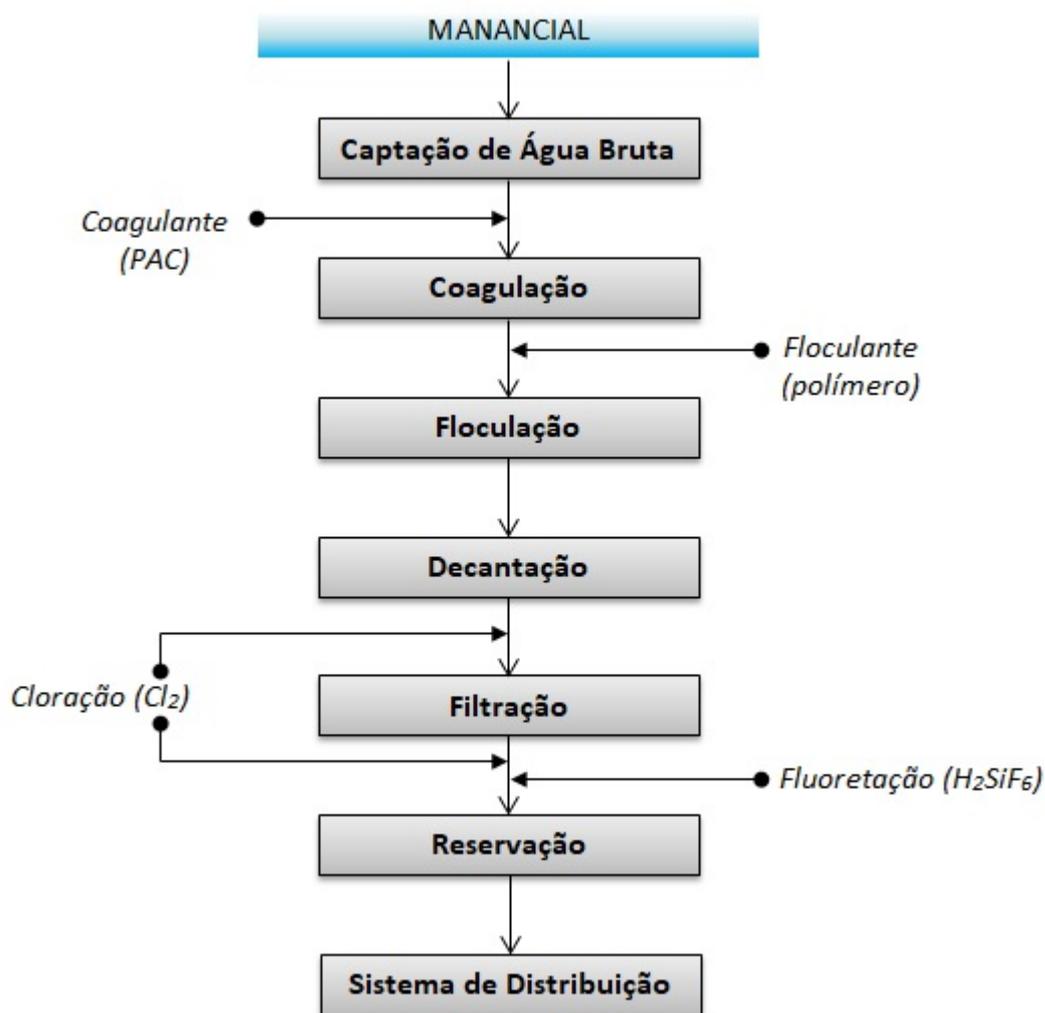
3.3 Sistema de Tratamento

O tratamento da água normalmente é feito com finalidades higiênicas, estéticas e econômicas. O propósito higiênico tem relação à eliminação de microrganismos, substâncias nocivas e impurezas. A finalidade estética diz respeito à correção da cor, sabor e odor. Por fim, o objetivo econômico é vinculado principalmente à redução da corrosão das tubulações de distribuição (BARRETO, 2010).

A fim de atender todos os requisitos e padrões de potabilidade, o processo pode envolver diferentes etapas, dependendo das condições da água bruta. Em Porto Alegre,

para garantia da qualidade da água distribuída à população, utiliza-se um sistema completo de tratamento que inclui: captação da água bruta, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação (DMAE, 2018b). A Figura 3.2 ilustra o fluxograma do processo que ocorre no local de realização desse estudo.

Figura 3.2: Fluxograma do processo de tratamento de água na ETA



Fonte: Adaptado (DMAE, 2018b).

A escolha do manancial deve ser precedida de levantamento sanitário da bacia hidrográfica e de profundo estudo da qualidade da água, a qual pode variar não só sazonalmente, mas também ao longo dos anos. Portanto, a definição do manancial deve estar associada à preservação futura do mesmo, visando evitar problemas decorrentes de alterações significativas na qualidade da água que podem, com o tempo, tornar ineficaz a tecnologia de tratamento adotada (TIBA, 2012). O manancial utilizado para captação da água bruta no local de estudo é o Lago Guaíba

A captação tem por finalidade criar condições para que a água seja retirada do manancial abastecedor em quantidade capaz de atender o consumo e em qualidade tal que reduza os tratamentos ao mínimo possível. É, portanto, a unidade de extremidade de montante do sistema (GUIMARÃES, CARVALHO E SILVA, 2007). A captação do local de estudo ocorre a 2 km da margem e é garantida por quatro bombas centrífugas combinadas de forma a proporcionar a vazão desejada. A capacidade de tratamento da ETA é de 1000 L/s (DMAE, 2018c).

A primeira etapa realizada na estação é a coagulação. A adição de coagulante desestabiliza a dispersão coloidal pela redução das forças de repulsão entre as partículas negativas (PAVANELLI, 2001). A dosagem do produto químico é feita com bomba dosadora no canal de entrada da água captada, como mostra a Figura 3.3.

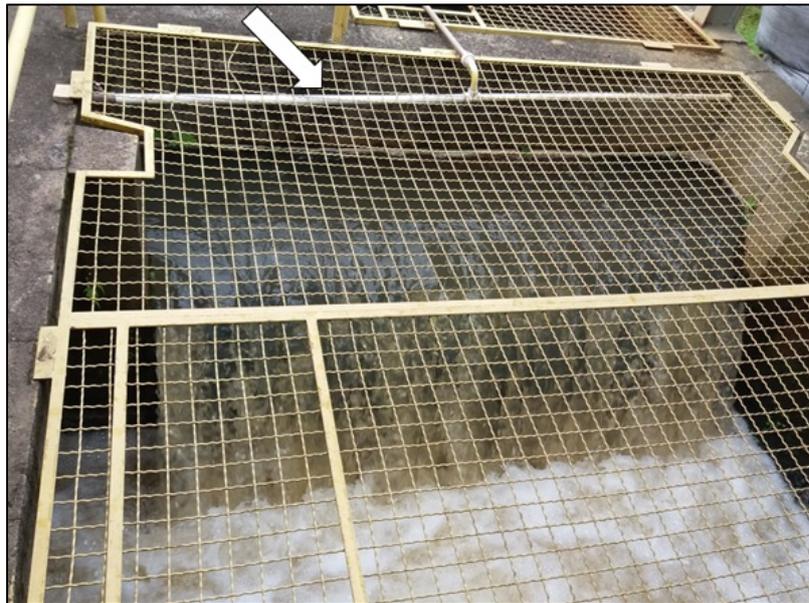
Figura 3.3: Calha para aplicação do coagulante na ETA



Fonte: Própria, 2018.

A Figura 3.3 mostra a canaleta que distribui a solução de PAC na ETA. A seguir, tem-se um ressalto hidráulico de grande turbulência, provocado na saída da calha Parshall, que promove condições adequadas para a dispersão homogênea e rápida do coagulante.

Quando necessário, a aplicação da solução de poliacrilamida ocorre em um segundo ponto turbulento, sendo bombeada via tubulação e distribuída em um tubo perfurado, mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4: Tubo perfurado para dosagem do floculante na ETA

Fonte: Própria, 2018.

Na Figura 3.4, o gradeamento de segurança do local dificulta a visualização do despejo de floculante na corrente de água, mas a seta indica o cano vazado com vários furos que permite essa dosagem. O ressalto hidráulico tem a finalidade de dispersar o produto rápida e uniformemente na massa líquida, de tal maneira que cada litro de água a tratar receba aproximadamente a mesma quantidade de reagente no menor tempo possível (GUIMARÃES, CARVALHO E SILVA, 2007).

Na etapa de floculação ocorre a formação de flocos pela aglutinação dos colóides neutralizados. A agitação contínua e leve introduz energia capaz de promover esse contato. O uso de floculante é opcional, ele atua como auxiliar na floculação, facilitando a união dos flocos formados (BARRETO, 2010). Na ETA, a floculação acontece durante o deslocamento da água pelas tubulações e câmaras que permitem uma redução de velocidade.

Na decantação, separam-se os sólidos da água pela ação da gravidade. Quanto maior a velocidade de sedimentação, menor é o tempo necessário para a clarificação. Essa etapa ocorre em decantadores classificados como convencionais, de alta taxa ou centrífugos, de acordo com suas configurações (TAE, 2013).

O decantador da ETA estudada é ilustrado na Figura 3.5. Este é classificado como de alta taxa de sedimentação, exigindo uma área menor de instalação.

Figura 3.5: Decantador superpulsator da ETA

Fonte: Própria, 2018.

A Figura 3.5 apresenta parte do decantador superpulsator da ETA. Ele possui um sistema de vácuo que produz uma pulsação e permite o contato dos flocos com o manto de lodo, assim como sua extração (DMAE, 2018c). Essa etapa ocorre de forma acelerada, justificando a necessidade de flocos grandes que sedimentem rápido.

A etapa de filtração consiste na remoção das partículas suspensas e coloidais e de microrganismos presentes na água pelo escoamento através de um meio filtrante, o qual pode ser composto de uma ou de várias camadas de areia de diferentes granulometrias e/ou carvão. Durante a filtração, as impurezas que não sedimentaram no decantador ficam retidas no meio filtrante, fazendo-se necessária a lavagem dos filtros após certo período de tempo (COMUSA, 2017).

Na ETA estudada, a filtração ocorre em seis filtros de areia por gravidade, um deles é apresentado na Figura 3.6. A areia utilizada possui apenas uma granulometria. A lavagem de todos os filtros é realizada diariamente através da introdução de ar comprimido e água tratada com altas velocidades no sentido ascensional.

Figura 3.6: Filtro de areia da ETA

Fonte: Própria, 2018.

A desinfecção objetiva remover ou destruir (inativar) microrganismos patogênicos capazes de causar várias doenças. Existem diversos agentes desinfetantes aplicáveis, como cloro gasoso (Cl_2), hipoclorito de sódio (NaClO), hipoclorito de cálcio ($\text{Ca}(\text{ClO})_2$), dióxido de cloro (ClO_2), ozônio (O_3) e a radiação ultravioleta (UV). Os produtos químicos a base de cloro são mais utilizados por apresentarem concentrações residuais que permanecem na água até sua chegada à casa do consumidor final, garantindo o padrão microbiológico (COMUSA, 2017). Na ETA estudada, a desinfecção é promovida por gás cloro (Cl_2), o qual é adicionado à água por injetores a vácuo antes e depois da filtração.

A fluoretação tem por finalidade reduzir a incidência de cárie dentária, sendo uma exigência do Ministério da Saúde. Sabe-se que o flúor, em pequenas quantidades, é benéfico à saúde humana, principalmente em crianças, por promover o endurecimento da matriz mineral dos dentes e esqueleto (COMUSA, 2017). No ETA em análise, a fluoretação ocorre pela aplicação da solução de ácido fluossilícico (H_2SiF_6).

Ao final de todos esses passos, a água atende todos os parâmetros de qualidade e é considerada potável, seguindo para reservação e distribuição na cidade. O reservatório enterrado da ETA tem capacidade para 4000 m^3 , atendendo 150 mil pessoas.

4 Materiais e Métodos

Esse tópico aborda os equipamentos, materiais, reagentes e metodologia empregados para realização desse estudo.

4.1 Local e Amostragem

A pesquisa descrita nesse trabalho foi realizada em uma Estação de Tratamento de Água (ETA) da cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. O local tem capacidade de tratar 1000 L/s de água bruta, opera 24 horas por dia e abastece cerca de 150 mil habitantes.

Uma Estação de Bombeamento de Água Bruta (EBAB) capta água via tubulação a 2 km da margem no Lago Guaíba e a encaminha até a ETA por mais 1 km. Os pré-tratamentos feitos na adutora são gradeamento para retenção de sólidos grosseiros e aplicação de dióxido de cloro para prevenção de desenvolvimento de mexilhões-dourado.

A água bruta chega na ETA em um canal onde há uma calha Parshall com um sensor para medição de vazão. Nesse ponto são recolhidas várias amostras diariamente para verificação de pH e turbidez, conforme procedimento operacional do local. O mesmo ponto foi utilizado para coleta das amostras analisadas nesse estudo.

A amostragem da água bruta para realização dos experimentos em testes de jarros foi feita com dois baldes de 15 litros e testadas em seguida no laboratório da ETA nos dias 16 e 24 de novembro de 2018. Foram coletadas amostras da água bruta captada com diferentes valores de turbidez.

O tratamento é controlado por oito operadores que trabalham dois a dois em plantões de 12 horas, com 36 horas de folga. Diversas análises são feitas de diferentes pontos do processo a cada duas horas. Esses resultados e outras informações são armazenadas no Sistema UniLab, de onde foi possível obter dados dos meses junho, julho, agosto e setembro de 2018 para diagnóstico do funcionamento da ETA.

4.2 Reagentes

O reagente Policloreto de Alumínio (PAC) é o coagulante do tratamento de água utilizado na ETA. A empresa Ambientaly Global Solutions com sede em Guaíba/RS fornece PAC com concentração de 434,3 g/L em solução aquosa. No processo, o reagente é

adicionado diretamente, já para os experimentos desse estudo é necessário diluí-lo a 20 g/L com água destilada.

O floculante poliacrilamida foi obtido na forma sólida em embalagens de 25 kg da empresa SNF do Brasil, localizada em Guarulhos/SP. Para aplicação na planta, os operadores preparam uma solução de 1 g/L em água tratada dentro de um tanque de 4 m³. Para uso nos experimentos, foram preparadas soluções de trabalho com 0,2 g/L em água destilada.

4.3 Análises Físico-Químicas

Para verificação dos parâmetros de qualidade que devem ser monitorados e controlados em uma ETA são realizadas análises físico-químicas. Esse trabalho envolve testes que simulam o tratamento e as mesmas especificações precisam ser respeitadas.

4.3.1 Turbidez

Para a determinação da turbidez das amostras foi utilizado o Turbidímetro Portátil modelo 2100P fabricado pela Hach Company. Colocam-se 15 mL de amostra em uma cubeta de vidro que deve ter a superfície externa limpa e seca. A leitura é feita de forma direta e o resultado é expresso em NTU (Unidade Nefelométrica de Turbidez).

4.3.2 pH

O pHmetro da marca Digimed modelo DM 21 foi empregado para medição do pH, feita de forma direta com imersão do eletrodo em cerca de 50 mL de amostra. O equipamento foi previamente calibrado com soluções padrão de pH 4,01 e 6,86.

4.3.3 Alcalinidade

A alcalinidade foi determinada por titulação de 100 mL de amostra com solução 0,02 M de ácido clorídrico. Emprega-se o indicador misto para visualização do ponto final, mudança da coloração de azul para rosa (DMAE, 2018b).

4.3.4 Cor aparente

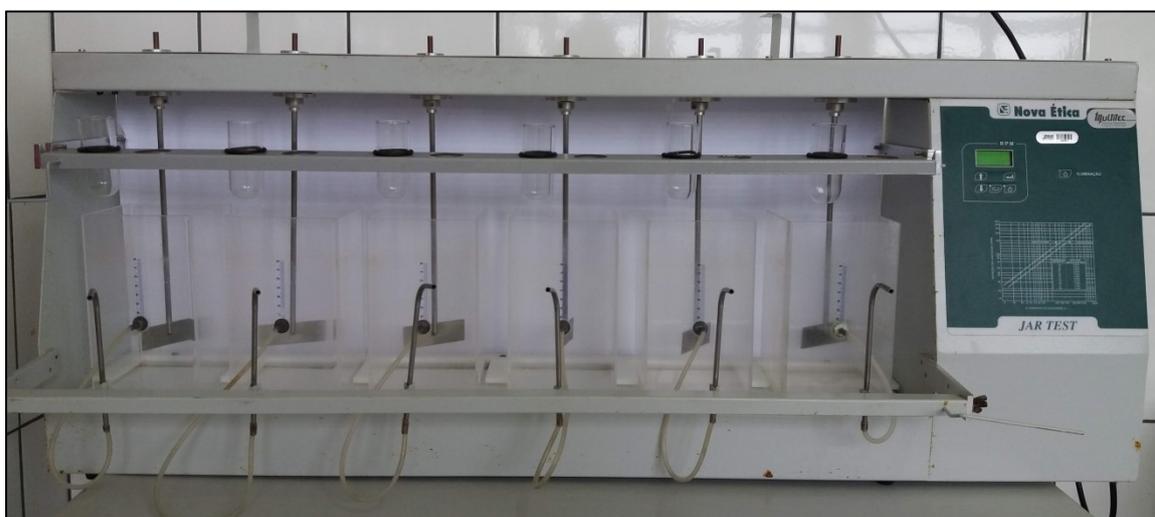
A análise de cor aparente foi feita no equipamento Aqua Tester modelo 611-A fabricado pela Orbeco-Hellige. Duas cubetas de vidro de 20 cm, uma contendo água

destilada e outra a amostra, são colocadas no aparelho que possui um disco comparativo para determinação visual desse parâmetro.

4.4 Teste de Jarros

O equipamento Teste de Jarros faz a simulação das etapas de coagulação, floculação e decantação do processo de tratamento de água. O aparelho da marca Nova Ética utilizado possui seis recipientes de acrílico para 2 litros de amostra cada, agitadores com controle de velocidade e tempo, aplicador simultâneo de reagentes, coletor de amostras e display para programação do ensaio, como mostra a Figura 4.1.

Figura 4.1: Equipamento teste de jarros Nova Ética



Fonte: Própria, 2018.

A mesma amostra foi adicionada aos seis jarros, enquanto volumes diferentes de coagulante e floculante foram aplicados a cada um, permitindo que fossem comparadas as eficiências das diferentes concentrações dos reagentes.

O procedimento realizado seguiu as instruções de trabalho da ETA, empregando as velocidades e durações apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Programação quanto à agitação no equipamento teste de jarros

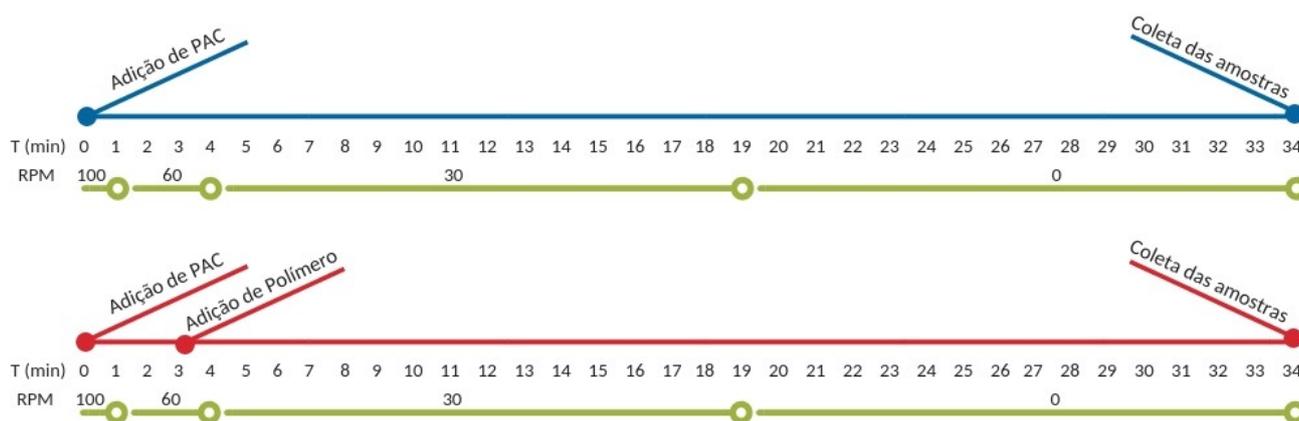
Velocidade (RPM)	Duração (min)	Etapa
100	1	Coagulação
60	3	Floculação
30	15	Floculação
0	15	Decantação

Fonte: DMAE, 2018b.

O controle da agitação é essencial, pois permite que cada etapa do processo ocorra da melhor forma e semelhante ao que acontece na planta real. O coagulante foi adicionado no começo do teste, quando a velocidade é rápida para garantir sua dispersão no meio e a neutralização das cargas. Ao longo do tempo a agitação deve diminuir para que os flocos sejam formados e cresçam, facilitando a decantação no final do ensaio.

O teste foi realizado nas quatro amostras de água bruta coletadas. Cada uma sofreu duas avaliações, com aplicação somente do coagulante PAC e com adição combinada do PAC e do floculante polímero. A duração total da simulação do tratamento foi de 34 minutos, como mostram as linhas do tempo na Figura 4.2.

Figura 4.2: Linhas do tempo dos testes de jarros com adição somente de PAC e com adição de PAC e polímero



Fonte: Própria, 2018.

Nos experimentos com uso do polímero, sua adição foi feita após o terceiro minuto do teste para garantir que o coagulante já tivesse neutralizado as cargas e os flocos estivessem se formando.

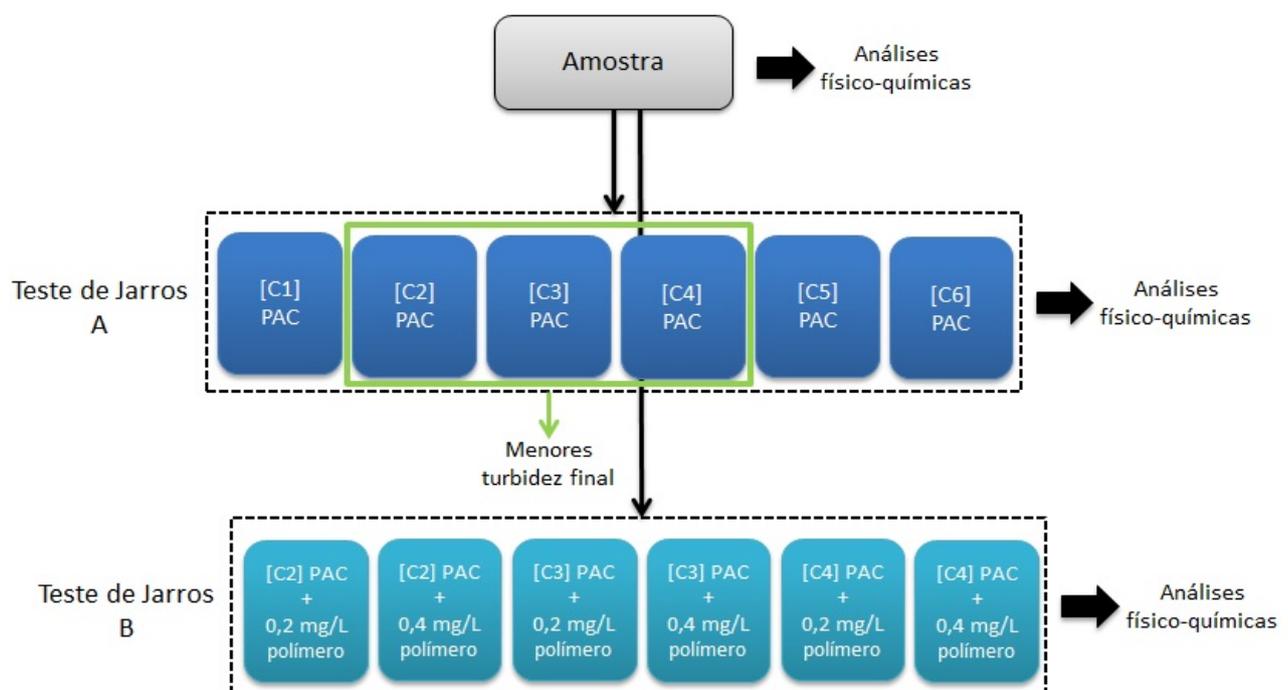
As instruções de trabalho da ETA orientam variar as concentrações de PAC nos seis jarros baseando-se nas características físico-químicas da água bruta (pH e turbidez) e no conhecimento da dosagem geralmente aplicada. Por isso, os volumes da solução de PAC analisados nesse estudo são fundamentados na coleta de dados da ETA, feita entre junho e setembro de 2018.

As concentrações de PAC aplicadas nos três jarros com os menores valores de turbidez final foram repetidas em um teste na sequência, onde foi avaliada a atuação do

polímero. A recomendação dada aos operadores pela chefia é dosar 0,4 mg/L de floculante quando julgarem necessário. Com o objetivo de reduzir o consumo desse reagente, também foi testada a concentração de 0,2 mg/L. Assim, o segundo ensaio envolveu as três melhores dosagens de PAC combinadas com 0,2 e 0,4 mg/L de polímero, ocupando os seis recipientes do equipamento.

A metodologia descrita e aplicada a cada uma das quatro amostras de água bruta coletadas é simplificada na Figura 4.3.

Figura 4.3: Fluxograma da metodologia empregada nos testes de jarro



Fonte: Própria, 2018.

As análises físico-químicas de turbidez, pH, alcalinidade e cor aparente foram realizadas nas quatro amostras de água bruta e nas 48 amostras de água decantada resultantes dos oito testes de jarros.

O tamanho dos flocos formados e a velocidade de decantação dos mesmos também são fatores importantes para selecionar as dosagens mais eficientes. As Tabelas 4.2 e 4.3 indicam as classificações desses parâmetros, que são determinadas visualmente baseando-se na graduação existente nos jarros.

Tabela 4.2: Classificação quanto ao tamanho dos flocos

Classificação	Diâmetro (mm)
Pequeno (P)	< 1
Médio (M)	1 – 3
Grande (G)	> 3

Fonte: Própria, 2018.

O tamanho dos flocos pode ser pequeno, médio ou grande conforme as dimensões apresentadas na Tabela 4.2. Os flocos não possuem um formato regular, então é necessário aproximá-lo a uma esfera. Além disso, é possível obter todas as categorias em um mesmo sistema, classificando-os de acordo com o tamanho predominante.

Tabela 4.3: Classificação quanto a velocidade de decantação dos flocos

Classificação	cm/10 s
Lenta (L)	< 1
Média (M)	1 – 3
Rápida (R)	> 3

Fonte: Própria, 2018.

A velocidade de decantação é classificada em lenta, média ou rápida, de acordo com a distância vertical percorrida em dez segundos pela maioria dos flocos presentes. A Tabela 4.3 mostra, em centímetros, os limites de cada categoria.

5 Resultados

Esse tópico apresenta e discute os resultados obtidos no estudo proposto. Inicialmente é feito um diagnóstico das condições e do modo de operação na ETA, avaliados entre os meses de junho e setembro de 2018. A seguir, são expostos e analisados os resultados dos testes de jarros. Por fim, encontram-se as sugestões de concentrações dos reagentes a serem aplicadas no processo pelos operadores da ETA.

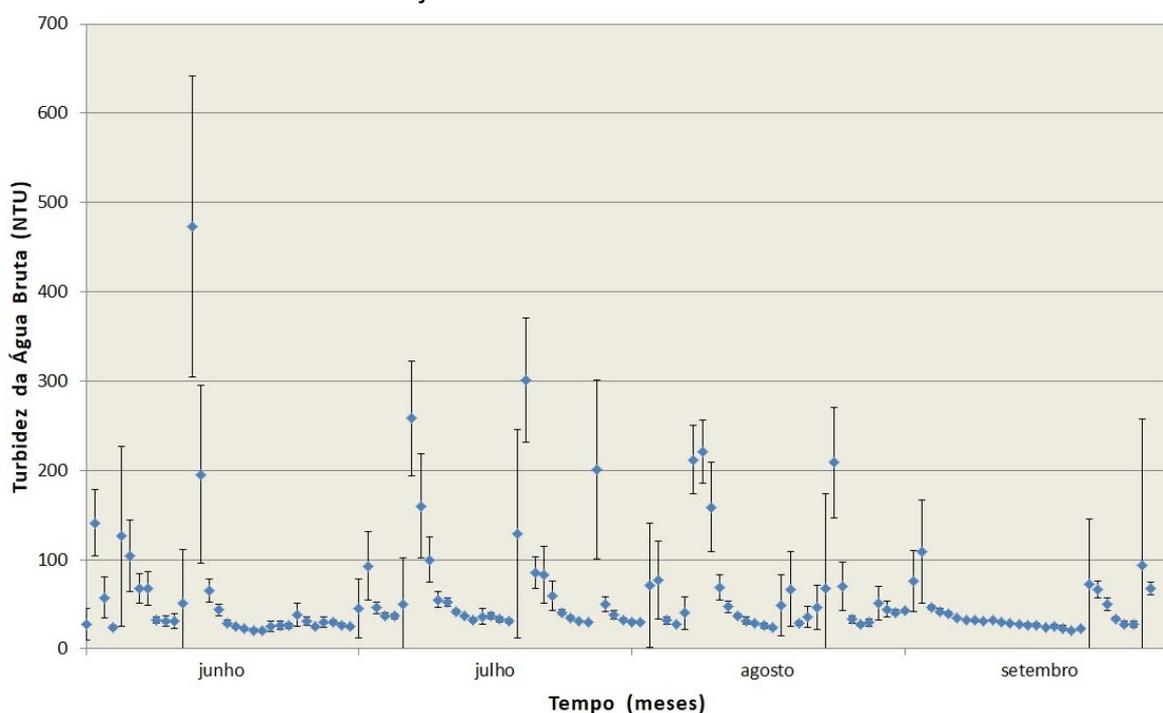
5.1 Diagnóstico do processo na ETA

Foi realizada uma coleta de dados na ETA no período de junho a setembro de 2018. As informações obtidas foram: turbidez da água bruta, turbidez da água decantada, dosagem de PAC e aplicação de polímero no referido período. Todos os dados coletados estão no Anexo A, enquanto suas análises são apresentadas a seguir.

5.1.1 Turbidez da Água Bruta

A análise de turbidez da água bruta é efetuada pelos operadores a cada 2 horas. Como a operação funciona 24 horas por dia, obtêm-se 12 leituras diárias. A Figura 5.1 exibe um gráfico dessa turbidez ao longo do tempo, cada ponto é uma média diária com desvio-padrão.

Figura 5.1: Gráfico da variação da turbidez média diária da água bruta entre os meses de junho e setembro de 2018



Fonte: Adaptado (DMAE, 2018c).

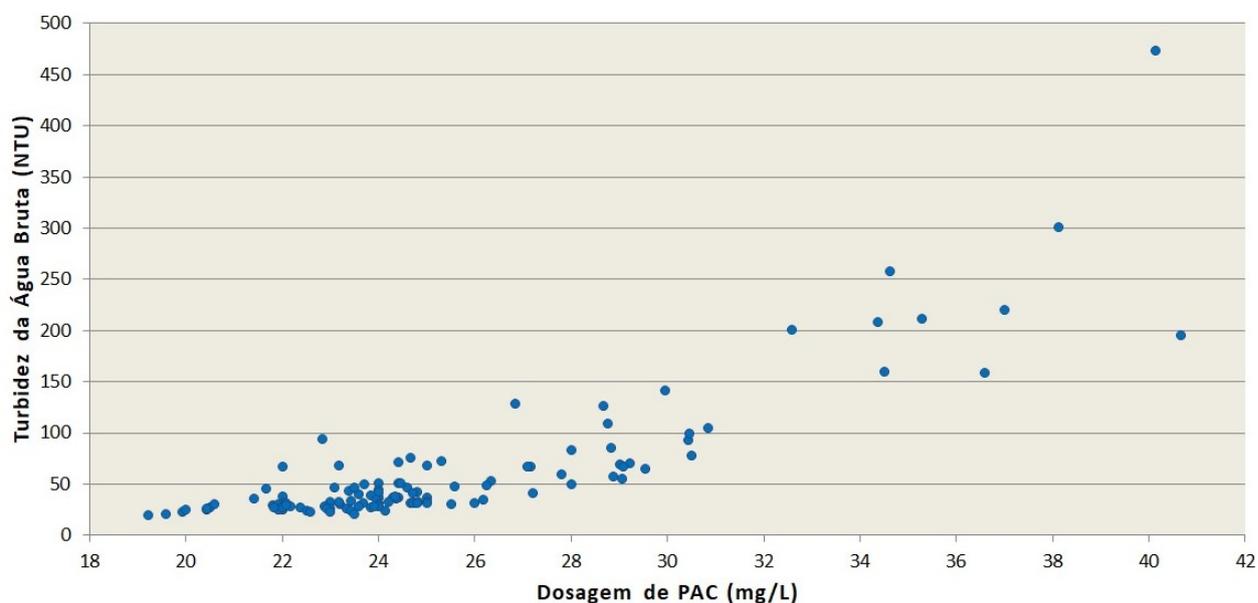
A partir da Figura 5.1 é possível verificar que a turbidez da água a ser tratada é bastante variável no período. Encontram-se médias de 20 a 474 NTU na água captada, as quais causam interferências frequentes na estabilidade do processo.

As condições climáticas estão fortemente vinculadas à turbidez da água bruta. A ocorrência de chuva e vento provoca arraste de partículas do solo e movimentação do Lago Guaíba, elevando a presença de compostos em suspensão (BARRETO, 2010). De acordo com dados do Centro Integrado de Comando da Cidade de Porto Alegre (CEIC), no dia 12/06/2018 houve o maior volume de chuva do mês de junho, 47,50 mm, fato que provavelmente originou o alto valor de turbidez no dia 13/06/2018.

5.1.2 Dosagem de PAC

A aplicação do coagulante PAC é registrada de hora em hora, resultando em 24 dados diários de dosagem. A obtenção dessa informação permitiu relacioná-la com a condição de turbidez da água bruta, ilustrada na Figura 5.2, onde cada ponto representa as médias diárias.

Figura 5.2: Gráfico da dosagem de PAC em função da turbidez da água bruta entre os meses de junho e setembro de 2018



Fonte: Adaptado (DMAE, 2018c).

Analisando a Figura 5.2, constata-se que quanto maior a turbidez da água bruta, maior a dosagem de PAC aplicada pelos operadores da ETA. Essa concentração variou de 19 a 41 mg/L no período acompanhado. O gráfico gerado permite a construção da Tabela

5.1, onde são apresentadas as faixas de coagulante utilizadas para cada intervalo de turbidez.

Tabela 5.1: Faixas de PAC aplicadas para diferentes intervalos de turbidez da água bruta

Turbidez da Água Bruta (NTU)	Faixa de PAC Aplicada (mg/L)
< 50	19 - 28
50 – 100	22 - 30
100 – 150	26 - 31
>150	32 - 41

Fonte: Adaptado (DMAE, 2018c).

A Tabela 5.1 serve como base para determinação dos intervalos de concentração de coagulante utilizados nos testes de jarros das amostras coletadas.

5.1.3 Aplicação de Polímero

Na ETA de Porto Alegre é recomendado aos operadores aplicar 0,4 mg/L de polímero quando estes julgarem necessário. Ou seja, não há uma padronização na utilização do mesmo e não é realizada nenhuma medida dessa dosagem na rotina de operação. Há, contudo, registro dos dias nos quais o reagente foi utilizado. Dessa forma, a Tabela 5.2 apresenta os valores de turbidez média na água bruta captada quando há e quando não há aplicação de polímero, bem como a turbidez média das águas decantadas resultantes.

Tabela 5.2: Dados operacionais referentes ao processo com e sem aplicação de polímero

Aplicação de Polímero	Turbidez Média da Água Bruta (NTU)	Turbidez Média da Água Decantada (NTU)	% Redução de Turbidez
Não	39,82	2,30	94,2
Sim	105,70	2,86	97,3

Fonte: Própria, 2018.

A Tabela 5.2 permite verificar que o polímero foi adicionado nos dias em que a turbidez da água bruta estava mais elevada, visto que a média nesse caso foi de 105,70 NTU, consideravelmente superior à média dos dias sem aplicação do floculante (39,82 NTU). Constata-se também que o uso do reagente possibilitou atingir um valor de

turbidez dentro da especificação definida pelo Ministério da Saúde na Portaria Nº 2.914/11, entre 0 e 5 NTU, o que exigiu um maior percentual de redução. Esses dados justificam o uso desse reagente e indicam a necessidade da avaliação de quando e em qual concentração ele atua com maior eficiência.

5.2 Testes de Jarros

Foram realizados testes de jarros a fim de verificar a melhor concentração de coagulante e floculante a serem utilizados para cada faixa de turbidez da água captada. Esses experimentos envolveram as seguintes etapas: caracterização das amostras coletadas de água bruta (turbidez, pH, alcalinidade e cor aparente); definição das dosagens de PAC a serem avaliadas; execução dos testes de jarros com aplicação de PAC e com uso de PAC e polímero em conjunto; análises físico-químicas das águas decantadas obtidas e indicação dos melhores resultados.

5.2.1 Caracterização das Amostras de Água Bruta

Análises de turbidez, pH, alcalinidade e cor aparente foram realizadas nas quatro amostras de água bruta coletadas. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Caracterização das amostras de água bruta

Amostra	1	2	3	4
Turbidez (NTU)	39,5	84,6	136	262
pH	7,18	7,15	7,13	7,08
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	19	18	18	18
Cor aparente (mg Pt Co/L)	175	350	400	500

Fonte: Própria, 2018.

Observa-se que os valores de pH e alcalinidade são semelhantes, as grandes variações são encontradas nos resultados de turbidez e cor aparente. Conforme desejado, as amostras obtidas estão nas diferentes faixas de turbidez: menor que 50 NTU, entre 50 e 100 NTU, entre 100 e 150 NTU, e maior que 150 NTU.

5.2.2 Definição das Dosagens de PAC a serem analisadas no Teste de Jarros

As concentrações de PAC analisadas nas amostras foram definidas com base na Tabela 5.1. Também foram testadas dosagens menores e maiores com o objetivo de verificar a possibilidade de reduzir o uso do reagente ou a necessidade de aumentá-lo, conforme mostrado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Dosagens de PAC analisadas no teste de jarros

Amostra	Turbidez (NTU)	Faixa de Turbidez (NTU)	Dosagens de PAC analisadas (mg/L)					
1	39,5	< 50	15	18	21	24	27	30
2	84,6	50 - 100	18	21	24	27	30	33
3	136	100 - 150	18	21	24	27	30	33
4	262	> 150	24	28	32	36	40	44

Fonte: Própria, 2018.

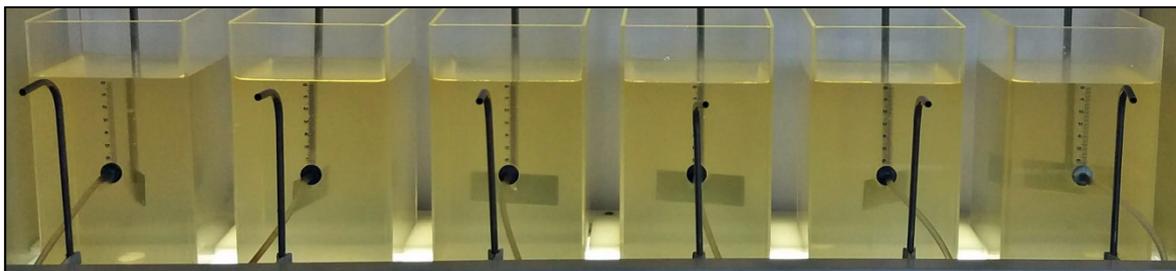
Para turbidez menor que 50 NTU, as dosagens de PAC aplicadas na ETA foram de 19 a 28 mg/L, optou-se por avaliar a amostra 1 com concentrações de 15 a 30 mg/L.

Na faixa de 50 a 100 NTU, a água bruta foi tratada com 22 a 30 mg/L de coagulante. Já na faixa de 100 a 150 NTU de turbidez foi adicionado entre 26 e 31 mg/L de PAC. Definiu-se que os testes de jarros de ambas tenham concentrações entre 18 e 33 mg/L.

Água bruta pertencente a faixa de turbidez superior a 150 NTU recebeu dosagens de 32 a 41 mg/L de coagulante, concentrações elevadas quando comparadas às outras faixas. Buscando avaliar a possibilidade de reduzir o consumo de PAC, definiu-se que os testes envolveriam a aplicação de um intervalo maior, de 24 a 44 mg/L do reagente.

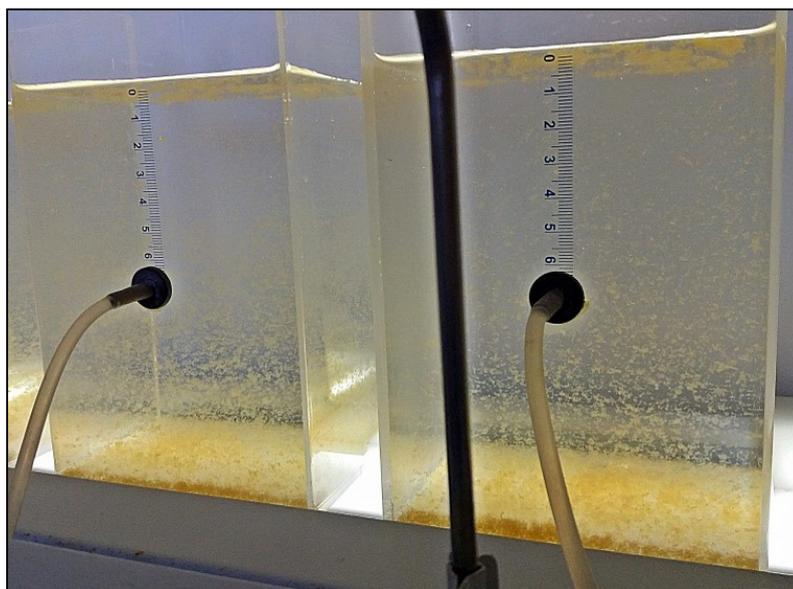
5.2.3 Testes de Jarros com a Amostra 1 (Turbidez inicial = 39,5 NTU)

A Figura 5.3 mostra a amostra disposta no equipamento antes de iniciar o ensaio, enquanto a Figura 5.4 apresenta os flocos formados pela adição de PAC.

Figura 5.3: Amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU) antes do teste de jarros

Fonte: Própria, 2018.

Para a realização do teste de jarros, dispõem-se 2 L da mesma amostra em cada um dos seis recipientes do aparelho. Na Figura 5.3, observa-se que a turbidez inicial da amostra 1 ainda permite a visualização das pás agitadoras.

Figura 5.4: Início da decantação dos flocos formados pela adição de PAC na amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU)

Fonte: Própria, 2018.

Ao término do ensaio, as pás agitadoras são removidas para que não interfiram na decantação. Analisando a Figura 5.4, nota-se o início da sedimentação dos flocos formados pela aplicação de PAC na amostra 1. Com base nas Tabelas 4.2 e 4.3, estes possuem tamanho e velocidade de decantação médios.

Os resultados dos parâmetros analisados no teste de jarros com aplicação apenas de PAC na amostra 1, são apresentados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 1 (turbidez inicial=39,5 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	15	18	21	24	27	30
Turbidez final (NTU)	1,40	1,20	1,29	1,70	2,35	5,17
pH	6,74	6,62	6,52	6,42	6,36	6,26
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	13	12	10	10	9	8
Cor aparente (mg Pt Co/L)	10	10	10	11	14	22
Tamanho dos flocos	M	M	M	G	G	G
Velocidade de decantação	M	M	M	R	R	R

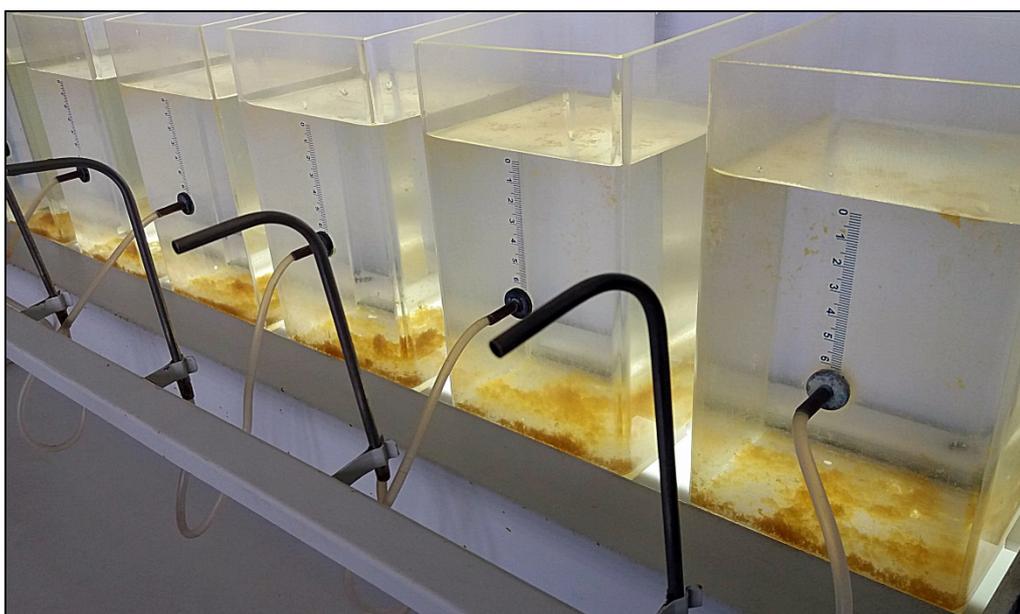
Legenda: M – Médio(a), G – Grande, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

Para a amostra 1, os resultados mais baixos de turbidez foram nas concentrações 15, 18 e 21 mg/L de PAC. Os valores de pH e alcalinidade decaem com o aumento da concentração de PAC, pois coagulantes comumente atuam como ácidos em solução (PAVANELLI, 2001). As melhores análises de cor aparente são encontradas nos três primeiros jarros, assemelhando-se à análise de turbidez. Isso ocorre porque a cor aparente é medida diretamente, sem aplicação de filtração ou centrifugação, sendo influenciada pela turbidez presente (STANDARD METHODS, 1998). Apesar das formações de flocos grandes e decantações rápidas ocorridas nos jarros 4, 5 e 6, as reduções de turbidez não foram tão eficientes, sendo que apenas a dosagem de 30 mg/L não atingiu a especificação de turbidez menor que 5 NTU.

A análise da atuação conjunta de PAC e polímero foi aplicada a amostra 1, combinando 15, 18 e 21 mg/L de coagulante com 0,2 e 0,4 mg/L de floculante. A Figura 5.5 mostra os recipientes do equipamento após a sedimentação.

Figura 5.5: Teste de jarros com aplicação combinada de PAC e polímero na amostra 1 (turbidez inicial = 39,5 NTU)



Fonte: Própria, 2018.

Observa-se na Figura 5.5, a formação de flocos grandes em todos os jarros, o que proporciona uma rápida decantação. Essas constatações são confirmadas nas análises realizadas e apresentadas na Tabela 5.6.

Tabela 5.6: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 1 (turbidez inicial=39,5 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	15	15	18	18	21	21
Dosagem de polímero (mg/L)	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Turbidez final (NTU)	1,31	1,38	1,17	1,41	1,24	1,32
pH	6,82	6,78	6,71	6,69	6,64	6,62
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	15	14	13	12	11	12
Cor aparente (mg Pt Co/L)	10	10	8	8	9	9
Tamanho dos flocos	G	G	G	G	G	G
Velocidade de decantação	R	R	R	R	R	R

Legenda: G – Grande, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

A adição de polímero permitiu a obtenção de flocos maiores e decantação mais rápida. A turbidez foi levemente reduzida nas concentrações de 0,2 mg/L de polímero e ligeiramente aumentada nas concentrações de 0,4 mg/L. Os resultados de cor aparente independeram da quantidade de floculante aplicada. As análises de pH e alcalinidade mostraram que a presença do polímero manteve seus valores mais altos que quando aplicado apenas PAC. Todos jarros apresentaram resultados dentro das especificações.

A combinação de 18 mg/L de PAC e 0,2 mg/L de polímero revelou uma água com a menor medida de turbidez final, 1,17 NTU. A aplicação da mesma dosagem de PAC sem a presença de polímero alcançou a turbidez final de 1,20 NTU. Os valores são semelhantes, por isso, deve-se considerar outros fatores, como tamanho dos flocos, velocidade de decantação e custo.

5.2.4 Testes de Jarros com a Amostra 2 (Turbidez inicial = 84,6 NTU)

O tratamento da amostra 2 com adição de PAC decorreram nas medições exibidas na Tabela 5.7.

Tabela 5.7: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 2 (turbidez inicial=84,6 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	18	21	24	27	30	33
Turbidez final (NTU)	0,90	0,69	1,02	1,91	5,36	15,3
pH	6,73	6,65	6,55	6,49	6,42	6,33
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	12	12	12	10	9	8
Cor aparente (mg Pt Co/L)	9	8	8	10	20	50
Tamanho dos flocos	P	M	M	M	M	M
Velocidade de decantação	L	M	R	R	M	M

Legenda: P – Pequeno, M – Médio(a), G – Grande, L – Lenta, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

As três menores concentrações de PAC apresentaram as maiores reduções de turbidez e cor aparente. Os valores de pH e alcalinidade diminuem com o acréscimo da adição de coagulante. Os tamanhos dos flocos variaram pouco, sendo pequenos apenas na dosagem de 18 mg/L, o que não afetou um bom resultado de turbidez. Já as melhores

velocidades de decantação foram encontradas para 24 e 27 mg/L de dosagem. Como a turbidez é o principal parâmetro para selecionar as concentrações que serão avaliadas com o polímero, as escolhidas são 18, 21 e 24 mg/L. Obteve-se resultados acima do limite de turbidez (5 NTU) nos ensaios com 30 e 33 mg/L do reagente.

A avaliação do tratamento da amostra 2 com PAC e polímero atuando juntos indicou as medidas expostas na Tabela 5.8.

Tabela 5.8: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 2 (turbidez inicial=84,6 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	18	18	21	21	24	24
Dosagem de polímero (mg/L)	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Turbidez final (NTU)	0,97	0,92	0,72	0,83	1,15	1,38
pH	6,63	6,60	6,48	6,46	6,38	6,34
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	11	11	10	10	10	9
Cor aparente (mg Pt Co/L)	5	5	4	5	8	8
Tamanho dos flocos	G	G	G	G	G	G
Velocidade de decantação	R	R	R	R	R	R

Legenda: G – Grande, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

Como na amostra 1, a adição de polímero gerou flocos maiores e velocidade de decantação mais rápida. As análises de turbidez final indicaram leve aumento quando comparadas com aplicação de PAC somente. Para a dosagem de 18 mg/L, o aumento da concentração de polímero diminuiu a turbidez; já para as demais o resultado foi oposto. Contudo, essas diferenças apresentam pequenas amplitudes e todos os valores estão dentro da especificação, sendo menores que 5 NTU. Os parâmetros pH, alcalinidade e cor aparente mostraram-se ligeiramente inferiores ao teste anterior.

A água decantada com menor turbidez final, 0,69 NTU, foi atingida com aplicação de 21 mg/L de PAC. Já a combinação de 21 mg/L de PAC e 0,2 mg/L de polímero proporcionaram a turbidez final de 0,72 NTU. Como para a amostra 1, esses resultados são semelhantes e outras considerações devem ser feitas.

5.2.5 Testes de Jarros com a Amostra 3 (Turbidez inicial = 136 NTU)

Para a terceira amostra também foram realizados experimentos com PAC e com PAC e polímero em testes de jarros. Os resultados são expostos nas Tabelas 5.9 e 5.10.

Tabela 5.9: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 3 (turbidez inicial=136 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	18	21	24	27	30	33
Turbidez final (NTU)	1,83	1,59	1,07	1,22	1,81	2,66
pH	6,61	6,55	6,53	6,49	6,44	6,39
Alcalinidade (mg CaCO₃/L)	12	12	11	10	9	8
Cor aparente (mg Pt Co/L)	10	10	8	9	10	15
Tamanho dos flocos	P	P	M	M	M	M
Velocidade de decantação	L	M	M	M	R	R

Legenda: P – Pequeno, M – Médio(a), L – Lenta, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

Os resultados de turbidez mais baixos encontram-se nas dosagens 21, 24 e 27 mg/L de PAC. Para a maior concentração, encontraram-se índices mais elevados de turbidez e cor aparente. As análises de pH e alcalinidade assemelham-se aos casos anteriores, reduzindo com o acréscimo de adição do coagulante. Os flocos desenvolvidos são pequenos para as duas menores concentrações e médios para as restantes. Já a velocidade de decantação é lenta apenas no primeiro jarro e rápida nos dois últimos. Todos os resultados de turbidez desse caso atingiram a especificação do Ministério da Saúde e são menores que 5 NTU.

Tabela 5.10: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 3 (turbidez inicial=136 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	21	21	24	24	27	27
Dosagem de polímero (mg/L)	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Turbidez final (NTU)	1,54	1,63	0,87	0,99	1,25	1,33
pH	6,56	6,57	6,50	6,47	6,44	6,42
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	10	10	10	9	10	9
Cor aparente (mg Pt Co/L)	8	8	5	5	7	8
Tamanho dos flocos	G	G	G	G	G	G
Velocidade de decantação	R	R	R	R	R	R

Legenda: G – Grande, R – Rápida.
 Fonte: Própria, 2018.

A presença do floculante proporciona flocos grandes e, conseqüentemente, rápida velocidade de decantação (SANTOS, 2011). A comparação com o teste sem polímero indica que 0,2 mg/L do floculante reduz a turbidez final e 0,4 mg/L do mesmo a eleva. As medidas de pH, alcalinidade e cor aparente são menores no teste com os reagentes combinados. Todos os resultados estão dentro do limites exigidos. O mais baixo valor de turbidez final foi encontrado nas concentrações de 24 mg/L de PAC e 0,2 mg/L de polímero.

5.2.6 Testes de Jarros com a Amostra 4 (Turbidez inicial = 262 NTU)

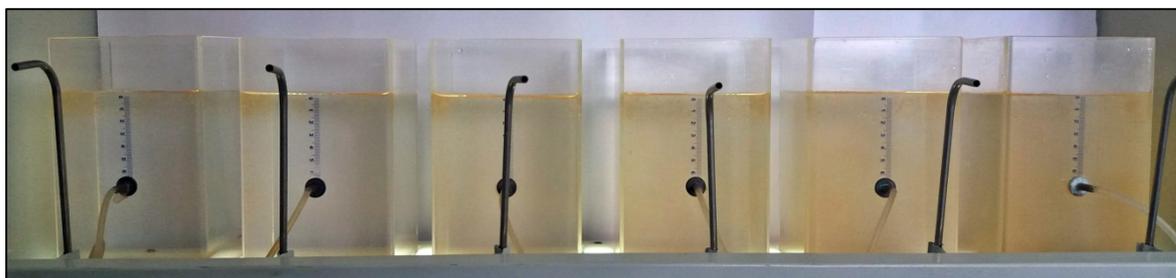
As Figuras 5.6 e 5.7 mostram a última amostra antes e depois do ensaio com PAC.

Figura 5.6: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) antes do teste de jarros

Fonte: Própria, 2018.

A amostra 4 foi distribuída igualmente aos seis recipientes do equipamento. Observe na Figura 5.6 que a alta turbidez inicial impede a visualização das pás agitadoras.

Figura 5.7: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) após teste de jarros com PAC



Fonte: Própria, 2018.

Na Figura 5.7 é possível observar visualmente que a turbidez aumenta ao longo dos jarros, ou seja, o melhor resultado foi atingido pela menor dosagem de PAC. Isso se confirma pelas análises físico-químicas apresentadas na Tabela 5.11.

Tabela 5.11: Teste de Jarros com aplicação de PAC na amostra 4 (turbidez inicial=262 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	24	28	32	36	40	44
Turbidez final (NTU)	1,49	3,43	10,4	13,8	18,2	20,9
pH	6,55	6,52	6,36	6,28	6,21	6,10
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	11	11	11	10	10	10
Cor aparente (mg Pt Co/L)	10	20	50	60	100	120
Tamanho dos flocos	M	M	P	P	P	P
Velocidade de decantação	R	R	M	L	L	L

Legenda: P – Pequeno, M – Médio(a), G – Grande, L – Lenta, R – Rápida.

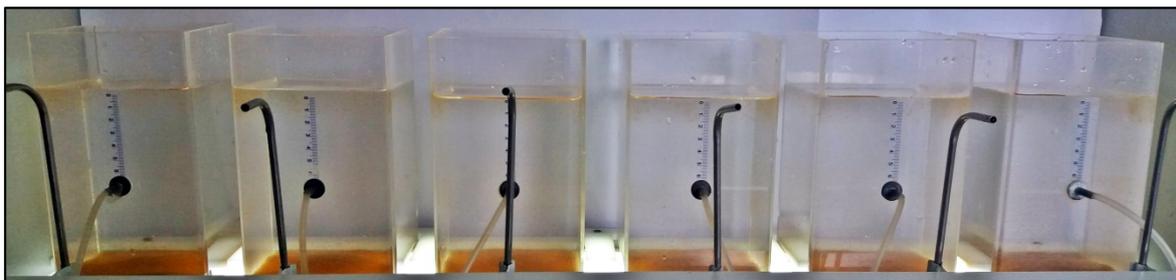
Fonte: Própria, 2018.

A amostra 4 possui maior turbidez inicial e os resultados de turbidez das concentrações 32, 36, 40 e 44 mg/L de PAC ficaram acima do limite de 5 NTU, também decorrendo em altos valores de cor aparente, pequenos flocos e lenta decantação. Como a turbidez mais baixa foi encontrada na aplicação de 24 mg/L, menor dosagem testada, é necessário verificar se um ponto ótimo não estaria em uma dosagem inferior a esta. Assim, para seguir as concentrações das outras amostras, as concentrações avaliadas com

polímero na amostra 4 são 21, 24 e 27 mg/L de PAC. As alcalinidades apresentaram-se parecidas e o pH manteve o padrão de reduzir ao longo dos jarros.

A Figura 5.8 mostra os jarros do equipamento após o ensaio na amostra 4 com PAC e polímero. A Tabela 5.12 contém os resultados das análises das águas desses recipientes.

Figura 5.8: Amostra 4 (turbidez inicial = 262 NTU) após teste de jarros com PAC e polímero



Fonte: Própria, 2018.

Tabela 5.12: Teste de Jarros com aplicação de PAC e polímero na amostra 4 (turbidez inicial=262 NTU)

Jarro	1	2	3	4	5	6
Dosagem de PAC (mg/L)	21	21	24	24	27	27
Dosagem de polímero (mg/L)	0,2	0,4	0,2	0,4	0,2	0,4
Turbidez final (NTU)	1,38	1,50	0,90	1,01	2,60	2,79
pH	6,60	6,62	6,53	6,51	6,38	6,40
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	11	11	11	10	9	9
Cor aparente (mg Pt Co/L)	9	10	5	6	15	15
Tamanho dos flocos	G	G	G	G	G	G
Velocidade de decantação	R	R	R	R	R	R

Legenda: G – Grande, R – Rápida.

Fonte: Própria, 2018.

As menores concentrações de PAC e a adição do polímero permitiram a formação de flocos grandes, decantação rápida e valores de turbidez final dentro da especificação. Medidas de pH e alcalinidade diminuem com o aumento da aplicação de PAC e sofrem pouca interferência da presença do polímero. Os resultados de turbidez e cor aparente mais baixos são atingidos nas concentrações de 24 mg/L de coagulante e 0,2 mg/L de floculante.

5.2.7 Avaliação Geral

Os testes de jarros aplicados às amostras de água bruta com diferentes condições de turbidez inicial indicaram questões importantes que devem ser consideradas para sugestão de procedimentos operacionais na ETA estudada.

A presença do polímero como floculante gera flocos grandes e decantação rápida em todos os ensaios realizados. Em geral, o floculante atuou de forma pouco expressiva na turbidez final das amostras, diminuindo-a na concentração de 0,2 mg/L e elevando-a na concentração de 0,4 mg/L para a maioria dos casos.

Maiores adições de PAC reduzem mais os valores de pH e alcalinidade, porém a inclusão do floculante interferiu nesses parâmetros de maneiras diferentes, impedindo a indicação de um padrão de influência. É importante citar que as especificações dessas análises, pH de 6,0 a 9,5 e alcalinidade de 0 a 30 mg CaCO₃/L (BRASIL, 2011), foram respeitadas em todos os experimentos realizados.

As medidas de cor aparente apontam relação com os resultados de turbidez final, conforme indicado pelo Standard Methods (1998). Deseja-se que estas análises sejam as mais baixas possíveis, o que foi encontrado nos mesmos ensaios.

5.3 Sugestão de Procedimento Operacional

O equipamento teste de jarros possibilita uma comparação imediata e avaliação da melhor dosagem de coagulante e floculante a ser usada no processo, podendo-se ainda considerar o tempo de decantação e a qualidade do líquido clarificado em relação ao parâmetro turbidez (RODRIGUES, 2004). Com base nos resultados encontrados, orientam-se os operadores da ETA quanto às dosagens de PAC e polímero no tratamento.

Para o tratamento de água bruta com até 50 NTU de turbidez, indica-se a aplicação de 18 mg/L de PAC. Os testes não definiram a necessidade de adicionar polímero nessa faixa. Fatores como tamanho dos flocos e velocidade de decantação foram maiores na sua presença, porém, o custo adicional pelo uso desse reagente deve ser considerado. Portanto, recomenda-se que o processo seja realizado apenas com o coagulante. O floculante deve ser mantido a disposição para casos de dificuldade de decantação, verificadas visualmente ou nas análises de turbidez rotineiras.

Quando a análise de turbidez da água bruta estiver entre 50 e 100 NTU, a dosagem de PAC deve ser 21 mg/L. Como para a faixa anterior, o uso de polímero mostrou auxiliar a decantação, mas não ser essencial. Por isso, sua aplicação é indicada apenas se houver necessidade.

As faixas de turbidez de água bruta de 100 a 150 NTU e acima de 150 NTU apresentaram melhores resultados com a combinação de 24 mg/L de PAC e 0,2 mg/L de polímero. Por isso, essas faixas são unificadas em acima de 100 NTU.

As constatações citadas permitem a criação da Tabela 5.13 que sugere o modo de operação quanto às dosagens de coagulante e floculante na ETA.

Tabela 5.13: Dosagens de PAC e polímero indicadas conforme turbidez da água bruta

Faixa de Turbidez da Água Bruta (NTU)	Dosagem de PAC (mg/L)	Dosagem de Polímero (mg/L)	Observação
< 50	18	0*	*Aplicar 0,2 mg/L se ocorrer dificuldade de decantação
50 – 100	21	0*	
> 100	24	0,2	

Fonte: Própria, 2018.

Os valores sugeridos servem de apoio para os operadores. Não foram testadas todas as dosagens, portanto, o ponto ideal pode ser algo próximo ao indicado, como 17 ou 19 mg/L para água bruta com turbidez menor que 50 NTU, por exemplo.

O equipamento teste de jarros simula as etapas de coagulação, floculação e decantação do processo de tratamento de água (SANTOS, 2011). Entretanto, existem diversas configurações de decantadores e a resposta real pode não ser igual à simulação, exigindo bom senso no modo de atuação dos operadores da ETA.

5.4 Avaliação Econômica

As médias de dosagens de PAC para as faixas de turbidez de água bruta utilizadas na ETA no período de junho a setembro de 2018 são apresentadas na Tabela 5.14.

Tabela 5.14: Dosagens médias de PAC conforme turbidez da água bruta utilizadas entre junho e setembro de 2018

Faixa de Turbidez da Água Bruta (NTU)	Dosagem Média de PAC (mg/L)
< 50	23,29
50 - 100	26,91
> 100	33,93

Fonte: Própria, 2018.

As dosagens indicadas nesse estudo são todas inferiores ao normalmente empregado no processo. Considerando uma vazão de tratamento de 1000 L/s (capacidade de operação da ETA) e que o funcionamento ocorre 24 h/dia, a economia de coagulante para as respectivas faixas de turbidez da água bruta seria de 1053 L/dia (22,7%), 1176 L/dia (22,0%) e 1977 L/dia (29,3%).

Os testes demonstraram que a adição de 0,2 mg/L de polímero já gerou os efeitos necessários. Como a recomendação seguida pelos operadores é de 0,4 mg/L, o uso do reagente reduziria a metade. Assim, quando aplicado ao tratamento de 1000 L/s, a economia seria de 17,28 Kg/dia.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo padronizar o uso de policloreto de alumínio e poliacrilamida em uma ETA de Porto Alegre baseando-se na turbidez da água bruta captada. Para isso, foram coletados dados reais do processo entre os meses de junho e setembro de 2018 que serviram de orientação para a realização de testes de jarros. Amostras com condições variáveis quanto ao valor de turbidez inicial foram coletadas para os ensaios. Análises físico-químicas permitiram avaliar a adequação aos parâmetros de qualidade e definir as dosagens ideais dos reagentes.

Com base nos dados de turbidez da ETA, delimitaram-se quatro faixas de turbidez para a água bruta: menor que 50 NTU, entre 50 e 100 NTU, entre 100 e 150 NTU, e maior que 150 NTU, das quais amostras foram coletadas e testadas com diferentes concentrações de PAC e polímero. As análises aplicadas antes e após os ensaios foram turbidez, pH, alcalinidade e cor aparente. Avaliaram-se, também, tamanho dos flocos e velocidade de decantação nos testes de jarros.

Os resultados indicaram que as duas faixas de menor turbidez não exigiram a adição de polímero, enquanto as duas faixas de maior turbidez demandaram as mesmas dosagens dos reagentes. Quando a água captada exibir turbidez até 50 NTU, deve-se dosar 18 mg/L de PAC. Para a faixa entre 50 e 100 NTU, recomenda-se 21 mg/L do coagulante. Já água bruta com turbidez superior a 100 NTU necessita de 24 mg/L de PAC e 0,2 mg/L de floculante.

Os resultados obtidos nesse estudo, se aplicadas ao processo real na ETA, proporcionam economia de produtos químicos. Reduzir-se-iam os volumes gastos de PAC em pelo menos 22%, enquanto o consumo de poliacrilamida seria diminuído em 50%.

Conclui-se que o tratamento de água potável pode ser eficiente e respeitar os padrões de qualidade, definidos pelo Ministério da Saúde na Portaria Nº 2.914/11, com aplicações de dosagens de coagulante e floculante mais econômicas. Assim, sugere-se aos operadores da ETA estudada que busquem seguir as orientações dadas a fim de atender a população da cidade com segurança, qualidade e economia de recursos públicos.

7 Referências

ALMEIDA, R. B. R. Clarificação de Água utilizando sementes da planta Moringa. Graduação em Engenharia Ambiental. Faculdade Dinâmica das Cataratas. Foz do Iguaçu-PR, 2009.

BARRETO, V. B. G. Estudo de caso: Utilização de polímero catiônico como auxiliar de coagulação no tratamento de água da Estação de Tratamento da Nova Marabá. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Faculdade de Engenharia de Materiais, Marabá-PA, 2010.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria Nº 2.914, de 12 de dezembro de 2011. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria de Consolidação Nº 5, de 28 de setembro de 2017. Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde.

CEIC – CENTRO INTEGRADO DE COMANDO. Registro Diário de Chuva de Junho de 2018. Prefeitura de Porto Alegre – RS, 2018. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/ceic/default.php?p_secao=28>. Acesso em 28 de novembro de 2018.

COMUSA – COMPANHIA MUNICIPAL DE SANEAMENTO. Tratamento de Água. Novo Hamburgo/RS. 2017. Disponível em: <<http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

DERISIO, J. C. Introdução ao Controle de Poluição Ambiental. 2ª edição. São Paulo: Signus Editora, 2000.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. Métodos e Técnicas de Tratamento de Água. 2ª edição. 2º volume. São Carlos: RiMa, 2005.

DMAE – DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. Compromisso com a Qualidade. Prefeitura de Porto Alegre - RS, 2018a. Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/dmae/default.php?p_secao=433>. Acesso em 03 de novembro de 2018.

DMAE – DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. Plano de Qualidade da ETA Belém Novo. Instrução de Trabalho IT007. Revisão nº 12. Prefeitura de Porto Alegre - RS. 2018b.

DMAE – DEPARTAMENTO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO. UniLab, Sistema Operacional das Estações de Tratamento de Água. Prefeitura de Porto Alegre – RS, 2018c.

FEC – FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL. UNICAMP. Módulo de Saneamento Ambiental. 2001. Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.fec.unicamp.br/~bdta/coagulacao.htm>>. Acesso em: 03 de novembro de 2018.

FUNASA – FUNDAÇÃO NACIONAL DA SAÚDE. Manual Prático de Análise de Água. 2. Ed. rev. Brasília: Fundação Nacional da Saúde, 2006.

GUIMARÃES, A. J. A.; CARVALHO, D. F. de; SILVA, L. D. B. da. Saneamento básico. 2017. Disponível em: <<http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/leonardo/downloads/APOSTILA/Apostila%20IT%20179/Capit%204%20parte%202.pdf>>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

KURITA. Handbooh of Water Treatment. Second English Edition. 1999. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/39456186/Handbook-of-Water-Treatment>>. Acesso em 04 de setembro de 2018.

PAVANELLI, G. Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada. 2001. 233 f. Dissertação de Mestrado em Hidráulica e Saneamento - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2001.

RICHTER, C. A.; NETTO, J. M. de A. Tratamento de Água: Tecnologia atualizada. São Paulo: Edgard Blücher, 1991.

RODRIGUES, F. S. F., Aplicação da Ozonização e do Reativo de Fenton como Pré-tratamento de Chorume com os Objetivos de Redução da Toxicidade e do Impacto no Processo Biológico, Dissertação de Mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2004.

SANTOS, G. R. Estudo de Clarificação de Água de Abastecimento Público e Otimização da Estação de Tratamento de Água. Dissertação (Mestrado em Tecnologia dos Processos Químicos e Bioquímicos) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

SPERLING, M. V. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos. 3ª edição. Belo Horizonte: Editora DESA, 2005.

STANDARD METHODS. For the Examination of Water and Wastewater 20 th. 1998.

TAE - REVISTA ESPECIALIZADA EM TRATAMENTO DE ÁGUA E EFLUENTES. Sistema de Decantação. 2013. Disponível em: < <http://www.revistatae.com.br/6101-noticias>>. Acesso em 29 de novembro de 2018.

TIBA, W. M. Comparação Técnica visando a substituição do Coagulante Sulfato de Alumínio pelo Sulfato Férrico no Tratamento de Água de Abastecimento. 2012. 130 f. Trabalho de conclusão de curso – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2012.

VALENTE, J. P. S, PADILHA, P. M., SILVA, A. M. M. da. Dissolved oxygen (DO), biochemical oxygen demand (BOD) and chemical oxygen demand (COD) as pollution parameters in the Lavapés/Botucatu - SP brook. Ecl. Quím. (São Paulo), v.22, p.49-66, 1997.

8 ANEXO A

Tabela 8.1: Dados operacionais da ETA nos meses de junho a setembro de 2018

Dia	Turbidez da Água Bruta (NTU)				Turbidez da Água Decantada (NTU)	Dosagem de PAC (mg/L)	Aplicação de Polímero
	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	Média	Média	
01/jun	18	27,67	78	17,25	1,92	20,50	Não
02/jun	89	141,40	181	36,71	4,13	29,96	Sim
03/jun	31	57,58	94	22,79	1,81	28,88	Sim
04/jun	20	24,33	29	2,50	1,66	24,13	Não
05/jun	25	126,17	257	101,09	3,98	28,67	Sim
06/jun	56	104,67	181	39,98	1,80	30,83	Não
07/jun	48	68,08	94	16,70	1,78	25,00	Não
08/jun	38	67,50	89	18,64	1,94	22,00	Não
09/jun	28	32,00	38	3,67	1,98	24,67	Não
10/jun	24	31,08	41	5,60	2,00	23,00	Não
11/jun	22	30,92	53	8,46	2,05	23,21	Não
12/jun	25	51,50	241	60,02	2,04	24,42	Não
13/jun	298	473,67	815	168,44	3,23	40,13	Sim
14/jun	93	195,58	320	99,96	2,98	40,67	Sim
15/jun	52	65,50	88	13,33	2,26	29,54	Não
16/jun	34	43,67	52	6,07	2,36	23,38	Não
17/jun	25	29,25	34	3,05	2,09	21,79	Não
18/jun	23	24,75	27	1,29	2,09	20,42	Não
19/jun	20	22,58	25	1,56	2,28	19,92	Não
20/jun	19	21,00	25	1,71	2,08	19,58	Não
21/jun	19	20,17	23	1,34	1,92	19,21	Não
22/jun	22	25,08	38	5,63	1,77	20,00	Não
23/jun	22	26,50	33	4,60	1,62	20,42	Não
24/jun	22	26,08	32	2,78	1,64	22,00	Não
25/jun	26	37,92	64	12,87	2,00	22,00	Não
26/jun	26	31,33	38	4,54	1,77	22,00	Não
27/jun	22	24,83	27	1,34	1,96	22,00	Não
28/jun	24	30,17	42	5,59	2,02	20,58	Não
29/jun	26	30,08	34	2,57	1,94	21,92	Não
30/jun	24	26,67	29	1,61	1,81	23,33	Não
01/jul	21	25,17	27	1,64	2,23	21,92	Não
02/jul	25	45,50	148	32,83	1,99	21,67	Não
03/jul	45	92,64	155	38,35	2,40	30,43	Sim
04/jul	39	46,25	58	6,21	2,20	24,58	Não
05/jul	32	37,42	43	2,87	2,53	24,00	Não
06/jul	33	36,58	41	2,75	3,24	24,42	Não
07/jul	33	50,50	213	51,24	2,81	24,46	Não
08/jul	164	258,33	343	64,47	3,48	34,63	Sim

Dia	Turbidez da Água Bruta (NTU)				Turbidez da Água Decantada (NTU)	Dosagem de PAC (mg/L)	Aplicação de Polímero
	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	Média	Média	
09/jul	87	159,92	260	58,32	2,98	34,50	Sim
10/jul	66	100,00	148	25,14	2,53	30,46	Não
11/jul	43	55,30	70	8,74	2,24	29,05	Não
12/jul	45	52,83	61	4,78	3,52	26,33	Não
13/jul	37	41,92	45	2,19	2,73	24,79	Sim
14/jul	36	37,33	40	1,37	2,79	25,00	Sim
15/jul	30	32,42	37	2,54	2,62	25,00	Não
16/jul	30	36,25	63	9,14	2,91	24,38	Não
17/jul	32	36,67	47	3,55	2,24	24,29	Não
18/jul	30	33,08	37	2,68	2,49	23,00	Não
19/jul	30	31,33	36	2,15	2,84	22,08	Não
20/jul	28	128,92	282	117,00	3,39	26,83	Sim
21/jul	156	301,33	385	69,45	4,14	38,13	Sim
22/jul	66	85,33	123	18,11	2,79	28,83	Não
23/jul	54	83,08	149	32,34	2,55	28,00	Não
24/jul	46	59,58	97	16,99	2,34	27,79	Não
25/jul	37	41,08	46	2,81	2,16	27,21	Não
26/jul	31	35,17	37	1,70	2,41	26,17	Não
27/jul	29	31,25	34	1,54	2,49	26,00	Não
28/jul	28	30,33	32	1,15	2,57	25,50	Não
29/jul	39	200,92	360	100,19	2,50	32,58	Sim
30/jul	43	50,42	75	8,37	2,24	28,00	Não
31/jul	33	37,91	45	4,61	2,34	24,33	Não
01/ago	30	32,67	36	1,78	2,91	24,83	Não
02/ago	28	30,33	35	1,87	2,53	24,00	Não
03/ago	29	30,42	33	1,24	2,61	24,00	Não
04/ago	28	71,33	210	69,34	3,19	24,42	Sim
05/ago	33	77,42	148	43,79	2,17	30,50	Não
06/ago	27	32,08	39	4,40	2,60	23,67	Não
07/ago	27	28,08	29	0,67	3,14	22,00	Não
08/ago	27	40,58	89	18,28	2,52	23,58	Não
09/ago	154	212,00	304	37,99	3,18	35,29	Sim
10/ago	151	220,58	278	35,21	2,76	37,00	Sim
11/ago	108	159,08	230	49,60	2,46	36,58	Sim
12/ago	56	68,92	105	14,64	2,73	29,00	Não
13/ago	37	47,25	60	6,37	2,12	25,58	Sim
14/ago	34	36,92	41	2,02	2,99	24,00	Não
15/ago	27	31,58	43	4,40	2,62	25,00	Sim
16/ago	27	28,67	31	1,15	1,92	22,88	Não
17/ago	23	26,17	31	2,66	2,45	23,00	Não
18/ago	22	23,75	27	1,42	2,63	23,42	Não
19/ago	22	48,67	98	33,91	2,48	26,25	Sim

Dia	Turbidez da Água Bruta (NTU)				Turbidez da Água Decantada (NTU)	Dosagem de PAC (mg/L)	Aplicação de Polímero
	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão	Média	Média	
20/ago	29	67,08	135	41,60	2,48	27,17	Não
21/ago	25	28,75	33	1,91	2,09	22,17	Não
22/ago	29	35,50	66	11,69	2,03	21,42	Não
23/ago	26	46,58	96	25,29	2,26	23,08	Não
24/ago	23	68,08	350	105,57	2,07	23,17	Sim
25/ago	162	208,83	396	62,17	1,73	34,38	Sim
26/ago	41	70,58	135	27,07	1,95	29,21	Sim
27/ago	28	33,08	40	3,99	2,48	23,17	Não
28/ago	25	27,25	31	1,66	2,25	22,00	Não
29/ago	24	29,67	38	4,42	2,53	22,08	Não
30/ago	38	51,33	105	18,40	2,44	24,00	Sim
31/ago	37	44,50	69	9,02	2,39	24,00	Não
01/set	37	41,17	46	2,66	2,33	24,71	Sim
02/set	40	42,64	44	1,43	3,30	24,00	Sim
03/set	38	76,08	140	34,21	3,18	24,67	Sim
04/set	48	109,08	198	57,80	2,80	28,75	Sim
05/set	43	46,17	50	2,21	2,84	23,50	Sim
06/set	39	42,08	49	3,15	2,99	24,00	Sim
07/set	36	39,08	43	2,23	3,58	23,83	Sim
08/set	33	35,00	38	1,21	2,91	23,96	Sim
09/set	32	32,67	34	0,65	3,01	24,21	Sim
10/set	28	32,00	34	1,63	2,55	24,76	Sim
11/set	30	31,67	33	1,15	2,83	24,71	Sim
12/set	30	31,83	34	1,03	3,18	24,79	Sim
13/set	29	30,17	32	0,94	2,98	24,00	Sim
14/set	26	28,75	30	1,06	2,32	24,00	Não
15/set	26	27,83	31	1,47	2,35	23,58	Não
16/set	25	26,75	31	1,60	2,51	22,38	Não
17/set	25	26,75	30	1,60	2,69	23,83	Não
18/set	24	24,50	27	0,90	2,89	22,50	Não
19/set	23	25,75	30	2,09	2,42	22,92	Não
20/set	20	23,42	31	3,37	2,20	23,00	Não
21/set	19	20,67	23	1,07	2,38	23,50	Não
22/set	21	22,83	26	1,90	2,50	22,58	Não
23/set	24	72,17	287	73,56	1,77	25,29	Não
24/set	52	66,75	86	9,49	1,88	27,08	Não
25/set	38	49,92	62	6,91	2,46	23,71	Não
26/set	32	34,17	38	1,95	2,57	23,42	Sim
27/set	25	28,17	34	2,55	2,02	23,92	Não
28/set	24	27,58	33	3,20	2,19	21,83	Não
29/set	31	93,58	590	163,51	2,93	22,83	Sim
30/set	60	67,67	88	7,51	1,78	29,08	Não

Fonte: Adaptado (DMAE, 2018c).