



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE CRATEÚS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA

ANTONIA LEYANNE GOMES DE ARAÚJO

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE
ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE**

CRATEÚS

2021

ANTONIA LEYANNE GOMES DE ARAÚJO

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO
DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof.^a Dr.^a Larissa Granjeiro Lucena.

CRATEÚS

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A687o Araújo, Antonia Leyanne Gomes de.
Otimização do processo de tratamento de água de abastecimento do município de Crateús-CE / Antonia Leyanne Gomes de Araújo. – 2021.
77 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, 3, Crateús, 2021.
Orientação: Profa. Dra. Larissa Granjeiro Lucena.
1. Água de abastecimento. 2. Delineamento Composto Central Rotacional. 3. Metodologia de Superfície Resposta. 4. Remoção de turbidez. 5. Remoção de cor. I. Título.

CDD

ANTONIA LEYANNE GOMES DE ARAÚJO

OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO
DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof^a. Dr.^a Larissa Granjeiro Lucena.

Aprovado em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr.^a Larissa Granjeiro Lucena (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

M.^c Francisco das Chagas da Costa Lopes
Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)

Prof^a. M.^a Raimunda Moreira da Franca
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof.^a Dr.^a Thayres de Sousa Andrade
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus que me permitiu
saúde e força para enfrentar
os obstáculos.

Aos meus pais, Amélia e Neto.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que nunca me abandonou por nenhum segundo, me deu saúde, me guardou e protegeu em todos os momentos. Foi e é Ele o meu refúgio.

Aos meus pais, Neto e Amélia, por sempre me incentivarem a estudar, me ajudarem a superar os obstáculos e vibrarem a cada vitória minha (foi e sempre será tudo por vocês).

Aos meus irmãos, Rayanne Nájala, Rafael Araújo e Samuel Araújo, que nunca mediram esforços para me ajudar e estiveram ao meu lado por toda essa caminhada.

Aos meus afilhados, João Heitor, Theo Abner e Maria Liz, que foram o meu combustível nos momentos de fraqueza.

À Roberta, minha cunhada, amiga e segunda mãe, que me adotou em Crateús, estando sempre disposta a me ajudar, em qualquer circunstância.

À Larissa, minha orientadora e maior referência de profissional, que apoiou as minhas ideias e junto comigo, fez acontecer. Ela que sempre foi a minha calma em meio à tempestade, além de orientadora, uma grande amiga.

À Gabriela, Ivo, Fabrinny e Isabel (minha banda), que estiveram juntos comigo durante toda essa caminhada, nas lutas diárias da universidade e pela amizade incondicional de cada um.

Ao Luan, que esteve comigo nos melhores e piores momentos, nunca me deixou baixar a cabeça e sempre me lembrava da força que tenho.

À Karoline, Jenilson e Felipe, a quem eu compartilhei experiências boas e ruins, meus colegas de profissão e amigos para a vida toda.

À Thayres, Raimunda e Janine, professoras da Engenharia Ambiental e Sanitária, que me ensinaram a trabalhar com amor e a estar preparada para os obstáculos que me aguardam na profissão.

À Luana, que fez eu me apaixonar pelo curso, me proporcionou as melhores experiências e me ajudou em um dos momentos mais cruciais dessa jornada.

À ASSENG, por me proporcionar uma experiência de estágio que terá uma importância imprescindível na minha carreira profissional. Aos meus orientadores profissionais Aurício e Pedro, por toda a paciência e conduta ao repassar os seus conhecimentos e por me deixarem mais apaixonada pela engenharia. Ao Wiliam, por sua amizade e consideração, que fez eu me sentir tão acolhida. A todos vocês, só gratidão.

Ao laboratório da CAGECE, pela parceria e disponibilidade na realização dos experimentos.

Ao Francisco das Chagas, pela amizade e grande ajuda no desenvolvimento desse projeto.

“Nenhuma engenharia constrói caráter,
mas com caráter se faz os melhores engenheiros.”

Jordan Lucas

RESUMO

O controle da dosagem dos produtos químicos utilizados no tratamento de água ainda é ineficaz na maioria das estações de tratamento. A otimização do processo colabora para utilização dos produtos em quantidade adequada, a fim de elevar a eficiência do tratamento, minimizar os resíduos e os custos gerados. Nesse contexto, a presente pesquisa teve como objetivo otimizar o processo de tratamento da água de abastecimento do município de Crateús-CE. Foi aplicado o método Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) aliado à análise das curvas de contorno e das superfícies respostas no estudo de duas variáveis imprescindíveis ao tratamento: concentração de coagulante e de polímero, a fim de maximizar as respostas remoção de turbidez e de cor. Os experimentos em *Jar Test* apresentaram eficiência máxima de 89% para remoção de turbidez e 91% para remoção de cor. A partir dos experimentos realizados e da análise de variância (ANOVA), os modelos foram classificados como estatisticamente significativos, com $R^2 = 0,833$ e $R^2 = 0,789$ para remoção de turbidez e cor, respectivamente. A validação experimental também confirmou os resultados obtidos na validação estatística, indicando que os modelos são estaticamente significativos. Para remoções de turbidez $> 70\%$ e para remoções de cor $> 65\%$, a faixa de concentração ótima abrange toda a faixa estudada: para o coagulante varia entre 13,79 mg/L e 56,21 mg/L, enquanto para o polímero essa faixa se estende de 0,12mg/L a 0,68mg/L. Para remoções de cor e turbidez ainda maiores que estas mencionadas, os pares ordenados das variáveis independentes devem ser definidos com base nas curvas de contorno geradas. A associação da modelagem e otimização por planejamento fatorial associado à metodologia de superfície resposta é capaz de elevar a qualidade da água de abastecimento e colaborar na redução da quantidade de produto químico utilizado no processo.

Palavras-chave: Água de abastecimento. Delineamento Composto Central Rotacional. Metodologia de Superfície Resposta. Remoção de turbidez. Remoção de cor.

ABSTRACT

Controlling the dosage of chemicals used in water treatment is still ineffective in most treatment plants. The optimization of the process contributes to the use of products in adequate quantity, in order to increase the efficiency of the treatment, minimize the residues and the generated costs. In this context, this research aimed to optimize the water supply treatment process in the municipality of Crateús-CE. The Central Composite Design (CCD) method was applied, associated with the analysis of the contour curves and the response surfaces in the study of two essential variables of the treatment: concentration of coagulant and polymer, in order to maximize the responses removing turbidity and color. The jar test experiments showed a maximum efficiency of 89% for removing turbidity and 91% for removing color. From the experiments performed and the analysis of variance (ANOVA), the models were classified as statistically significant, with $R^2 = 0.833$ and $R^2 = 0.789$ for removing turbidity and color, respectively. The experimental validation also confirmed the results obtained in the statistical validation, indicating that the models are statically significant. For turbidity removals $> 70\%$ and for color removals $> 65\%$, the optimal concentration range covers the entire range studied: for the coagulant it varies between 13.79 mg/L and 56.21 mg/L, while for the polymer this range extends from 0.12 mg/L to 0.68 mg/L. For color and turbidity removals even greater than those mentioned, the ordered pairs of independent variables must be defined based on the generated contour curves. The association of modeling and optimization by factorial planning associated with the surface response methodology is able to increase the quality of the supply water and collaborate in reducing the amount of chemical used in the process.

Keywords: Supply water. Central Composite Design. Response Surface Methodology. Turbidity removal. Color removal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Total de água consumida no Brasil por setor em 2019	20
Figura 2 – Fluxograma típico da tecnologia de tratamento convencional.....	25
Figura 3 – Vista frontal da grade	26
Figura 4 – Esquema em corte de um desarenador retangular.....	27
Figura 5 – Vista em planta e corte de misturador mecânico.....	29
Figura 6 – Vista em planta e corte de misturador hidráulico do tipo Calha Parshall	29
Figura 7 – Esquema do processo de floculação: agregação das partículas	30
Figura 8 – Corte esquemático de um sistema de floculador mecânico de eixo vertical.....	31
Figura 9 – Representação esquemática em corte de floculador hidráulico de escoamento vertical	31
Figura 10 – Vista em planta de um sistema hidráulico de escoamento horizontal	31
Figura 11 – Esquema de um decantador de fluxo horizontal	32
Figura 12 – Esquema de um decantador de fluxo vertical	33
Figura 13 – Processo de flotação no tratamento de água	33
Figura 14 – Classificação da filtração no tratamento de águas de abastecimento.....	35
Figura 15 – Elementos básicos de filtro de areia lento com fluxo descendente	35
Figura 16 – Características hidrobiológicas de qualidade	36
Figura 17 – Adição de flúor e correção de pH.....	38
Figura 18 – Localização do município de Crateús- CE.....	43
Figura 19 – Estação de Tratamento de Água Poty – ETA Poty	45
Figura 20– Coleta da água pré-oxidada.....	45
Figura 21– Armazenamento da água	46
Figura 22 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para o alcance do objetivo desejado	48
Figura 23 – Realização de experimentos no <i>Jar test</i>	52
Figura 24 – Resíduos versus ensaios (resposta remoção de turbidez).....	55
Figura 25 – Resíduos versus ensaios (resposta remoção de cor).....	56
Figura 26 – Distribuição dos resíduos na reta de normalidade (resposta remoção de turbidez)	56
Figura 27 – Distribuição dos resíduos na reta de normalidade (resposta remoção de cor)	57
Figura 28 – Variáveis significativas para a remoção de turbidez	58
Figura 29 – Variáveis significativas para a remoção de cor	59
Figura 30 – Variáveis significativas para a remoção de cor	59

Figura 31 –Valores preditos versus observados para remoção de turbidez	63
Figura 32 –Valores preditos versus observados para remoção de cor	63
Figura 33 – Curva de contorno: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de turbidez.....	65
Figura 34 – Superfície resposta: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de turbidez.....	65
Figura 35 – Curva de contorno: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de cor.....	67
Figura 36 – Superfície resposta: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de cor.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamento requerido em função da classificação de águas doces	22
Tabela 2 – Alguns dos principais parâmetros de classificação da qualidade da água	23
Tabela 3 – Principais parâmetros a serem investigados em uma análise de água	23
Tabela 4 – Parâmetros e métodos analíticos de análise da água bruta.....	47
Tabela 5 – Fatores utilizados no DCCR para otimização do processo	49
Tabela 6 – Matriz dos fatores de delineamento composto central rotacional de 2º ordem	50
Tabela 7 – Valores estabelecidos para os ensaios de validação do processo de otimização.....	51
Tabela 8 – Caracterização da amostra pré-oxidada	53
Tabela 9 – Condições dos fatores e valores de remoção de cor e turbidez obtidos nos ensaios de <i>Jar Test</i>	54
Tabela 10 – Tabela de análise de variância (ANOVA) para o modelo da resposta remoção de turbidez	61
Tabela 11 – Tabela de análise de variância (ANOVA) para o modelo da resposta remoção de cor	61
Tabela 12 – Respostas observadas nos ensaios, respostas obtidas pelo modelo e variação entre as observadas e obtidas (resíduo) para a remoção de turbidez	62
Tabela 13– Respostas observadas nos ensaios, respostas obtidas pelo modelo e variação entre as observadas e obtidas (resíduo) para a remoção de cor	62
Tabela 14 – Valores observados, preditos e o erro associado para remoção de turbidez	64
Tabela 15 – Valores observados, preditos e o erro associado para remoção de cor	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise de Variância
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
PAC	Policloreto de Alumínio
<i>SMEWW</i>	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Apresentação do tema e contextualização do problema	15
1.2	Objetivos	17
<i>1.2.1</i>	<i>Objetivo geral</i>	<i>17</i>
<i>1.2.2</i>	<i>Objetivos específicos</i>	<i>17</i>
1.3	Justificativa	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	Água de abastecimento	20
<i>2.1.1</i>	<i>Consumo e importância</i>	<i>20</i>
<i>2.1.2</i>	<i>Introdução à qualidade de água</i>	<i>21</i>
2.2	Tratamento convencional das águas de abastecimento	24
<i>2.2.1</i>	<i>Descrição dos processos e operações unitárias</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1.1</i>	<i>Tratamento preliminar</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1.1.1</i>	<i>Telas e grades</i>	<i>25</i>
<i>2.2.1.1.2</i>	<i>Desarenador ou caixa de areia</i>	<i>26</i>
<i>2.2.1.2</i>	<i>Pré-oxidação</i>	<i>27</i>
<i>2.2.1.3</i>	<i>Coagulação</i>	<i>28</i>
<i>2.2.1.4</i>	<i>Floculação</i>	<i>29</i>
<i>2.2.1.5</i>	<i>Decantação e flotação</i>	<i>31</i>
<i>2.2.1.6</i>	<i>Filtração</i>	<i>34</i>
<i>2.2.1.7</i>	<i>Desinfecção</i>	<i>35</i>
<i>2.2.1.8</i>	<i>Fluoretação e correção de pH</i>	<i>37</i>
<i>2.2.2</i>	<i>Estudo das variáveis interferentes</i>	<i>38</i>
<i>2.2.2.1</i>	<i>pH</i>	<i>38</i>
<i>2.2.2.2</i>	<i>Temperatura</i>	<i>39</i>
<i>2.2.2.3</i>	<i>Dosagem de coagulantes</i>	<i>40</i>
<i>2.2.2.4</i>	<i>Auxiliar de coagulação/floculação</i>	<i>40</i>
3	METODOLOGIA	42
3.1	Classificação e definição da pesquisa	42
3.2	Local de estudo	42
3.3	Coleta e caracterização da amostra de água	45
3.4	Otimização do processo	47

3.5	Procedimentos experimentais	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Caracterização da amostra de água	53
4.2	Otimização do tratamento de água	54
4.3	Efeito das variáveis nas respostas.....	57
4.4	Modelo de 2° ordem da resposta em função das variáveis significativas.....	60
4.5	Validação experimental do modelo.....	64
4.6	Definição das faixas ótimas operacionais de cada variável do processo	65
4.6.1	<i>Faixas operacionais ótimas para remoção de turbidez.....</i>	<i>65</i>
4.6.2	<i>Faixas operacionais ótimas para remoção de cor.....</i>	<i>67</i>
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	APÊNDICE A – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO – POP.....	76
	ANEXO A – TABELA DE CONCENTRAÇÕES DOS REAGENTES	
	UTILIZADOS NA ETA POTY.....	77

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação do tema e contextualização do problema

Aliado ao crescimento da população mundial, o consumo de água para usos diversos também se elevou. Com essa evolução exponencial, tornou-se necessário o incremento intelectual e tecnológico ao longo do tempo a fim de acompanhar tal realidade. Com o aumento da necessidade de água, também se tornou visível o acréscimo de microrganismos patogênicos, deixando explícito que o consumo de água sem qualquer tipo de tratamento pode levar ao surgimento de doenças mortais aos seres humanos (GOMES, 2016).

Há algumas décadas têm-se acentuado, continuamente, os problemas relacionados à poluição dos mananciais, especialmente devido ao desenvolvimento industrial e agrícola, demandando medidas tecnológicas adequadas ao tratamento da água para consumo humano (VERAS; DI BERNARDO, 2008).

Além disso, a ocorrência de doenças por veiculação hídrica tem aumentado de forma considerável, principalmente, nos centros urbanos. Tal fato possui como principais agravantes a falta de saneamento básico e a ausência e/ou deficiência dos sistemas de tratamento de água para consumo. De acordo com o contexto do aumento da poluição dos mananciais na captação de água, o processo de tratamento da água para o consumo humano tem se tornado indispensável (NASCIMENTO, 2003). Nesse aspecto, destaque deve ser dado ao papel de uma Estação de Tratamento de Água – ETA, cujo principal objetivo é o alcance dos padrões de potabilidade, de acordo com as legislações vigentes. Isso se dá com a utilização de tecnologias e materiais adequados, que estejam em conformidade com o manancial de captação, e as características físico-químicas da água bruta e tratada (RAMOS, 2017).

A Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), anexo XX, que dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, em seu artigo 5, inciso II, define água potável como a água destinada ao consumo humano que deve atender ao padrão de potabilidade estabelecido nesse anexo e que não ofereça riscos à saúde.

O tratamento de água teve inicialmente o objetivo principal de fornecer água esteticamente agradável ao consumidor. Dessa forma, no início do século XX, a única operação unitária realizada no tratamento de água nas estações era a etapa de filtração, que atuava na remoção de sólidos da água, a fim de reduzir a má aceitação da população (ALVES; FILHO, 2006).

No Brasil, são contabilizadas, aproximadamente, 7.500 estações de tratamento de água, em que 75% destas realizam o processo denominado convencional para a transformação da água bruta em água potável. Nessa tecnologia, as principais fases de tratamento são: coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH, desinfecção e fluoretação (BORETO *et al.*, 2009).

A escolha do tipo de tratamento a ser desenvolvido em uma ETA dá-se, entre outros fatores, a partir da qualidade da água captada, considerando que de acordo com o nível de poluição dessa água, o tratamento pode ter mais ou menos fases, podem ser requeridos diferentes tipos de reagentes, tudo isso com o objetivo de adequar os parâmetros aos padrões de potabilidade da água. Por muitas vezes, o produto final gerado no tratamento da água é de boa qualidade, mas na maioria das vezes não apresentam processos otimizados em função dos gastos, sejam eles energéticos, com reagentes, tempos de respostas ou perdas de água (MOREIRA, 2004).

Duas fases essenciais para uma eficiência satisfatória no tratamento convencional da água são a coagulação e a floculação, caracterizadas pela desestabilização química das moléculas e consequente formação de flocos. Desse modo, a utilização do coagulante em sua dosagem adequada é essencial para diminuir o aspecto turvo da água, obtendo relação intrínseca com os parâmetros básicos de turbidez e cor (FRANCO, 2009). O mesmo autor relata uma problemática bastante presente nas estações de tratamento de água, considerando a escassez de estudos sobre as dosagens corretas desses coagulantes, não sendo determinados valores eficazes que evitem os excessos e desperdícios de reagentes, gerando, conseqüentemente, maior produção de resíduos e maiores gastos no processo de tratamento da água.

Portanto, é necessário que a otimização comece a ser empregada de forma mais efetiva nos processos de tratamento de água, a fim de melhorar a qualidade da água tratada e minimizar problemáticas relativas a esses processos: o alto custo de operação (agravada pelo uso excessivo de reagentes) e a alta geração de lodo.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Utilizar planejamento fatorial do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) associado à Metodologia de Superfície Resposta para otimizar o processo de tratamento de água de abastecimento realizado na Estação de Tratamento de Água do município de Crateús-CE.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar as variáveis que interferem no processo de tratamento da água para abastecimento;
- Determinar as principais variáveis de estudo, dependentes (respostas) e independentes (fatores, variáveis interferentes), atuantes no processo de tratamento da água;
- Elaborar planejamento fatorial, empregando as variáveis interferentes estudadas;
- Avaliar os efeitos que as variáveis independentes têm nas variáveis dependentes;
- Elaborar modelo matemático de representação das respostas em função das variáveis independentes significativas;
- Realizar validação, experimental e estatística, do modelo proposto;
- Obter superfícies de respostas para as variáveis independentes analisadas;
- Alcançar as condições otimizadas das variáveis analisadas a partir da determinação de faixas operacionais ótimas das mesmas.

1.3 Justificativa

O contexto atual no qual se encontra o saneamento básico no Brasil, principalmente na vertente do abastecimento de água, seja na quantidade ou qualidade desse recurso, aponta a necessidade de geração de novas metodologias que elevem a eficiência do tratamento de água para o abastecimento da população. Segundo dados do diagnóstico de água e esgoto realizado pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento- SNIS (BRASIL, 2020), no Brasil, para o ano de 2019, o índice de atendimento total com rede de abastecimento de água foi de 83,7%, enquanto o índice de atendimento da rede de coleta de esgoto foi de 54,1%.

Para agravar esse quadro, os mananciais de água doce sofrem atualmente uma degradação de forma indiscriminada, seja pela inserção de resíduos ou até mesmo pela remoção de mata ciliar em seu entorno, reduzindo a sua proteção. Tal situação, é apontada como um grande prejuízo ambiental e social, considerando o aumento da turbidez da água e uma maior variedade de compostos químicos, físicos e biológicos que tornam a qualidade da água limitada, necessitando, assim, de um tratamento mais eficiente e com maiores custos. Dessa forma, torna-se fundamental o desenvolvimento de novos estudos na área do saneamento que considerem os compostos citados e atinjam maior eficiência para o tratamento dessas águas que serão destinadas para usos diretos e indiretos da sociedade (PAVANELLI, 2001).

No contexto da potabilidade da água, a decomposição da matéria orgânica, a presença dos íons ferrosos e manganês e o lançamento de resíduos industriais, podem ser classificados como os principais responsáveis pela cor das águas (LEAL; LIBÂNIO, 2002). Os mesmos autores abordam a trajetória da importância do parâmetro cor no tratamento da água, sendo comprovado ao final da década de 70, os malefícios à saúde humana ocasionados por determinados elementos que conferem cor à água. Isso se dá pelo surgimento de substâncias carcinogênicas quando a água é desinfetada por compostos inorgânicos de cloro, tornando indispensável a remoção de tais elementos no tratamento.

O parâmetro turbidez é classificado atualmente como o principal objeto de estudo para avaliação do desempenho e eficiência das estações de tratamento de água. A turbidez nas águas além de conferir um aspecto turvo, pode ser um obstáculo na etapa de desinfecção, na qual as partículas suspensas servem de escudo à ação do cloro nos microrganismos, impedindo que os mesmos sejam removidos. Além disso, tais partículas possuem a capacidade de adsorver compostos químicos tóxicos que podem influenciar negativamente na qualidade da água (LIBÂNIO, 2010).

A remoção de partículas primárias da água pode-se dar por processos químicos, principalmente a coagulação, sendo a mesma realizada na fase de mistura rápida do tratamento. Essa etapa é indispensável para: remoção de contaminantes; clarificação da água; e para a boa eficiência dos processos subsequentes do tratamento, como a floculação, sedimentação, filtração e desinfecção (LEAL; LIBÂNIO, 2002).

Tomando como referência que a coagulação ocorre com a utilização de produtos químicos, sendo estes essenciais para a eficiência na remoção de impurezas da água, torna-se indispensável a otimização da concentração desses reagentes, a fim de reduzir o uso em excesso desses produtos e proporcionar as condições que viabilizem o atendimento aos padrões de potabilidade.

Durante o processo de tratamento da água, alguns impactos negativos dessa atividade não podem ser deixados de lado, sendo eles o consumo excessivo de produtos químicos, perdas de água, consumo de energia elétrica e geração de resíduos. Diante de tal realidade, avalia-se a necessidade de um controle operacional e uma gestão mais eficaz nas etapas de tratamento da água, que sejam capazes de minimizar os custos e os impactos ambientais negativos gerados (ACHON, 2008).

Para otimização do processo de tratamento de água, escolheu-se o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). É uma metodologia de otimização do sistema caracterizada pela adição de pontos axiais, englobando diversas combinações entre os níveis a partir de dois fatores, utilizando um número menor de experimentos e explorando todo o espaço experimental para obtenção de respostas (TEODOSIO, 2015).

Nesse contexto, o referido trabalho é uma alternativa de melhorar a eficiência de remoção de determinados parâmetros, como turbidez e cor, da água tratada pela Estação de Tratamento de Água – ETA Poty, do Município de Crateús, que realiza um tratamento do tipo convencional. O clima semiárido dessa região contribui para períodos de seca, muitas vezes prolongados, que colaboram para o acúmulo de sedimentos nos mananciais de captação, verificando, assim, maiores níveis de turbidez e cor na água a ser tratada. Além disso, vê-se uma lacuna referente a estudos de otimização do tratamento da água utilizando análise multivariada. Esse estudo é importante para a determinação das dosagens ideais dos reagentes utilizados, que nem sempre estão amparadas em estudos de faixas ótimas que evitem excessos. Tais excessos repercutem na elevação da produção de lodo, considerada uma grande problemática no processo de tratamento de água.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Água de abastecimento

2.1.1 Consumo e importância

A importância da utilização da água no abastecimento da população está, inquestionavelmente, associada à história da humanidade, seja na caça, na pesca e até mesmo nas transformações dos modos de vida das populações em tempos atrás. Além da necessidade biológica de água pela população, o desenvolvimento da sociedade, sua necessidade de sobrevivência e a expansão de aportes tecnológicos, passaram a exigir, em maior demanda, a segurança no suprimento da água (HELLER; PÁDUA, 2010).

A partir de estudos realizados pela Agência Nacional das Águas – ANA, o consumo de água no Brasil cresce em conjunto com o aumento da população. Tal situação colabora para o estresse hídrico em um futuro próximo. Segundo a ANA, os principais usos da água no país são para irrigação, abastecimento humano e animal, indústria, geração de energia, mineração, aquicultura, navegação, recreação e lazer.

A Figura 1 apresenta uma média anual do total de água consumido no Brasil.

Figura 1 – Total de água consumida no Brasil por setor em 2019



Fonte: ANA (2020).

Segundo a Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), anexo XX, artigo 5, inciso VI, um sistema de abastecimento de água para consumo humano pode ser caracterizado como o meio de produção e fornecimento de água potável

para a população, através de um conjunto de obras, materiais e equipamentos que estão presentes desde a captação da água até as instalações prediais.

No âmbito da importância sanitária do abastecimento de água, pode-se observar que de acordo com implantações e/ou melhorias dos serviços de abastecimento, os resultados são apresentados de forma positiva na saúde e nas condições de vida da população. Tais melhorias podem ser observadas no controle e prevenção de doenças, no aumento de hábitos higiênicos, promoção de uma alimentação mais saudável e nas práticas de lazer mais seguras (FREGONEZI, 2015).

2.1.2 Introdução à qualidade de água

A água em seu estado de solvente nunca é encontrada em estado de pureza absoluta na natureza. As impurezas que a constituem determinam as suas características e sua forma de tratamento, de acordo com os seus usos previstos. Por conseguinte, a qualidade da água depende do grau de poluição da mesma, sendo necessário analisar os parâmetros de qualidade para determinar a possibilidade do seu uso, principalmente, para o consumo humano (ANDRADE, 2004).

Além disso, a água possui o poder de dissolver uma ampla variedade de substâncias por onde percorre, dando-lhe características próprias. Tais substâncias são transportadas pelos cursos d'água, proporcionando uma dinamicidade na qualidade da água. Dessa maneira, conclui-se que a qualidade de uma água é resultado da capacidade de transporte e de dissolução que ocorrem na bacia de drenagem do corpo hídrico (BRASIL, 2006).

De acordo com a Resolução Conama nº 357/2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, as águas podem ser classificadas em doces, salinas e salobras, sendo tais categorias subdivididas ainda em classes, de acordo com condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes. O tipo de tratamento para as águas é definido de acordo com a sua classe (BRASIL, 2005).

A Tabela 1 apresenta as classes para os usos de águas doces e seus respectivos tratamentos.

Tabela 1 – Tratamento requerido em função da classificação de águas doces

Classificação	Tratamento Requerido
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento Simplificado
Classe 2	Tratamento Convencional
Classe 3	Tratamento Convencional ou Avançado
Classe 4	Águas destinadas a usos menos exigentes

Fonte: Libânio (2010).

As águas superficiais são caracterizadas, em sua maioria, por suas características físicas e bacteriológicas inadequadas para o uso. Nesse contexto, essas águas necessitam de tratamento, realizado com o objetivo de elevar a qualidade física, química, bacteriológica e organoléptica das mesmas, tornando-as aptas ao consumo humano (BRASIL, 2014).

O conceito de qualidade de água varia de acordo com o seu uso, considerando, por exemplo, que uma determinada água pode estar com os padrões adequados para o uso industrial e imprópria para o consumo humano.

Nesse contexto, a qualidade da água pode ser analisada como um elemento essencial à vida, na qual deve condicionar a saúde e o bem-estar da população. A veiculação hídrica de agentes etiológicos de caráter infeccioso ou parasitário é responsável pela alta incidência de doenças que afetam as populações de modo geral. Logo, a qualidade da água de abastecimento deve ser considerada o fator principal nas ações realizadas pelos Serviços de Abastecimento de Água, sejam eles públicos ou privados, de modo que as características da água atendam às determinadas pela legislação vigente (BRASIL, 2014).

Segundo a Resolução Conama n° 357/2005, a qualidade e classificação das águas pode ser representada através de parâmetros, que traduzem suas características físicas, químicas e biológicas. São utilizados indicadores para os usos específicos, como o uso para o abastecimento humano. Na Resolução citada, os parâmetros são classificados em orgânicos e inorgânicos.

Alguns dos principais parâmetros utilizados na análise de qualidade da água estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Alguns dos principais parâmetros de classificação da qualidade da água

Parâmetros de classificação		
Físicos	Químicos	Biológicos
Temperatura	pH	Bactérias coliformes
Sabor e Odor	Alcalinidade	Densidade de cianobactérias
Cor verdadeira	Acidez	Protozoários
Turbidez	Dureza	Vírus
Sólidos dissolvidos totais	Oxigênio Dissolvido	
Sólidos sedimentáveis	DBO e DQO	
Condutividade elétrica	Nitrogênio total	
	Fósforo Total	
	Ferro e Manganês	
	Cloretos	

Fonte: Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

Os parâmetros de qualidade da água a serem analisados devem ser escolhidos a partir do conhecimento das particularidades de cada situação (VON SPERLING, 1996). A Tabela 3 apresenta uma relação entre o tipo de água e os parâmetros mais usuais na análise da sua qualidade.

Tabela 3 – Principais parâmetros a serem investigados em uma análise de água

Características	Parâmetros	Água de Abastecimento			
		Superficial		Subterrânea	
		Bruta	Tratada	Bruta	Tratada
Físicas	Cor				
	Turbidez				
	Sabor e Odor				
	Temperatura				
Químicas	pH				
	Alcalinidade				
	Acidez				
	Dureza				
	Ferro e Manganês				
	Cloretos				
	Nitrogênio				
	Fósforo				
	Oxigênio dissolvido				
	Matéria orgânica				
	Micropoluentes orgânicos e inorgânicos				
Biológicas	Bactérias decompositoras				
	Algas				
	Organismos indicadores				

Fonte: Von Sperling (1996, com adaptações).

Dependendo do tipo de uso, a boa qualidade da água torna-se um aspecto imprescindível na sua utilização. Tal fato torna-se ainda mais evidente quando a mesma é empregada para fins de abastecimento humano (MORAES; SOUZA, 2014).

Á vista disso, as águas de abastecimento devem obedecer aos padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde, anexo XX (BRASIL, 2017), que classifica os padrões de potabilidade da água para consumo humano em: a) Padrão microbiológico; b) Padrão de turbidez; c) Padrão para substâncias químicas que representam risco à saúde; d) Padrão de cianotoxinas; e) Padrão de radioatividade; e f) Padrão organoléptico.

2.2 Tratamento convencional das águas de abastecimento

Segundo Libânio (2010), a adequação da água bruta à água potável consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e substâncias que provoquem riscos à saúde humana, sob os menores custos de operação e manutenção e gerando o menor impacto ambiental.

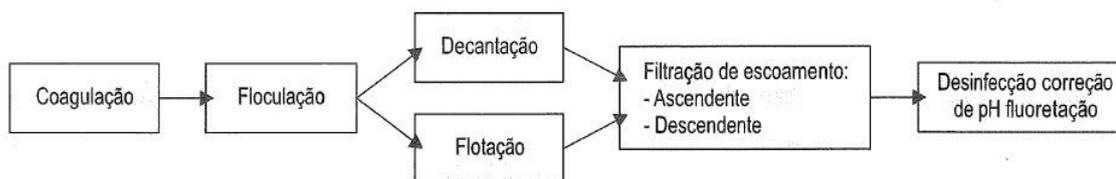
Dentre as técnicas utilizadas no Brasil para a potabilização da água, o método denominado convencional ou de ciclo completo é considerado o mais completo e adotado no país. O mesmo é caracterizado, principalmente, pelos processos de coagulação e floculação realizados, que se executados de forma eficiente, reduzem, significativamente, os parâmetros de turbidez e cor da água (SOARES; LEÃO, 2015).

Segundo Duarte (2011), as vantagens desse tipo de tratamento de água são: facilidade operacional; confiabilidade nos resultados; flexibilidade; e aplicabilidade em inúmeras faixas de qualidade da água. Além disso, desvantagens que podem ser elencadas, principalmente quando se compara a tecnologia convencional com tecnologias mais simplificadas como a filtração direta e dupla filtração: custo elevado de implantação, operação e manutenção; maior consumo de reagentes; e maior geração de resíduos.

A tecnologia do tratamento convencional teve surgimento em função da necessidade de inserir uma unidade no tratamento da água na qual pudesse reter os flocos formados no processo de floculação. A referida denominação teve início no ano de 1890 nos Estados Unidos, quando nesta mesma época recomendou-se por estudiosos que se acrescentasse, antes da filtração, uma etapa de clarificação da água (LIBÂNIO, 2010).

A Figura 2 apresenta as etapas do tratamento convencional utilizadas no tratamento da água de abastecimento.

Figura 2 – Fluxograma típico da tecnologia de tratamento convencional



Fonte: Libânio (2010).

2.2.1 Descrição dos processos e operações unitárias

2.2.1.1 Tratamento preliminar

O tratamento preliminar da água possui como principal objetivo a remoção de sólidos grosseiros que possam vir a causar obstruções e danos aos equipamentos eletromecânicos nas etapas seguintes do tratamento (MENEZES; MENDONÇA, 2017).

O mau funcionamento do tratamento preliminar pode ocasionar problemas posteriores, como a obstrução de tubulações e equipamentos, além do acúmulo de partículas de grande diâmetro na água, que podem reduzir a eficiência dos processos de tratamento.

O tratamento preliminar é constituído por grades, telas e desarenador (ou caixa de areia). Segundo a NBR 12216 (ABNT, 1992), o mesmo é instalado no local de captação da água bruta, ou na entrada da ETA quando circunstâncias especiais não permitem a sua localização na captação.

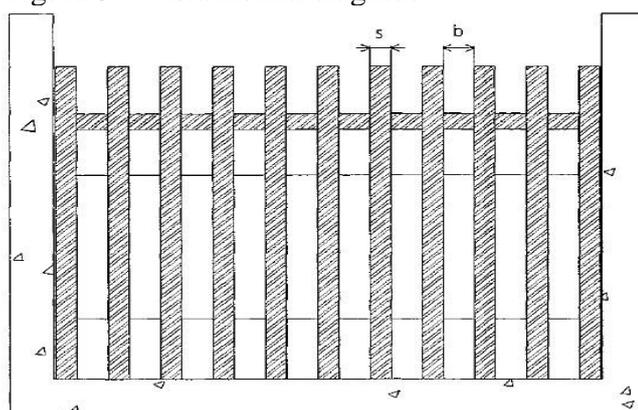
2.2.1.1.1 Telas e grades

As grades e telas são mecanismos do tratamento preliminar da água, utilizados com o objetivo de reter os materiais flutuantes ou em suspensão que apresentem dimensões elevadas. As grades podem ser classificadas com relação a sua dimensão em: grosseiras, responsáveis pela retenção de materiais de maiores dimensões (superiores a 7,5cm); e finas, responsáveis por reter materiais de menores dimensões (inferiores a 7,5cm) (HELLER; PÁDUA, 2010).

De acordo com a NBR 12.213 (ABNT,1992), as grades estão contidas na primeira etapa do tratamento e possuem barras paralelas que impedem as passagens dos sólidos, enquanto as telas são constituídas por fios que formam malhas, responsáveis pela retenção dos materiais que não ficaram contidos na grade.

A Figura 3 apresenta a representação de uma grade do tipo grosseira.

Figura 3 – Vista frontal da grade



Fonte: Heller e Pádua (2010).

2.2.1.1.2 Desarenador ou caixa de areia

Como parte do tratamento preliminar da água, a desarenação, é classificada como a operação unitária responsável pela remoção de partículas discretas. A permanência do material no desarenador ocorre com as partículas que possuem velocidade de sedimentação relativamente alta (PRADO; CAMPOS, 2008).

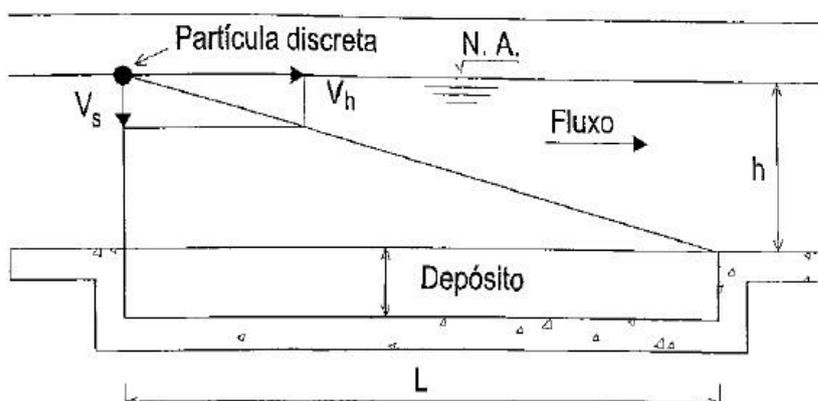
A eficiência das unidades de desarenação está relacionada, diretamente, às condições de sedimentação e de retenção do desarenador, sendo a primeira condicionada à velocidade de sedimentação, também conhecida como Taxa de Escoamento Superficial (TAS). A retenção possui o objetivo de impedir que as partículas não sejam arrastadas pelo fluxo da água (FIGUEIREDO, 2009).

Segundo Heller e Pádua (2010), nos sistemas de abastecimento de água, os desarenadores são geralmente projetados de forma retangular em planta. A fim de evitar curto-circuito da água no interior do mesmo, o seu comprimento é projetado sendo três vezes maior que sua altura. Dentro do desarenador, as partículas a serem sedimentadas estão passíveis de dois movimentos perpendiculares entre si: horizontal, devido a movimentação da água nesse mesmo sentido; e vertical, resultante da força da gravidade contrária ao empuxo da água e ao atrito do grão da partícula com a água.

De acordo com a NBR 12.213 (ABNT, 1992), o desarenador deve ser instalado entre a tomada de água e a adutora. Além disso, é preferencial que sejam construídos dois desarenadores, considerando um reserva.

A Figura 4 apresenta um desarenador do tipo retangular.

Figura 4 – Esquema em corte de um desarenador retangular.



Fonte: Heller e Pádua (2010).

2.2.1.2 Pré-oxidação

A presença de organismos fitoplanctônicos, como microalgas e cianobactérias, além de organismos patogênicos na água, proporcionam obstáculos tanto para a qualidade adequada da água, como para o bom funcionamento da estação de tratamento. Com isso, a pré-oxidação constitui-se como uma etapa de grande eficiência na remoção de tais compostos contaminantes (SILVA *et al.*, 2012).

De acordo com Mondardo (2004), a pré-oxidação é caracterizada como uma operação unitária com grande influência nos sistemas de tratamento de água. A mesma consiste na adição de um oxidante na água antes das etapas de tratamento subsequentes, sendo realizada, na maioria das vezes, na etapa de captação da água bruta, ou na entrada das estações de tratamento.

Em águas com níveis de cor elevados, a etapa de pré-oxidação pode proporcionar uma redução da concentração de coagulante na etapa de coagulação. Os oxidantes comumente mais utilizados são: compostos de cloro, permanganato de potássio, peróxido de hidrogênio e ozônio (LIBÂNIO, 2010).

A utilização de oxidantes na água possui como principais objetivos a remoção de cor, sabor e odor, oxidação de metais e de poluentes orgânicos, e redução da dosagem de coagulantes, influenciando positivamente na etapa de coagulação (WIECHETECK, 2005). O referido autor também deixa explícita a importância da pré-oxidação na eliminação dos níveis de matéria orgânica presentes na água.

O uso do cloro no tratamento da água, quando reage com a matéria orgânica presente na mesma, possui a desvantagem de gerar subprodutos orgânicos halogenados,

comprometendo, de forma negativa, a qualidade da água. Por consequência, a fim de reduzir a utilização de cloro na estação de tratamento de água, estudos vêm sendo realizados com o uso de oxidantes alternativos na etapa de pré-oxidação, destacando-se: o ozônio, dióxido de cloro, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio e radiação ultravioleta (PASCHOALATO; TRIMAILOVAS; DI BERNARDO, 2008).

2.2.1.3 Coagulação

A coagulação é a operação unitária inicial do tratamento da água em uma ETA, sendo a mesma uma condicionante para o desempenho eficiente das etapas subsequentes do tratamento. Sendo assim, torna-se necessária a realização da coagulação da forma mais adequada à obtenção de resultados satisfatórios (DE MEDEIROS, 2017).

O referido processo atua, principalmente, no objetivo de clarificação da água, tornando-a esteticamente adequada para o consumo humano.

A coagulação química é constituída pela adição de produtos químicos com o objetivo de precipitar os compostos em solução e desestabilizar partículas sólidas coloidais em suspensão, que não poderiam ser removidas por outros processos, como sedimentação e flotação (RICHTER, 2009).

A atuação eficaz dos coagulantes químicos é imprescindível para a eficiência do processo de coagulação, sendo os principais disponíveis para comercialização: o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o hidróxicloreto de alumínio e o sulfato férrico (PAVANELLI, 2001).

De acordo com Cardoso (2003), o processo químico que ocorre na etapa de coagulação pode ser explicado da seguinte forma:

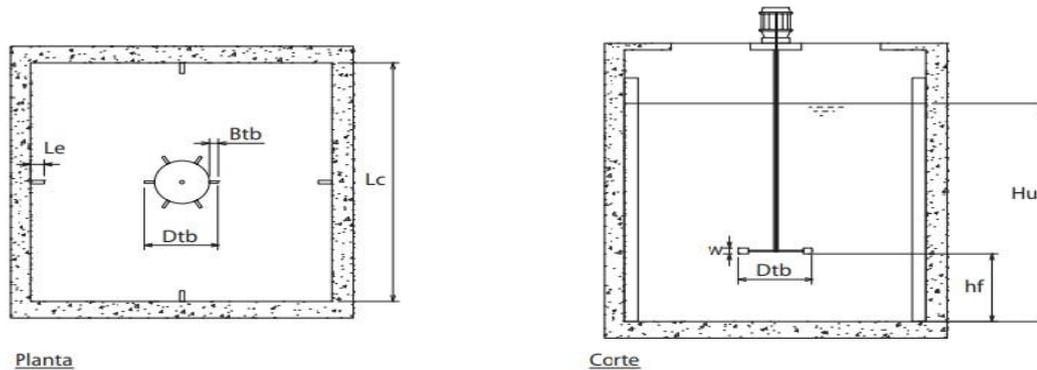
Ao se adicionar um coagulante na água, este se hidrolisa e pode produzir a desestabilização das partículas, por simples adsorção específica dos produtos de hidrólise na dupla camada que rodeia os coloides de carga negativa. Os produtos da hidrólise dos coagulantes sofrem reações de polimerização e se transformam em longas cadeias com extremos ativos. Estas cadeias podem ser facilmente adsorvidas nos sítios vazios, pelos coloides da suspensão. Os extremos destas cadeias podem aderir-se a outros coloides que tenham sítios vazios, ligados por cadeias poliméricas. Ao sedimentar estes coágulos esbarram noutras partículas e com um efeito varredura se incorporam a outros coloides.

Ademais, quando o coagulante é adicionado à água, ocorrem reações de hidrólise e polimerização, que são influenciadas diretamente pelos seguintes fatores: pH; espécies iônicas presentes na água; concentração e tipo de coloides; além do tipo e concentração do coagulante aplicado. Tais fatores são parâmetros essenciais na análise de eficiência da coagulação (RICHTER, 2009).

Em uma estação de tratamento de água, o coagulante é adicionado na unidade de mistura rápida, utilizada para promover a dispersão rápida e o mais uniforme possível do coagulante na água. As unidades de mistura rápida mais comuns são as de tanque com agitador rápido e os misturadores hidráulicos (ASHBY, 2013).

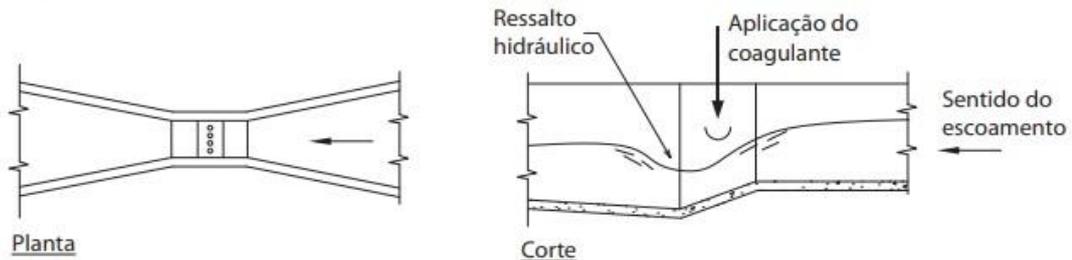
As Figuras 5 e 6 apresentam, em planta e corte, o agitador mecânico tipo turbina e o misturador hidráulico, respectivamente.

Figura 5 – Vista em planta e corte de misturador mecânico



Fonte: Ashby (2013).

Figura 6 – Vista em planta e corte de misturador hidráulico do tipo Calha Parshall



Fonte: Ashby (2013).

2.2.1.4 Floculação

Em uma estação de tratamento de água, a floculação é a etapa subsequente da coagulação. De acordo com Richter (2009), essa etapa consiste na junção das partículas que foram desestabilizadas, a fim de formar flocos maiores para que, assim, possam ser sedimentados posteriormente. Dessarte, o processo de floculação é de notória importância na remoção do material responsável pela produção de turbidez e cor na água.

A floculação é realizada por um conjunto de fenômenos físicos que possuem o objetivo de reduzir o maior número de partículas suspensas da água. Por isso, a mesma é

classificada com uma das operações unitárias do processo de clarificação da água bruta (LIBÂNIO, 2010).

O principal objetivo da etapa de floculação no tratamento de águas de abastecimento é possibilitar a agregação das partículas coloidais, colocando as mesmas em contato umas com as outras, ocasionando o aumento de seu tamanho físico e, assim, a elevação da eficiência de sua remoção nas etapas seguintes do tratamento (FILHO, 2017).

A Figura 7 apresenta o processo físico de aglomeração das partículas e formação dos flocos.

Figura 7 – Esquema do processo de floculação: agregação das partículas



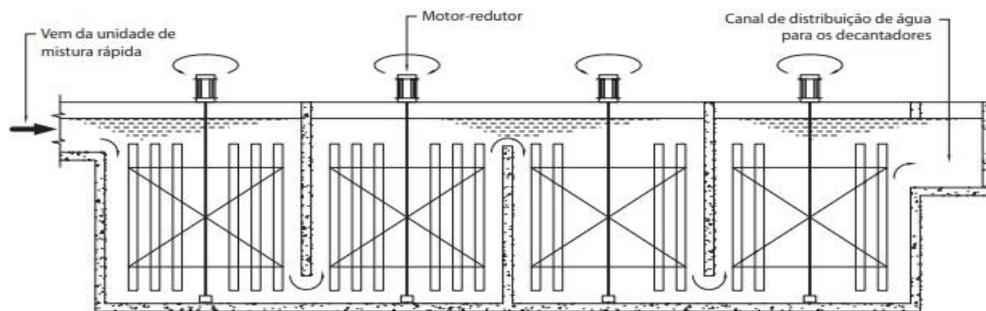
Fonte: Filho (2017).

Os mecanismos de transporte das partículas para a formação dos flocos dependem das dimensões das partículas e do crescimento dos flocos. Os mesmos podem ocorrer devido a três fenômenos: 1) ao movimento Browniano, denominado floculação pericinética, na qual o movimento aleatório das partículas permite os primeiros choques; 2) às diferenças de velocidade das linhas de corrente do fluido em escoamento, denominado floculação ortocinética, que ocorre com a entrada de energia externa que amplia a aglutinação das partículas; e 3) às distintas velocidades de sedimentação dos flocos, denominado sedimentação diferencial (LIBÂNIO, 2010).

Os tipos de unidades de floculação são divididos em flocladores mecânicos, subdivididos em eixo vertical e eixo horizontal, e flocladores hidráulicos, que podem ser de fluxo vertical ou fluxo horizontal (ASHBY, 2013).

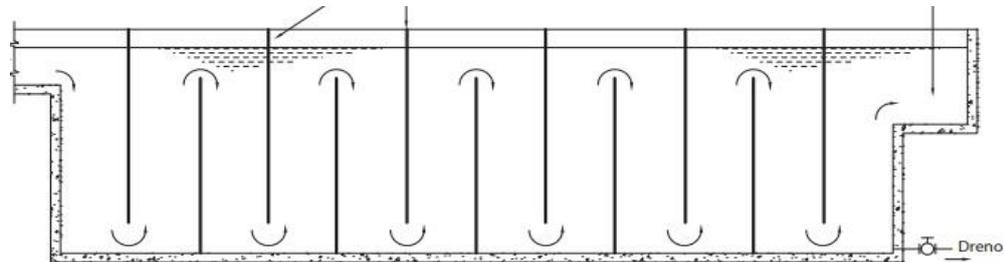
As Figuras 8, 9 e 10 apresentam o esquema de um agitador mecânico de eixo vertical, uma vista em corte de um sistema hidráulico de escoamento vertical e uma vista em planta de um sistema hidráulico de escoamento horizontal, respectivamente.

Figura 8 – Corte esquemático de um sistema de floclador mecânico de eixo vertical



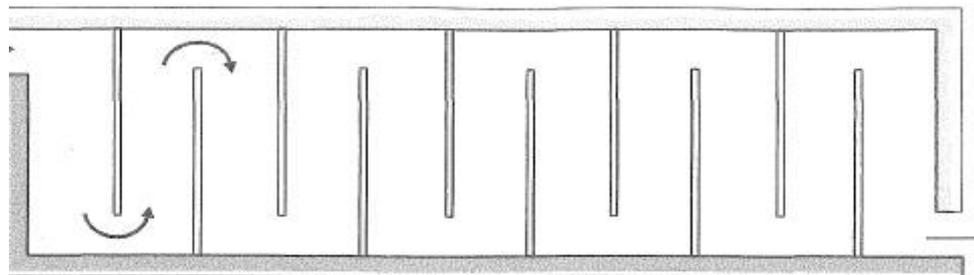
Fonte: Ashby (2013).

Figura 9 – Representação esquemática em corte de floclador hidráulico de escoamento vertical



Fonte: Ashby (2013).

Figura 10 – Vista em planta de um sistema hidráulico de escoamento horizontal



Fonte: Libânio (2010).

2.2.1.5 Decantação e flotação

No processo de tratamento convencional da água, a etapa posterior à floculação pode ser a decantação ou flotação. Os referidos processos são diferenciados, basicamente, pelo movimento dos sólidos, em que na decantação, os mesmos sedimentam, e na flotação, eles flutuam. Ademais, o método mais adotado no processo de tratamento é a decantação, pelo fato de possuir maior simplicidade técnica de execução, além de necessitar de menores custos, tanto na construção quanto na operação.

Segundo Libânio (2010), a decantação, ou sedimentação, consiste na operação unitária

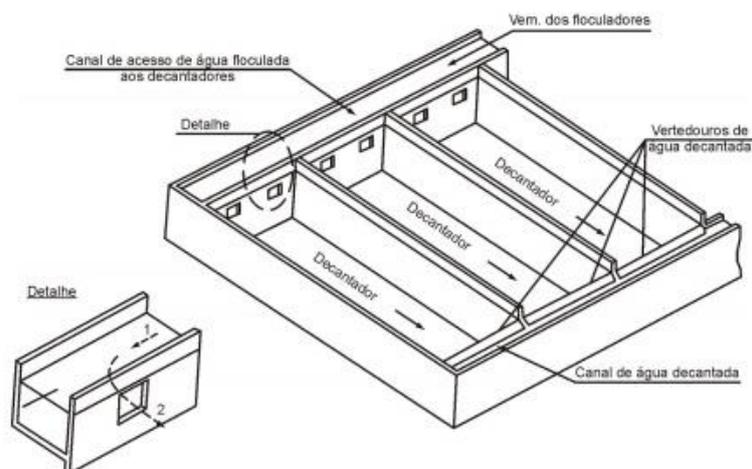
que é condicionada pela eficiência das etapas anteriores, conhecidas como coagulação e floculação. Além disso, as referidas operações buscam reduzir, de forma significativa, o número de partículas que possam adentrar para a unidade seguinte de filtração.

A água que está sendo tratada, após a etapa de floculação, é transportada para os decantadores, responsáveis pela sedimentação dos flocos em suspensão, que ocorre pela ação da gravidade e pela redução do movimento da água (ASHBY, 2013). O referido autor também afirma que os flocos, após serem sedimentados, se acumulam no fundo da unidade de decantação, deixando a água parcialmente livre da maior parte destes, sobrando a outra parte, classificados como os de tamanho menor, que serão removidos nas etapas subsequentes.

Os processos de coagulação e floculação irão possibilitar a agregação das partículas e, conseqüentemente, a formação dos flocos, gerando um crescimento no diâmetro físico das mesmas e uma velocidade de sedimentação que possibilite a sedimentação gravitacional nos decantadores (FILHO, 2017). Vale destacar que a nomenclatura correta consiste em se referir às partículas sedimentadas e à água decantada (LIBÂNIO, 2010).

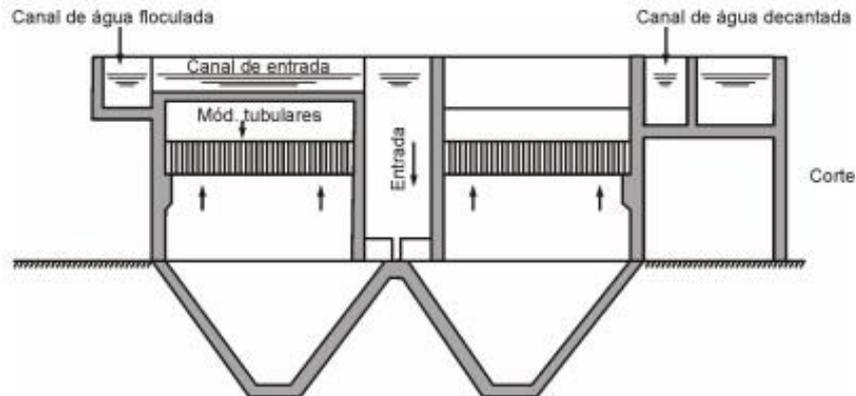
As unidades de decantação se caracterizam em decantadores de escoamento horizontal e vertical. As Figuras 11 e 12 apresentam um esquema dos tipos citados, respectivamente.

Figura 11 – Esquema de um decantador de fluxo horizontal



Fonte: Souza (2007).

Figura 12 – Esquema de um decantador de fluxo vertical



Fonte: Souza (2007).

Grandes concentrações de cor e turbidez na água são considerados os principais fatores para o aumento da produção de resíduos nos decantadores, caracterizado pela maior presença de partículas sedimentadas (LIBÂNIO, 2010). A geração de lodo nos decantadores é uma das desvantagens da referida unidade, na qual é necessário um tratamento adequado antes da disposição final do mesmo, a fim de evitar possíveis impactos ambientais no solo e nos corpos d'água.

A flotação é o processo na qual a fase sólida, possuindo uma densidade menor que a do líquido em que está suspenso, é separada do mesmo, passando a flutuar no meio em que está exposto. A flotação por ar dissolvido é considerada uma das mais comuns no tratamento convencional de água e ocorre em câmaras de ar ou tanques de saturação, caracterizada pela geração de bolhas de ar pela redução brusca de pressão na corrente líquida saturada de ar. As bolhas de ar geradas se aderem aos flocos, proporcionando menor densidade aos mesmos, fazendo-os flutuar (RICHTER, 2009).

A Figura 13 apresenta uma demonstração do processo de flotação no tratamento de água.

Figura 13 – Processo de flotação no tratamento de água



Fonte: SAAE (2006).

2.2.1.6 Filtração

No tratamento convencional da água, a filtração pode ser definida como a etapa seguinte da decantação (ou flotação), responsável pela remoção das partículas que ainda permanecem na água, além dos microrganismos também presentes. A mesma ocorre através da utilização de filtros, responsáveis por filtrar as partículas a partir das camadas de diferentes materiais contidas no filtro (SOUZA, 2007).

A etapa de filtração é uma das mais importantes em uma estação de tratamento de água, considerando que esta etapa possui o objetivo de remover as partículas coloidais restantes na água, além do mais, é a etapa na qual as falhas - porventura ocorridas nas etapas anteriores - podem ser corrigidas, garantindo a qualidade da água tratada (LIBÂNIO, 2010). Deve-se destacar que possíveis falhas ocorridas na etapa de filtração podem ocasionar redução na qualidade da água, afetando tanto suas características estéticas, como a etapa seguinte do tratamento (FILHO, 2017).

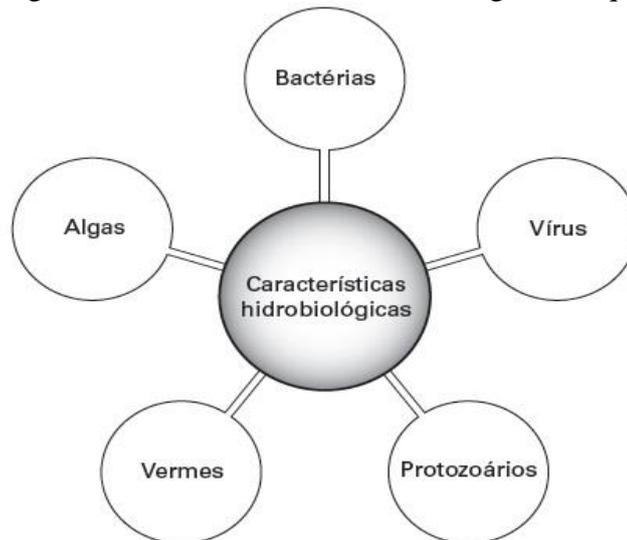
Segundo Souza (2007) os filtros geralmente são constituídos por: tanque, classificado como uma estrutura de contenção da água a ser filtrada; leitos filtrantes, constituídos por uma camada de material filtrante, sendo os materiais mais utilizados no tratamento de água a areia e carvão ativado; camadas-suporte, compostas por material granular e pedregulhos de granulometria maior, servindo de sustentação para o meio filtrante; e os fundos falsos, situados abaixo da camada suporte e com capacidade drenante, geralmente composto de blocos cerâmicos. Ademais, os filtros podem ser classificados como: lentos, com baixa taxa de filtração; rápidos, com altas taxas de filtração; de fluxo ascendente, quando a água segue um fluxo de baixo para cima; de fluxo descendente, quando a água segue um fluxo de cima para baixo; de camada simples, com apenas uma camada filtrante; de múltiplas camadas, constituído por mais de uma camada filtrante; de pressão, operando com pressão acima da atmosférica; e os de gravidade, na qual a água está em contato direto com a atmosfera.

As Figuras 14 e 15 apresentam um esquema de classificação dos tipos de filtros e um esquema de um filtro lento de fluxo descendente, respectivamente.

Os mesmos possuem grande importância na autopurificação de um corpo d'água, podendo atenuar as suas condições críticas de poluição. No entanto, algumas espécies específicas de microrganismos podem propiciar além de doenças de veiculação hídrica, sabor e odor à água (RICHTER, 2009).

A Figura 16 apresenta os principais seres vivos de maior interesse no tratamento de água.

Figura 16 – Características hidrobiológicas de qualidade



Fonte: Richter (2009).

O tratamento de água objetiva, entre outros resultados, uma água de boa qualidade, do ponto de vista estético, e segura, do ponto de vista microbiológico. Com isso, a desinfecção consiste em um processo físico e/ou químico que possui como finalidade remover e inativar os microrganismos patogênicos presentes na água (FILHO, 2017).

A eficiência da desinfecção depende, entre outros fatores, das características da água, considerando que, os materiais em suspensão, compostos orgânicos e outros compostos oxidáveis reduzem a eficiência da inativação dos microrganismos patogênicos. A mesma pode ocorrer através de processos químicos e/ou físicos, sendo o primeiro conhecido pela utilização, principalmente, do cloro e seus compostos, do ozônio e do iodo; e o segundo pela aplicação direta de energia sob a forma de calor ou luz, ultravioleta e gama (BRASIL, 2006).

A atuação dos agentes químicos na desinfecção, à exceção do ozônio, ocorre por meio da destruição ou dano à parede celular e subsequente difusão do desinfetante no interior da célula do microrganismo. Os agentes físicos interferem diretamente na biossíntese e na

reprodução celular, causando danos aos ácidos nucleicos, coenzimas ou células estruturais pela ação fotoquímica (LIBÂNIO, 2010).

O desinfetante usualmente mais utilizado no processo de desinfecção é o cloro, sendo considerado de eficácia satisfatória, pois atua diretamente nos organismos patogênicos que estão presentes na água. O mesmo é, na maioria das vezes, utilizado na forma de cloro molecular (Cl_2) em estado líquido ou gasoso (BRASIL, 2014).

No final da década de 1970, introduziu-se aos padrões de potabilidade os trihalometanos, considerado, a partir de então, parâmetro de qualidade de água para consumo humano, devido às pesquisas realizadas e às suspeitas levantadas sobre o potencial cancerígeno desse composto. O referido é subproduto da desinfecção efetuada com o cloro e os seus compostos em uma água que apresente teor considerável de matéria orgânica. Apesar de ser o mais preocupante e estudado, os trihalometanos não é o único subproduto do processo de desinfecção (BRASIL, 2006).

2.2.1.8 Fluoretação e correção de pH

A fluoretação ocorre após todos os processos físico-químicos do tratamento da água. Consiste em acrescentar à água tratada maior concentração de íons F^- , por meio da aplicação de compostos de flúor, cuja adição é motivada pela ação benéfica do flúor no combate às cáries dentárias na população (LIBÂNIO, 2010).

O flúor propicia maior resistência à superfície do esmalte devido a sua presença contínua (SALIBA; GARBIN; SANTOS, 2017). Os referidos autores também abordam os aspectos negativos relativos à introdução desenfreada do flúor nas águas de abastecimento, caracterizados pelo aparecimento de fluorose dentária, causando manchas opacas no esmalte do dente e até casos mais graves. Além da fluorose, outros problemas podem ser ocasionados pelos altos teores de flúor, como intoxicações com efeitos neurológicos, perda de atividade motora, alterações ósseas, entre outras.

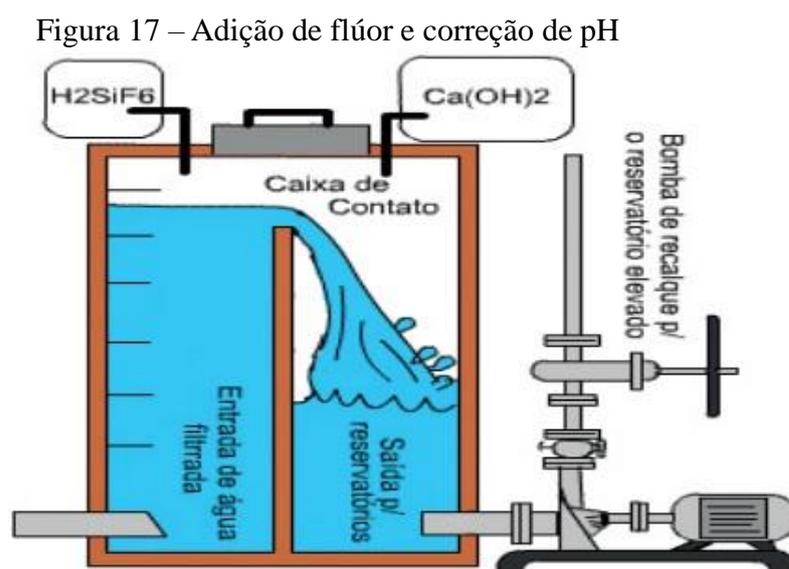
Em 1974, foi aprovada e permanece em vigência até os dias atuais a Lei n° 6.050, que afirma a obrigatoriedade da fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento.

De acordo com o anexo XX da Portaria n° 5/2017 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2017), concentração de íons fluoreto no tratamento de água para consumo não devem ultrapassar 1,5 mg/L.

Após a água passar por todo o tratamento, além da adição do flúor, é necessário que seja realizada a correção do pH antes que o mesmo seja distribuído para a reservação. O

referido método possui como principal objetivo a prevenção da corrosão do encanamento e equipamentos, sendo realizado por meio do aumento do pH, a fim de tornar a água mais alcalina, para remover o gás carbônico livre e formar uma película de carbonato na superfície interna das tubulações. Para tal ação, geralmente, utiliza-se o hidróxido de cálcio (BRASIL,2014).

A Figura 17 apresenta um esquema de adição de flúor e correção de pH realizado em estações de tratamento de água.



Fonte: Brasil (2014).

2.2.2 Estudo das variáveis interferentes

2.2.2.1 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) da água atua na indicação dos níveis de acidez, neutralidade ou alcalinidade do meio. A referida determinação é obtida em termos de escala logarítmica da concentração de íons hidrogênio (H^+) presentes (VON SPERLING, 1996).

O pH apresenta relação significativa com a acidez e a alcalinidade da água, não sendo possível analisá-las sem utilizá-lo. Do ponto de vista analítico, é considerado um dos parâmetros mais importantes na determinação de possíveis agentes químicos presentes na água, sendo de interesse na análise de água potável. No processo de tratamento da água, o pH atua nas etapas de coagulação, controle da corrosão das tubulações, abrandamento e desinfecção (DE MEDEIROS, 2017).

No processo de tratamento de água para abastecimento, situações com pH em valores baixos estão mais propícias à corrosão e agressividade, enquanto valores mais altos proporcionam maiores chances de incrustações nas tubulações (BRASIL, 2006).

O pH pode ser considerado o parâmetro de maior importância e frequência no monitoramento dos processos em uma estação de tratamento de água. Tal fato é influenciado por sua interferência nas operações unitárias de potabilização, sendo atuante de forma significativa desde a aplicação de coagulante até a etapa de desinfecção química (LIBÂNIO, 2010).

Valores extremos ou muito baixos de alcalinidade na água podem ocasionar problemas no tratamento da mesma, principalmente, na etapa de floculação. Nesse contexto, é importante que a água apresente valores de alcalinidade neutros, sendo o contrário, necessária a correção com aplicação de produtos químicos (FRANCO, 2009).

A correção do pH durante o processo de tratamento de água pode ser realizada tanto para sua elevação como para sua redução. Na elevação de pH, objetiva-se tornar o meio mais alcalino, e utiliza-se produtos químicos como a cal hidratada, carbonato de cálcio e sódio, e hidróxido de sódio; enquanto que na redução de pH, o meio torna-se mais ácido, e geralmente são utilizados gás carbônico, ácido clorídrico e ácido sulfúrico (SOUZA, 2007).

De acordo da Portaria de Consolidação do Ministério da Saúde nº 5/2017 (BRASIL, 2017), anexo XX, artigo 39, inciso I, é recomendado que o pH no sistema de distribuição de água seja mantido na faixa de 6,0 a 9,5.

2.2.2.2 Temperatura

A temperatura representa a energia cinética das moléculas de um corpo, e sua alteração pode ser ocasionada por fontes naturais ou antrópicas. Nas águas para consumo humano, temperaturas elevadas podem ser um fator de rejeição por parte da população. Além disso, a mesma possui influência marcante na velocidade das reações químicas, nas atividades metabólicas dos organismos e na solubilidade das substâncias (BRASIL, 2006).

A importância da temperatura nas águas brutas e tratadas é notória. Tal fato é demonstrado pela influência da mesma em todas as etapas do tratamento da água, além de ser um dos principais fatores utilizados na determinação de parâmetros como pH e solubilidade dos gases (SAMAE, 2010).

Para fins de tratabilidade da água, a temperatura apresenta uma vantagem ainda maior em países tropicais, considerando que nestes a variação de temperatura chega a ser menos significativa. A etapa de coagulação, considerada uma das mais importantes no tratamento de

água convencional, apresenta maior eficiência em um meio com temperatura mais elevada. Contudo, águas com temperaturas mais elevadas tendem a favorecer a dissolução de compostos inorgânicos, podendo conferir gosto e odor à água (LIBÂNIO, 2010).

2.2.2.3 Dosagem de coagulantes

Em função do pH de coagulação, à proporção que se eleva a dosagem de coagulante, passa a predominar o mecanismo de varredura, o mais recorrente nas estações de tratamento de água. Assim, em função da dosagem de coagulante e do pH no meio, as partículas coloidais são adsorvidas e as suspensas envolvidas pelo precipitado de hidróxido de alumínio ou de ferro (LIBÂNIO, 2010).

Nesse sentido, o estudo de viabilidade do sistema e as decisões tomadas no tratamento da água em uma ETA são dependentes, com grande ênfase, da determinação das concentrações ideais de reagentes nos processos, além de suas interferências nos resultados do tratamento da água (FILHO; DOLL, WIECHETECK;2011).

Segundo Franco (2009), a determinação da dosagem adequada de coagulantes está intrinsecamente relacionada aos parâmetros turbidez, cor, pH e alcalinidade da água bruta. Além disso, a remoção das impurezas da água possui como principal atuante os coagulantes utilizados em dosagens adequadas no processo de tratamento da água.

A redução das cargas negativas presentes nas superfícies das partículas, pode ser obtida com a utilização de concentrações adequadas de coagulantes na etapa de coagulação, formando, assim, espécies hidrolisadas com cargas positivas presentes e, conseqüentemente, atenuando a dificuldade das partículas em se agregarem (FRANCO, 2009).

Duarte (2011) afirma que o principal objetivo dos estudos de otimização do processo de coagulação está na redução dos custos com coagulantes e do volume de resíduo resultante. Além disso, a utilização dos coagulantes hidróxicloreto de polialumínio ou sulfato de polialumínio apresenta maior vantagem pela necessidade de doses menores dos mesmos, devido a maior densidade de cargas, gerando, assim, menores volumes de lodo.

2.2.2.4 Auxiliar de coagulação/floculação

As etapas de coagulação e floculação são de grande importância para que as etapas subsequentes do tratamento de água ocorram com eficiência. Portanto, torna-se necessária a procura de tecnologias e produtos que auxiliem esses processos, proporcionando os resultados mais satisfatórios possíveis.

A escassez de recursos destinados a melhoria da eficiência do tratamento de água de

abastecimento estimula o crescimento de pesquisas para o melhor rendimento dos processos de coagulação e floculação. Logo, a utilização de polieletrólitos nas estações de tratamento de água consiste em uma proposta cada vez mais crescente na busca de otimização desses processos (RICHTER, 2009).

Os polímeros, além de todas as suas atribuições, possuem grande importância no processo de tratamento de águas para abastecimento de água. Tal fato se dá pela sua capacidade de clarificação da água, principalmente nas etapas de floculação e decantação, possibilitando a eficiência das etapas subsequentes do tratamento (NOVAIS, 2012).

De acordo com Richter (2009), os polímeros orgânicos têm sido cada vez mais utilizados como auxiliares de coagulação ou floculantes primários, a fim de acrescentar nas eficiências das etapas de coagulação e floculação. Os polímeros são classificados em: aniônicos, catiônicos e não-aniônicos, sendo os mesmos destinados a situações específicas.

A utilização dos polímeros no tratamento de água é conhecida desde a década de 50. Os classificados como iônicos e não iônicos são utilizados na etapa de floculação com o objetivo de formar flocos mais resistentes à força de cisalhamento e com maior velocidade de sedimentação. Além disso, a seleção dos polímeros na etapa de floculação é realizada levando em conta a necessidade de remoção de material particulado presente e do custo que é necessário para o tratamento dessa água, ficando explícita, a importância das dosagens corretas desse reagente (LIMA, 2007).

3 METODOLOGIA

3.1 Classificação e definição da pesquisa

A presente pesquisa, quanto à sua abordagem, pode ser classificada como quantitativa, na qual é centrada na objetividade e na busca da realidade por análise de dados brutos. Além disso, os resultados obtidos podem ser de alguma forma mensurados em forma de números e recorre-se à utilização de linguagem matemática para a demonstração das causas de fenômenos, relações entre variáveis, etc. (FONSECA, 2002).

De acordo com a natureza da pesquisa, a mesma é classificada como aplicada. De acordo com Vianna (2013) o referido tipo de pesquisa constitui-se naquela que possui finalidades imediatas, que gera produtos e/ou processos. Ademais, a pesquisa aplicada objetiva gerar conhecimentos para serem aplicados, a fim de solucionar problemas específicos (GERHARDT; SILVEIRA, 2009).

Com base nos procedimentos técnicos utilizados, o presente estudo é caracterizado como experimental. Segundo Prodanov e Freitas (2013), essa classificação de pesquisa é aplicada na determinação de um objeto de estudo, na seleção de variáveis que são capazes de influenciá-lo, além dos efeitos e das formas de controle das mesmas no referido objeto. Com isso, possui como principal objetivo a manipulação das variáveis, a fim de determinar as causas e efeitos de possíveis acontecimentos no processo.

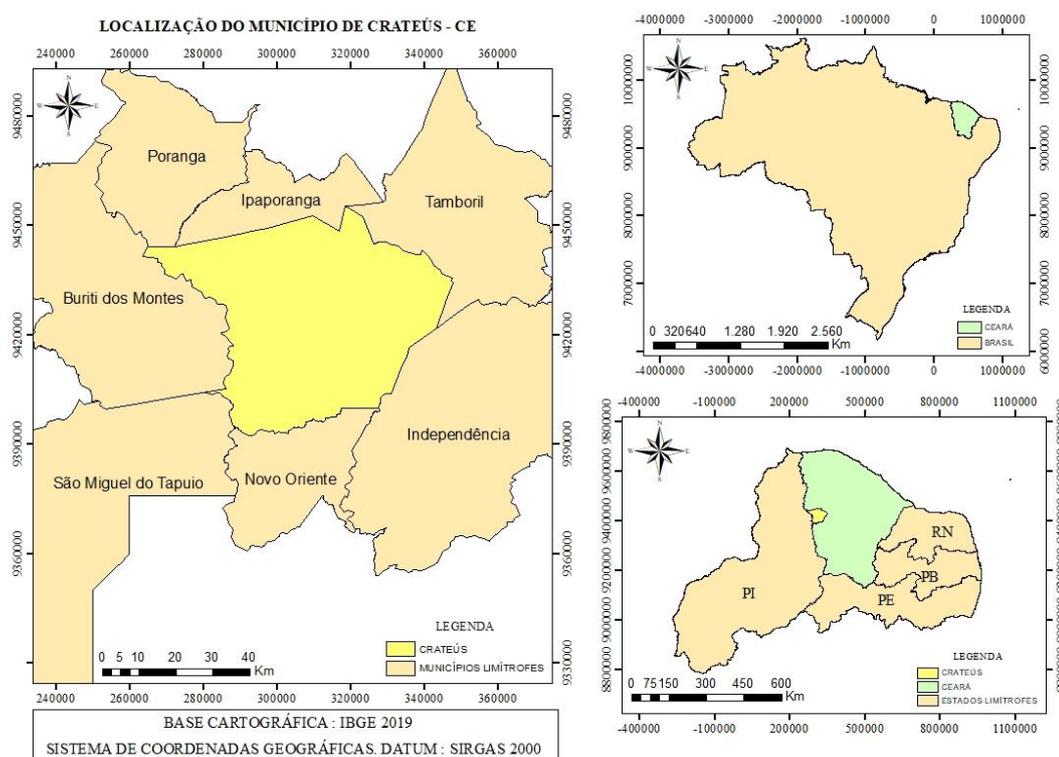
Por conseguinte, os experimentos realizados na pesquisa serão executados exclusivamente em laboratório, e os resultados serão obtidos pelos experimentos de otimização do tratamento da água, e complementados por pesquisa bibliográfica.

3.2 Local de estudo

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 20--), o município de Crateús, unidade integrante da organização político-administrativo do Estado do Ceará, está localizado a oeste do estado, com uma área de unidade territorial de aproximadamente 2.985,15km² e abriga uma população de 72.812 habitantes, de acordo com o censo de 2010. Ademais, possui uma distância de aproximadamente 350km do município de Fortaleza e é limitado pelos municípios de Ipaporanga, Tamboril, Novo Oriente, Independência e porções limítrofes com o estado do Piauí.

A Figura 18 apresenta a localização do estado do Ceará em relação ao país e do município de Crateús em relação ao estado do Ceará, além dos municípios que o cercam.

Figura 18 – Localização do município de Crateús- CE



Fonte: elaborada pela autora.

De acordo com dados do IPECE (2017) o clima do município é caracterizado como tropical quente semiárido brando e tropical quente semiárido, apresenta uma pluviosidade média de 730mm e temperatura média de 26 a 28°C no período chuvoso (janeiro a abril). O Bioma é o da Caatinga e apresenta relevo classificado como Planalto da Ibiapaba, Depressões Sertanejas e Maciços Residuais. Os solos são caracterizados como areias quartzosas distróficas, latossolo vermelho-amarelo e planossolo solódico. O saneamento no município possui uma taxa de cobertura de água urbana de 99,96%, contendo aproximadamente 17.900 ligações ativas e uma taxa de cobertura de esgoto de 73,06%, contendo aproximadamente 8.500 ligações ativas.

O referido município faz parte da Bacia Hidrográfica dos Sertões de Crateús, na qual contém uma área de 10.821km², compreendendo a rede de drenagem do Rio Poti. De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica dos Sertões de Crateús, a referida bacia é composta por 9 municípios, sendo eles Ararendá, Crateús, Independência, Ipaporanga, Novo Oriente, Poranga, Ipueiras, Quiterianópolis e Tamboril, e apresenta uma capacidade de acumulação de águas superficiais de 446.685.647m³, contendo 10 açudes monitorados (COGERH, 2020).

A captação da água bruta para o abastecimento do município de Crateús é realizada através dos mananciais Açude Carnaubal e Açude Barragem do Batalhão, ambos situados no

município, pertencentes à bacia Sertões de Crateús e sob monitoramento da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos – COGERH. A água é bombeada dos açudes através de uma adutora até a ETA Poty para a realização do tratamento.

Segundo o boletim da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2020), após longos períodos de seca e 11 anos sem sangrar, no início de 2020, o principal reservatório de abastecimento de água de Crateús, o açude Carnaubal, atingiu o seu volume máximo, obtendo um volume de 73.200.000m³ e uma cota de 300,6m. Além disso, a Barragem do Batalhão também apresenta o seu volume máximo de água, estimado em 1.638.000m³ e uma cota de 100,05m.

O tratamento de água para o abastecimento do município de Crateús é realizado na Estação de Tratamento de Água Poty, localizada no perímetro urbano do próprio município. Atualmente, a ETA, com um funcionamento de 24 horas por dia, conta com uma vazão média fornecida na ordem de 376,3m³/h de água potável para a população. O tratamento da água é caracterizado como convencional de ciclo completo, realizado pelos processos de pré-oxidação, coagulação e floculação, decantação, filtração descendente, desinfecção e fluoretação.

A etapa de pré-oxidação é a primeira etapa do processo de tratamento, sendo realizada com a utilização de cloro gasoso, com o objetivo de remover, além de ferro e manganês, os teores de matéria orgânica que conferem cor à água. Essa etapa é seguida pela adição do coagulante policloreto de alumínio - PAC e do polímero catiônico para intensificar o processo de coagulação-floculação. A floculação na ETA é realizada através de floculadores hidráulicos e, logo após, na etapa de decantação, o processo de sedimentação ocorre em decantadores retangulares (em planta) de escoamento horizontal. Ademais, a filtração é realizada através de 06 (seis) filtros descendentes, a desinfecção é garantida através da utilização de cloro gasoso e a fluoretação com a adição de flúor na água antes da sua distribuição para a população. Após o tratamento, a água é armazenada em 07(sete) reservatórios com capacidade total de 2.549m³ e a seguir é distribuída para a população (CAGECE,2020).

A Figura 19 apresenta a Estação de Tratamento de Água Poty – ETA Poty, responsável pelo tratamento e distribuição de água do município de Crateús.

Figura 19 – Estação de Tratamento de Água Poty – ETA Poty



Fonte: Arquivo CAGECE.

3.3 Coleta e caracterização da amostra de água

A amostra de água bruta utilizada nos experimentos foi coletada na Calha Parshall da ETA Poty, mais especificamente após o processo de pré-oxidação. Foram coletados aproximadamente 50L de água bruta, dividida em dois galões de 50L, devidamente esterilizados e ambientados com a própria amostra, conforme Figura 20 e Figura 21, respectivamente.

Figura 20– Coleta da água pré-oxidada



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 21– Armazenamento da água



Fonte: elaborada pela autora.

Após a coleta, realizou-se a caracterização físico-química da amostra de água utilizada no experimento de otimização do tratamento de água (água coletada imediatamente após a etapa de pré-oxidação), e corresponde a uma amostra que ainda vai passar pelo tratamento do tipo convencional da ETA. Os experimentos foram realizados no dia 01 de dezembro de 2020, no período da manhã, seguindo o procedimento operacional da CAGECE, com metodologias formalizadas em seus Procedimentos Operacionais de Controle de Qualidade (POPDQ), seguindo as orientações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater - SMEWW* (APHA; AWWA; WEF, 2017). A partir da parceria realizada, os experimentos de Teste de Jarros foram conduzidos no laboratório operacional ETA Poty do município de Crateús, sendo a mesma responsável pela execução das análises de caracterização da água pré-oxidada e disponibilização dos dados para a presente pesquisa.

Alguns dos parâmetros são analisados semestralmente no laboratório regional, como a condutividade, pH, alcalinidade, dureza, magnésio, ferro, manganês, cloreto e cálcio. Os parâmetros cor aparente, turbidez e pH são analisados a cada duas horas no laboratório operacional da ETA.

Os parâmetros analisados e seus respectivos métodos estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros e métodos analíticos de análise da água bruta

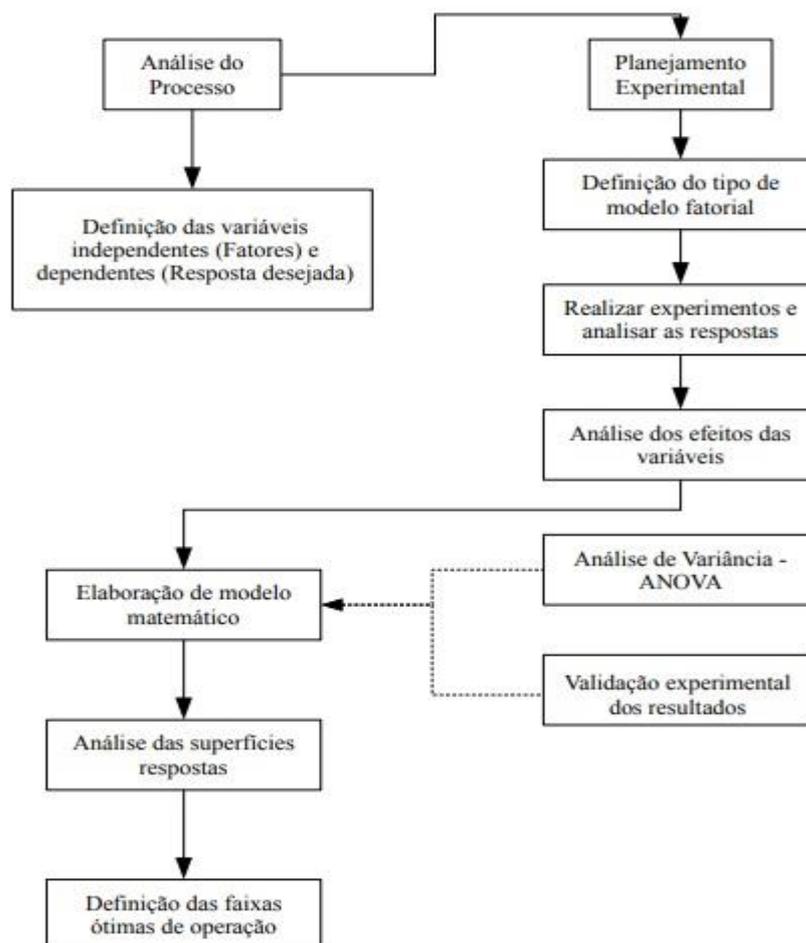
Parâmetro	Método Analítico	Metodologia
Alcalinidade	Titulométrico	2320 B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Cálcio	Titulométrico/Complexométrico com EDTA	3500-CA B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Cloreto	Titulométrico/Argentométrico	3500-CA B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Condutividade	Potenciométrico	2510 B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Cor aparente	Comparação visual	2120 B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Dureza Total	Titulométrico/Complexiométrico com EDTA	2340 C, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Ferro Total	Espectrofotométrico (UV/VIS)	3500-FE B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Magnésio	Medida indireta	3500-MG B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Manganês	Espectrofotométrico (UV/VIS)	3500-MN B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
pH	Potenciométrico/ISE	4500-H+ B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>
Turbidez	Nefelométrico	2130 B, <i>SMEWW 23RD ED., 2017</i>

Fonte: *SMEWW (2017)*.

3.4 Otimização do processo

Baseando-se nas etapas necessárias para a otimização de processos, descritas em Rodrigues e Iemma (2009) e Lucena (2014), o presente estudo seguiu uma estratégia sequencial para atingir as respostas desejadas. As etapas realizadas para o alcance das condições otimizadas estão esquematizadas na Figura 22.

Figura 22 – Fluxograma das etapas desenvolvidas para o alcance do objetivo desejado



Fonte: Rodrigues e Iemma (2009, com adaptações).

Para a referida pesquisa, utilizou-se o planejamento experimental de 2 fatores. Com a análise dos parâmetros mais interferentes no tratamento da água de abastecimento, as variáveis mais relevantes, denominadas variáveis independentes ou fatores, foram definidas como sendo a concentração de coagulante e a concentração de auxiliar de floculação.

As etapas iniciais do tratamento de água de abastecimento podem ser configuradas como as mais importantes para a qualidade final da mesma. A escolha correta do coagulante, associada à sua dosagem ideal de aplicação, corroboram na eficiência de desestabilização das partículas, facilitando a formação dos flocos, seguido pela decantação dos mesmos. Além disso, a utilização de polímeros possui suas vantagens na formação de flocos mais susceptíveis à sedimentação, colaborando na clarificação da água (PADILHA *et al.*, 2011).

As respostas da pesquisa foram avaliadas considerando os seguintes objetivos relativos ao tratamento da água: remoção de turbidez e cor (%).

A remoção dos parâmetros cor e turbidez foram determinadas pela equação 1.

$$Ef(\%) = \frac{X_{Bruta} - X_{Tratada}}{X_{Bruta}} * 100 \quad (1)$$

Onde:

Ef (%): Eficiência de remoção de turbidez e cor.

X: Valor do parâmetro turbidez ou cor.

A partir das variáveis determinadas, elaborou-se o planejamento do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), associado à metodologia de superfície resposta. Esse tipo de planejamento busca a eficiência e a redução de experimentos, além da busca pelo ponto no qual determine a resposta ótima, dentro da faixa de estudo, a fim de maximizar as respostas (CONAGIN; BARBIN; MATEUS, 2001).

Os valores dos fatores mínimos (-1), máximos (+1), pontos axiais mínimo (-1,414), máximo (+1,414) e ponto central (0) das condições operacionais das variáveis em análise estão expostos na Tabela 5. A faixa de investigação foi definida com base no histórico de valores utilizados no dia a dia da ETA, extrapolando tanto para mais quanto para menos, as concentrações de ambos os reagentes. Os valores disponibilizados foram utilizados durante um período de 12 meses na estação de tratamento, conforme tabela apresentada no Anexo A.

Tabela 5 – Fatores utilizados no DCCR para otimização do processo

Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR					
Fator	-1,414	-1	0	1	1,414
Concentração de coagulante(mg/L)	13,79	20,00	35,00	50,00	56,21
Concentração de auxiliar de floculação(mg/L)	0,12	0,20	0,40	0,60	0,68

Fonte: elaborada pela autora.

De acordo com a quantidade de variáveis determinadas para o estudo, o número de experimentos realizados foi calculado pela equação 2.

$$Exp = 2^n + 2 * n + Pc \quad (2)$$

Onde:

Exp: Número de experimentos a serem realizados

n: Número de variáveis independentes (fatores)

Pc: Número de pontos centrais

Foram fixados dois fatores e três pontos centrais para o estudo, totalizando, assim, 11 ensaios. As condições a serem utilizadas em cada experimento estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Matriz dos fatores de delineamento composto central rotacional de 2º ordem

Ensaio	Concentração de coagulante		Concentração de auxiliar de floculação	
	Codificado	Real (mg/L)	Codificado	Real (mg/L)
1	-1	20,00	-1	0,20
2	-1	20,00	1	0,60
3	1	50,00	-1	0,20
4	1	50,00	1	0,60
5	-1,414	13,79	0	0,40
6	1,414	56,21	0	0,40
7	0	35,00	-1,414	0,12
8	0	35,00	1,414	0,68
9	0	35,00	0	0,40
10	0	35,00	0	0,40
11	0	35,00	0	0,40

Fonte: elaborada pela autora.

Após a realização dos ensaios, foi utilizado o *software* Statistica, a fim de realizar a interpretação dos dados e análise das respostas. Primeiramente, foram analisados se os erros de ajustamento são independentes e normalmente distribuídos, sendo tal condição uma exigência do modelo estatístico utilizado na análise de variância (RODRIGUES; IEMMA, 2009). Tais verificações foram realizadas através do gráfico dos ensaios *versus* resíduos e do gráfico normal dos resíduos, ambos gerados no *software* Statistica.

Após essas verificações, através do gráfico de Pareto, foi possível analisar o efeito das variáveis no processo (considerando os efeitos de primeira ordem, de segunda ordem e a interação entre as variáveis nas respostas), selecionando os fatores que possuem maior significância para o estudo. Com isso, foi gerado um modelo matemático de 2º ordem, o qual determinou a relação entre as variáveis independentes (fatores) e as dependentes (respostas), considerando apenas os fatores estatisticamente significativos.

Após o modelo gerado, realizou-se a sua validação. A Análise de Variância (ANOVA) foi realizada a fim de verificar a qualidade de ajuste do modelo, sendo esta analisada através da elaboração de uma tabela no software excel, na qual foram executados dois testes de verificação: Teste F (distribuição de Fisher), no qual $F_{\text{calculado}}/F_{\text{tabelado}} > 1$, e o cálculo do coeficiente de determinação ($R^2 > 0,75$). Ademais, executou-se a validação experimental dos resultados que foram obtidos, realizando testes de tratamento em condições que se encontrem dentro da faixa de estudo, e comparando as respostas previstas pelo modelo e as respostas experimentais.

Os experimentos de validação foram realizados em duas condições em triplicata, totalizando 6 ensaios. Os valores determinados para os ensaios estão dentro da faixa de estudo utilizada na otimização do processo (Tabela 5).

Os erros entre os valores observados e os preditos pelo modelo foram realizados a partir da equação 3.

$$Erro = \frac{|Y_{Modelo} - Y_{Experimental}|}{Y_{Modelo}} \quad (3)$$

A Tabela 7 apresenta as condições utilizadas nos ensaios de validação.

Tabela 7 – Valores estabelecidos para os ensaios de validação do processo de otimização

Ensaio de Validação		
Ensaio	Concentração de coagulante(mg/L)	Concentração de auxiliar de floculação(mg/L)
1	30	0,5
2	30	0,5
3	30	0,5
4	40	0,35
5	40	0,35
6	40	0,35

Fonte: elaborada pela autora.

Após a validação do modelo, foram geradas as superfícies de respostas e curvas de contorno através do *software Statistica*.

3.5 Procedimentos experimentais

Os testes experimentais realizados para a determinação dos valores ótimos de coagulante e auxiliar de floculação para o tratamento da água em estudo foram realizados com o Teste de Jarros, baseado no procedimento descrito em Lopes (2017), conforme Apêndice A.

O experimento do teste de jarros seguiu o padrão operacional utilizado pela CAGECE, utilizando os mesmos reagentes já utilizados atualmente no tratamento da água do município. Ademais, os testes foram realizados no laboratório da própria estação de tratamento, conforme mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Realização de experimentos no *Jar test*



Fonte: elaborada pela autora.

Durante a realização do teste, foram variadas as concentrações do coagulante e do auxiliar de floculação, para a determinação de valores que proporcionem as maiores eficiências de remoção dos parâmetros cor e turbidez da água. As análises de turbidez e cor foram feitas em duplicata.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização da amostra de água

Os resultados da análise dos parâmetros físico-químicos da água pré-oxidada estão apresentados na Tabela 8 e, além disso, adicionou-se os valores máximos permitidos para a água potável, a fim de avaliar as remoções requeridas dos parâmetros cor e turbidez para a água que passará pelo tratamento da ETA.

Tabela 8 – Caracterização da amostra pré-oxidada

Parâmetros	Unidade	Resultado	Valor máximo permitido para a água potável****
Alcalinidade	mg CaCO ₃ /L	86,54	-
Cálcio	mg Ca/L	21,19	-
Cloreto	mg Cl-/L	31,00	250
Condutividade	uS/cm	290,3	-
Cor aparente	uH*	30,00	15
Dureza total	mg CaCO ₃ /L	90,37	500
Ferro Total	Mg Fe/L	0,25	0,3
Magnésio	mg Mg/L	8,97	-
Manganês	mg Mn/L	0,00	0,1
pH**	-	7,28	6 a 9,5
Turbidez	uT***	2,46	5

*Unidade Hazen (mgPt-Co/L).

**Valor de pH para a água no sistema de distribuição.

***Unidade de turbidez.

****Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

Fonte: elaborada pela autora.

Com relação à turbidez, além do VMP de 5 uT exigido pela portaria de potabilidade para a água potável, esta norma especifica o VMP para a turbidez da água pós-filtração ou pré-desinfecção de acordo com a tecnologia de tratamento: para filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta) o VMP é de 0,5 uT em 95% das amostras analisadas mensalmente, enquanto o valor encontrado foi de 2,46 uT, o que indica uma necessidade de pelo menos 79,67% de remoção. Além disso, o resultado apresentado pelo parâmetro cor da água pré-oxidada foi de 30 uH, necessitando assim de uma remoção de pelo menos 50% para enquadramento aos padrões de potabilidade. Esses resultados demonstram a importância do tratamento realizado pela ETA para enquadrar tais parâmetros. Vale salientar que esse estudo

foi desenvolvido para uma amostra de água com a caracterização apresentada, referente ao período seco da região (o experimento foi realizado em dezembro de 2020). Segundo Libânio (2010), a turbidez tende a apresentar valores mais elevados em solos com maior probabilidade de erosão associado a períodos chuvosos, em que a ação da chuva pode carrear com mais intensidade as partículas para o interior dos corpos d'água. Ademais, o manancial é um açude, que naturalmente apresenta uma turbidez mais baixa se comparada a sistemas lóticos.

4.2 Otimização do tratamento de água

Os níveis codificados e decodificados (reais) de cada fator, as condições de cada ensaio, assim como as médias encontradas nas análises de cor e turbidez, e as respostas em termos de eficiência de remoção de cor e turbidez (%), estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Condições dos fatores e valores de remoção de cor e turbidez obtidos nos ensaios de *Jar Test*

Ensaio	Concentração de coagulante		Concentração de auxiliar de floculação		Cor	Turbidez	Eficiência remoção de Cor (%)	Eficiência remoção de Turbidez (%)
	Codificado	Real (mg/L)	Codificado	Real (mg/L)	uH	uT		
1	-1	20	-1	0,2	10	0,64	66,67	74,19
2	-1	20	1	0,6	7,5	0,37	75,00	85,16
3	1	50	-1	0,2	5	0,26	83,33	89,43
4	1	50	1	0,6	2,5	0,26	91,67	89,43
5	-1,414	13,79	0	0,4	7,5	0,39	75,00	84,15
6	1,414	56,21	0	0,4	5	0,29	83,33	88,21
7	0	35	-1,414	0,12	7,5	0,43	75,00	82,52
8	0	35	1,414	0,68	5	0,29	83,33	88,21
9	0	35	0	0,4	7,5	0,35	75,00	85,77
10	0	35	0	0,4	5	0,33	83,33	86,79
11	0	35	0	0,4	6,25	0,37	79,17	85,06

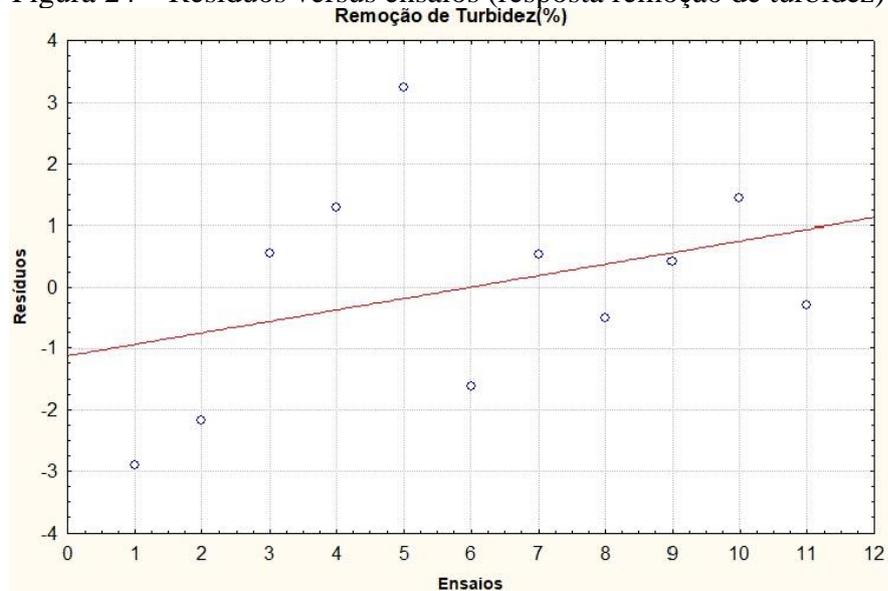
Fonte: elaborada pela autora

Os resultados obtidos em termos de eficiência de remoção de turbidez e cor, apresentaram valores relativos. As remoções de cor variaram entre 66,67% (ensaio 1) e 91,67% (ensaio 4), enquanto as remoções de turbidez foram de 74,19% (ensaio 1) a 89,43% (ensaios 3 e 4). Quanto aos padrões de potabilidade, todos apresentaram turbidez abaixo de 0,5 uT e cor abaixo de 15 uH, exceto o ensaio 1, que apresentou turbidez de 0,64 uT (> 0,5 uT). Porém, esse limite refere-se à turbidez da água pós-filtração ou pré-desinfecção,

enquanto o presente tratamento foi simulado até a etapa de decantação. Portanto, a partir de tais resultados, todas as condições usadas nos ensaios têm grande potencial de atender às exigências da Portaria de Potabilidade após o tratamento completo, mas experimentos em escalas maiores são recomendados.

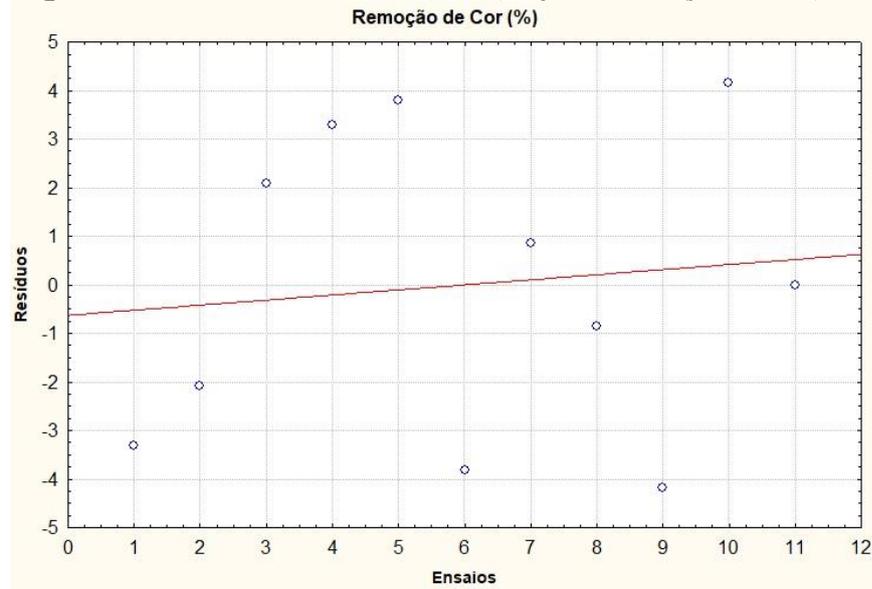
Os gráficos de resíduos versus ensaios, apresentados nas Figura 24 e 25, mostram que os resíduos apresentaram uma distribuição aleatória, sendo assim considerados independentes. Para a remoção de turbidez, os resíduos referentes aos ensaios 1 e 5 apresentaram-se mais distantes da reta vermelha, enquanto na remoção de cor, os resíduos dos ensaios 9 e 10 apresentaram-se mais distantes da reta, o que significa que foram os ensaios que tiveram uma maior diferença entre os valores preditos pelo modelo e os valores experimentais.

Figura 24 – Resíduos versus ensaios (resposta remoção de turbidez)



Fonte: elaborada pela autora.

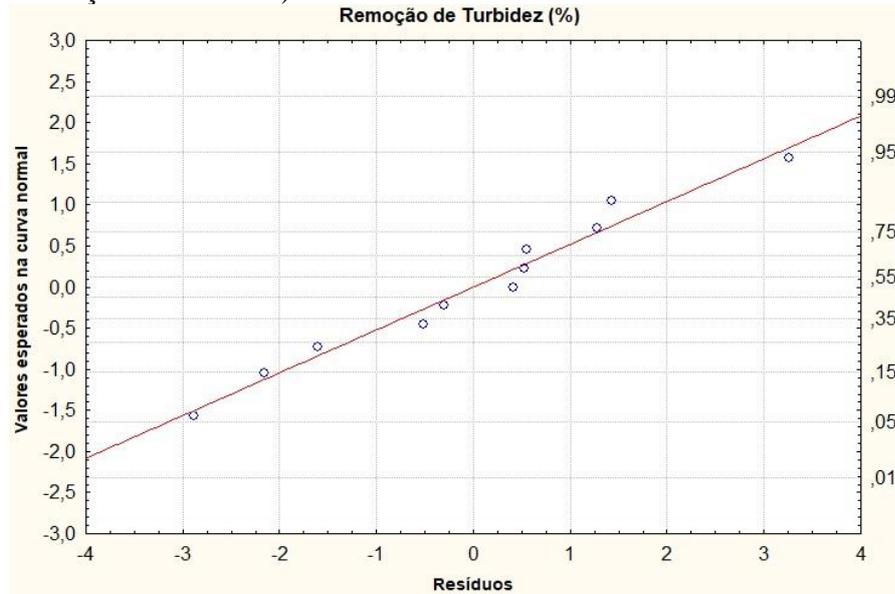
Figura 25 – Resíduos versus ensaios (resposta remoção de cor)



Fonte: elaborada pela autora.

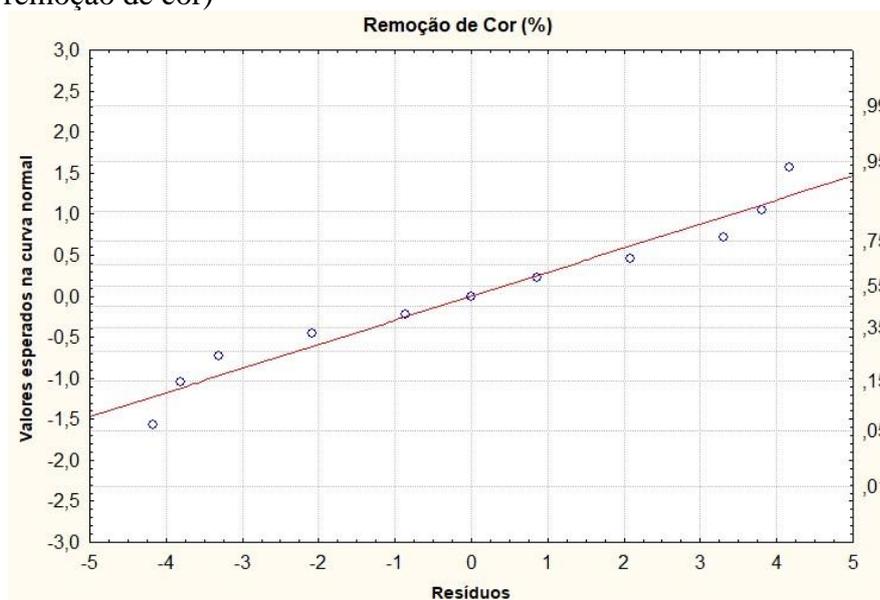
As Figuras 26 e 27 apresentam os gráficos de normalidade para a remoção de turbidez e cor, respectivamente. Tais gráficos não apresentaram pontos muito distantes da reta, o que indica uma distribuição normal dos resíduos.

Figura 26 – Distribuição dos resíduos na reta de normalidade (resposta remoção de turbidez)



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 27 – Distribuição dos resíduos na reta de normalidade (resposta remoção de cor)



Fonte: elaborada pela autora.

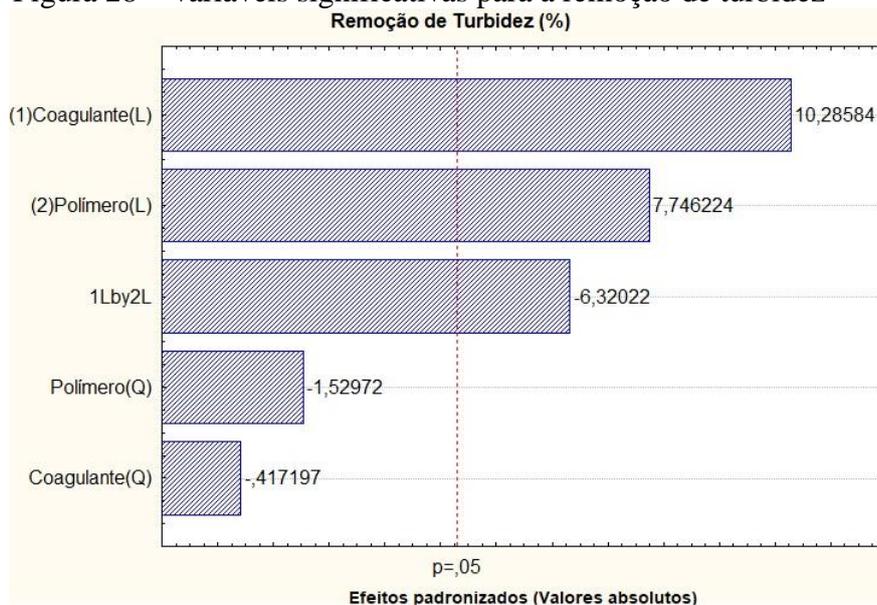
Com os gráficos apresentados, observa-se que os resíduos dos ensaios foram independentes e normalmente distribuídos, satisfazendo as condições para geração dos modelos de otimização a partir de metodologia de superfície resposta.

4.3 Efeito das variáveis nas respostas

Para a análise estatística, selecionou-se no programa Statistica, quanto ao termo do erro da ANOVA, a opção erro puro (Pure Error) para a resposta remoção de turbidez, e soma quadrática do resíduo (SS Residual) para a resposta remoção de cor, pois essas opções resultaram em um maior número de coeficientes estatisticamente significativos para os modelos gerados.

O gráfico de Pareto, apresentado na Figura 28, representa qual variável e/ou qual a interação entre elas proporciona efeitos mais significativos para a remoção do parâmetro turbidez. A partir do mesmo, é possível identificar os efeitos mais significativos para o processo, e classificá-los como positivos ou negativos para a resposta desejada.

Figura 28 – Variáveis significativas para a remoção de turbidez



Fonte: elaborada pela autora.

Com o gráfico apresentado, para um nível de significância de $p = 0,05$, observa-se que para a resposta remoção de turbidez os efeitos mais significativos foram a concentração do coagulante e do polímero em sua forma linear, além da interação destes fatores. Enquanto isso, os efeitos quadráticos do polímero e do coagulante não foram considerados significativos para o modelo.

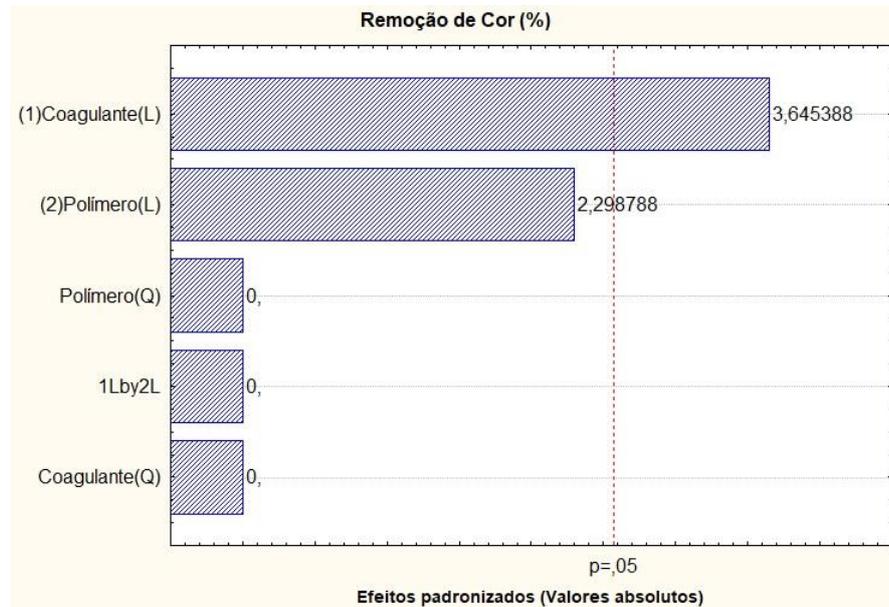
Dentre os fatores significativos, destaca-se o efeito da interação concentração de coagulante e de polímero. Desse modo, vê-se que não seria satisfatória a utilização de uma análise univariada, na qual não seria possível analisar o efeito dessa interação, demonstrando a importância da otimização multivariada para o presente estudo.

Zamora, Morais e Nagata (2005) analisaram 3 (três) experimentos práticos utilizando a otimização multivariada e a definiram como uma técnica apropriada e eficaz no estudo da significância estatística de mais de um fator, bem como dos efeitos da interação entre os mesmos. Os referidos autores também destacaram a eficiência do planejamento fatorial na análise multivariada, no qual é possível analisar as variáveis de forma simultânea, sem negligenciar suas interações e assim obter condições ótimas mais precisas.

Para a remoção de cor, o gráfico de Pareto apresentou duas versões. Na primeira análise, representada na Figura 29, apenas o coagulante na forma linear apresentou-se significativo para o processo. Entretanto, ao retirar as outras variáveis do processo (não significativas), a concentração de polímero na forma linear tornou-se significativa para a resposta (Figura 30). Portanto, para geração do modelo de remoção de cor foram consideradas

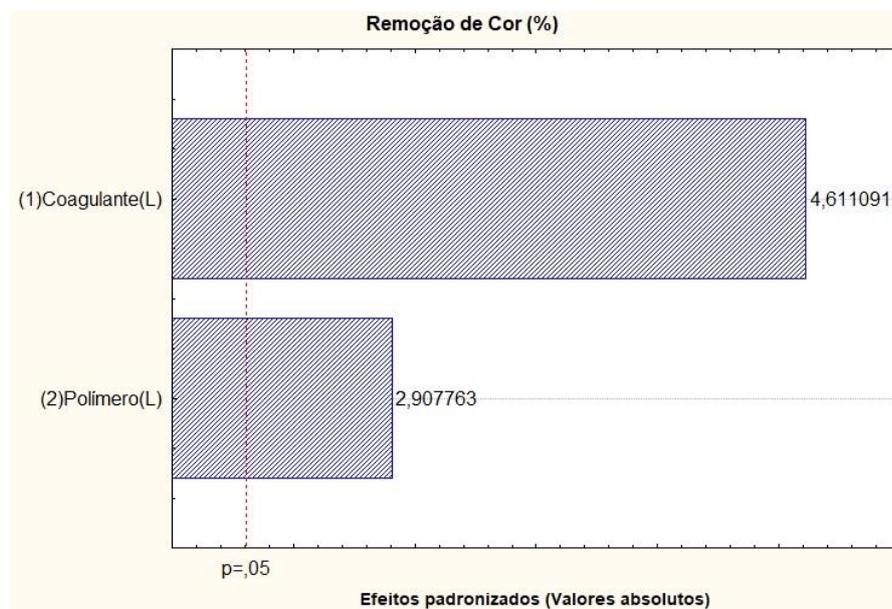
as componentes lineares concentração de coagulante e de polímero.

Figura 29 – Variáveis significativas para a remoção de cor



Fonte: elaborado pela autora.

Figura 30 – Variáveis significativas para a remoção de cor



Fonte: elaborado pela autora.

Efeito positivo indica que, com o aumento no valor do parâmetro dentro do domínio em estudo, provoca também aumento na resposta, enquanto efeito negativo sugere que ao se

aumentar o valor do fator, haverá diminuição da resposta (RODRIGUES; IEMMA, 2009). Portanto, observa-se que para as duas variáveis estudadas e considerando a faixa investigada, os fatores significativos (componentes lineares) apresentaram efeitos positivos, logo, concentrações maiores de coagulante e de polímero resultaram em remoções maiores de turbidez e cor.

4.4 Modelo de 2° ordem da resposta em função das variáveis significativas

Os modelos matemáticos de segunda ordem, em função das variáveis significativas do processo de remoção de turbidez e cor, estão apresentados nas equações 4 e 5, respectivamente.

Modelo para remoção de turbidez:

$$Y_1(X) = 60,42794 + 0,57636X_1 + 43,90218X_2 - 0,911463X_1 X_2 \quad (4)$$

Onde:

$Y_1(X)$ = Eficiência na remoção de turbidez (%)

X_1 = Concentração de coagulante (mg/L)

X_2 = Concentração de polímero (mg/L)

Modelo para remoção de cor:

$$Y_2(X) = 58,89417 + 0,37599X_1 + 17,78236X_2 \quad (5)$$

Onde:

$Y_2(X)$ = Eficiência na remoção de cor (%)

X_1 = Concentração de coagulante (mg/L)

X_2 = Concentração de polímero (mg/L)

Os modelos foram gerados pelo *software* Statistica, considerando apenas os efeitos significativos. Para a remoção de turbidez, as variáveis concentração de coagulante e de polímero na forma quadrática não foram considerados significativos para a resposta, portanto, não foram incluídas no modelo ajustado.

Para a remoção de cor, as variáveis concentração de coagulante e de polímero na forma quadrática e a interação (concentração de coagulante versus polímero) não foram significativas, não sendo incluídas no modelo.

O teste da ANOVA, para a remoção de turbidez e cor, está apresentado na Tabela 10 e 11, respectivamente.

Tabela 10 – Tabela de análise de variância (ANOVA) para o modelo da resposta remoção de turbidez

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	F _{cal}	F _{tab}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	155,12	3	51,71	11,68	4,35	2,68
Resíduo	31	7	4,43	-	-	-
Total Corrigido	186,12	-	-	-	-	-
R ²	0,833	-	-	-	-	-

F_{cal}= F_{calculado}F_{tab}=F_{tabelado}

Fonte: elaborada pela autora.

Tabela 11 – Tabela de análise de variância (ANOVA) para o modelo da resposta remoção de cor

Fonte de Variação	Soma Quadrática (SQ)	Grau de Liberdade (GL)	Quadrado Médio (QM)	F _{cal}	F _{tab}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	355,65	2	177,82	14,86	4,46	3,33
Resíduo	95,74	8	11,97	-	-	-
Total Corrigido	451,39	-	-	-	-	-
R ²	0,788	-	-	-	-	-

F_{cal}= F_{calculado}F_{tab}=F_{tabelado}

Fonte: elaborada pela autora.

Considerando os critérios $F_{cal}/F_{tab} > 1$ e $R^2 > 0,75$, os modelos das duas respostas foram estatisticamente significativos.

Após a obtenção dos modelos pelo Statistica, também foram determinados os valores das respostas preditos pelos modelos. As Tabelas 12 e 13 apresentam os valores obtidos pelos experimentos e pelos modelos, além da diferença entre os mesmos para a remoção de turbidez e cor, respectivamente.

A maioria dos ensaios apresentaram valores de resíduos próximos de 0, afirmando que

os valores obtidos pelo modelo e os apresentados nos experimentos estão próximos. O maior resíduo, em módulo, para a remoção de turbidez foi 3,26% (ensaio 5) e, para a remoção de cor, 4,17% (ensaios 9 e 10).

Tabela 12 – Respostas observadas nos ensaios, respostas obtidas pelo modelo e variação entre as observadas e obtidas (resíduo) para a remoção de turbidez

Ensaio	Valores observados (%)	Valores preditos (%)	Resíduo (%)
1	74,19	77,08	-2,89
2	85,16	87,32	-2,16
3	89,43	88,88	0,55
4	89,43	88,15	1,28
5	84,15	80,89	3,26
6	88,21	89,82	-1,61
7	82,52	81,99	0,53
8	88,21	88,72	-0,51
9	85,77	85,36	0,42
10	86,79	85,36	1,43
11	85,06	85,36	-0,3

Fonte: elaborada pela autora.

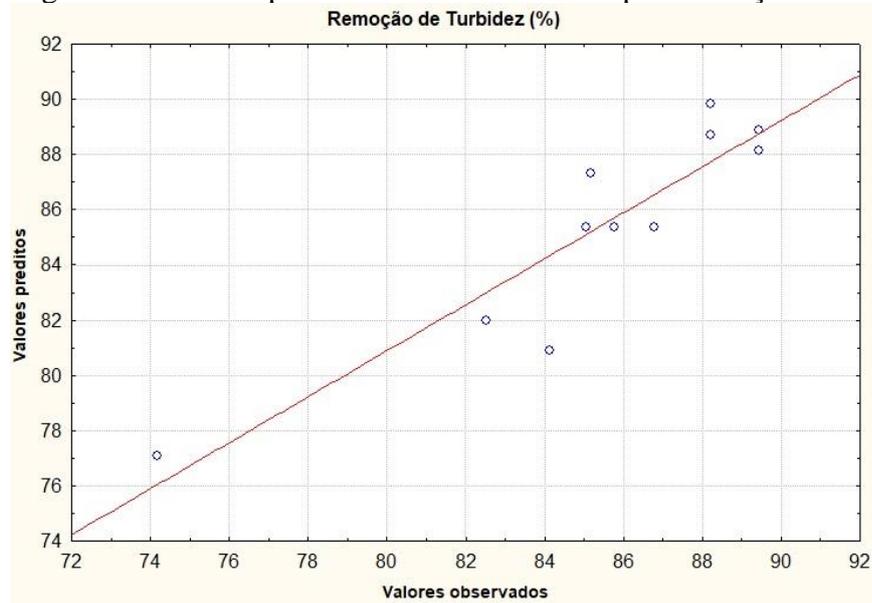
Tabela 13– Respostas observadas nos ensaios, respostas obtidas pelo modelo e variação entre as observadas e obtidas (resíduo) para a remoção de cor

Ensaio	Valores observados (%)	Valores preditos (%)	Resíduo (%)
1	66,67	69,97	-3,3
2	75	77,08	-2,08
3	83,33	81,25	2,08
4	91,67	88,36	3,3
5	75	71,19	3,81
6	83,33	87,14	-3,81
7	75	74,14	0,86
8	83,33	84,2	-0,86
9	75	79,17	-4,17
10	83,33	79,17	4,17
11	79,17	79,17	0

Fonte: elaborada pela autora.

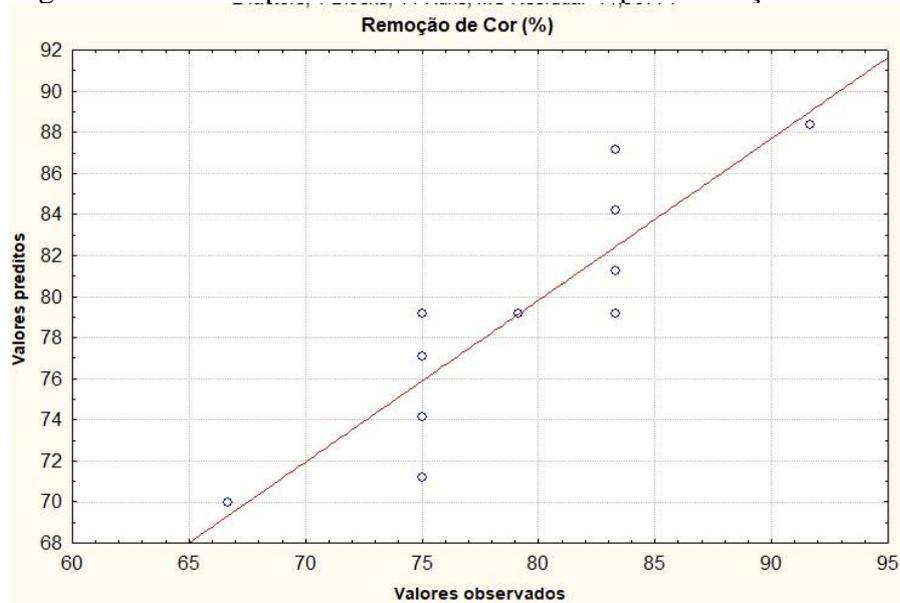
As Figuras 31 e 32 apresentam os gráficos dos valores obtidos nos experimentos e os preditos pelos modelos, para a resposta de turbidez e cor, respectivamente. Os mesmos demonstram conformidade dos dados, comprovando o ajuste satisfatório do modelo em relação aos resultados experimentais para as duas respostas.

Figura 31 –Valores preditos versus observados para remoção de turbidez



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 32 –Valores preditos versus observados para remoção de cor



Fonte: elaborada pela autora.

4.5 Validação experimental do modelo

A fim de validar o modelo de forma experimental, os ensaios foram realizados seguindo as condições apresentadas na Tabela 7. Com as respostas apresentadas nos experimentos, foi possível fazer a comparação com as respostas previstas pelo modelo.

Os valores reais obtidos nos ensaios e os determinados pelo modelo estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores observados, previstos e o erro associado para remoção de turbidez

Ensaio	Valores observados (%)	Valores previstos (%)	Erro ($\pm\%$)
1	81,91	85,95	4,7
2	89,63	85,95	4,29
3	85,16	85,95	0,92
4	82,93	86,04	3,62
5	91,46	86,04	6,3
6	88,01	86,04	2,28

Fonte: elaborada pela autora.

Para a remoção de turbidez, observa-se que os erros variaram de 0,92 a 6,30%. Tais erros podem ser explicados pela realização dos experimentos com amostras reais, que estão sujeitas a variações que podem interferir nas respostas. Os valores reais obtidos nos experimentos e os determinados pelo modelo para a remoção de cor estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Valores observados, previstos e o erro associado para remoção de cor

Ensaio	Valores observados (%)	Valores previstos (%)	Erro (%)
1	91,67	79,07	15,94
2	91,67	79,07	15,94
3	83,33	79,07	5,4
4	91,67	80,16	14,36
5	91,67	80,16	14,36
6	83,33	80,16	3,96

Fonte: elaborada pela autora.

Para a remoção de cor, todos os ensaios apresentaram valores observados maiores que os preditos pelo modelo. Os valores de erros variaram de 5,4% a 15,94%, sendo mais elevados que os erros encontrados na resposta remoção de turbidez. Tal fato pode ser explicado pela interferência do processo de pré-cloração e pelo método utilizado para análise do parâmetro cor, efetuada usando colorímetro pelo método comparativo, sendo este sujeito a erros, por depender, quase que exclusivamente, da análise do técnico/analista.

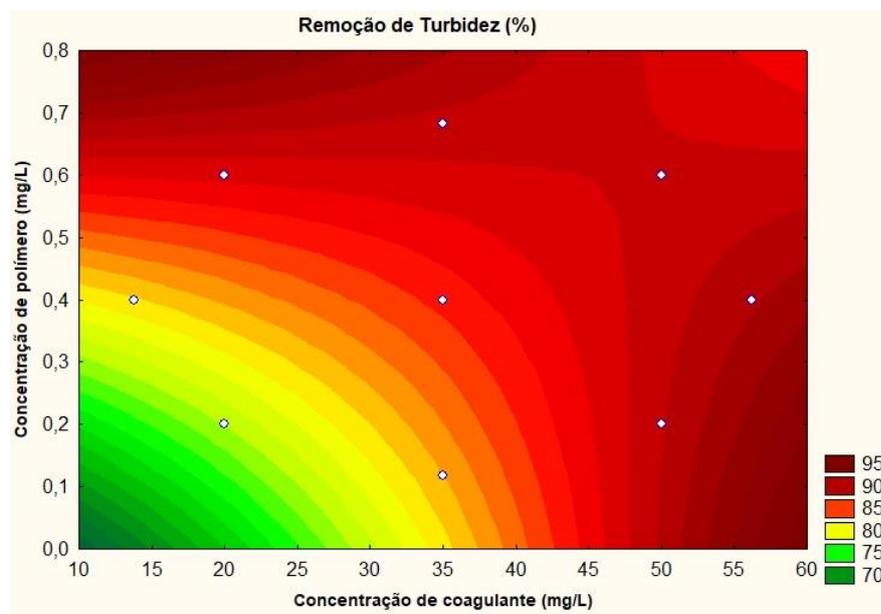
A partir desse fato, torna-se importante, em trabalhos futuros, a análise de cor a partir do método espectrofotométrico ou a partir de uma colorímetro digital, a fim de reduzir os possíveis erros analíticos.

4.6 Definição das faixas ótimas operacionais de cada variável do processo

4.6.1 Faixas operacionais ótimas para remoção de turbidez

A Figura 33 apresenta a curva de contorno remoção de turbidez.

Figura 33 – Curva de contorno: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de turbidez

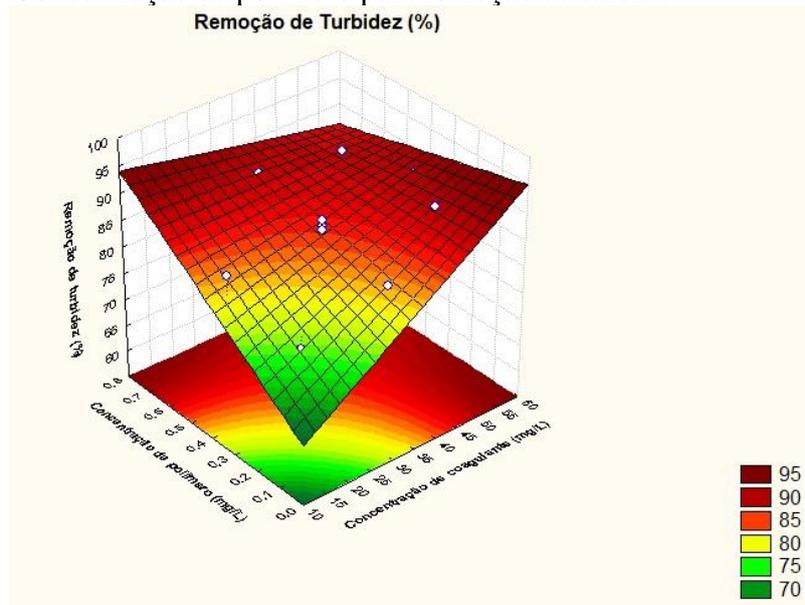


Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 34 apresenta o gráfico de superfície resposta para a remoção de turbidez.

Figura 34 – Superfície resposta: Concentração de coagulante x

Concentração de polímero para remoção de turbidez
Remoção de Turbidez (%)



Fonte: elaborada pela autora

As faixas de concentração ótima para o coagulante e para o polímero devem ser determinadas em conjunto, pois como pode ser visto na superfície de resposta e curva de contorno, o efeito da interação dessas variáveis impacta na resposta remoção de turbidez. Para uma remoção de turbidez de no mínimo 70%, a faixa de concentração ótima abrange toda a faixa estudada: para o coagulante varia entre 13,79 mg/L e 56,21 mg/L, enquanto para o polímero essa faixa se estende de 0,12mg/L a 0,68mg/L. Para uma remoção de turbidez de no mínimo 80%, os valores das variáveis independentes devem se situar nas faixas amarela, laranja, vermelha e vinho dos gráficos. Remoções maiores e, conseqüentemente, concentrações maiores de reagentes devem obedecer aos pares ordenados apresentados nas Figuras 33 e 34.

Costa (2014) também estudou a otimização de dosagens de coagulantes e auxiliar de floculação no tratamento de água de abastecimento e concluiu que o coagulante PAC foi o mais significativo na remoção de turbidez, apresentando respostas satisfatórias em toda a sua faixa de estudo (5,0 a 15 mg/L), entretanto o aumento na dosagem do coagulante potencializou a redução da turbidez das águas do Açude Gavião. Os autores também observaram que um aumento nas concentrações de coagulante, para valores acima de 15mg/L, pode incrementar ainda mais a remoção de turbidez. Em contrapartida, as concentrações investigadas do auxiliar de floculação (polímero catiônico) foram de 0,3 mg/L a 1,0 mg/L, obtendo-se as maiores remoções de turbidez a partir da redução da concentração do polímero dentro da faixa estudada.

Novaes *et al.* (2017) analisaram o uso da metodologia de superfície de respostas na otimização de métodos analíticos, e concluíram a eficiência da mesma com base no seu poder de modelagem, associado a capacidade de avaliação dos efeitos de interação entre as variáveis e as respostas, utilizando-se de um número pequeno de experimentos.

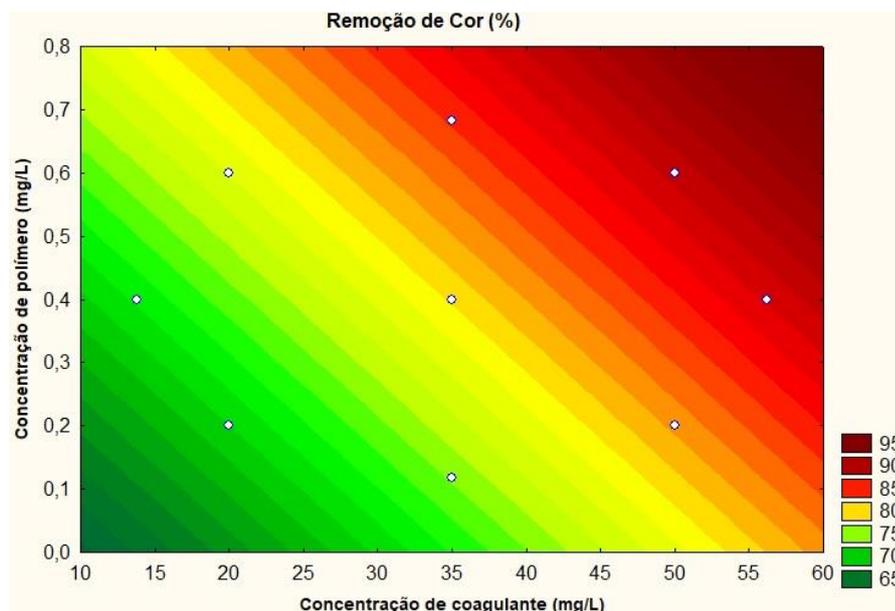
Cagliari (2018) analisou a padronização do uso do coagulante policloreto de alumínio (PAC) e do floculante poliacrilamida (polímero) em uma ETA de Porto Alegre, determinando que para as faixas de turbidez da água bruta até 50 NTU, de 50 a 100 NTU e acima de 100 NTU, as dosagens de PAC devem ser 18, 21 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, afirmando que é possível tratar a água em estudo com dosagens menores de produtos químicos, garantindo a qualidade da mesma.

Ao considerar o alto custo dos produtos químicos, em especial o polímero, observa-se que os resultados apontam que baixas concentrações de polímero e de coagulante são capazes de resultar em remoções consideráveis de turbidez. Tal fato é uma vantagem para permitir a redução da quantidade desses produtos químicos e da geração de lodo no tratamento de água.

4.6.2 Faixas operacionais ótimas para remoção de cor

A Figura 35 apresenta a curva de contorno para a remoção de cor.

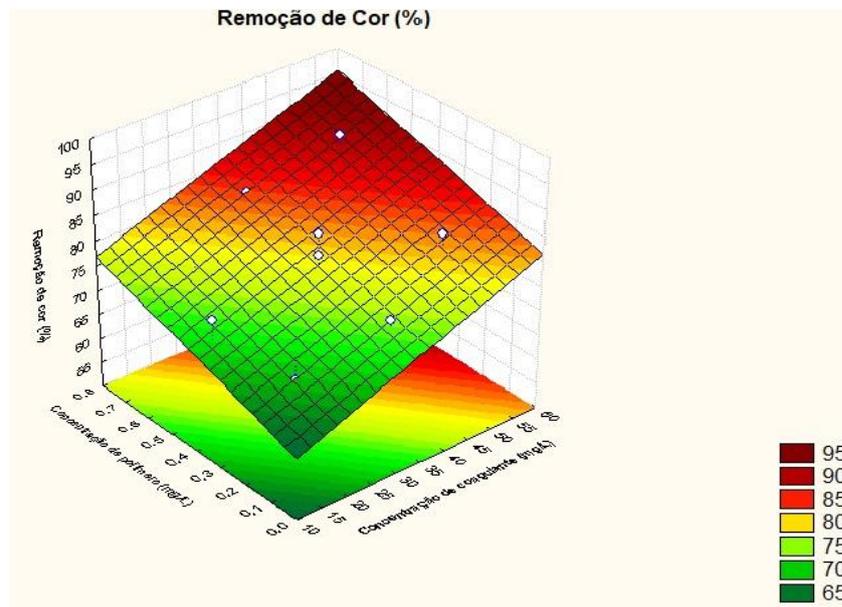
Figura 35 – Curva de contorno: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de cor



Fonte: elaborada pela autora.

A Figura 36 apresenta o gráfico de superfície resposta para a remoção de cor

Figura 36 – Superfície resposta: Concentração de coagulante x Concentração de polímero para remoção de cor



Fonte: elaborada pela autora.

A faixa de concentração ótima para o coagulante e para o polímero devem ser determinados em conjunto, uma vez que o efeito da interação dessas variáveis impacta na resposta remoção de cor. Para uma remoção de cor de no mínimo 65%, a faixa de concentração ótima abrange toda a faixa estudada: para o coagulante varia entre 13,79 mg/L e 56,21 mg/L, enquanto para o polímero essa faixa se estende de 0,12mg/L a 0,68mg/L. Para uma remoção de cor de no mínimo 80%, os valores das variáveis independentes devem se situar nas faixas amarela, laranja, vermelha e vinho dos gráficos. Remoções maiores e, conseqüentemente, concentrações maiores de reagentes devem obedecer aos pares ordenados ilustrados nas Figuras 35 e 36.

No estudo da otimização da dosagem de coagulantes para a redução de turbidez e cor da água de abastecimento, Filho, Döll e Wiecheteck (2011) determinaram que a dosagem mais econômica e operacionalmente viável do coagulante PAC foi de 15 mg/L (associada a 10 mg/L de carvão ativado em pó com tempo de contato de 15 minutos), uma vez que apresentou maiores remoções de turbidez (81%) e cor aparente (86%), valores estes condizentes com os resultados encontrados.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo apresentou a importância dos fatores concentração de coagulante e concentração de polímero na remoção de cor e turbidez no tratamento da água de abastecimento do município de Crateús. O Planejamento fatorial completo do tipo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) das variáveis interferentes no processo foi associado à Metodologia de Superfície de Resposta, que auxiliou na geração de dois modelos da remoção de turbidez e cor, em função das variáveis concentração de coagulante e concentração de polímero. Os fatores que apresentaram maior influência na resposta remoção de turbidez foram as componentes lineares concentração de coagulante e de polímero, além da concentração de coagulante versus o polímero, nesta ordem. Os fatores que apresentaram maior influência na resposta remoção de cor foram as componentes lineares concentração de coagulante e de polímero, nesta ordem. Demonstrou-se a utilidade de uma análise multivariada, já que se observou que interações entre as variáveis independentes foram significativas, o que demonstra a necessidade de determinar os valores de concentração dos reagentes químicos em conjunto. Os modelos apresentaram um ajuste satisfatório aos dados experimentais e, por meio de ANOVA, foram considerados estatisticamente significativos. A validação experimental apresentou valores de erros relativamente baixos para a remoção de turbidez (<6,30%), e valores medianos para a remoção de cor (<16%), o que atesta a concordância entre os valores observados e os preditos, embora esses erros possam ser minimizados por meio da utilização de métodos mais precisos para análise da cor aparente. A partir das superfícies de resposta e curvas de contorno foi possível modelar as faixas ótimas de operação para o coagulante e o polímero, em função das remoções de cor e turbidez. Os resultados apontaram que concentrações de reagentes abaixo das utilizadas na estação já são capazes de resultar em remoções consideráveis de turbidez (>70%) e cor (>65%). Os resultados apresentados atestaram a importância da modelagem e otimização por planejamento fatorial associado à metodologia de superfície resposta, a fim elevar a qualidade da água de abastecimento e colaborar na redução da quantidade de produto químico utilizado no processo, assim como reduzir a quantidade de lodo gerado na estação.

REFERÊNCIAS

- ACHON, Cali Laguna. **Ecoeficiência de sistemas de tratamento de água à luz dos conceitos da ISO 14.001**, 2008. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). **Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil 2020**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://conjuntura.ana.gov.br/usoagua>. Acesso em: 21 de março de 2021.
- ALVES, R; FILHO, S. S. F. Técnicas de avaliação de gosto e odor em águas de abastecimento: método analítico, análise sensorial e percepção dos consumidores. **Associação Brasileira de Engenharia Ambiental e Sanitária – ABES**. São Paulo, v. 11, n. 4, p. 362-370, out./dez. 2006.
- ANDRADE, J. B. **Notas de aula - Saneamento Básico e Sistema de Abastecimento de Água**. Universidade Católica de Goiás, Goiás, 2004. Disponível em: <https://rmdaveiga.files.wordpress.com/2011/01/sb-agua-ucg.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2020.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington, DC: APHA; AWWA; WEF, 2017.
- ASHBY, M. F. **Engenharia Ambiental: Conceitos, Tecnologia e Gestão**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12213**: Projeto de captação de água de superfície para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12216**: Projeto de estação de tratamento de água para abastecimento público – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.
- BORETO, W. et al. Caracterização de lodo gerado em estações de tratamento de água: perspectivas de aplicação agrícola. **Química Nova**. São Paulo. v. 32, n. 8, p. 2018- 2022, 2009.
- BRASIL. Lei nº 6.050, de 24 de maio de 1974. Dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, p. 6021, 27 mai 1974. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L6050.htm. Acesso: 18 jun. 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que trabalham em ETAS**. Brasília: FUNASA, 2014. Disponível em: <http://www.funasa.gov.br/documents/20182/38937/Manual+de+controle+da+qualidade+da+%C3%A1gua+para+t%C3%A9cnicos+que+trabalham+em+ETAS+2014.pdf/85bbdcbc-8cd2-4157-940b-90b5c5bcfc87>. Acesso em: 20 mai. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria de Consolidação n° 5, anexo XX**. Dispõe sobre o controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e o seu padrão de potabilidade. Brasília: Ministério da Saúde, 2017. Disponível em: <https://portalarquivos2.saude.gov.br/images/pdf/2018/marco/29/PRC-5-Portaria-de-Consolida----o-n---5--de-28-de-setembro-de-2017.pdf>. Acesso em: 26 jun. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. Brasília: Ministério da Saúde, 2006. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/vigilancia_controle_qualidade_agua.pdf. Acesso em: 20 mai. 2020.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução Conama n° 357, de 17 de Março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**: n. 53, p. 58-63, 18 mar 2005. Disponível em: <http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>. Acesso em: 26 jun. 2020.

CARDOSO, M. **Efeito do tipo de coagulante na produção de lodo de estação de tratamento de água**. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

CALIGARI, L. **Padronização do uso de policloreto de alumínio e poliacrilamida em uma ETA de Porto Alegre**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2018.

COMPANHIA DE ÁGUA E ESGOTO DO CEARÁ (CAGECE). **Relatório anual para informação ao consumidor**. Fortaleza: CAGECE, 2020. Disponível em: <https://www.cagece.com.br/wpcontent/uploads/PDF/RelatorioQualidadeAgua/RelatoriosAnuais/ABCDEF/Fortaleza.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2020.

COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Sertões de Crateús**. Fortaleza: COGERH, 2020. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/sertoes-de-crateus/>. Acesso em: 11 jun. 2020.

CONAGIN, A.; BARBIN, D.; MATEUS, N. Viabilidade do uso do Delineamento Composto Central. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 23, n. 6, p. 1537–1546, 2001.

COSTA, W. M. **Otimização das dosagens de agentes coagulantes para o tratamento da água do açude Gavião, Pacatuba/CE, com delineamento composto central rotacional e análise de superfície resposta**. 2014. Dissertação (Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2014.

DE MEDEIROS, C. F. F. **Abastecimento de água**. 1° ed. Campina Grande – PB, 2017. Disponível em:

http://www.ppga.unir.br/uploads/11523232/arquivos/Apostilha_Abast_de_Agua_UFCG_1632633735.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.

DUARTE, M. A. C. **Tratamento de água para consumo humano de reservatório**

eutrofizado através de pré e interoxidação, adsorção em carvão ativado e dupla filtração. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FIGUEIREDO, I. C. **Avaliação de desempenho do processo CEPT no tratamento primário de esgotos domésticos.** 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

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

FILHO, S. S. F. **Tratamento de Água: Concepção, projeto e operação de estações de tratamento.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

FONSECA, J. J. S. **Metodologia da Pesquisa Científica.** Fortaleza, CE: Editora da UECE, 2002.

FRANCO, E. S. **Avaliação da influência de coagulantes Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água.** 2009. Tese (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FREGONEZI, G. **Sistema de captação, tratamento, reservação e distribuição de água.** Maringá, 2015. Disponível em:
https://www.academia.edu/10602353/Apostila_saneamento_II. Acesso em: 18 jun.2020.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Volume Armazenado - Reservatórios.** Fortaleza: FUNCEME, 2020. Disponível em:
http://www.funceme.br/produtos/script/acudes_e_rios/Boletim_diario_nivel_acudes/. Acesso em: 11 jun. 2020.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. **Métodos de Pesquisa.** 1. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009.

GOMES, A. MI. C. **Análise da evolução da qualidade da água do rio Cávado na última década e respetivos impactes na operação da ETA de Areias de Vilar.** 2016. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Biológica) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Portugal, 2016.

HELLER, L.; PÁDUA, V. **Abastecimento de água para consumo humano.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2010.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 20--). **Portal Cidades IBGE.** Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/crateus>. Acesso em: 11 jun. 2020.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil**

municipal 2017 – Crateús. Fortaleza: IPECE, 2017. Disponível em: https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2018/09/Crateus_2017.pdf. Acesso em: 11 jun. 2020

LEAL, F. C. T.; LIBÂNIO, M. Estudo da remoção da cor por coagulação química no tratamento convencional das águas de abastecimento. **Engenharia Sanitaria e Ambiental.** Juíz de Fora – MG, v. 7, n. 3, p. 117–128, jul/set, 2002.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água.** 3. ed. Campinas, São Paulo: Editora Átomo, 2010.

LIMA, G. J. **Uso de polímero natural do quiabo como auxiliar de floculação e filtração em tratamento de água e esgoto.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

LOPES, F. DAS C. DA C. **Avaliação da formação de Trialometas através de tratamento simulado em teste de jarros com água bruta de mananciais superficiais eutrofizados.** 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Elaboração e Gerenciamento de Projetos para a Gestão Municipal de Recursos Hídricos) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, Fortaleza, 2017.

LUCENA, L. G. **Otimização do processo foto-fenton aplicado ao tratamento de lixiviados de aterros sanitários,** 2014. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2014.

MENEZES, I. S.; MENDONÇA, L. C. Avaliação do tratamento preliminar da estação de tratamento de efluentes do campus de São Cristovão da Universidade Federal de Sergipe. **Scientia Plena.** São Cristovão – SE, v. 13, n. 10, 2017.

MONDARDO, R. I. **Influência da pré-oxidação na tratabilidade das águas via filtração direta descendente em manancial com elevadas concentrações de microalgas e cianobactérias.** 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORAES, M. E. B.; SOUZA, J. R. A importância da qualidade da água e os seus múltiplos usos: Caso Rio Almada, Sul da Bahia, Brasil. **Revista Eletrônica do Prodepa.** Fortaleza, v. 8, n. 1, p. 26–45, abr. 2014.

MOREIRA, C. M. **Optimização de Sistemas de Automoção, Controle e Supervisão de Estações de Tratamento de Água.** 2004. Dissertação (Mestrado em Automoção, Instrumentação e Controle) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, 2004.

NASCIMENTO, B. **Vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água potável da região metropolitana do Recife: intermitência e poluição.** 2003. Dissertação (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife -PE, 2003.

NOVAES, C. G. *et al.* Otimização de métodos analíticos usando metodologia de superfícies respostas – Parte I: Variáveis de processo. **Revista Virtual de Química.** Bahia, v.9, n.3, p. 184-1215, abr. 2017.

- NOVAIS, E. S. **Utilização de polímeros catiônicos e aniônicos no tratamento de efluentes**. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Técnico em Polímeros – Produção em Plásticos) – Faculdade de Tecnologia de Sorocaba, Sorocaba, 2012.
- PADILHA, D. J.; CERUTI, F.C.; VIDAL, C. M.; MARTINS, C. H. **Análise da utilização de três diferentes coagulantes na remoção de turbidez de água de manancial de abastecimento**. VII EPCC Encontro Internacional de Produção Científica. Centro Universitário de Maringá. Maringá - PR, 2011.
- PASCHOALATO, C. P.; TRIMAILOVAS, M. R.; DI BERNARDO, L. Formação de subprodutos orgânicos halogenados nas operações de pré-oxidação com cloro, ozônio e peroxônio e pós-cloração em água contendo substância húmica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo, v. 13, n. 3, p. 313–322, jul/set, 2008.
- PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Sanamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001
- PRADO, G. S.; CAMPOS, J. R. Determinação da quantidade de areia no esgoto sanitário: metodologia e estudo de caso. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo, v. 12, n. 3, p. 306-312, jul/set, 2008.
- RAMOS, R. C. **Propostas de melhoria para a Estação de Tratamento de Água no Município de Formiga/MG visando o aumento da capacidade de água tratada**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga – MG, 2017.
- RICHTER, C. A. **Água: Métodos e tecnologia de tratamento**. 1º ed. Editora Blucher, 2009.
- RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, São Paulo: Editora Cárita, 2009.
- SALIBA, O.; GARBIN, C. A.; SANTOS, L. F. Fluoretação da água de abastecimento público: abordagem bioética, legal e política. **Revista Bioética**. Araçatuba – SP, v. 25, n. 2, p. 328-337, 2017.
- SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO (SAAE). **Sistemas de Tratamento de Água**. ARACRUZ: SAAE, 2006. Disponível em: https://www.saaeara.com.br/arquivos/outros/Tratamento_de_Agua.pdf. Acesso em: 18 jun. 2020.
- SERVIÇO AUTÔNOMO MUNICIPAL DE ÁGUA E ESGOTO (SAMAÉ). **Operador de estação de tratamento de água e esgoto**. Caxias do Sul: SAMAÉ, 2010. Disponível em: <http://www.samaecaxias.com.br/Concurso/DownloadArquivoConcurso/Apostila%20Operador%20ETAÉ.pdf/>. Acesso em: 18 jun. 2020.
- SILVA, G. G. et al. Tratamento de água de reservatórios por dupla filtração, oxidação e adsorção em carvão ativado granular. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Palmas-TO, v. 17,

n. 1, p. 71–80, jan/mar, 2012.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO (SNIS). **Diagnóstico dos serviços de água e esgoto 2019**. Brasília, 2020. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-anual-agua-e-esgotos/diagnostico-dos-servicos-de-agua-e-esgotos-2019>. Acesso em: 20 jan. 2021

SOARES, A.; LEÃO, M. Contaminação dos mananciais por micropoluentes e a precária remoção desses contaminantes nos tratamentos convencionais de água para potabilização. **Doutrina Internacional**. Minas Gerais, v. 14, n. 21, p. 36–85, jan/jun, 2015.

SOUZA, W. A. **Tratamento de Água**. 1º ed. Natal: Editora CEFET – RN, 2007.

TEODOSIO, J, R. **Estudo e otimização do processo de tratamento de efluentes líquidos contendo hidroquinona por processo oxidativo avançado com peróxido de hidrogênio**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife - PE, 2015.

VERAS, L.; DI BERNARDO, L. Tratamento de Água de Abastecimento por Meio da Tecnologia de Filtração em Múltiplas Etapas - FIME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. São Paulo, v. 13, n. 1, p. 109-116, jan/mar, 2008.

VIANNA, C, T. **Classificação de Pesquisas Científicas**. Florianópolis, 2013, 2p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/cleversontabajara1/metodologia-cientifica-tipos-de-pesquisa-ultimate>. Acesso em: 18 jun. 2020.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgoto**. 2. ed. Belo Horizonte: Editora SEGRAC, 1996.

WIECHETECK, G. K. **Remoção de substâncias húmicas em tratamento de água pro meio de pré-oxidação e dupla filtração**. 2005. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

ZAMORA, P, P.; MORAIS, J, L.; NAGATA, N. Por que otimização multivariada? **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 2, jun-2005.

APÊNDICE A – PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO – POP

PROCEDIMENTO OPERACIONAL PADRÃO DOS EXPERIMENTOS REALIZADOS NO PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO DO TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO DO MUNICÍPIO DE CRATEÚS-CE

Procedimentos:

1. Encher os beakers com água já pré-oxidada até a marca de 2000 mL;
2. Colocá-los no aparelho de Jar-Test (cada Becker refere-se a um experimento);
3. Ligar o *Jar-Test* na velocidade máxima de 100 rpm para simular a etapa de mistura rápida (Coagulação), ligar o cronômetro simultaneamente e deixá-lo rodar nessa velocidade por 1 minuto;
4. Após 1 minuto, adicionar o coagulante PAC aos dosadores nos jarros, deixando na mesma velocidade de rotação durante 1 minuto;
5. Passado 1 minuto, adicionar o auxiliar de floculação (polímero catiônico) nos jarros (com o auxílio dos dosadores), deixar rodar por 1 minuto na velocidade máxima e após esse tempo, reduzir para 20 rpm, com o objetivo de simular a etapa de mistura lenta da ETA (Floculação) durante 15 min;
6. Após o tempo determinado, desligar o equipamento e deixar as amostras decantarem por 15 minutos;
7. Com uma pipeta volumétrica retirar uma amostra de cada jarro para análise de turbidez no aparelho turbidímetro (para evitar qualquer interferência indesejada, descartar a primeira alíquota e utilizar a 2ª para as análises);
8. Para a análise de cor, é necessário coletar o sobrenadante e analisar a amostra no colorímetro, a fim de determinar sua cor aparente;
9. Realizar a primeira batelada com 6 experimentos cada, e a segunda com 5 experimentos, totalizando, assim, 11 ensaios. Ademais, realizar 6 ensaios de validação experimental, utilizando duas condições em triplicata.

**ANEXO A – TABELA DE CONCENTRAÇÕES DOS REAGENTES UTILIZADOS NA
ETA POTY**

Mês/ano	Unidade	Produto Químico	
		Policloreto de Alumínio - PAC	Polímero Catiônico
Jul./19	mg/L	36,69	0,30
Ago./19	mg/L	36,13	0,30
Set./19	mg/L	37,87	0,39
Out./19	mg/L	36,75	0,39
Nov./19	mg/L	36,45	0,38
Dez./19	mg/L	34,09	0,36
Jan./20	mg/L	27,67	0,33
Fev./20	mg/L	28,44	0,36
Mar./20	mg/L	47,74	0,55
Abr./20	mg/L	45,38	0,62
Mai./20	mg/L	39,47	0,58
Jun./20	mg/L	35,13	0,45

Fonte: CAGECE, 2020.