



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

ADRYA SANTOS ALBUQUERQUE

**OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA
ABASTECIMENTO PÚBLICO DO MUNICÍPIO DE SOBRAL - CE**

FORTALEZA

2021

ADRYA SANTOS ALBUQUERQUE

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO
PÚBLICO DO MUNICÍPIO DE SOBRAL - CE

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestra em Tecnologia e Gestão Ambiental.

Área de concentração: Hidrologia.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Instituto Federal do Ceará - IFCE
Sistema de Bibliotecas - SIBI
Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- A345o Albuquerque, Adrya Santos.
 Otimização do Sistema de Tratamento de Água para Abastecimento Público do Município de Sobral-CE /
 Adrya Santos Albuquerque. - 2021.
 134 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental,
 Campus Fortaleza, 2021.
 Orientação: Prof. Dr. Francisco Maurício de Sá Barreto.
1. Auxiliares de coagulação. 2. Otimização. 3. Planejamento experimental. 4. Policloreto de alumínio. 5.
 Tratamento de água. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 , - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

AVALIAÇÃO

Processo: 23256.008403/2021-33

Interessado: Adrya Santos Albuquerque

FOLHA DE APROVAÇÃO

ADRYA SANTOS ALBUQUERQUE

OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO DO MUNICÍPIO DE SOBRAL - CE

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - Campus Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de concentração: Hidrologia.

Aprovada em: 28/09/2021



Documento assinado eletronicamente por **Adriana Guimaraes Costa Saboia, Professora do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 01/10/2021, às 16:34, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Francisco Mauricio de Sa Barreto, Professor(a) do Ensino Básico, Técnico e Tecnológico**, em 24/10/2021, às 20:19, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Mendes Pedroza, Usuário Externo**, em 31/10/2021, às 05:53, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade do documento pode ser conferida no site https://sei.ifce.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0 informando o código verificador **3011116** e o código CRC **106D029E**.

Dedico,

A Deus, autor de toda graça, por seu amor,
eleição e sustento em todos os momentos.

Aos meus pais, Sâmia e Édrio, e meu irmão,
Édrio Filho, pelo amor, carinho e apoio
incondicional.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos a Deus, por seu infinito amor e pela sua eleição eterna, que com misericórdia e sabedoria tem me sustentado no caminho que trilho.

Ao professor Francisco Maurício de Sá Barreto, pelo incentivo e orientação durante esses dois anos de pesquisa.

Aos professores membros da banca avaliadora, professora Adriana Guimarães Costa Saboia e professor Marcelo Mendes Pedroza, pela participação e sugestões apresentadas, além da disponibilidade e apoio oferecidos durante o processo de produção deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos e auxílio financeiro que possibilitou a dedicação integral ao programa de pós-graduação e a operacionalização do estudo.

Às amigas da turma de mestrado em Tecnologia e Gestão Ambiental de 2019, em especial, Joana Ribeiro e Priscila Karine, pelo companheirismo, disponibilidade e troca de experiências, indispensáveis ao meu crescimento humano e profissional durante esses dois anos de curso.

Aos meus familiares, em especial, meus pais, Sâmia e Édrio, meu irmão, Édrio Filho, e minhas avós, Maria Costa e Gildete Gouveia, por toda dedicação, carinho, amor e apoio, e por serem exemplos de fortaleza e determinação na minha vida.

Aos meus amigos, Nayara Soares, Douglas Ribeiro, Bia Negreiros, Lorayne Oliveira e Everton Góes, pela amizade, apoio e sinceridade diante de momentos importantes em minha vida pessoal.

Aos consagrados da célula Mãe Auxiliadora, pela intercessão e vida de oração, sustento na minha caminhada durante estes anos de conclusão da pós-graduação.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação humana, profissional e vocacional.

“Essas águas, disse-me ele, dirigem-se para a parte oriental, elas descem à planície do Jordão; elas se lançarão no mar, de sorte que suas águas se tornarão mais saudáveis. Em toda parte, aonde chegar a corrente, todo animal que se move na água poderá viver, e haverá lá grande quantidade de peixes. Tudo o que essa água atingir se tornará são e saudável e em toda parte aonde chegar a torrente haverá vida [...] Ao longo da torrente, em cada uma de suas margens, crescerão árvores frutíferas de toda espécie, e sua folhagem não murchará, e não cessarão jamais de dar frutos: todos os meses frutos novos, porque essas águas vêm do santuário. Seus frutos serão comestíveis e suas folhas servirão de remédio.”

Bíblia. Ezequiel 47, 8-9, 12.

RESUMO

Na busca pelo aperfeiçoamento das unidades de tratamento, estudos têm sido realizados com o intuito de determinar os parâmetros que mais interferem no processo de clarificação das águas, entre eles, podem-se destacar: as características da água bruta; as concentrações e tipos de produtos químicos aplicados; e os parâmetros hidráulicos (TDH e G). Diante da importância da etapa de coagulação/floculação nesse processo, os ensaios com reatores estáticos são utilizados para identificar o cenário operacional mais adequado. Neste estudo, buscou-se otimizar o processo de clarificação das águas do rio Acaraú, tratadas em uma ETA localizada em Sobral-CE, avaliando sua eficiência na remoção de cor aparente e turbidez. Foram investigadas a influência e as dosagens ótimas dos seguintes fatores: dosagem do agente pré-oxidante hipoclorito de sódio, do coagulante PAC e dos polímeros catiônico e aniônico, utilizando técnicas de experimentação planejada em batelada do tipo *Jar test* e análise dos efeitos principais e de interação entre os fatores pelo *software R*. Para águas com características próximas às analisadas neste estudo (turbidez até 60 uT e cor aparente até 300 uH), as dosagens de coagulante PAC entre 70 e 125 mg/L apresentaram remoções de cor aparente e turbidez superiores à 90%, no entanto, dosagens superiores a 150 mg/L prejudicaram o processo de clarificação. Além disso, identificou-se que é possível reduzir a dosagem dos auxiliares de coagulação/floculação e do pré-oxidante adotadas pela ETA. A partir das análises estatísticas, constatou-se que o parâmetro crítico para o processo de clarificação é a dosagem de coagulante PAC. As expressões matemáticas modeladas mostraram estatisticamente significantes, podendo ser utilizadas para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. Dentre as expressões que apresentaram melhor ajuste, destaca-se o modelo matemático que quantifica as dosagens de produtos químicos para as águas com turbidez até 40 uT e cor aparente até 130 uH. Estas expressões resultaram em um $R_{ajustado}$ de 96,56% para remoção de turbidez e 94,08% para remoção de cor aparente.

Palavras-chave: auxiliares de coagulação, otimização, planejamento experimental, policloreto de alumínio, tratamento de água.

ABSTRACT

In the search of improvement of treatment units, studies have been carried out in order to determine the parameters that most interfere in the process of water clarification, among them, one stands out: the characteristics of raw water; concentrations and types of chemicals applied; and hydraulic parameters (TDH and G). Given the importance of the coagulation/flocculation stage in this process, tests with static reactors are used to identify the most appropriate operational scenario. In this study, we sought to optimize the process of clarification of the waters of the Acaraú River, treated in a Waterworks located in Sobral-CE, evaluating its efficiency in the removal of apparent color and turbidity. The influence and optimal dosages of the following factors were investigated: dosage of the pre-oxidant agent sodium hypochlorite, coagulant PAC and cationic and anionic polymers, using techniques of planned experimentation in Jar test type and analysis of the main effects and interaction between the factors by the *R* software. For waters with characteristics close to those analyzed in this study (turbidity up to 60 uT and apparent color up to 300 uH), dosages of coagulant PAC between 70 and 125 mg/L showed removals of apparent color and turbidity higher than 90%, however, dosages higher than 150 mg/L impaired the clarification process. In addition, it was identified that it is possible to reduce the dosage of coagulation/flocculation and pre-oxidant aids adopted by Waterworks. From the statistical analyses, it was found that the critical parameter for the clarification process is the dosage of coagulant PAC. The modeled mathematical expressions showed statistically significant and can be used for predictive purposes within the domain of the factors studied. Among the expressions that presented better fit, we highlight the mathematical model that quantifies the dosages of chemicals for waters with turbidity up to 40 uT and apparent color up to 130 uH. These expressions resulted in a $R_{adjusted}$ of 96.56% for turbidity removal and 94.08% for apparent color removal.

Keywords: coagulation aids, optimization, experimental planning, aluminum polyvinyl, water treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação e faixa de tamanhos das partículas presentes na água.	25
Figura 2 – Principais tecnologias de tratamento de água para consumo humano.	32
Figura 3 – Mapa de localização das ETAs de Sobral.	44
Figura 4 – Captação das águas do rio Acaraú por poço amazonas.....	45
Figura 5 – Etapas do tratamento de água da ETA III de Dom Expedito.....	46
Figura 6 – Etapas do tratamento de água da ETA III de Dom Expedito.....	47
Figura 7 – Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização. (a) turbidímetro digital; (b) colorímetro visual; (c) pHmetro digital.	52
Figura 8 – Equipamento de <i>jar test</i> utilizado para ensaios de bancada.....	52
Figura 9 – Médias mensais dos parâmetros físicos cor aparente e turbidez para o ano de 2019 e limite recomendado para adoção da tecnologia de tratamento convencional.	63
Figura 10 – Configuração do ressalto hidráulico na calha Parshall.	105

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2019.....	59
Gráfico 2 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	60
Gráfico 3 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2019.	61
Gráfico 4 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	61
Gráfico 5 – Perfil de dosagem do coagulante PAC na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	64
Gráfico 6 – Perfil de dosagem do polímero catiônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	65
Gráfico 7 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	65
Gráfico 8 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 1.	72
Gráfico 9 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 1.....	73
Gráfico 10 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$	74
Gráfico 11 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$	74
Gráfico 12 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 1.....	77
Gráfico 13 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$	78
Gráfico 14 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 1.	79
Gráfico 15 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$	82
Gráfico 16 – Gráfico de superfície de remoção de turbidez do Ensaio 2: PAC <i>versus</i> catiônico.	84
Gráfico 17 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 2.....	84
Gráfico 18 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$	85
Gráfico 19 – Gráfico de superfície de remoção de cor aparente do Ensaio 2: PAC <i>versus</i> catiônico.	87
Gráfico 20 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 2.	87
Gráfico 21 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$	90

Gráfico 22 – Gráfico de superfície de remoção de turbidez do Ensaio 3: PAC <i>versus</i> catiônico.	91
Gráfico 23 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 3.....	92
Gráfico 24 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$	93
Gráfico 25 – Gráfico de superfície de remoção de cor aparente do Ensaio 3: PAC <i>versus</i> catiônico.	94
Gráfico 26 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 3.	95
Gráfico 27 – Curva de gradiente do equipamento de <i>jar test</i>	102
Gráfico 28 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2015.....	106
Gráfico 29 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2016.....	106
Gráfico 30 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2017.....	107
Gráfico 31 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2015.....	108
Gráfico 32 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2016.....	108
Gráfico 33 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2017.....	109
Gráfico 34 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2015. ..	110
Gráfico 35 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2016. ..	110
Gráfico 36 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2017. ..	111
Gráfico 37 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2015.	112
Gráfico 38 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2016.	112
Gráfico 39 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2017.	113
Gráfico 40 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2015.....	114
Gráfico 41 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2016.....	114
Gráfico 42 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2017.....	115
Gráfico 43 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2015.	116
Gráfico 44 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2016.	116
Gráfico 45 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2017.....	117
Gráfico 46 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 1.	118

Gráfico 47 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 1.	118
Gráfico 48 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$	119
Gráfico 49 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 2.	121
Gráfico 50 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 2.	121
Gráfico 51 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$	122
Gráfico 52 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 2.	125
Gráfico 53 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 2.	125
Gráfico 54 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$	126
Gráfico 55 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 3.	129
Gráfico 56 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 3.	129
Gráfico 57 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$	130
Gráfico 58 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 3.	132
Gráfico 59 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 3.	132
Gráfico 60 – <i>Half Normal</i> dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados das Precipitações Anuais nos Postos de Acaraú, Santa Quitéria e Meruoca.	23
Tabela 2 – Características da água bruta em função da tecnologia de tratamento recomendada.	33
Tabela 3 – Classificação das águas doces e salobras e tipos de tratamentos recomendados, segundo a Resolução CONAMA 357/2005.....	33
Tabela 4 – Experimentos compostos centrais e os valores de espaçamento axial α	40
Tabela 5 – Tabela de ANOVA para um experimento fatorial 2^2	41
Tabela 6 – Padrão de potabilidade para cor aparente e turbidez.	44
Tabela 7 – Número mínimo de amostras e frequência para controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, considerando o ponto de amostragem na saída do tratamento e manancial do tipo superficial.....	50
Tabela 8 – Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química das águas brutas e tratadas.....	51
Tabela 9 – Configuração do planejamento fatorial completo para o Ensaio 1 (preliminar). ...	55
Tabela 10 – Configuração do planejamento composto central rotacional do Ensaio 2.....	56
Tabela 11 – Configuração do planejamento composto central rotacional do Ensaio 3.....	56
Tabela 12 – Medidas estatísticas para vazão de captação da ETA Dom Expedito em 2019. ..	59
Tabela 13 – Medidas estatísticas para caracterização das águas do manancial Acaraú. Período: janeiro a dezembro de 2019.....	62
Tabela 14 – Medidas estatísticas dos produtos químicos dosados em comparação com as características de qualidade do manancial Acaraú no Cenário I.	66
Tabela 15 – Medidas estatísticas dos produtos químicos dosados em comparação com as características de qualidade do manancial Acaraú no Cenário II.	66
Tabela 16 – Parâmetros de qualidade das amostras de água bruta do rio Acaraú.....	68
Tabela 17 – Parâmetros utilizados no Ensaio 1.....	68
Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos ensaios 2 e 3.....	69
Tabela 19 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 1 (fatorial 2^4).	70
Tabela 20 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 1 (fatorial 2^4).	71
Tabela 21 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 1.	75
Tabela 22 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 1.	76
Tabela 23 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 2 (DCCR).	80

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 2 (<i>DCCR</i>).	80
Tabela 25 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 3 (<i>DCCR</i>).	88
Tabela 26 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 3 (<i>DCCR</i>).	88
(continua).....	88
Tabela 27 – Relação entre os valores de rotação do equipamento de <i>jar test</i> e o gradiente de velocidade.....	102
Tabela 28 – Etapas para verificação das condições de mistura na calha Parshall.....	103
Tabela 29 – Valores do expoente n e do coeficiente K , unidades métricas, e de limites de aplicação dos medidores Parshall com escoamento livre.	104
Tabela 30 – Dimensões padronizadas (em cm) de medidores Parshall.....	104
Tabela 31 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 1.....	119
Tabela 32 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 1.....	120
Tabela 33 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 2.	122
Tabela 34 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 2.	123
Tabela 35 – Efeitos estimados e erro padrão do modelo ajustado para remoção de turbidez do Ensaio 2.	124
Tabela 36 – Análise de variância do modelo ajustado para remoção de turbidez do Ensaio 2.	124
Tabela 37 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 2.....	126
Tabela 38 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 2.....	127
Tabela 39 – Efeitos estimados e erro padrão do modelo ajustado para remoção de cor aparente do Ensaio 2.	128
Tabela 40 – Análise de variância do modelo ajustado para remoção de cor aparente do Ensaio 2.	128
Tabela 41 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 3.	130
Tabela 42 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 3.	131
Tabela 43 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 3.....	133
Tabela 44 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 3.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APHA	<i>American Public Health Association</i>
APP	Áreas de Preservação Permanente
CC	Tratamento em Ciclo Completo
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DF	Dupla Filtração
ETA	Estação de Tratamento de Água
FDA	Filtração Direta Ascendente
FDD	Filtração Direta Descendente
FF	Floto-Filtração
FiME	Filtração em Múltiplas Etapas
G	Gradiente de Velocidade
GML	Gradiente de Mistura Lenta
GMR	Gradiente de Mistura Rápida
DCCR	Planejamento Composto Central Rotacional
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLANSAB	Plano Nacional de Saneamento Básico
SAAE	Serviço Autônomo de Água e Esgoto
SMEWW	<i>Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater</i>
TDH	Tempo de Detenção Hidráulico
TML	Tempo de Mistura Lenta
TMR	Tempo de Mistura Rápida

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 Caracterização do problema.....	18
1.2 Objetivos	20
<i>1.2.1 Objetivo geral.....</i>	<i>20</i>
<i>1.2.2 Objetivos específicos.....</i>	<i>20</i>
1.3 Estrutura da dissertação	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Bacia Hidrográfica de Acaraú	22
<i>2.1.1 Problemas ambientais que caracterizam a qualidade das águas do Rio Acaraú</i>	<i>23</i>
2.2 Impurezas presentes nas águas.....	25
<i>2.2.1 Características Biológica das Águas</i>	<i>26</i>
<i>2.2.2 Características Física das Águas.....</i>	<i>27</i>
<i>2.2.3 Características Químicas das Águas</i>	<i>28</i>
2.3 Processos de clarificação da água.....	29
<i>2.3.1 Mecanismo de coagulação/floculação</i>	<i>30</i>
<i>2.3.2 Tecnologias de tratamento de água</i>	<i>31</i>
2.4 Agentes coagulantes e auxiliares estudados	34
<i>2.4.1 Agentes coagulantes.....</i>	<i>34</i>
<i>2.4.2 Auxiliares de coagulação: Polímeros</i>	<i>36</i>
2.5 Experimentação planejada	37
<i>2.5.1 Planejamento fatorial 2^k</i>	<i>39</i>
<i>2.5.2 Planejamento Composto Central Rotacional (DCCR)</i>	<i>40</i>
<i>2.5.3 Análise estatística</i>	<i>40</i>
3 ÁREA DE ESTUDO.....	43
3.1 Sistema de Abastecimento de Água de Sobral	43
3.2 Caracterização da estação de tratamento estudada	45

4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	50
4.1 Avaliação dos cenários operacionais.....	50
4.2 Ensaios de caracterização e de coagulação.....	51
4.3 Planejamento de experimentos.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1 Avaliação dos cenários operacionais.....	58
<i>5.1.1 Perfil de vazão de captação da água bruta para ETA Dom Expedito</i>	<i>58</i>
<i>5.1.2 Perfis de qualidade da água bruta para ETA Dom Expedito</i>	<i>60</i>
<i>5.1.3 Perfis de dosagens dos produtos químicos aplicados para ETA Dom Expedito</i>	<i>63</i>
5.2 Ensaios de caracterização e de coagulação.....	67
<i>5.2.1 Ensaios de caracterização da água dos mananciais.....</i>	<i>67</i>
<i>5.2.2 Parâmetros operacionais dos ensaios de bancada</i>	<i>68</i>
5.3 Planejamento de experimentos	70
<i>5.3.1 Análise estatística do Ensaio 1 (preliminar)</i>	<i>70</i>
<i>5.3.2 Análise estatística do Ensaio 2.....</i>	<i>80</i>
<i>5.3.3 Análise estatística do Ensaio 3.....</i>	<i>88</i>
6 CONCLUSÕES.....	96
REFERÊNCIAS	98
ANEXO A – CURVA DE GRADIENTE DO EQUIPAMENTO DE JAR TEST.	102
ANEXO B – CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE MISTURA E DO GRADIENTE DE VELOCIDADE NA CALHA PARSHALL.....	103
ANEXO C – DIMENSÕES PADRONIZADAS E LIMITES DE APLICAÇÃO DOS MEDIDORES PARSHALL COM ESCOAMENTO LIVRE	104
APÊNDICE A – PERFIS DE VAZÃO DE CAPTAÇÃO DA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017.....	106
APÊNDICE B – PERFIS DE QUALIDADE PARA TURBIDEZ DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017	108
APÊNDICE C – PERFIS DE QUALIDADE PARA COR APARENTE DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017	110

APÊNDICE D – PERFIS DE QUALIDADE PARA O PH DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017	112
APÊNDICE E – PERFIS DE DOSAGEM DE COAGULANTE PARA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017	114
APÊNDICE F – PERFIS DE DOSAGEM DE POLÍMERO ANIÔNICO PARA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017.....	116
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO I	118
APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ DO ENSAIO II.....	121
APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO II.....	125
APÊNDICE J – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ DO ENSAIO III	129
APÊNDICE K – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO III	132

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo se dedica a uma breve apresentação do problema proposto por esta pesquisa, contextualiza o tema abordado e esclarece sua justificativa e relevância, assim como, dispõe dos objetivos e estrutura adotada para dissertação.

1.1 Caracterização do problema

Dentre as rotas tecnológicas utilizadas para o tratamento de água para abastecimento público, a associação coagulação, floculação e decantação é mais difundida no Brasil em função do ótimo custo-benefício (DELMONICO; CONSTANTINO; CARNEIRO, 2020). O bom gerenciamento e a otimização das unidades que operam com tratamento convencional são essenciais para reduzir os custos com operação e prover ao tratamento uma redução significativa na produção de lodo e na turbidez remanescente da água tratada (SIQUEIRA; ISAAC, 2013).

No Brasil, de acordo com dados do Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB) de 2019, 94,6% dos domicílios urbanos e rurais do País são abastecidos com água por rede de distribuição ou por poço ou nascente. Tratando-se da região nordeste, 87,4% dos domicílios são abastecidos com água. Contudo, tais dados não contemplam a qualidade da água distribuída e, apesar dos crescentes avanços, muitas estações de tratamento de água (ETAs) estão operando com sobrecarga, sendo a falta de recursos no setor de saneamento um dos grandes vilões para a postergação das ampliações e melhorias necessárias (LIBÂNIO, 2008).

Nos últimos anos, a otimização das unidades de tratamento de água tem-se mostrado uma alternativa mais econômica quando comparada à construção de novas unidades ou novas instalações. Estudos têm sido realizados com o intuito de determinar os parâmetros que influenciam no processo de clarificação da água, principalmente na etapa de coagulação, a fim de reduzir a contribuição de partículas suspensas às unidades de filtração, melhorando a qualidade do efluente e prolongando o tempo das carreiras de filtração (ALMEIDA; VIANA; LIBÂNIO, 2004; CORAL; BERGAMASCO; BASSETTI, 2009; DOTTO et al., 2019; FREITAS et al., 2015; LIU et al., 2011; PAVANELLI, 2001).

Dos parâmetros que interferem no desempenho das estações de tratamento de água, destacam-se: as características da água bruta; as dosagens e tipos de produtos químicos utilizados na coagulação; os parâmetros hidráulicos referentes aos processos de clarificação, gradiente de velocidade (G) e tempo de detenção hidráulico (TDH); e a acuidade da operação.

A análise do desempenho das estações de tratamento de água é frequentemente realizada sob duas perspectivas. A primeira, mais reducionista, limitando-se ao monitoramento dos parâmetros de qualidade da água bruta e filtrada para atendimento dos padrões de potabilidade brasileiro. E a segunda, aliada à qualidade do efluente, acrescenta-se o custo de potabilização, contemplando despesas com produtos químicos, energia elétrica e pessoal de operação (DE OLIVEIRA et al., 2021).

Na maior parte dos estudos relacionados à remoção de partículas suspensas, utilizam-se métodos de experimentação convencional em que é alterado um parâmetro independente, enquanto os outros são mantidos fixos. Os ensaios de bancada são adotados como alternativa à construção de estações-piloto, por permitirem a obtenção de resultados exitosos e com menor custo. No entanto, quando realizados pelo método clássico de experimentação, requerem a execução de grande número de ensaios, demandando muito tempo. Os resultados obtidos ainda ignoram os efeitos de interação dos parâmetros independentes e levam a uma baixa eficiência na otimização (LIBÂNIO, 2008; MONTGOMERY; RUNGER, 2009; KHAYET et al., 2011).

Dessa forma, as técnicas de planejamento experimental surgem para minimizar as limitações do método convencional, envolvendo estatísticas em que todos os fatores são variados simultaneamente em um conjunto de execuções experimentais. Dentre as vantagens oferecidas pela experimentação planejada, destacam-se: a rapidez e confiabilidade, a capacidade de determinação dos efeitos da interação entre fatores e a redução do número total de experimentos, economizando tempo e custos de experimentação (KHAYET et al., 2011).

A ETA Dom Expedito, objeto de estudo deste trabalho, representa uma das ETAs que opera precariamente no Brasil. Está passando por um processo de ampliação que visa adicionar mais 2 (dois) módulos de sistema de tratamento convencional. Atualmente, a ETA encontra-se operando saturada com uma vazão de 100 L/s através de 2 módulos de tratamento convencional constituídos por calha Parshall, que atua como medidor de vazão e misturador no processo de coagulação, floculador com chincanas, seguido de decantador de placas e, na sequência, por filtração (SANECONTROLLER, 2018).

Nesse estudo, buscou-se otimizar o processo de clarificação das águas do rio Acaraú, tratadas em uma ETA localizada em Sobral-CE. Primeiramente, foram levantadas informações sobre as vazões de captação, a qualidade das águas do manancial que atende à unidade potabilizadora e as dosagens de produtos químicos aplicadas. Segundo Menezes (2018), por meio da avaliação de qualidade da água bruta e de seu perfil de vazão de captação, é possível identificar as variações sazonais e os cenários operacionais de uma estação de tratamento.

E, posteriormente, foram investigadas a influência e as dosagens ótimas dos fatores que interferem no processo de coagulação/floculação: dosagem dos agentes oxidante e coagulante e dos polímeros catiônico e aniônico, utilizando técnicas de experimentação planejada em reatores estáticos e análise de superfícies de resposta, a fim de avaliar o desempenho do sistema.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa é otimizar um sistema de tratamento de água para abastecimento público do município de Sobral, avaliando a eficiência na remoção de cor e turbidez por meio de técnicas de planejamento de experimentos em ensaios com reatores estáticos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos da pesquisa são:

- a) identificar os cenários operacionais da ETA, a partir da análise dos perfis de vazão de captação, de qualidade das águas brutas do manancial estudado e das dosagens de produtos químicos adotadas no processo de clarificação das águas pela ETA Dom Expedito;
- b) determinar os parâmetros operacionais da ETA (TDH e G), visando modelar as condições de agitações e tempo de agitação para os ensaios de bancada;
- c) analisar a influência dos produtos químicos aplicados (coagulante, polímeros catiônico e aniônico e pré-oxidante) e obter dosagem adequada, visando determinar as condições otimizadas de coagulação no mecanismo de varredura;
- d) formular uma expressão matemática que correlacione as dosagens de produtos químicos e a remoção de cor aparente e turbidez da água bruta;

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está dividido em seis partes principais, descritas a seguir:

No Capítulo 1, consta a introdução, onde são levantadas as características do problema, as justificativas da pesquisa e são definidos os objetivos do trabalho, bem como a organização da dissertação.

O Capítulo 2 faz referência ao embasamento teórico relacionado aos principais temas abordados no trabalho, destacando alguns estudos que contribuíram para o desenvolvimento da pesquisa.

O Capítulo 3 descreve a área de estudo, caracterizando o sistema de abastecimento e a estação de tratamento de água analisada, suas tecnologias e métodos para clarificação das águas

No Capítulo 4, têm-se os métodos e materiais utilizados no desenvolvimento da pesquisa, sendo detalhada a análise de dados obtidos junto à autarquia responsável pela operação das estações, os procedimentos dos ensaios de caracterização da água bruta e de coagulação e o planejamento experimental realizado para avaliação da eficiência das estações de tratamento.

No Capítulo 5, apresentam-se os resultados e discussões alcançados a partir dos dados de vazão de captação do manancial e dos ensaios de caracterização e coagulação realizados, além da análise a respeito do planejamento experimental.

No Capítulo 6, estão as conclusões obtidas com o estudo em questão e as recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta seção se dedica ao fundamento teórico relacionado aos principais temas abordados no trabalho, destacando alguns estudos que contribuem com o entendimento da pesquisa. Dividido em quatro tópicos, o referencial teórico visa explicar as características da bacia hidrográfica em estudo, a qualidade de suas águas e os problemas ambientais decorrentes da ação antrópica. Assim como, conforme literatura, esclarecer as características gerais das águas, seus processos de clarificação, destacando as principais tecnologias de tratamento de água adotadas no Brasil, e os produtos químicos aplicados para remoção de impurezas, bem como tratar sobre os principais aspectos operacionais e os fatores que interferem na dosagem dos produtos químicos. Por fim, detalhar o método experimental utilizado e suas aplicações no âmbito do saneamento básico.

2.1 Bacia Hidrográfica de Acaraú

A Bacia Hidrográfica do Acaraú está localizada no segmento setentrional do Nordeste brasileiro, no Estado do Ceará. Tem cerca de 14.444 km² de área, o que corresponde a cerca de 10% da área do estado. Seu principal coletor é o Rio Acaraú apresenta 315km de extensão no sentido sul-norte, nasce na Serra das Matas, no município de Monsenhor Tabosa e desagua no mar, no município de Acaraú. (COGERH, 2016).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1936), a Bacia Hidrográfica do Acaraú apresenta predominantemente zona climática “As” (clima tropical com estação seca de verão), caracterizada por climas megatérmicos e chuvas de inverno. O clima de tipo semiárido encontra-se marcado pela ocorrência de duas estações climáticas:

- 1) Período chuvoso e irregular que ocorre no outono (meses de março a maio), e;
- 2) Estação seca prolongada (cerca de 10 meses do ano) com elevada evaporação, baixa umidade relativa do ar e elevadas temperaturas.

Ao longo da bacia, as temperaturas médias oscilam em torno de 27°C, com temperaturas mínimas ocorrendo nos meses de junho a agosto, coincidindo com o período pós-quadra chuvosa, e temperaturas máximas ocorrendo de setembro a dezembro. No segundo semestre, a umidade relativa do ar é inferior à do primeiro semestre, variando entre 57,24% no mês de outubro em Sobral e 88,80% no mês de abril próximo ao litoral (COGERH, 2016).

A média pluviométrica anual da área da bacia está situada entre 740mm e 1500mm. A Tabela 1 apresenta as informações sobre as estatísticas das precipitações anuais nos Pontos

Pluviométricos de Santa Quitéria, Meruoca e Acaraú que representam, respectivamente, o alto, o médio e o baixo curso do rio Acaraú.

Tabela 1 – Dados das Precipitações Anuais nos Postos de Acaraú, Santa Quitéria e Meruoca.

Estatística	Postos		
	Acaraú (00240007)	Santa Quitéria (00440077)	Meruoca (00340113)
Média (mm)	1.116,89	740,10	1.496,00
Desvio Padrão (mm)	573,00	358,13	572,93
Coefficiente de Variação (%)	51,30%	48,39%	38,30%
Precip. Máxima (mm)	2.886,20	2.065,60	2.899,00
Precip. Mínima (mm)	346,90	167,00	619,80

Fonte: (COGERH, 2016).

De acordo com Claudino-Sales, Lima e Diniz (2020), o uso e ocupação do solo da bacia do rio Acaraú tem sua economia fundamentada no setor primário. O alto e meio curso do rio são caracterizados pela criação extensiva de gado bovino, pelo agro-extrativismo e pela pequena lavoura de subsistência. Enquanto que o baixo curso do rio é caracterizado pela presença de atividades associadas a mineração (areias no leito do rio), carnicultura e turismo costeiro. Próximos aos centros urbanos prevalecem o comércio e a prestação de serviços, ao passo que, nas regiões distante, a ocupação humana torna-se rarefeita.

2.1.1 Problemas ambientais que caracterizam a qualidade das águas do Rio Acaraú

Sabe-se que o homem atua transformando o meio natural em que vive, e nesse sentido, a região hidrográfica do rio Acaraú tem sofrido intensas mudanças a fim de atender a demanda populacional. Dentre elas, Claudino-Sales, Lima e Diniz (2020) destacam:

- a) a construção de reservatórios, do tipo açudes, para controle de cheias e secas e garantia da perenização do rio;
- b) a canalização do leito fluvial em áreas urbanas, a fim de ampliar as áreas urbanizadas nas cidades atravessadas pelo curso d'água; e
- c) a construção de tubulações aéreas e subaéreas para lançamento de águas pluviais e de efluentes urbanos e industriais.

Além dessas interferências, o Relatório de Diagnóstico Ambiental da Bacia do Acaraú, realizado pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (COGERH), relata outras ações antrópicas identificadas na região da bacia: ocupação urbana desordenada,

impermeabilização do solo, especulação imobiliária, ocupação irregular de Áreas de Preservação Permanente (APP), destinação inadequada de resíduos sólidos e de esgotos urbanos e industriais, prática de atividades agrícola, pecuária, cunicultura e aquicultura, produção de efluentes domésticos, industriais e hospitalares, desmatamento de APP's e Mangues, lavras clandestinas e atividade turística (COGERH, 2016).

É a falta de controle das ações antrópicas que acelera o processo de degradação dos mananciais, ocasionando perdas da biodiversidade, crescimento de doenças por veiculação hídrica, aumento do custo de tratamento das águas para abastecimento humano, perda de produtividade agrícola e pecuária, redução na pesca e decréscimos de valores turísticos, culturais e paisagísticos (GOMES, 2017).

De acordo com a Resolução CONAMA n° 357/2005, o rio Acaraú, por não possuir enquadramento aprovado, deve ser considerado um rio de classe 2, ou seja, suas águas podem ser destinadas:

- a) ao abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional;
- b) à proteção das comunidades aquáticas;
- c) à recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho;
- d) à irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto; e
- e) à aquicultura e à atividade de pesca.

Em seu estudo sobre a qualidade ambiental do rio Acaraú no espaço intraurbano da cidade de Sobral, Gomes (2017) identificou os efeitos e consequências da ação antrópica, a partir de coletas realizadas entre março/2015 e março/2016, em cinco estações amostrais ao longo do curso d'água. O autor constatou o comprometimento da qualidade hídrica do rio Acaraú com variáveis fora dos padrões exigidos pela Resolução Conama N° 357/2005, dentre elas destacam-se: oxigênio dissolvido, demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), compostos nitrogenados (amônia, nitrito e nitrato), cargas de fósforo total e coliformes termotolerantes, sendo estes indicadores de degradação.

No período chuvoso, devido ao aumento do aporte hídrico, os poluentes foram diluídos pelas águas fluviais, resultando em teores menores diante dos parâmetros avaliados. Apesar disso, o autor afirma que as águas do rio Acaraú são vulneráveis aos processos de eutrofização, considerando que o rio pode ter sua capacidade de autodepuração alterada por intervenções humanas, em resposta a elevadas quantidades de nutrientes no corpo hídrico.

2.2 Impurezas presentes nas águas

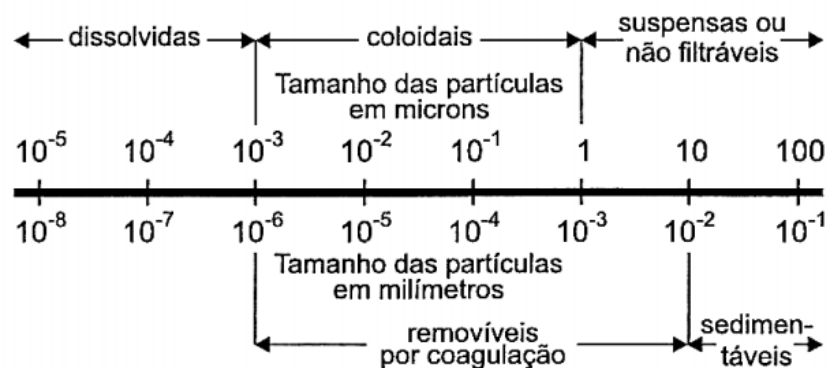
Água absolutamente pura não existe na natureza, e, para consumo humano, é necessário que ela atenda a requisitos de potabilidade. Segundo a Portaria de Consolidação nº5, que regulamenta o padrão de potabilidade adotado pelo Ministério da Saúde, na remoção das suas impurezas, são desejados três objetivos:

- obtenção de água que apresente segurança para a saúde humana, isto é, seja livre de contaminantes e de organismos patogênicos, e em quantidade adequada às necessidades dos consumidores;
- aquisição de água a custos razoáveis, eliminando ou reduzindo as impurezas que causam corrosividade, dureza, cor, turbidez, odor e sabor; e
- obtenção de água de aspecto agradável ao consumidor.

Conhecer os diferentes tipos de impurezas, seus efeitos e o modo em que se encontram na água é de grande importância para o planejamento de um sistema de tratamento de água. Em outras palavras, o tipo de tratamento a ser adotado em uma ETA depende das características das impurezas presentes no manancial. A determinação dessas impurezas é feita por meio de análises físico-químicas e bacteriológicas (LEME, 1990).

Piveli e Kato (2006) afirmam que, no esquema geral de classificação de partículas, as impurezas encontradas nas águas superficiais se dividem basicamente em três grupos, como representados na Figura 1.

Figura 1 – Classificação e faixa de tamanhos das partículas presentes na água.



Fonte: (PIVELI; KATO, 2006).

As partículas dissolvidas possuem dimensões menores que 10^{-6} mm e correspondem aos sólidos dissolvidos em forma ionizada, além de gases e compostos orgânicos dissolvidos. São consideradas soluções verdadeiras por formar um sistema homogêneo e unifásico. Os autores

afirmam que estas partículas não podem ser separadas por tratamentos convencionais, sendo necessários processos à base de troca-iônica, osmose reversa, ultrafiltração, entre outros. Como exemplo, têm-se os contaminantes químicos presentes em efluentes industriais, como os metais pesados e os pesticidas, que devem ser removidos antes de seu lançamento em rios e lagos por não serem eliminados em ETAs municipais.

Nas unidades municipais, emprega-se a coagulação para remoção de material em estado coloidal ou em suspensão. Segundo Pavanelli (2001), as partículas em suspensão, que variam de 10^{-3} mm a 10^{-1} mm, podem ser removidas por sedimentação ou flotação em tempo médio de uma hora, com exceção dos zooplânctons que apresentam dimensões de 10^{-2} mm, mas não são sedimentáveis. Para estes, assim como para as dispersões coloidais, faz-se necessário o uso de coagulação química.

Conforme Piveli e Kato (2006), as partículas em estado coloidal são resultantes da decomposição de vegetais e de descargas de efluentes industriais, apresentam “relações área superficial/volume elevadas e manifestam cargas elétricas superficiais que originam campos eletrostáticos ao redor das partículas”.

2.2.1 Características Biológica das Águas

A caracterização biológica das águas é realizada por meio de exames bacteriológicos e hidrobiológicos que visam identificar e quantificar a presença de organismos em amostras ambientais, como a água bruta. Entre esses microrganismos, destacam-se os seguintes grupos: algas, protozoários, rotíferos, crustáceos, vermes, larvas de inseto e bactérias. Sabe-se que a água é veículo para transmissão de diversas doença, tais como: cólera, hepatite A, disenteria bacilar, amebíase, giardíase e esquistossomose, e que, por isso, a realização regular desses exames auxilia na interpretação de análises referente à poluição das águas e possibilita a adoção de medidas de controle na prevenção do desenvolvimento de organismos indesejáveis (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), existe uma relação íntima entre turbidez e o número de coliformes totais e fecais nos efluentes de filtros rápido, devendo-se dar atenção especial na seleção da tecnologia de tratamento quando detectados coliformes totais ou *E. coli* nas águas destinadas ao consumo humano. Via de regra, o número de coliformes e de outros organismos será menor, quanto menor a turbidez da água filtrada.

A presença de coliformes fecais ou *E. coli* nas águas não necessariamente comprova a presença de organismos patogênicos, visto que a aparição destes pressupõe a existência de um

portador na população contribuinte, enquanto que a comparência de coliformes totais ou fecais depende da existência de um despejo orgânico, não estéril, estranho ao corpo receptor. Apesar disso, os coliformes têm sido utilizados como indicadores de poluição de fezes e, ocasionalmente, de contaminação. Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que existe uma correlação, baseada na probabilidade, entre o número de coliformes e de organismos patogênicos, visto que quanto maior o número de coliformes fecais ou *E. coli*, maior a probabilidade da comparência de organismos patogênicos.

Da mesma forma, quando identificada a presença de algas, devem ser tomados cuidados especiais para escolha da tecnologia de tratamento, uma vez que estas podem flotar nos decantadores e serem carregadas para os filtros, causando sérios problemas operacionais nas estações. Algumas espécies de algas, quando presentes em quantidades significativas, podem passar pelos filtros provocando odor na água tratada e possibilitando a formação de compostos organoclorados (DI BERNARDO, 2000).

2.2.2 Características Física das Águas

As características físicas das águas apresentam propriedades organolépticas e influenciam diretamente no aspecto estético da água para o ser humano. Apesar de desempenharem pequena importância do ponto de vista sanitário, algumas características, como turbidez e cor aparente, são decisivas na escolha da tecnologia de tratamento. A seguir são apresentadas as características físicas da água, com ênfase naquelas utilizadas nesta pesquisa.

2.2.2.1 Turbidez

A turbidez é uma propriedade ótica da água que decorre da presença de partículas em suspensão variando em tamanho, desde suspensões grosseiras até o estado coloidal. Ela pode ser causada principalmente por partículas de argila e silte, matéria orgânica, material proveniente de descargas de esgoto doméstico e industrial, bactérias, algas e outros microrganismos (RICHTER, 2009, p. 69).

No Brasil, a turbidez dos corpos d'água é elevada em regiões com solos de alto potencial erosivo, tais como: solos pouco profundos e de baixa permeabilidade. Os índices pluviométricos também influenciam na turbidez da água. Em regiões semiáridas, o período chuvoso abrange três a quatro meses, podendo concentrar-se em apenas dois meses, fazendo que precipitações intensas causem o arraste de partículas do solo. Além disso, o uso de práticas

agrícolas, muitas vezes inadequadas, faz que grande parte das águas de rios brasileiros seja naturalmente turvas (LIBÂNIO, 2008, p. 30; RODRIGUES, 2016).

2.2.2.2 Cor Aparente e Cor Verdadeira

A cor da água é decorrente da presença de substâncias, mineral e orgânica, dissolvidas no estado coloidal ou em suspensão. Segundo Libânio (2008), os compostos orgânicos que conferem cor às águas naturais são provenientes basicamente de duas fontes:

- a) da decomposição de matéria orgânica de origem vegetal e do metabolismo de microrganismos presentes no solo; e
- b) de atividades antrópicas, tais como, descargas de efluentes domésticos ou industriais, lixiviação de vias urbanas e solos agriculturáveis.

Quando oriundos da degradação de plantas e animais, os compostos orgânicos são denominados substâncias húmicas e, geralmente, são constituídos por ácido húmico e ácido fúlvico. Embora não sejam prejudiciais ao ser humano, estas substâncias podem gerar subprodutos tóxicos, como trihalometanos e organo-halogenados, em contato com agentes oxidantes e desinfetantes, como o cloro e o dióxido de cloro (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Chama-se cor verdadeira, quando a tonalidade da água é devida exclusivamente a substâncias dissolvidas e em estado coloidal. Quando apresenta matéria em suspensão, chama-se de cor aparente. Assim, a cor verdadeira pode ser obtida após a centrifugação ou filtração da amostra (RICHTER, 2009).

2.2.2.3 Temperatura

A temperatura influi nas reações de hidrólise do coagulante e, consequentemente, na eficiência do processo de clarificação da água. No entanto, no Brasil, principalmente no Ceará, a temperatura da água apresenta-se praticamente constante ao longo do ano.

2.2.3 Características Químicas das Águas

As características químicas apresentam grande importância do ponto de vista sanitário, visto que a presença de alguns compostos químicos nas águas reservadas para o abastecimento

público pode inviabilizar o uso de certas tecnologias de tratamento, exigindo técnicas específicas.

2.2.3.1 Alcalinidade, Acidez e pH

A alcalinidade é a medida total das substâncias presentes na água com capacidade de neutralizar ácidos, ou seja, representa a capacidade de tamponamento da água. Já a acidez representa o total de substâncias presentes na água com capacidade de neutralizar bases. Se um manancial tem alta alcalinidade, este é mais estável e resistente às variações de pH. Por outro lado, se sofre adição de volumes de ácidos, como despejo de resíduos industriais e ocorrência de chuvas ácidas, a sua capacidade tampão é consumida.

A alcalinidade influi consideravelmente no processo de coagulação, uma vez que os coagulantes primários comumente encontrados no Brasil – Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico – apresentam características ácidas e, quando são aplicados à massa líquida da amostra, reduzem a alcalinidade e o pH (PAVANELLI, 2001).

Sabendo que os coagulantes atuam em faixas de pH específicas, a determinação da alcalinidade da água permite verificar a necessidade de adição de alcalinizantes para manter o equilíbrio do pH. Esta faixa específica, denominada “pH ótimo” de coagulação, corresponde à situação em que as partículas coloidais possuem menor quantidade de carga eletrostática superficial. Além do controle do pH da água bruta, faz-se necessário controlar o pH da água tratada, pois águas muito ácidas são corrosivas, enquanto águas alcalinas são incrustantes (PIVELI; KATO, 2006).

2.3 Processos de clarificação da água

As etapas de coagulação e floculação desempenham o papel mais importante no processo de clarificação da água. Nelas, ocorre aplicação de produtos químicos que desestabilizam as partículas coloidais na massa líquida e, em consequência das colisões entre essas partículas, permitem a aglomeração das impurezas com formação de flocos, posteriormente removidos por precipitação (NEPOMUCENO et al., 2018).

Devido a sua importância, no decorrer do século, a coagulação tem sido objeto de extensivos estudos e pesquisas. As contribuições iniciaram em 1917, com o modelo matemático de aglutinação de partículas proposto por von Smoluchowski e, futuramente, utilizado por Camp e Stein em estudo sobre os gradientes de velocidade na floculação em 1943. Desde então,

muitas teorias e conceitos foram desenvolvidos com o objetivo de melhorar o processo das estações de tratamento (ABREU LIMA, 2007; RICHTER, 2009).

A seguir, serão discutidos os mecanismos de coagulação das impurezas presentes na água. A síntese apresentada nessa seção foi baseada nos conceitos apresentados e discutidos por Di Bernardo e Dantas (2005).

2.3.1 Mecanismo de coagulação/floculação

A coagulação (ou mistura rápida) consiste na desestabilização das partículas coloidais por fenômenos químicos e físicos. Primeiramente, ocorrem as reações químicas que correspondem às reações do coagulante com a água e a formação de espécies hidrolisadas ou de precipitados do metal do coagulante utilizado. Por fim, o processo é puramente físico e se limita ao transporte das espécies hidrolisadas ou dos precipitados para que ocorra choque entre as partículas presentes na massa líquida, o que permite a formação de aglomerados maiores e sedimentáveis.

Existem quatro mecanismos principais que ocorrem no processo de coagulação: compressão da dupla difusa; adsorção e neutralização das cargas; varredura; e adsorção e formação de pontes.

A compressão da camada difusa corresponde à desestabilização das partículas pela adição de íons de carga contrária. Grande parte das impurezas presentes na água apresenta carga negativa. Portanto, a aplicação de um eletrólito indiferente, que libera grande quantidade de íons positivos em um sistema coloidal, causa aumento na densidade de cargas da camada difusa, que reduz seu volume de esfera para manter-se eletricamente neutra.

A adsorção e neutralização de cargas ocorrem com eletrólitos que são capazes de ser adsorvidos na superfície das partículas coloidais e que, por apresentarem cargas contrárias, acabam por desestabilizá-las. Conforme Mendes (1989), existem três principais diferenças entre os mecanismos de compressão da camada dupla e de adsorção/neutralização:

- a) a desestabilização dos coloides por espécies adsorvíveis exigem dosagens de coagulantes muito inferiores às necessárias para a compressão da camada difusa por íons não adsorvíveis;
- b) há uma relação estequiométrica entre a concentração de coloides e a quantidade necessária de partículas adsorvíveis; e
- c) a superdosagem de espécies adsorvíveis pode ocasionar a reversão da carga superficial das partículas coloidais.

Di Bernardo e Dantas (2005) afirmam que, para espécies hidrolisadas de alumínio ou de ferro ou de polímeros sintéticos catiônicos, é comum ocorrer adsorção específica, causada pela interação entre coagulante e coloide. Além disso, reiteram a importância do mecanismo de adsorção/neutralização na tecnologia de tratamento por filtração direta, visto que as impurezas desestabilizadas serão retidas no meio granular dos filtros, não havendo necessidade de formação de flocos sedimentáveis.

No processo de varredura, ocorre a formação de precipitados, como $\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ou outros, que formam flocos e arrastam as partículas presentes na água. É muito utilizado em tecnologias de tratamento que apresentam etapas de floculação e sedimentação ou flotação antecedendo a filtração rápida. A ocorrência da varredura está condicionada à quantidade de coagulante adicionada, ao pH da mistura e a concentração de alguns tipos de íons na água. No entanto, os flocos formados por este mecanismo, normalmente, apresentam dimensões maiores e sedimentam mais rápidos quando comparados aos flocos obtidos por adsorção e neutralização de cargas.

E, por fim, o mecanismo de formação de pontes está relacionado ao uso de polímeros de grandes cadeias moleculares, que servem de pontes entre a superfície à qual estão aderidos e as demais partículas.

2.3.2 Tecnologias de tratamento de água

As tecnologias de tratamento de água podem ser divididas em dois grupos, aquelas que apresentam etapa de coagulação e outras que não necessitam de coagulação. A etapa de pré-tratamento pode existir em ambos os grupos, a depender da qualidade da água bruta. Em alguns casos, apesar do tratamento requerer apenas a filtração lenta, no Brasil, é comum o uso de outras tecnologias (PAVANELLI, 2001). A Figura 2 apresenta as principais tecnologias de tratamento de água utilizadas em países em desenvolvimento, não sendo consideradas as tecnologias sofisticadas, como as que empregam membranas, oxidantes alternativos ou carvão ativado (DI BERNARDO; DANTAS, 2005).

Tabela 2 – Características da água bruta em função da tecnologia de tratamento recomendada.

Característica / Tecnologia	Convencional	Dupla Filtração	Filtração Direta	Filtração Lenta*	Filtração Direta em Linha
Turbidez (uT)	< 3000	< 50	< 20	< 10	< 5
Cor Aparente (uH)	< 1000	< 50	< 20	< 20	< 15
<i>E. coli</i> (NMP/100 mL)	< 10	< 10 ³	< 10 ³	< 10 ³	< 100
Algas (UPA/mL)	< 10	< 5000	< 10 ³	< 250	< 100

*Sem emprego de pré-filtros.

Fonte: Libânio (2008) *apud* Kawamura (2000).

Dentre as tecnologias apresentadas, o tratamento em ciclo completo ou convencional, como é usualmente denominado, constitui-se na tecnologia mais difundida no Brasil e no exterior. Utilizada para o tratamento de águas com turbidez e cor aparente elevada, esta tecnologia contempla aplicação de coagulante na unidade de mistura rápida, floculação, sedimentação e filtração (LIBÂNIO, 2008).

De acordo com a Resolução CONAMA 357/2005, as águas doces e salobras são separadas em nove classes de qualidade e, a depender de sua classificação podem ser destinadas ao abastecimento para consumo humano. As águas de melhor qualidade são reservadas à usos mais exigentes, como preservação das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, aquicultura e pesca, enquanto as águas de menor qualidade, à navegação e à harmonia paisagística.

Quando destinadas ao abastecimento para consumo humano, as águas devem passar por tratamento específico. A Tabela 3 apresenta as classes e os tipos de tratamento requeridos para abastecimento público.

Tabela 3 – Classificação das águas doces e salobras e tipos de tratamentos recomendados, segundo a Resolução CONAMA 357/2005.

Classificação das águas	Tipo de tratamento
Água doce	
Classe Especial	Desinfecção
Classe 1	Tratamento Simplificado
Classe 2	Tratamento Convencional
Classe 3	Tratamento Convencional ou Avançado
Classe 4	-
Água salobra	
Classe Especial	-
Classe 1	Tratamento convencional ou avançado
Classe 2	-
Classe 3	-

Fonte: Autoria própria (2021).

As águas doces são enquadradas em classe especial e classes 1 a 4, em ordem decrescente de qualidade. Dentre elas, apenas a classe 4 não é destinada ao consumo humano. E as águas salobras, enquadradas em classe especial e classes 1 a 3, sendo apenas a classe 1 destinada ao abastecimento. As águas salinas, nos termos atuais da resolução, não são destinadas ao abastecimento para consumo humano independente de sua classificação.

A qualidade das águas dos rios é afetada por diversos fatores, tais como o uso de produtos industriais, a produção agrícola e o lançamento de efluentes e fertilizantes. Esses fatores podem comprometer o corpo d'água, variando o tratamento aplicado e sua possível utilização. O objetivo do conhecimento dessa classificação é fornecer a possibilidade de um controle e monitoramento constante.

2.4 Agentes coagulantes e auxiliares estudados

Como relatado anteriormente, a etapa de coagulação corresponde à aplicação de produtos químicos que desestabilizam as partículas suspensas na água. Seu processo sofre influência das características da água bruta, como: turbidez, cor, pH, alcalinidade e temperatura, assim como do agente coagulante e dos polímeros auxiliares.

2.4.1 Agentes coagulantes

Sabe-se que os insumos utilizados nas etapas de coagulação e floculação influenciam diretamente na eficiência do processo de clarificação da água. Isto, porque coagulantes mais eficientes ajudam a aglomerar melhor os sólidos em suspensão, consequentemente, produzem menos lodo nos decantadores e carreiam menos sólidos em suspensão para os filtros, que, por fim, necessita de um menor número de retrolavagens.

Diversos coagulantes podem ser utilizados nesta etapa de desestabilização coloidal, dentre eles, destacam-se os sais de alumínio e ferro, que são muito utilizados por causa do baixo custo e da eficiência que promovem na remoção de materiais particulados (CORAL; BERGAMASCO; BASSETTI, 2009; SÁNCHEZ-MARTÍN; BELTRÁN-HEREDIA; PERES, 2012).

O sulfato de alumínio é um produto químico que, em solução, apresenta características ácidas. Sua solubilidade depende do pH da massa líquida e por isso, na coagulação, deve ser aplicado em baixa faixa de pH, entre 5 e 7. Esse produto também consome alcalinidade durante a reação, por essa razão, a água deve apresentar alcalinidade suficiente para reagir com o sal, a

fim de obter uma coagulação satisfatória e manter residual adequado na água tratada (RICHTER, 2009).

2.4.1.1 Cloreto de polialumínio

Em estudo sobre a eficiência de diferentes tipos de coagulantes para clarificação de águas com cor e turbidez elevada, Pavanelli (2001) afirma que, na maioria das vezes, o cloreto de polialumínio ou hidróxicloreto de alumínio (PAC) apresenta-se como coagulante superior ao sulfato de alumínio, e que, para remoção de substâncias coloidais, sua eficiência pode ser o dobro da eficiência de remoção de outros sais de alumínio.

Este sal, diferentemente do sulfato de alumínio, ocasiona uma menor alteração do pH do meio tratado. Apesar de apresentar custo elevado quando comparado a outros coagulantes, apresenta vantagens tecnológicas e econômicas ocasionadas pela diminuição do consumo de agentes neutralizantes como cal, barrilha ou soda cáustica. Tem sido utilizado com maior intensidade a partir de 1990, embora seja empregado no Japão desde 1960. E as indústrias na Europa, Estados Unidos e Japão produzem cerca de 500.000 toneladas por ano. É um produto que apresenta grande basicidade, por isso, libera baixa quantidade de ácido durante a hidrólise. (DA SILVA; TORREZÃO, 2012; PAVANELLI, 2001).

Em sua pesquisa sobre a qualidade das águas de processo no setor sucroalcooleiro, Silva e Torrezão (2012) sugerem a utilização do PAC nas ETAs das indústrias para contribuir para diminuição de custos com o tratamento da água. A seguir são apresentados os benefícios no uso do PAC, defendidos pelos autores e reforçados em outros estudos (CONSTANTINO; YAMAMURA, 2009; LIMA; REALI, 1997; PRATI; MORETTI; CARDELLO, 2005).

- a) Pode ser utilizado na clarificação de águas para fins industriais e de consumo humano;
- b) Substituto eficiente do Sulfato de Alumínio e Cloreto Férrico;
- c) Atua em larga faixa de pH;
- d) Eleva a velocidade de decantação, formando flocos grandes e pesados;
- e) Fácil manuseio, estocagem e aplicação, na forma líquida;
- f) Melhor relação custo-benefício; e
- g) Remoção eficiente da carga orgânica e inorgânica do líquido a ser tratado.

2.4.2 Auxiliares de coagulação: Polímeros

O uso de polímeros nos processos de tratamento de água também tem crescido nos últimos anos. Eles podem ser utilizados tanto como auxiliares na floculação, como coagulantes primários. No Brasil, no entanto, seu uso tem se resumido ao primeiro caso, pois são necessárias dosagens maiores para o emprego como coagulante primário, o que torna desvantajoso do ponto de vista econômico. No emprego como auxiliares de floculação, os polímeros são aplicados, principalmente, com o objetivo de aumentar a velocidade de sedimentação dos flocos e diminuir a dosagem de coagulante primário (DI BERNARDO, 2000).

O termo polímero é dado à cadeia de pequenas subunidades denominadas monômeros (ou meros). Existem muitos tipos de meros, da mesma forma como existem muitas combinações possíveis na formação de um polímero, o que resulta em materiais de massa molecular e características estruturais diferentes, formando cadeias lineares ou ramificadas e podendo, inclusive, possuir grupos ionizáveis. Neste caso, devido às características como polímeros e como eletrólitos, estes produtos são denominados polieletrólitos.

Alguns compostos orgânicos naturais assumem características de polieletrólitos, como amido e seus derivados, compostos de celulose, gomas de *polyssacharídeos*, e materiais proteicos, e têm sido utilizados como auxiliares de coagulação. Entretanto, os polieletrólitos sintéticos apresentam vantagens sobre estes polímeros naturais, dado que podem ser produzidos sob medida para atender a requisitos específicos (PACHECO; AGOSTO, 1970).

Os polieletrólitos sintéticos podem ser classificados com base no tipo de carga presente na cadeia de polímero. Os polímeros que possuem cargas positivas são denominados catiônicos, enquanto os que possuem cargas negativas são chamados aniônicos. Aqueles que não apresentam carga em sua cadeia são denominados polieletrólitos não-iônicos.

A eficiência de um polímero na coagulação/floculação depende de sua estrutura química, das propriedades do meio e das características das substâncias a serem coaguladas. Assim sendo, e sabendo-se que existem muitos polieletrólitos comerciais, é conveniente realizar-se estudos para identificar a cadeia que melhor se adapte às condições da estação de tratamento e às características da água a ser tratada.

De acordo com Pacheco e Agosto (1970), de forma geral, polieletrólitos aniônicos comportam-se como auxiliares de floculação, modificando as características físicas do floculo produzido pelo coagulante principal. Estudos tem comprovado que a eficiência destes polieletrólitos é quase independente do pH, alcalinidade, dureza e turbidez. Entretanto, sua dosagem ótima cresce linearmente com os sais de alumínio ou de ferro.

Os autores ainda afirmam que os polímeros sintéticos catiônicos podem atuar, inclusive, como coagulantes (por mecanismos de neutralização das cargas e/ou adsorção-formação de pontes), reduzindo, ou até mesmo eliminando, o uso de sais de alumínio ou de ferro. Na sua aplicação, a turbidez remanescente em geral é relativamente alta e a remoção de cor é praticamente total. As dosagens ótimas dos catiônicos são sempre maiores quando comparadas as dosagens dos polímeros aniônicos ou não-iônicos. Em alguns casos, pode ser benéfico o uso desses dois tipos de polieletrólitos, aniônico e catiônico.

Para se obter uma dispersão adequada do coagulante e do polímero, faz-se necessária uma mistura rápida. De modo geral, os polieletrólitos catiônicos funcionam bem quando aplicados antes do ponto de aplicação do coagulante principal (com antecedência de 30 a 60 segundos). Havendo também resultados satisfatórios, mesmo sem mistura rápida, quando a aplicação ocorrer na tubulação adutora a, pelo menos, 1 km a montante da ETA.

2.5 Experimentação planejada

Na maior parte dos estudos relacionados à remoção de partículas suspensas, utilizam-se métodos de experimentação convencional em que é alterado um parâmetro independente, enquanto os outros são mantidos fixos. Os ensaios de bancada são adotados como alternativa à construção de estações-piloto, por permitirem a obtenção de resultados exitosos e com menor custo. No entanto, quando realizados pelo método clássico de experimentação, requerem a execução de grande número de ensaios, demandando muito tempo. Os resultados obtidos ainda ignoram os efeitos de interação dos parâmetros independentes e levam a uma baixa eficiência na otimização (KHAYET; ZAHRIM; HILAL, 2011; LIBÂNIO, 2008; MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

Dessa forma, as técnicas de planejamento experimental surgem para minimizar as limitações do método convencional, envolvendo estatísticas em que todos os fatores são variados simultaneamente em um conjunto de execuções experimentais. Dentre as vantagens oferecidas pela experimentação planejada, destacam-se: a rapidez e confiabilidade, a capacidade de determinação dos efeitos da interação entre fatores e a redução do número total de experimentos, economizando tempo e custos de experimentação (KHAYET; ZAHRIM; HILAL, 2011).

Em função deste interesse, as técnicas de planejamento experimental têm sido adotadas como ferramentas matemáticas em aplicações de tratamento de água (MENEZES, 2018), destacando-se alguns estudos sobre: remoção de fósforo em lodo ativado, extração de alumínio

residual em água clarificada, determinação da influência da qualidade da água sobre o tratamento químico utilizado, remoção de cor e turbidez oriunda de substâncias do couro, entre outros (CLARK; STEPHENSON, 1999; HEIDERSCHIEDT; LEIVISKÄ; KLØVE, 2015; JIANG et al., 2017; KHAYET; ZAHRIM; HILAL, 2011; VANLOOT et al., 2007)

Para exemplificar o estado atual da literatura sobre a aplicação de planejamento experimental no processo de tratamento de água, considerando a realidade brasileira, alguns trabalhos são citados abaixo:

- a) Macedo (2009) estabeleceu uma tecnologia alternativa para o tratamento de água de produção de petróleo através da combinação dos processos de coagulação/floculação, filtração por membranas e processos oxidativos avançados e, para isso, realizou planejamento experimental dos tipos: fatorial fracionado 2^{k-1} e fatorial completo 2^k ;
- b) Madrona (2010) avaliou a eficiência do coagulante natural *Moringa oleifera Lam* no processo de coagulação/floculação, seguido de filtração com membranas, para a obtenção de água potável e, para isso, utilizou análises estatísticas de planejamento experimental;
- c) Rocha et al. (2012) objetivaram otimizar o processo de coagulação da água do Açude Gavião, Ceará, utilizando as técnicas de planejamento por variável e planejamento composto central rotacional;
- d) Menezes (2018) avaliou o desempenho do sulfato de alumínio no processo de clarificação de água de uma refinaria de petróleo e o uso do coagulante natural TANFLOC como agente alternativo e, para isso, escolheu o método de planejamento fatorial fracionado 2^{k-1} ;
- e) Glusczak (2018) propôs uma técnica de pré-tratamento em ETA, para água de abastecimento com diferentes unidades de turbidez, utilizando eletrocoagulação-flotação e, para isso, escolheu o método de planejamento por delineamento composto central rotacional (DCCR).

O planejamento de experimentos, do inglês *Design Of Experiments* (DOE), ou experimentação planejada é um conjunto de técnicas matemáticas utilizadas na elaboração de ensaios e com objetivo de conhecer o comportamento dos fatores que influenciam no fenômeno analisado. Esse método de experimentação é devido a Ronald A. Fisher que desenvolveu e utilizou pela primeira vez a técnica de ANOVA (*Analysis of variance*) para análise estatística de um projeto experimental, quando era responsável pela estatística e análise de dados na Estação Agrícola Experimental em Londres – Inglaterra (GALDÁMEZ, 2002).

Existem três princípios básicos na experimentação planejada: replicação, aleatoriedade e blocagem. Os experimentos são realizados com réplicas por duas razões: para obtenção do erro experimental, que permite verificar se as diferenças observadas são distintas estatisticamente; e para obtenção de estimativas mais precisas do efeito de um fator, pelo uso de médias amostrais. A aleatoriedade garante a distribuição igualitária entre todos os fatores não considerados, ou seja, os erros tornam-se variáveis aleatórias distribuídas independentemente. E a blocagem é uma técnica utilizada para evitar a não homogeneidade de dados que apresentam fatores de perturbação, arranjando os experimentos em blocos similares entre si, como no caso de produtos fabricados em mesmas condições operacionais, mas em bateladas diferentes (ESTATCAMP, 2014).

Existe uma variedade de técnicas de experimentação planejada e a escolha da técnica mais adequada depende das características do processo estudado e das informações que se deseja obter. No presente trabalho, serão estudados dois tipos: planejamento fatorial 2^k e planejamento composto central rotacional. O conhecimento desses métodos se mostra importante na compressão da metodologia e do planejamento de construção de superfícies de resposta necessárias à otimização da estação de tratamento analisada.

2.5.1 Planejamento fatorial 2^k

Planejamentos fatoriais são frequentemente usados nos experimentos em que é necessário analisar o efeito conjunto de dois ou mais fatores sobre uma resposta. Em tese, cada fator pode ser observado em vários níveis, no entanto, o planejamento mais comum é o fatorial 2^k que possui k fatores, cada um com apenas dois níveis: baixo e alto. Esses níveis podem ser quantitativos, tais como dois valores de concentração de um coagulante, ou podem ser qualitativos, tais como a presença ou ausência de um polímero. Em notação geométrica, atribuem-se os sinais – e + (ou -1 e 1) para valores menores e maiores, respectivamente (MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

O uso de planejamentos fatoriais com dois níveis supõe a linearidade nos efeitos dos fatores, ou seja, o modelo é aplicado adequadamente para fenômenos que apresentam comportamento linear. Quando o comportamento do fenômeno não é conhecido, aconselha-se a adição de pontos centrais, estes permitem indicar o afastamento da linearidade dos fatores, assim como determinar uma estimativa independente do erro a ser obtido (MENEZES, 2018; MONTGOMERY; RUNGER, 2009).

2.5.2 Planejamento Composto Central Rotacional (DCCR)

O experimento composto central é utilizado em planejamentos de segunda ordem, em que se deseja obter uma superfície de resposta do fenômeno analisado, sendo possível determinar condições ótimas e a sensibilidade da variável resposta às mudanças de nível dos fatores. Este experimento apresenta ponto central, que será executado com réplicas para obtenção direta da estimativa de erro puro, e pontos axiais, que determinam os termos quadráticos. Essa técnica corresponde ao planejamento fatorial 2^k acrescido de ensaios que permitem obter a estimativa do modelo de superfície de resposta de segunda ordem (ESTATCAMP, 2014).

A Tabela 4 apresenta os valores de espaçamento axial em função do número de fatores analisados. É possível observar o total de corridas necessárias, considerando a realização de quatro réplicas do ponto central, e como estas crescem exponencialmente com o acréscimo de fatores.

Tabela 4 – Experimentos compostos centrais e os valores de espaçamento axial α .

Número de fatores	2	3	4	5	6	7	8
Experimento fatorial	2^2	2^3	2^4	2^5	2^6	2^7	2^8
Pontos axiais	4	6	8	10	12	14	16
Pontos centrais	4	4	4	4	4	4	4
α ($n_c = n_s = 1$)	1,41	1,68	2,00	2,38	2,83	3,36	4,00
Total de corridas	12	18	28	46	80	146	276

Fonte: Adaptado de Estatcamp (2014).

Essa técnica de planejamento tem sido utilizada em estudos de otimização de estações de tratamento, visando melhorar a eficiência das etapas de coagulação e floculação. Um exemplo dessa aplicação é o trabalho realizado por Rocha et al.(2012), que analisaram o processo de coagulação no tratamento da água bruta do Açude Gavião, localizado em Pacatuba-CE, utilizando os coagulantes sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio. Os autores investigaram a influência e os valores ótimos do pH da água bruta, da concentração de coagulante e de auxiliar de coagulação na turbidez.

2.5.3 Análise estatística

Segundo Menezes (2018), a análise estatística consiste na estimativa dos efeitos dos fatores e no uso de técnicas para verificação da significância destes efeitos sobre a variável

resposta. Neste estudo serão aplicados métodos gráficos para determinação das influências dos fatores sobre a variável em estudo e métodos matemáticos, que permitiram quantificar a significância destes efeitos: análise de variância e análise por regressão linear.

Para verificação da significância dos efeitos sobre a variável resposta, tem-se o método de análise de variância (ANOVA). De acordo com Montgomery e Runger (2009), esta análise permite quantificar a parcela da variabilidade total que é devida a cada fator e à interação entre eles. A variabilidade total é descrita pela Soma Total dos Quadrados, que é composta de duas parcelas: soma dos quadrados das diferenças entre as médias dos tratamentos e a média global ($SQ_{tratamentos}$), e soma dos quadrados das diferenças entre as observações dentro de um tratamento e a média dos tratamentos (SQ_E). A Equação (1) expressa a divisão da variabilidade total de um experimento.

$$SQ_T = SQ_{tratamentos} + SQ_E \quad (1).$$

A soma dos quadrados de cada combinação de tratamento pode ser calculada pela expressão:

$$SQ_{tratamentos} = \frac{(Contraste)^2}{n2^k} \quad (2).$$

A ANOVA é executada por *softwares* estatísticos, que para verificação da significância realizam testes de hipótese a partir da determinação da estatística F . A Tabela 5 apresenta um exemplo de análise para o experimento fatorial 2^2 , em que a e b representam o número de níveis dos fatores A e B, e r é o número de réplicas do experimento.

Tabela 5 – Tabela de ANOVA para um experimento fatorial 2^2 .

Fontes de Variação	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	F_0
A	$a - 1$	SQ_A	$QM_A = \frac{SQ_A}{a - 1}$	$\frac{QM_A}{QM_E}$
B	$b - 1$	SQ_B	$QM_B = \frac{SQ_B}{b - 1}$	$\frac{QM_B}{QM_E}$
AB	$(a - 1)(b - 1)$	SQ_{AB}	$QM_{AB} = \frac{SQ_{AB}}{(a - 1)(b - 1)}$	$\frac{QM_{AB}}{QM_E}$
Erro	$ab(r - 1)$	SQ_E	$QM_E = \frac{SQ_E}{ab(r - 1)}$	
Total	$abr - 1$	SQ_T		

Fonte: Estaticamp (2014).

Com o intuito de determinar uma expressão matemática que correlacione às dosagens de produtos químicos e a remoção de cor aparente e turbidez da água bruta, será realizada a análise por regressão linear, cujo modelo de segunda ordem é expresso pela equação:

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (3)$$

Os coeficientes β 's do modelo são estimados pelo método dos mínimos quadrados, que supõe que os erros experimentais ε_i possuem média zero e variância constante. Dessa forma, este método determina os valores dos β 's para os quais a soma dos quadrados dos erros ε_i seja minimizada. Para determinar a influência de cada fator no modelo, são realizados testes de hipótese com a estatística T . As hipóteses são definidas por:

$$\begin{aligned} H_0: \beta_j &= 0 \\ H_1: \beta_j &\neq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

Assim, se a hipótese H_0 é verdadeira, o efeito do fator não é significativo sobre a variável resposta e, por isto, ele pode ser removido do modelo de regressão linear. Os critérios de rejeição devem obedecer às seguintes especificações:

- a) rejeita-se H_0 se $|t_0| > t_{(\alpha/2, n-k-1)}$; e
- b) caso contrário, a hipótese nula não poderá ser rejeitada.

A análise de resíduos do modelo de regressão é realizada pela determinação do erro padrão residual e do coeficiente de determinação R^2 e R^2_{ajustado} . O método dos mínimos quadrados, assim como a ANOVA são realizados por *softwares* estatísticos, que fornecem a significância de cada fator em tabelas. Estes *softwares* fornecem uma tabela do modelo de regressão, em que são apresentadas as estimativas de cada coeficiente, o erro padrão, as estatísticas t e os valores P .

3 ÁREA DE ESTUDO

Nesta seção serão apresentadas as características da área de estudo na qual foram obtidos os dados apresentados neste trabalho. Nela, estão descritas a estrutura do sistema de abastecimento de água de Sobral, assim como a estação de tratamento investigada, sua tecnologia e métodos para clarificação das águas.

3.1 Sistema de Abastecimento de Água de Sobral

O Serviço Autônomo de Água e Esgoto de Sobral (SAAE) é a autarquia responsável pela administração dos serviços públicos de saneamento básico no município de Sobral. No período de desenvolvimento desta pesquisa (2019-2020), o SAAE contava com cinco unidades purificadoras, divididas em duas regiões:

- a) a primeira, localizada no bairro de Sumaré, corresponde a um complexo com quatro estações de tratamento, nomeadas ETA I, II, IV e V; e
- b) a segunda, localizada no bairro Dom Expedito, com apenas uma unidade de tratamento em funcionamento, nomeada ETA III.

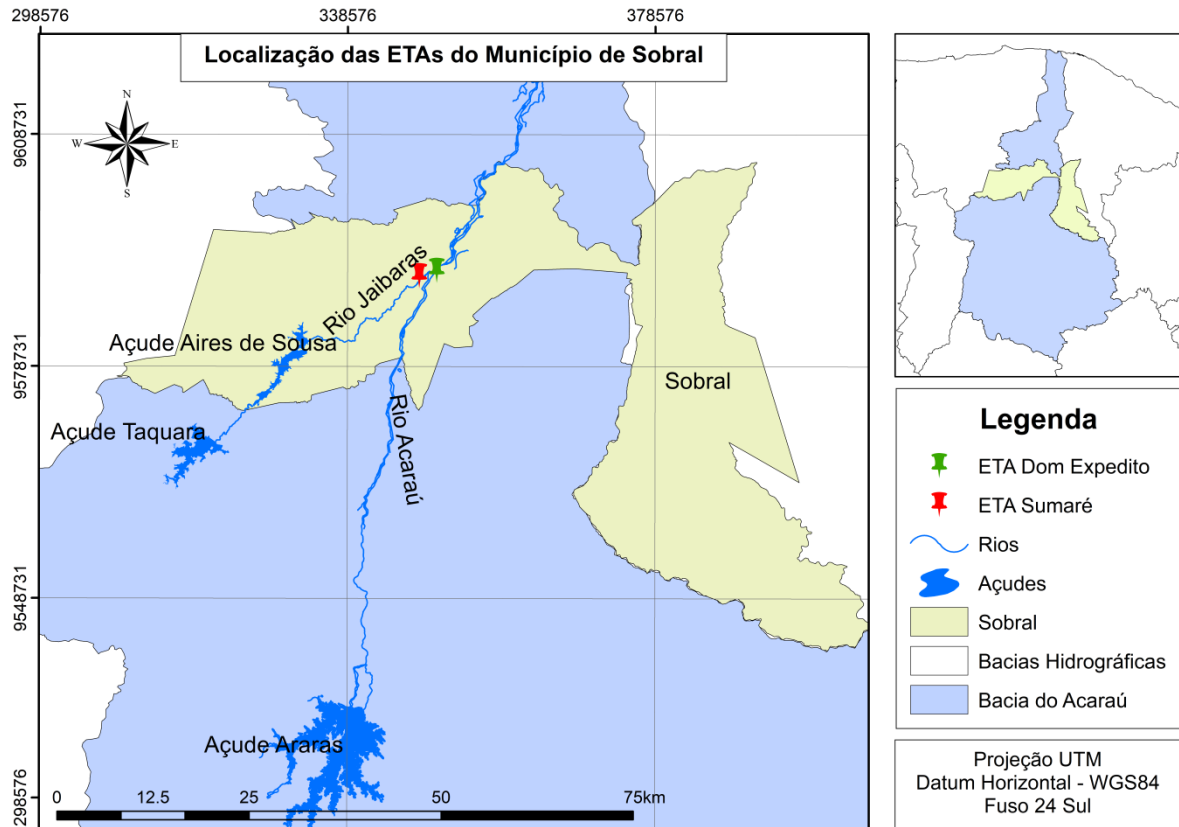
Atualmente, foi construída uma nova estação no bairro Dom Expedito que se encontra em fase de testes. Esta nova unidade terá capacidade de operar 360 m³/h, ampliando o potencial de tratamento no bairro para 720 m³/h. Em Sumaré, a ETA de maior capacidade opera 830 m³/h;

A importância da realização deste estudo na ETA de Sobral se deve à tecnologia de tratamento de água (tipo convencional, ou ciclo completo) adotado pela empresa e a qualidade das águas brutas, que apresentam as condições necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. A tecnologia de ciclo completo é utilizada para águas que apresentam valores altos de cor e turbidez, que segundo Libânio (2008) devem ser superiores a 50 uH e a 50 uT, respectivamente, caracterizando uma condição desfavorável para o processo de clarificação da água, pois exige dosagens maiores de coagulantes e uso de polímeros. Consequentemente, este tratamento acarreta maiores custos para a água filtrada e menores vazões fornecidas para o abastecimento.

Parte da cidade de Sobral está contida na bacia hidrográfica do Acaraú, e é nesta bacia que se localizam os mananciais que abastecem sua população: Rio Acaraú e Rio Jaibaras. Apesar de corresponder ao rio principal da região hidrográfica, as águas do manancial Acaraú, que são tratadas na ETA Dom Expedito, abastecem apenas cerca de 30% da sede do município de Sobral, sendo o restante de seu volume utilizado para abastecer distritos no interior. Em contrapartida, as águas do Rio Jaibaras, que são tratadas no complexo das ETAs do Sumaré,

atendem ao restante da população, fazendo que sua sub-bacia apresente grande relevância no abastecimento público da cidade. A Figura 3 ilustra a localização dos dois polos de tratamento do SAAE no município de Sobral/CE e a configuração dos rios que abastecem a cidade.

Figura 3 – Mapa de localização das ETAs de Sobral.



Fonte: Autoria própria (2021).

O SAAE tem por objetivo adequar a água superficial dos mananciais aos limites especificados pela Portaria GM/MS N°888, a fim de atender aos padrões de potabilidade da água para consumo humano. A Tabela 6 apresenta os valores máximos permitidos de cor aparente e turbidez da água para atender ao padrão de potabilidade da água.

Tabela 6 – Padrão de potabilidade para cor aparente e turbidez.

Parâmetro	Unidade	VMP ¹
Cor aparente	Hazen	15
Turbidez	uT	0,5 ²

¹Valor Máximo Permitido.

²Pós-filtração.

Fonte: Portaria GM/MS N°888.

3.2 Caracterização da estação de tratamento estudada

O processo de abastecimento de água para população ocorre basicamente em quatro grandes etapas: captação, tratamento, reservação e distribuição. A ETA Dom Expedito, a que diz respeito ao estudo em questão, capta as águas do rio Acaraú a partir de um poço amazonas de diâmetro de 3,00m (FIGURA 4) e as aduz até a estação por uma adutora de diâmetro de 250mm, onde o tratamento é realizado a partir de 2 (dois) módulos com capacidade de 100 L/s. Após os processos de clarificação, filtração e desinfecção, a água tratada segue por recalque para dois reservatórios (um reservatório apoiado e outro elevado) para, em seguida, ser distribuída à sede de Sobral e aos distritos vizinhos.

Figura 4 – Captação das águas do rio Acaraú por poço amazonas.

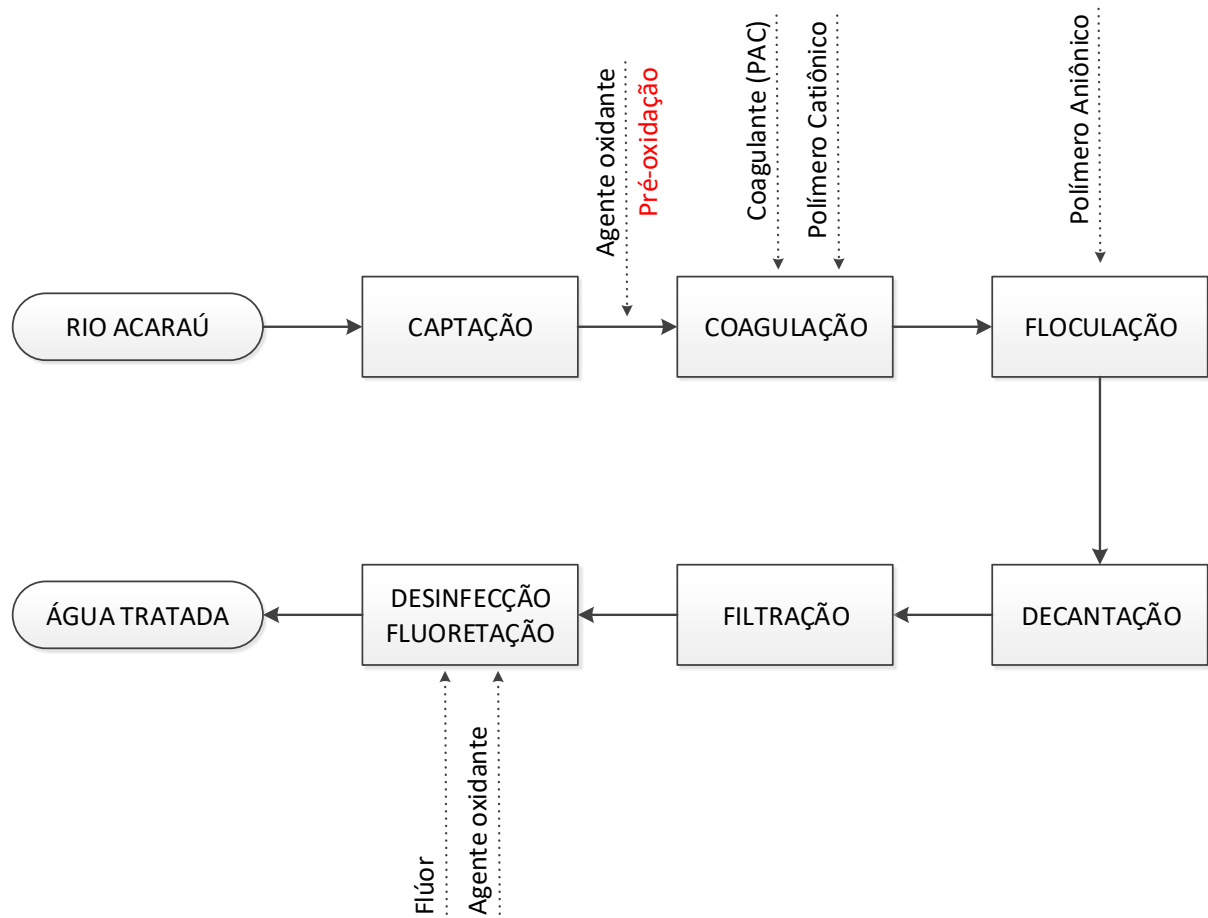


Fonte: Aatoria própria (2021).

A ETA Dom Expedito, no entanto, não supre as necessidades da população devido à grande perda na distribuição e ao crescimento do público beneficiado e, no período de realização do presente estudo, passa por processo de ampliação. Segundo dados levantados pela empresa SANEController, a bomba de captação encontra-se com vazamento e com capacidade de operação inferior à necessária. Além disso, a adutora de água bruta existente está subdimensionada e bastante deteriorada (SANECONTROLLER, 2018).

No que diz respeito a estrutura da estação, a ETA Dom Expedito apresenta casa química, com tanques de preparação de polímeros e de hipoclorito de sódio, utilizado como pré-oxidante; calha Parshall, que funciona como medidor de vazão e misturador; um canal de floculação com chicanas verticais; dois decantadores de alta taxa com fluxo horizontal; e quatro filtros rápidos descendentes. A seguir estão apresentadas as fases de tratamento da estação supracitada (FIGURA 5) com posterior detalhamento de suas etapas:

Figura 5 – Etapas do tratamento de água da ETA III de Dom Expedito.



Fonte: Autoria própria (2021).

A operação da ETA ocorre seguindo as seguintes etapas de tratamento convencional:

- pré-oxidação, que consiste na dosagem de solução de hipoclorito de sódio, preparado à base de salmoura e água de diluição no interior de um reator e aplicado na tubulação de entrada da estação, que opera em conduto forçado;
- coagulação do tipo hidráulica, constituída por calha Parshall. O coagulante utilizado é o policloreto de alumínio (PAC), aplicado após a saída da tubulação de entrada da estação, o que promove a agitação da água no início do canal de coagulação. Nesta etapa

ainda é feita a dosagem de um polímero auxiliar catiônico próximo à entrada no canal de floculação;

- c) floculação do tipo hidráulica, constituída por um canal de floculação de chicanas verticais, com aplicação de polímero auxiliar aniônico durante o processo;
- d) decantação, que consiste de duas unidades de sedimentação de seção retangular de alta taxa, operando em paralelo. A raspagem do lodo é feita manualmente por operadores, assim como a sua diluição;
- e) filtração, que compreende à quatro unidades de filtros rápidos, com camada simples, operando em paralelo.
- f) desinfecção que, assim como a pré-oxidação, se resume a adição de hipoclorito de sódio a fim de eliminar os microrganismos patogênicos existentes.

A Figura 6 ilustra as principais etapas de tratamento de água realizadas na ETA III de Dom Expedito, correspondendo aos processos de coagulação, floculação, decantação e filtração.

Figura 6 – Etapas do tratamento de água da ETA III de Dom Expedito.



(a) entrada na ETA Dom Expedito III



(b) aplicação do PAC na Calha Parshall



(c) aplicação do polímero catiônico antes da entrada no floculador.



(d) canal de floculação com chinacas verticais



(e) aplicação do polímero aniônico na floculação



(f) decantadores e filtros rápidos descendentes

Fonte: Autoria própria (2021).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo se dedica à apresentação dos métodos empregados para identificação dos cenários e parâmetros operacionais da estação de tratamento estudada, assim como, à descrição dos equipamentos e materiais utilizados na realização dos ensaios com reatores estáticos. A metodologia adotada baseia-se nos estudos realizados por Menezes (2018), especificamente no que se refere à análise de perfis de vazão e qualidade da água bruta, e aos métodos de determinação dos parâmetros operacionais para os ensaios em *jar test*.

4.1 Avaliação dos cenários operacionais

Segundo Menezes (2018), por meio da avaliação de qualidade da água bruta e de seu perfil de vazão de captação, é possível identificar as variações sazonais e os cenários operacionais de uma estação de tratamento. Dessa forma, optou-se por realizar a mesma metodologia a fim de caracterizar os parâmetros operacionais necessários para os ensaios com reatores estáticos.

Os perfis de vazão e de qualidade da água bruta foram construídos com os valores médios diários de dados fornecidos pelo SAAE. A ETA Dom Expedito opera 24 horas por dia, as medições de vazão são realizadas de hora em hora e as análises de turbidez, cor aparente e pH da água bruta são realizadas, em média 5 vezes ao dia. Juntamente à coleta das amostras de água na captação são realizadas coletas de água decantada e tratada. A frequência de amostragem dos parâmetros de qualidade de água deve atender aos requisitos impostos pela Portaria GM/MS N°888, como mostra a Tabela 7, com destaque aos parâmetros monitorados na pesquisa.

Tabela 7 – Número mínimo de amostras e frequência para controle da qualidade da água de sistema de abastecimento, considerando o ponto de amostragem na saída do tratamento e manancial do tipo superficial.

Parâmetro	Saída do Tratamento	
	Número de Amostras	Frequência
Cor	1	A cada 2 horas
Turbidez, Cloro Residual Livre ⁽¹⁾ , Cloraminas ⁽¹⁾ , Dióxido de Cloro ⁽¹⁾	1	A cada 2 horas
pH e fluoreto	1	A cada 2 horas

¹Análise exigida de acordo com o desinfetante utilizado.

Fonte: Portaria GM/MS N°888.

De acordo com a norma, as amostras de água tratada devem ser coletadas a cada 2 horas para verificação dos parâmetros físico-químicos (turbidez, cor aparente e pH). Segundo operadores da unidade, o número reduzido de análises se deve à distância entre a unidade de tratamento e o laboratório do SAAE, o que inviabiliza a coleta de duas em duas horas. Após as medições e análises, todos os dados de operação da ETA Dom Expedito são armazenados em planilhas eletrônicas, organizadas em boletins diários.

Para avaliação dos perfis de vazão e de qualidade da água bruta foram utilizados dados do período de janeiro a dezembro de 2015 a 2019. Dentre os parâmetros físico-químicos, decidiu-se por avaliar a turbidez, a cor aparente e o pH da água bruta. Além desses dados, optou-se também por consultar, para o mesmo período, as dosagens de produtos químicos aplicados pela autarquia no processo de clarificação das águas. A partir da construção de perfis de dosagens, é possível identificar as dosagens utilizadas em cada cenário operacional, auxiliando na determinação das dosagens escolhidas nos planejamentos experimentais.

4.2 Ensaios de caracterização e de coagulação

Todos os ensaios necessários ao cumprimento da pesquisa foram realizados no Laboratório do SAAE, em Sobral. Na caracterização das águas brutas foram determinadas as propriedades físico-químicas: turbidez, cor aparente, temperatura e pH. E na caracterização da água coagulada, foram definidas apenas as variáveis de interesse: turbidez e cor aparente. As determinações seguiram os métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater – 23rd edition* (APHA, 2017), conforme Tabela 8.

Tabela 8 – Métodos analíticos aplicados na caracterização físico-química das águas brutas e tratadas.

Parâmetro	Unidade	LDM	Método	Referência (APHA, 2017)
pH	Adimensional	0-14	Eletrométrico	SMEWW 4500H
Cor aparente	uH	1	Comparação Visual	SMEWW 2120B
Temperatura	°C	0,1	Sensor em aço inox	SMEWW 2550B
Turbidez	NTU	0,1	Nefelométrico	SMEWW 2130B

Fonte: Autoria própria (2021).

Para a determinação das propriedades, foram utilizados os seguintes equipamentos da marca Del Lab, expostos na Figura 7:

- a) turbidímetro microprocessado digital, modelo DLT-WV;
- b) colorímetro visual da marca Del Lab, modelo DLNH-100; e

c) pHmetro microprocessado digital de bancada, modelo DLA-PH.

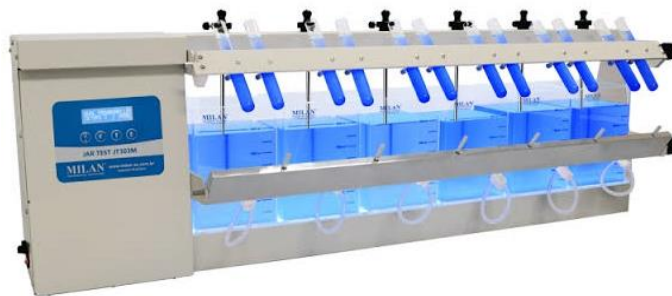
Figura 7 – Equipamentos utilizados nos ensaios de caracterização. (a) turbidímetro digital; (b) colorímetro visual; (c) pHmetro digital.



Fonte: Página eletrônica da empresa Del Lab (2020).

Os ensaios de bancada com reatores estáticos foram realizados com o equipamento de *jar test* da marca MILAN modelo JT603.M/6, que possui seis cubas de acrílico com capacidade para armazenamento de dois litros de amostra (FIGURA 8). O equipamento possui coletor de amostra e dosador simultâneo de reagentes, o que permite minimizar os erros inerentes à coleta e aplicação dos produtos químicos. A agitação mecânica do equipamento, que simula o gradiente de velocidade das etapas de tratamento, é mensurada em rotações por minuto (rpm) e possui controle do gradiente de velocidade variável de 20 a 600 rpm.

Figura 8 – Equipamento de *jar test* utilizado para ensaios de bancada.



Fonte: Página eletrônica da empresa MILAN (2019).

Para a aplicação dos ensaios de bancada, foram calculados os parâmetros: tempo de residência (TDH) e gradiente de velocidade (G). Com exceção da etapa de decantação, o tempo de residência do corpo d'água na coagulação e floculação foi calculado a partir das vazões médias e com base no volume útil de cada tanque. Os volumes foram determinados a partir dos projetos arquitetônicos das estações de tratamento fornecidos pelo SAAE. Visto que a ETA apresenta decantador laminar, não foram adotadas as vazões médias de operação e o volume

útil do decantador, mas as especificações adotadas no laboratório do SAAE para determinação do tempo de residência na etapa de decantação.

O gradiente de velocidade da etapa de coagulação foi estipulado a partir dos cálculos de ressalto hidráulico, apresentados no ANEXO B, considerando que o coagulante é aplicado na calha Parshall e esta promove a agitação hidráulica da água no canal de coagulação. Na etapa de floculação, adotou-se os gradientes de velocidade previstos pelo projeto de engenharia da ETA para dimensionamento dos flocladores. Com o intuito de obter resultados mais expressivos, o instante de injeção de cada polímero foi calculado considerando os pontos de aplicação dos produtos na unidade de tratamento.

Em janeiro de 2020, ocorreram as primeiras visitas ao laboratório do SAAE a fim de iniciar os ensaios de tratabilidade. Neste período, os dados necessários à caracterização do manancial e os dados de operação da ETA Dom Expedito não estavam disponíveis, o que impossibilitava a determinação dos parâmetros operacionais a serem aplicados nos ensaios de *jar test*. Dessa forma, optou-se pela execução de um ensaio preliminar com as amostras coletadas e que permitisse compreender, no contexto geral, as influências de cada produto químico no processo de clarificação e avaliação das dosagens aplicadas.

Para esse primeiro ensaio, foram coletadas amostras simples e adotados os parâmetros operacionais utilizados no laboratório do SAAE (TDH e G), realizando um experimento com número reduzido de análise, que possibilitou verificar a viabilidade na execução dos ensaios em batelada.

No mês de março de 2020, após obtenção dos dados necessários à caracterização da operação na ETA e da qualidade do manancial, realizaram-se dois novos ensaios de tratabilidade a partir da coleta de amostras simples. E para esses ensaios, foram estabelecidas as condições de agitações e tempo de residência próximas as existentes na estação de tratamento.

Entre os produtos químicos estudados, optou-se por avaliar aqueles aplicados atualmente na estação de tratamento. Como coagulante primário, utilizou-se o PAC preparado e fornecido pela empresa Bauminas com as seguintes especificações técnicas:

- Teor (Al_2O_3): 23%
- Basicidade livre: 18%
- Densidade: 1,36 g/ml

Além do coagulante, foram usados polímeros catiônicos e aniônicos, fabricados pela Fluerger e preparados na concentração de 0,2% e 0,1%, respectivamente; e hipocloreto de sódio, utilizado como pré-oxidante e preparado à base de água e sal.

4.3 Planejamento de experimentos

No presente trabalho, o planejamento experimental foi escolhido para avaliar quais parâmetros operacionais exercem maior influência na remoção de impurezas presentes na água, assim como determinar o grau de influência das interações entre essas grandezas. Entre os métodos de experimentação planejada, adotou-se o planejamento de experimentos de segunda ordem, com o objetivo de obter as superfícies de resposta do evento estudado, a condição ótima de funcionamento da unidade de tratamento e a capacidade de depuração da água como consequência das mudanças de nível dos parâmetros operacionais.

Entre os fatores que exercem maior influência na remoção de turbidez e cor da água bruta, destacam-se: pH de coagulação, dosagem de agente coagulante e de polímero auxiliar de coagulação, gradiente de velocidade nas etapas de coagulação e floculação e tempo de residência da água bruta em cada etapa do processo. Nesta pesquisa, optou-se por analisar quatro variáveis: a dosagem do agente oxidante, do agente coagulante e dos polímeros catiônico e aniônico.

Apesar de apresentar relevância no processo de remoção de impurezas, os gradientes de velocidade e os tempos de detenção não foram adotados como variáveis independentes, visto que a unidade de purificação analisada não utiliza processos mecanizados, ou seja, as velocidades e o tempo de residência dependem da vazão de captação. Sendo assim, optou-se por fixar seus valores para os ensaios de bancada, determinando suas medidas a partir da vazão média captada e das dimensões estruturais dos compartimentos de coagulação, floculação e sedimentação, como mencionado anteriormente.

O pH de coagulação também não foi adotado como variável independente, uma vez que, na aplicação do PAC, este parâmetro sofre pouca alteração durante o processo de tratamento da água, mantendo-se próximo a faixa neutra (PIVELI; KATO, 2006). Por fim, a escolha por analisar a dosagem de oxidante se deve as características físicas da água (períodos de baixa turbidez e cor elevada) e a necessidade de averiguar sua importância na remoção da cor aparente.

Na execução do ensaio preliminar, optou-se por realizar o experimento fatorial completo 2^4 . Para a construção deste planejamento, foram necessárias 18 combinações de tratamento (16

corridas fatoriais e 2 pontos centrais). A opção por este planejamento se deu em virtude da necessidade inicial de avaliar as funções do *software* estatístico utilizado, além de permitir realizar um número crescente ensaios até atingir a quantidade estimada para aplicação deste estudo.

Este tipo de planejamento permite identificar o efeito principal de cada fator sobre a remoção de turbidez e cor aparente com uma menor quantidade de ensaios. Comparada ao experimento fatorial composto central rotacional, representa uma análise mais simplificada dos efeitos de interação, mas norteia na identificação dos fatores mais relevantes da análise, mostrando-se um método satisfatório para ensaios preliminares. A Tabela 9 apresenta a configuração do planejamento experimental adotado na realização do Ensaio 1 (preliminar), considerando os quatro fatores, PAC (fator A), polímero catiônico (fator B), polímero aniônico (fator C) e pré-oxidante (fator D).

Tabela 9 – Configuração do planejamento fatorial completo para o Ensaio 1 (preliminar).

Experimento	A	B	C	D	Experimento	A	B	C	D
1	0,0	0,0	0,0	0,0	10	1,0	1,0	1,0	-1,0
2	1,0	-1,0	1,0	1,0	11	-1,0	-1,0	1,0	1,0
3	1,0	-1,0	1,0	-1,0	12	-1,0	1,0	1,0	1,0
4	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	13	1,0	1,0	-1,0	1,0
5	1,0	-1,0	-1,0	1,0	14	1,0	1,0	-1,0	-1,0
6	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0	15	-1,0	-1,0	1,0	-1,0
7	-1,0	1,0	-1,0	1,0	16	1,0	1,0	1,0	1,0
8	-1,0	1,0	1,0	-1,0	17	-1,0	1,0	-1,0	-1,0
9	1,0	-1,0	-1,0	-1,0	18	0,0	0,0	0,0	0,0

Fonte: Autoria própria (2021).

O *design* escolhido para a realização dos demais ensaios desse trabalho foi o experimento composto central rotacional que tem como base o experimento fatorial completo 2^k , acrescido de ponto central e pontos axiais. A escolha por este modelo permite verificar se as interações de ordem superior causam impacto significativo no resultado final. A ausência de repetições deve-se à grande quantidade de ensaios que deveriam ser realizados, optando-se por réplicas do ponto central para obter uma estimativa interna do erro puro.

A Tabela 10 e a Tabela 11 apresentam, respectivamente, a configuração do planejamento experimental adotado na realização dos ensaios 2 e 3. Considerando os quatro fatores analisados, observa-se que são necessárias 28 combinações de tratamento (16 corridas

fatoriais + 8 pontos axiais + 4 pontos centrais) para o Ensaio 2; e 30 combinações de tratamento (16 corridas fatoriais + 8 pontos axiais + 6 pontos centrais) para o Ensaio 3.

Tabela 10 – Configuração do planejamento composto central rotacional do Ensaio 2.

Experimento	A	B	C	D	Experimento	A	B	C	D
1	1,0	1,0	1,0	-1,0	16	0,0	0,0	2,1	0,0
2	0,0	2,1	0,0	0,0	17	1,0	-1,0	-1,0	-1,0
3	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	18	-1,0	1,0	-1,0	1,0
4	0,0	0,0	0,0	-2,1	19	1,0	-1,0	-1,0	1,0
5	-2,1	0,0	0,0	0,0	20	-1,0	1,0	1,0	1,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	21	0,0	0,0	0,0	2,1
7	-1,0	1,0	1,0	-1,0	22	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
8	0,0	-2,1	0,0	0,0	23	-1,0	-1,0	1,0	1,0
9	0,0	0,0	-2,1	0,0	24	0,0	0,0	0,0	0,0
10	1,0	1,0	-1,0	1,0	25	0,0	0,0	0,0	0,0
11	1,0	-1,0	1,0	-1,0	26	1,0	1,0	1,0	1,0
12	1,0	1,0	-1,0	-1,0	27	-1,0	1,0	-1,0	-1,0
13	2,1	0,0	0,0	0,0	28	-1,0	-1,0	1,0	-1,0
14	0,0	0,0	0,0	0,0	29	1,0	-1,0	1,0	1,0

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 11 – Configuração do planejamento composto central rotacional do Ensaio 3.

Experimento	A	B	C	D	Experimento	A	B	C	D
1	-1,0	1,0	-1,0	1,0	16	0,0	0,0	0,0	0,0
2	2,2	0,0	0,0	0,0	17	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0
3	-2,2	0,0	0,0	0,0	18	1,0	-1,0	-1,0	-1,0
4	1,0	-1,0	1,0	1,0	19	1,0	-1,0	1,0	-1,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	20	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	-2,2	0,0	21	1,0	1,0	-1,0	-1,0
7	-1,0	1,0	1,0	-1,0	22	-1,0	1,0	-1,0	-1,0
8	-1,0	1,0	1,0	1,0	23	0,0	0,0	0,0	0,0
9	-1,0	-1,0	-1,0	1,0	24	0,0	0,0	2,2	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	25	-1,0	-1,0	1,0	1,0
11	1,0	1,0	-1,0	1,0	26	1,0	1,0	1,0	1,0
12	0,0	-2,2	0,0	0,0	27	1,0	-1,0	-1,0	1,0
13	-1,0	-1,0	1,0	-1,0	28	0,0	0,0	0,0	2,2
14	0,0	2,2	0,0	0,0	29	1,0	1,0	1,0	-1,0
15	0,0	0,0	0,0	0,0	30	0,0	0,0	0,0	-2,2

Fonte: Autoria própria (2021).

Para construção das combinações de tratamento e para a análise estatística, utilizou-se o *software* R, sendo o planejamento composto central realizado pelo pacote *ccd*. Os valores de nível alto e baixo escolhidos para os fatores estudados foram baseados nas dosagens utilizadas, em 2019, pela autarquia responsável. A partir dessas informações, foram construídos gráficos de dispersão que permitiram identificar a distribuição das dosagens ao longo do tempo e relacionar seus valores com a turbidez e cor aparente da água bruta.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este tópico se dedica à apresentação e discussão dos resultados obtidos com a aplicação da metodologia descrita na seção anterior. A avaliação dos perfis de vazão e de qualidade de água, assim como, os perfis de dosagens de produtos químicos foram obtidos com dados fornecidos pelo SAAE. E as análises experimentais preliminares e finais foram realizadas em laboratório, no mês de janeiro e março, para as águas do rio Acaraú.

5.1 Avaliação dos cenários operacionais

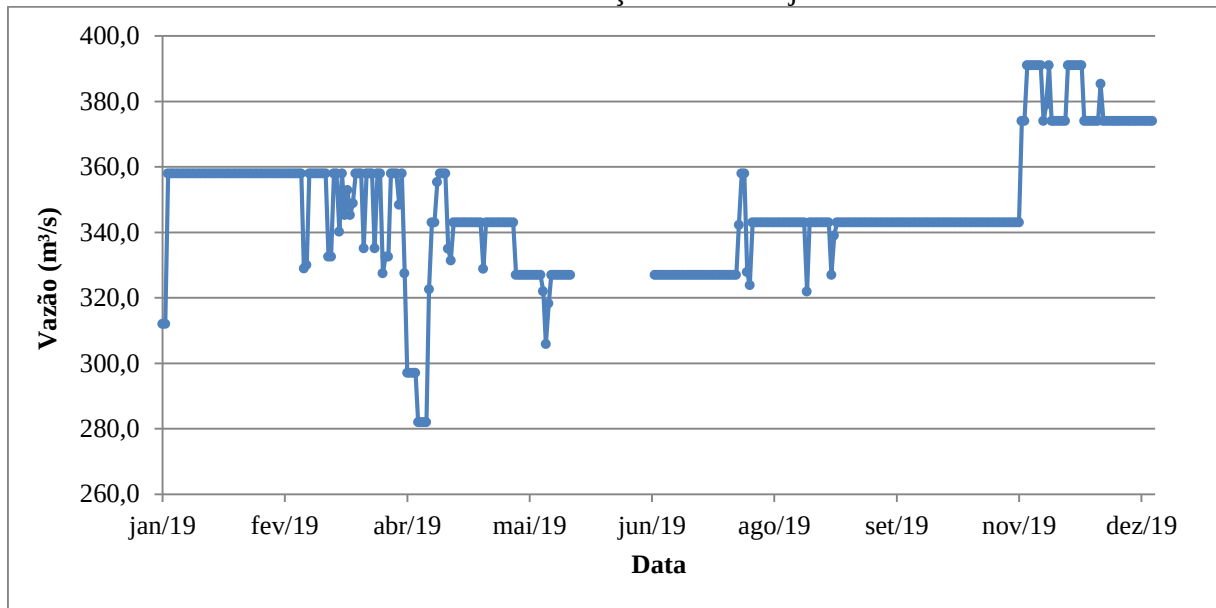
Os cenários operacionais da estação de tratamento foram identificados com o objetivo de enquadrar as amostras coletadas em um cenário correspondente. Acredita-se que as dosagens ótimas encontradas para as amostras nos ensaios com *jar test*, poderão ser adotadas pela unidade de tratamento nos períodos em que as águas do manancial apresentarem características semelhantes às dos cenários na qual foram enquadradas.

A avaliação do perfil de vazão permitiu determinar a vazão média de captação na estação de tratamento, sendo esta necessária para o cálculo do tempo de residência do corpo d'água nas etapas do processo de clarificação da água. E a análise dos perfis de qualidade da água bruta indicaram as variações sazonais dos corpos hídricos, permitindo classificar as águas em dois quadros.

5.1.1 Perfil de vazão de captação da água bruta para ETA Dom Expedito

O Gráfico 1 apresenta os resultados obtidos com os dados de vazão de captação do manancial Acaraú para ETA Dom Expedito, no período de janeiro a dezembro de 2019. A partir de sua análise, é possível constatar que as captações se mantêm praticamente constante, com média próxima à capacidade da ETA de 360 m³/h, apresentando valores entre 282 m³/h e 391 m³/h ao longo dos meses. Além disso, nota-se picos de vazão nos meses de novembro a dezembro de 2019 e quedas, nos meses de março a maio. Não há informações de vazão para o mês de junho.

Gráfico 1 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 12 apresenta a análise descritiva das vazões captadas pela ETA Dom Expedito durante o ano de 2019.

Tabela 12 – Medidas estatísticas para vazão de captação da ETA Dom Expedito em 2019.

Média	Desvio Padrão	Mínima	Máxima
347,01	19,09	282,00	391,00

Fonte: Autoria própria (2021).

Acredita-se que os picos de vazão captada correspondam aos meses maior consumo de água pela população de Sobral, coincidindo com os meses de temperaturas máximas da região, de férias de verão e de confraternizações de final de ano. Já os períodos de redução da vazão captada estão relacionados ao quadro chuvoso da Bacia Hidrográfica do rio Acaraú. As chuvas intensas ocasionam carreamento de sedimentos, fertilizantes e agroquímicos que prejudicam a qualidade das águas do manancial e, conseqüentemente, reduzem a capacidade de tratamento da estação.

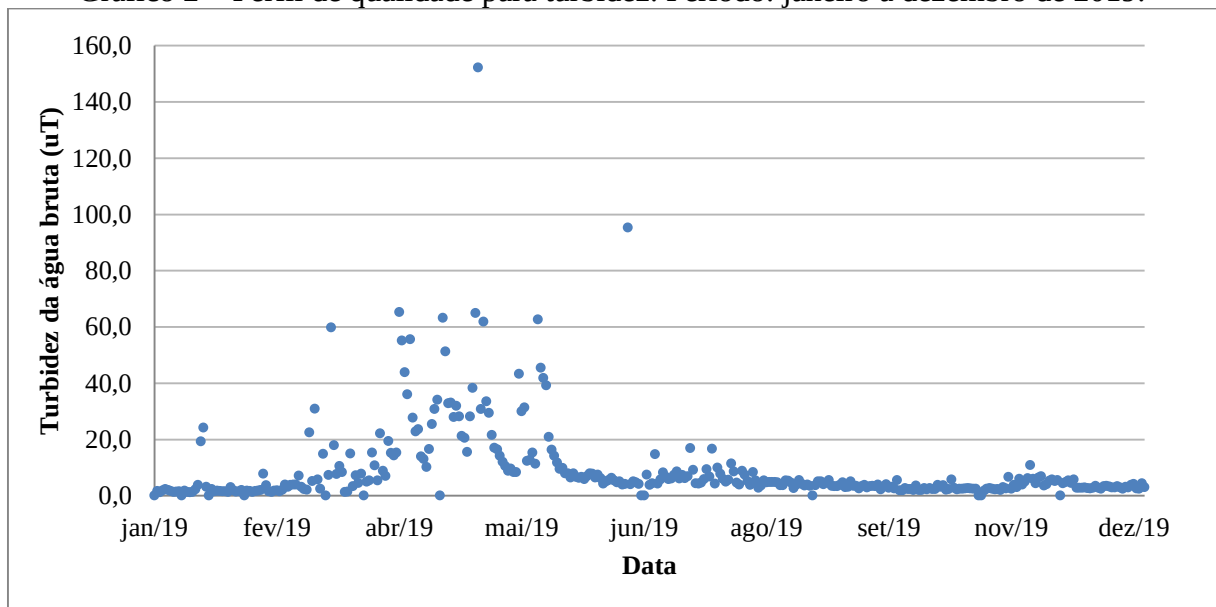
Os dados sobre a vazão de alimentação da ETA Dom Expedito de anos anteriores (2015-2017) estão apresentados no APÊNDICE A. Nas planilhas eletrônicas coletadas junto à equipe de operação da ETA, observou-se que não há informações sobre a captação e a caracterização do rio Acaraú no ano de 2018, assim como há falta de bases em alguns meses para os outros anos analisados.

5.1.2 Perfis de qualidade da água bruta para ETA Dom Expedito

Com o intuito de avaliar a qualidade das águas do manancial Acaraú, foram construídos gráficos de dispersão com os dados fornecidos pelo SAAE, no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019. Os perfis de qualidade para turbidez, cor aparente e pH dos anos de 2015 a 2017 estão expostos no APÊNDICE B, APÊNDICE C e APÊNDICE D, respectivamente. A seguir serão apresentados os perfis que caracterizam as águas do rio Acaraú ao longo de 2019.

O Gráfico 2 ilustra o perfil de turbidez das águas do manancial Acaraú.. É plausível identificar que, ao longo do ano, a turbidez apresenta valor médio inferior a 10 uT e, apenas no período de março a maio de 2019, as águas do manancial revelaram-se mais turvas, com valores entre 20 uT e 70 uT, apresentando também alguns valores próximos de 100 uT.

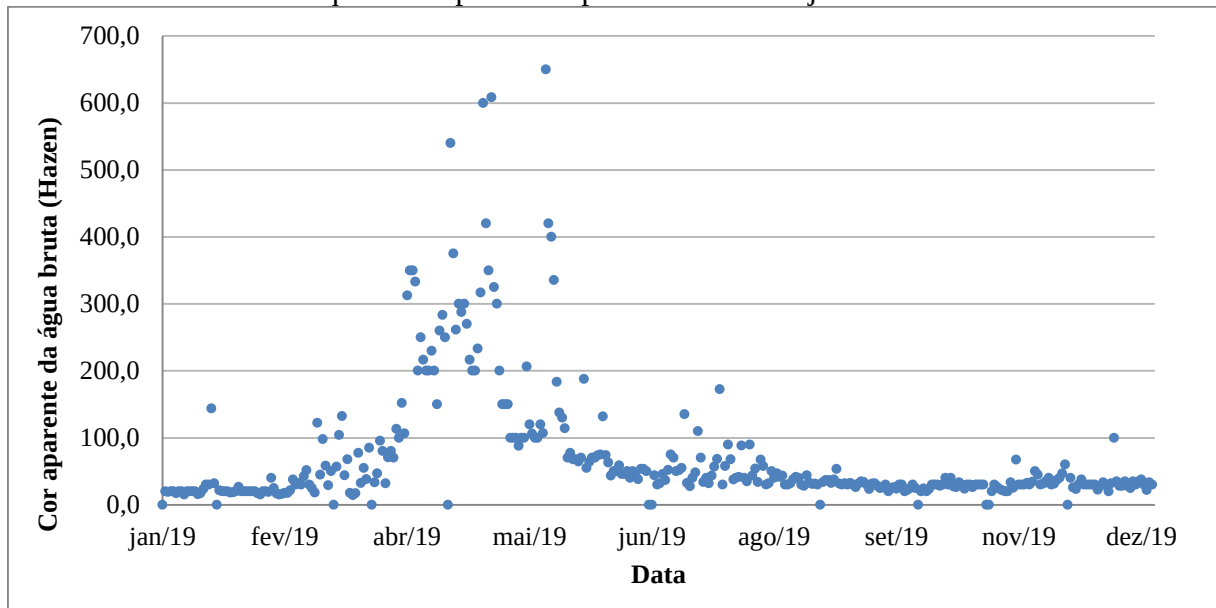
Gráfico 2 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como identificado para o perfil de turbidez, na avaliação do perfil de qualidade para cor aparente das águas do rio Acaraú, verifica-se um aumento desta característica nos meses de março a maio de 2019, como representado no Gráfico 3. Este aumento corresponde aos meses de chuvas mais intensas para o nordeste brasileiro e condiz com as condições climatológicas da região. Os ensaios de caracterização da água bruta revelam que, neste período, o manancial apresenta valores de cor aparente entre 100 uH e 400 uH, podendo ocorrer variações até quase 700 uH. No entanto, no restante do ano, as águas do manancial apresentam cor aparente média inferior a 50 uH.

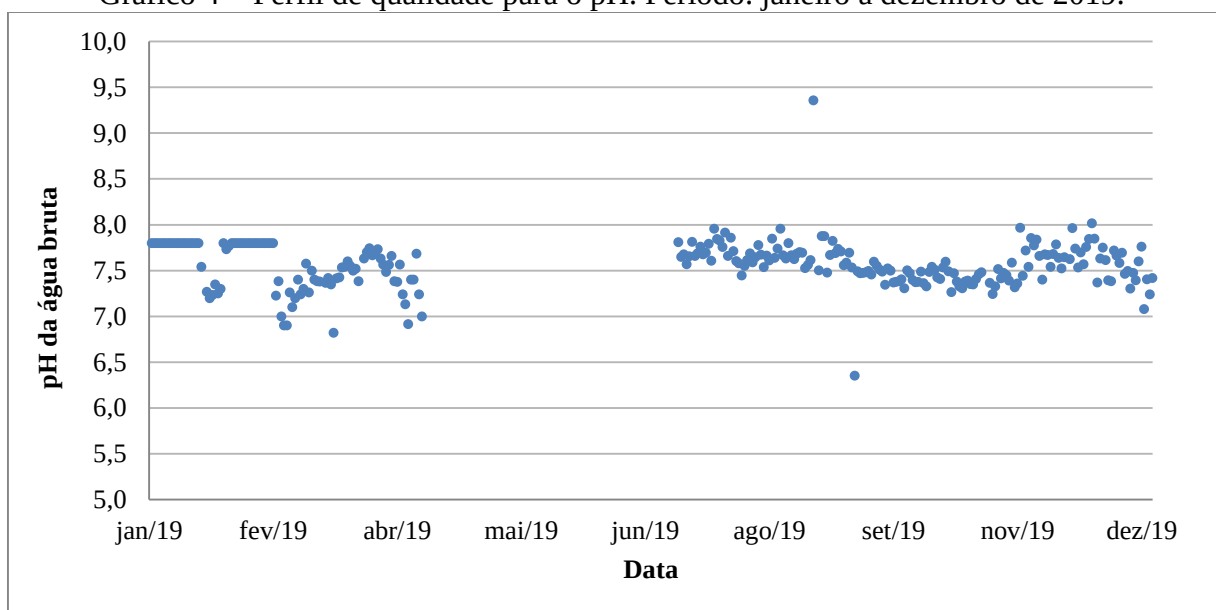
Gráfico 3 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

Por fim, o perfil de qualidade para o pH, indicado no Gráfico 4, demonstra que os valores de pH do manancial Acaraú mantêm-se próximo à região de neutralidade durante todos os meses. Para os dados coletados, no período de abril a julho de 2019, não há informações sobre o pH da água bruta, apesar disso, é possível inferir que este se manteve entre 7 e 8. Esta análise permite afirmar que não será necessário fazer uso de alcalinizantes ou acidificantes nos ensaios realizados em laboratório.

Gráfico 4 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 13 apresenta um resumo da análise descritiva das características físicas das águas tratadas pela ETA Dom Expedito. Sabe-se que para determinar o comportamento de um manancial são necessários dados de anos anteriores, no entanto, as bases obtidas junto ao SAAE apresentaram omissões que impedem uma análise mais adequada das informações. Dessa forma, estão expostos apenas os valores médios, mínimos, máximos e os desvios padrões referente ao ano de 2019.

Tabela 13 – Medidas estatísticas para caracterização das águas do manancial Acaraú. Período: janeiro a dezembro de 2019.

Parâmetros	Rio Acaraú			
	Valor médio	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo
pH bruto	7,57	0,25	6,35	9,36
Turbidez bruta	9,60	14,75	1,13	152,22
Cor aparente bruta	75,20	96,78	14,50	650,00

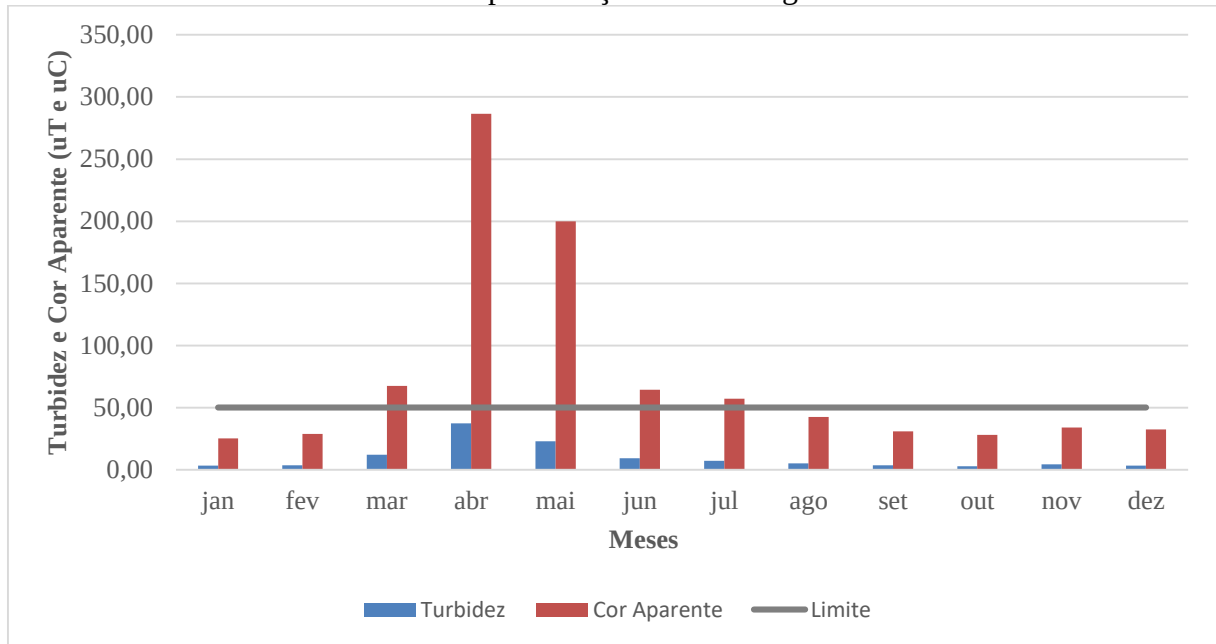
Fonte: Autoria própria (2021).

As características da água do manancial Acaraú, observadas na Tabela 12, apresentam valores médios baixos de turbidez e altos de cor aparente, indicando a presença elevada de partículas dissolvidas. No tratamento de águas para abastecimento, a ausência de partículas maiores dificulta a ocorrência de nucleação no processo de floculação, formando flocos pequenos e com baixa velocidade de sedimentação. A pré-cloração, ou seja, a aplicação de cloro na etapa de coagulação e/ou floculação, pode ser adotada pelas ETAs para a oxidação dos compostos coloidais e consequente melhora na floculação (PIVELI; KATO, 2006).

Os polímeros também podem ser aplicados no tratamento de águas com baixa turbidez, visto que estes auxiliam na desestabilização das partículas e na formação de flocos mais denso e resistentes, atuando como núcleos de floculação (ABREU LIMA, 2007). No entanto, alguns estudos apontam que para águas de turbidez muito baixas (inferior a 5 uT), a aplicação de polímeros pode piorar o processo de clarificação da água (LANDIM, 2005).

Avaliando as médias mensais para os valores de turbidez e cor aparente das águas do rio Acaraú no ano de 2019, identifica-se que, em alguns períodos do ano, há a possibilidade de tratamento das águas por outras tecnologias de tratamento, em especial algumas das tecnologias de filtração direta (FIGURA 9). Isto porque, segundo Libânio (2008), não se faz necessário a adoção da tecnologia de ciclo completo para águas que apresentam, por um longo período de tempo, turbidez e cor aparente inferiores a 50uT e 50uH, respectivamente.

Figura 9 – Médias mensais dos parâmetros físicos cor aparente e turbidez para o ano de 2019 e limite recomendado para adoção da tecnologia de tratamento convencional.



Fonte: Autoria própria (2021).

Nas ETAs localizadas no norte brasileiro, é comum o uso de sistemas em by-pass que permitam utilizar tecnologias diferentes a depender das condições climatológicas da região. No caso da ETA Dom Expedito, acredita-se que possam ser realizados estudos a fim de averiguar a possibilidade da implementação desses sistemas em *by-pass*, permitindo que, na estação seca, as águas sejam tratadas por uma das tecnologias de filtração direta e, na estação chuvosa, por ciclo completo.

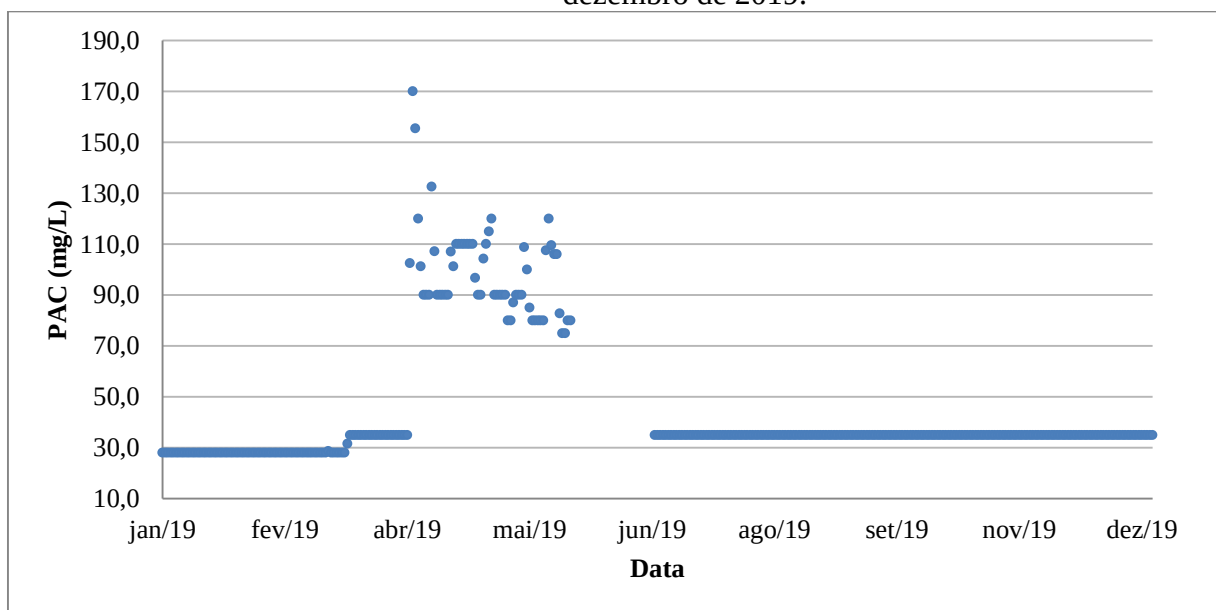
5.1.3 Perfis de dosagens dos produtos químicos aplicados para ETA Dom Expedito

Com o propósito de avaliar as tomadas de decisão na operação da ETA Dom Expedito, foram construídos gráficos de dispersão com as dosagens de produtos químicos aplicados no tratamento das águas do rio Acaraú, no período de janeiro de 2015 a dezembro de 2019. Os perfis de dosagens de coagulante e polímero aniônico dos anos de 2015 a 2017 estão expostos no APÊNDICE E e APÊNDICE F, respectivamente. Não há informações sobre aplicação de polímero catiônico nos anos referidos. A seguir serão apresentados os perfis que caracterizam as dosagens de produtos químicos na ETA Dom Expedito ao longo de 2019.

O Gráfico 5 ilustra o perfil das concentrações do coagulante PAC aplicadas durante o ano de 2019. A partir de sua análise, observa-se que apenas no período chuvoso há alterações significativas nas concentrações aplicadas do coagulante primário, apresentando valores entre

70 mg/L e 130 mg/L. No restante do ano, as concentrações se mantêm praticamente constantes, alternando entre 28 mg/L e 35 mg/L. Quando comparada aos gráficos de vazão de alimentação da ETA e de turbidez e cor aparente brutas (GRÁFICO 1, GRÁFICO 2 e GRÁFICO 3, respectivamente), constata-se que as dosagens de produtos químicos aplicadas buscam atender aos critérios de qualidades das águas brutas do manancial. Na operação da ETA Dom Expedito, são realizados ensaios de bancada nos períodos chuvosos, a fim de determinar as concentrações adequadas.

Gráfico 5 – Perfil de dosagem do coagulante PAC na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.



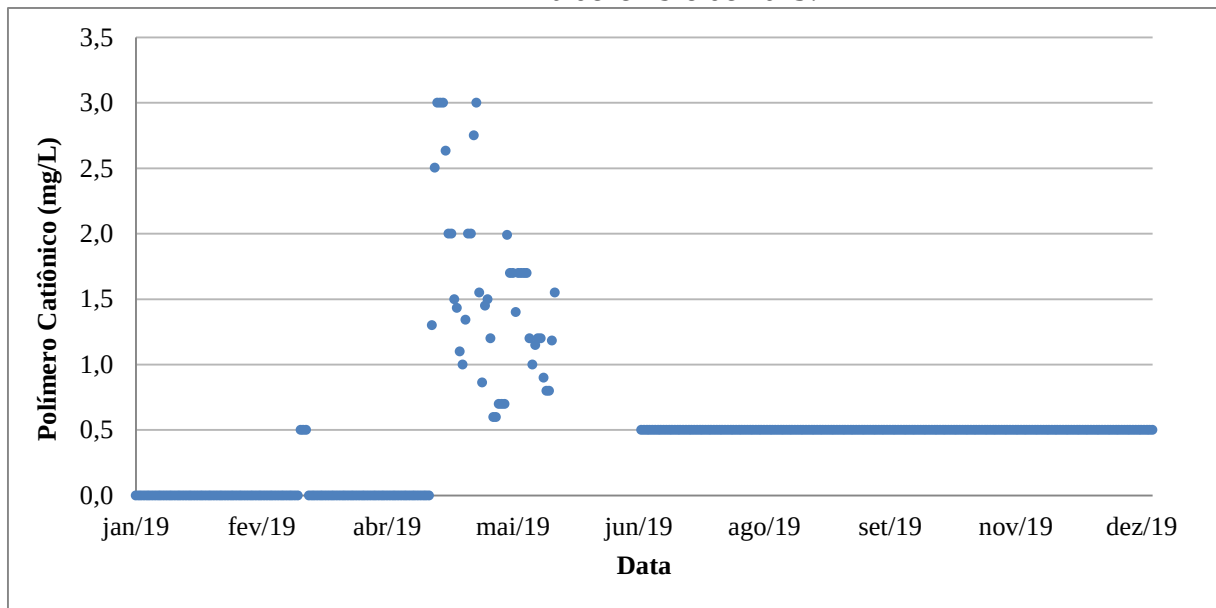
Fonte: Autoria própria (2021).

Da mesma forma, quando são avaliadas as concentrações de polímeros catiônico e aniônico (GRÁFICO 6 e GRÁFICO 7), observa-se que apenas os meses de abril e maio apresentam alterações significativas. O polímero catiônico não foi aplicado nos meses de janeiro a abril, mantendo-se com aplicação constante de 0,5 mg/L nos meses de julho a dezembro. Enquanto o polímero aniônico foi aplicado durante todo o ano, com concentração constante de 0,5 mg/L nos meses não chuvosos.

Em estudo realizado por Delmonico et al. (2020), avaliando o uso de polímeros auxiliares aplicados junto ao coagulante PAC no tratamento convencional da ETA-Pirapó, comprovou-se que a utilização dos polímeros catiônico e aniônico como auxiliares de floculação proporcionou uma maior eficiência no processo de tratamento da água, sendo superior ao uso apenas do coagulante PAC. Os autores avaliaram diferentes concentrações de água bruta, desde valores mais baixos, característicos de estiagem (25 uT), até valores mais

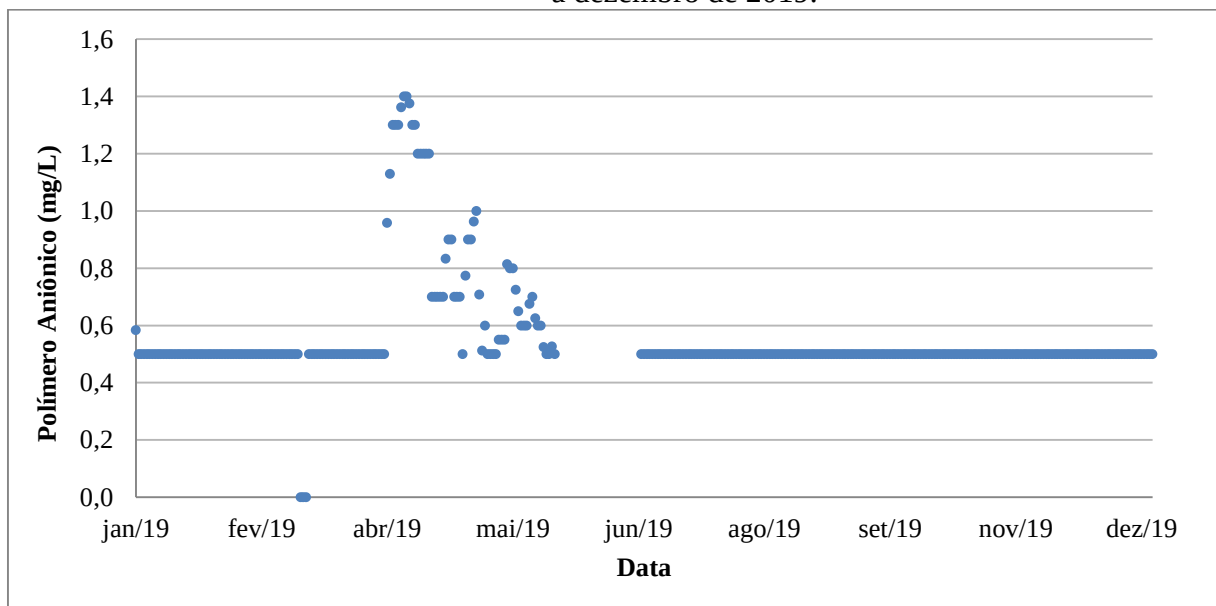
altos, característicos de períodos chuvosos (acima de 900 uT), e, para um breve período de operação em escala na ETA-Pirapó, o uso de PAC + polímero auxiliar permitiu que a água filtrada atendesse plenamente os padrões de potabilidade (0,50 NTU - Portaria GM/MS N°888). Além disso, aferiram as concentrações dos polímeros para dosagem ótima, e o intervalo de doses de 0,08 a 0,50 mg/L mostrou os melhores resultados em termos de turbidez da água decantada.

Gráfico 6 – Perfil de dosagem do polímero catiônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 7 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2019.



Fonte: Autoria própria (2021).

As informações nas planilhas eletrônicas fornecidas pelo SAAE-Sobral sobre as concentrações adotadas de pré-oxidante se encontram incompletas, tornando inviável a construção de um gráfico de dispersão. No entanto, a partir de visitas realizadas à estação de tratamento e diálogo com operadores, obtiveram-se informações de que as concentrações usuais de pré-oxidante estão em torno de 5mg/L à 10 mg/L, a depender das características da água e da sazonalidade.

Com base nos gráficos expostos acima, é possível identificar dois cenários operacionais para ETA Dom Expedito. No Cenário I, os parâmetros de qualidade abordados e as dosagens de produtos químicos apresentam resultados relativamente baixos e constantes ao longo da maior parte do período analisado. A Tabela 14 resume a análise descritiva da qualidade das águas do rio Acaraú e das concentrações de produtos químicos aplicados pela estação para este cenário.

Tabela 14 – Medidas estatísticas dos produtos químicos dosados em comparação com as características de qualidade do manancial Acaraú no Cenário I.

Parâmetros	Valor médio	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
Turbidez Bruta	4,17	3,13	1,13	24,18
Cor Aparente	35,08	20,53	15,00	172,50
PAC	33,30	3,01	28,00	35,00
P. Catiônico	0,38	0,21	0,00	0,50
P. Aniônico	0,50	0,01	0,50	0,58

Fonte: Autoria própria (2021).

No Cenário II, os parâmetros de qualidade e as dosagens de produtos químicos apresentam valores relativamente altos e com grandes variações, correspondendo aos meses de março à junho, quadro chuvoso da região (TABELA 15).

Tabela 15 – Medidas estatísticas dos produtos químicos dosados em comparação com as características de qualidade do manancial Acaraú no Cenário II.

Parâmetros	Valor médio	Desvio Padrão	Valor Mínimo	Valor Máximo
Turbidez Bruta	20,49	21,44	1,26	152,22
Cor Aparente	156,14	132,99	14,50	650,00
PAC	75,76	34,64	28,00	170,00
P, Catiônico	0,78	0,91	0,00	3,00
P, Aniônico	0,70	0,31	0,00	1,40

Fonte: Autoria própria (2021).

Como indicado por Almeida et al. (2004), o primeiro cenário representa uma realidade favorável ao tratamento, pois teoricamente necessita de uma quantidade reduzida de produtos

químicos para atender aos padrões de potabilidade exigidos pela Portaria GM/MS N°888. É no segundo cenário que se mostra necessário a otimização dos processos de clarificação das águas pela ETA Dom Expedito, visto que neste período os gastos com produtos químicos e os riscos de contaminação do manancial são elevados, caracterizando a condição mais desfavorável para o tratamento.

5.2 Ensaio de caracterização e de coagulação

Seguindo a metodologia adotada por Menezes (2018) e exposta no capítulo anterior, a avaliação dos cenários operacionais da estação de tratamento mostrou-se importante na caracterização das dosagens de produtos químicos utilizados no processo de clarificação. Em seu trabalho, o autor avaliou as características das águas nos dois cenários identificados, determinando as dosagens de Sulfato de Alumínio e Tanfloc em cada quadro.

Para o presente trabalho, também foram realizados ensaios nos Cenários I e II identificados para estação de tratamento abordada, no entanto, utilizando PAC como agente coagulante. As águas do ensaio preliminar (Ensaio 1) foram utilizadas para avaliar as condições do Cenário I, enquanto as águas dos ensaios 2 e 3 foram utilizadas para avaliar as condições do Cenário II.

5.2.1 Ensaio de caracterização da água dos mananciais

No período de janeiro de 2020, em que foram realizadas as primeiras visitas a estação de tratamento de Sobral, os dados necessários à caracterização do manancial e da operação da ETA Dom Expedito não estavam disponíveis. Por isto, optou-se pela realização de ensaios preliminares que permitiram compreender, no contexto geral, as influências de cada produto químico no processo de clarificação e avaliar as dosagens aplicadas nas condições do Cenário I. Após obtenção dos dados necessários à caracterização da operação na ETA e da qualidade do manancial, foram realizadas novas coletas que permitiram estabelecer condições de agitações e de tempo de agitação próximas as existentes na estação de tratamento. Estas coletas foram realizadas no período de março de 2020 e possibilitaram a realização adequada de mais dois ensaios enquadrados no Cenário II.

A Tabela 16 apresenta os parâmetros de qualidade da água bruta do rio Acaraú para um dos ensaios preliminares realizados no início do mês de janeiro e para os dois ensaios realizados no início do mês de março.

Tabela 16 – Parâmetros de qualidade das amostras de água bruta do rio Acaraú.

Características da água bruta	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Turbidez (uT)	40,0	60,1	42,7
Cor aparente (uH)	130	250	300
pH	7,50	7,37	7,25
Temperatura (°C)	24,7	28,0	25,7

Fonte: Autoria própria (2021).

As amostras de água do rio Acaraú coletadas para os três ensaios apresentaram turbidez e cor elevadas, quando comparadas aos dados coletados no mesmo período no ano anterior (meses de janeiro a março de 2019), principalmente no que diz respeito às características das águas brutas coletadas para o ensaio preliminar. O pH apresentou valor próximo ao neutro, correspondendo aos dados observados anteriormente. E a temperatura das amostras apresentou valor médio equivalente às temperaturas de rios do nordeste brasileiro.

A seguir serão apresentados os parâmetros operacionais adotados para os três ensaios realizados com as águas do manancial Acaraú. Primeiramente, serão apresentados os parâmetros operacionais adotados para o ensaio preliminar. Depois, serão discutidos os resultados obtidos com base nos dados de operação da ETA Dom Expedito e que permitiram modelar as condições de agitações e tempo de agitação dos ensaios 2 e 3.

5.2.2 Parâmetros operacionais dos ensaios de bancada

No período de janeiro de 2020, quando foram realizados os ensaios preliminares, ainda não havia sido disponibilizado os dados de vazão de captação e qualidade das águas do rio Acaraú, nem das dosagens de produtos químicos aplicados pela autarquia, por isso, adotaram-se os parâmetros operacionais realizados no laboratório do SAAE. A Tabela 17 apresenta um resumo das condições e tempo de agitação utilizados no Ensaio 1 (preliminar).

Tabela 17 – Parâmetros utilizados no Ensaio 1.

Etapas	TDH (min)	G (s ⁻¹)	Número de rotação (rpm)
Coagulação	3	225	120
Floculação	15	70	50
Decantação	3	0	0

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos projetos arquitetônicos fornecidos pelo SAAE, foram determinados os volumes de cada câmara no processo de clarificação da água e, de posse do valor médio da vazão de captação da unidade de tratamento, estimados os tempos de residência para os ensaios de tratabilidade das águas.

Na ETA Dom Expedito, o volume útil do canal na mistura rápida é de 5,4 m³, assim, admitindo-se que sua vazão média de captação média de 347 m³/h, o tempo de residência nesta etapa será em média de 15,6 segundos. O canal de floculação possui o volume útil de 234,60 m³, o tempo de residência no floculador será de 40,60 minutos. Por fim, o volume do tanque de sedimentação é 104,65 m³, tendo em vista que existem dois decantadores, o tempo de residência em cada decantador será de 18,09 minutos.

Com o intuito de avaliar a importância dos auxiliares de coagulação na formação de flocos e na redução do tempo de detenção, decidiu-se por escolher um tempo de residência reduzido para etapa de decantação, 3 min. Baseado em ensaios preliminares, que mostraram percentuais de remoção satisfatórios, admitiu-se que grande parte dos flocos sedimenta neste intervalo de tempo.

Na etapa de coagulação, calculou-se o gradiente de velocidade gerado pelo ressalto hidráulico na calha Parshall. Para os cálculos expostos no ANEXO B, o gradiente de velocidade na calha Parshall resultou em 1037 s⁻¹. Optou-se por adotar um valor aproximado para simular os ensaios no equipamento de jar test, 1100 s⁻¹. O canal de floculação da ETA Dom Expedito foi projetado para atender as condições de agitações recomendadas pela NBR 12216 (1992), que prevê valores entre 70 s⁻¹ e 10 s⁻¹, escalonado em ordem decrescente.

A Tabela 18 apresenta um resumo dos parâmetros utilizados nos ensaios de bancada para ETA Dom Expedito (ensaios 2 e 3), com valores arredondados de tempo de residência e gradiente de velocidade. Para este último, os valores são fornecidos em s⁻¹ e em rpm (unidade mensurada no equipamento de *jar test*).

Tabela 18 – Parâmetros utilizados nos ensaios 2 e 3.

Etapas	Aplicação de produtos	TDH	G (s ⁻¹)	G (rpm)
Coagulação	<i>Coagulante primário</i>	5 seg	1100	480
	<i>Polímero catiônico</i>	15 seg	557	260
Floculação	-	10 min	70	48
	-	20 min	50	33
	<i>Polímero aniônico</i>	10 min	20	23
Decantação		3 min	-	-

Fonte: Autoria própria (2021).

Na realização dos ensaios de bancada, primeiramente, promoveu-se uma agitação mecânica de 120 rpm em que se aplicou o agente oxidante, agitado durante 60 segundos. Em seguida, iniciou-se a etapa de coagulação, com aplicação do coagulante primário em gradiente de velocidade de 480 rpm e, após 5 segundos, adicionou-se o polímero catiônico, em agitação mecânica de 260 rpm por 15 segundos. Na etapa de floculação, o equipamento de *jar test* foi programado para promover agitação mecânica escalonada e decrescente de $70s^{-1}$, $50s^{-1}$ e $20s^{-1}$, por períodos de 10 min, 20 min e 10 min, respectivamente.

5.3 Planejamento de experimentos

A determinação das concentrações de produtos químicos a serem aplicadas nos ensaios de bancada foi baseada nas características físico-químicas do manancial em estudo. A partir dos perfis de dosagens expostos na seção 5.1.3, constatou-se que, em grande parte do ano, as concentrações dos produtos mantêm-se constantes, sendo alteradas apenas nos períodos de chuvas intensas, correspondendo aos meses de turbidez e cor aparente elevada (março a maio). Dessa forma, para cada ensaio, foram utilizados intervalos de dosagens equivalentes ao cenário em que estão enquadrados.

5.3.1 Análise estatística do Ensaio 1 (preliminar)

A partir das características do manancial Acaraú, determinadas no período de janeiro e descritas na Tabela 16 da seção 5.2.1, definiu-se as seguintes dosagens dos produtos químicos a serem utilizadas no ensaio preliminar, Ensaio 1, apresentadas na Tabela 19 a seguir.

Tabela 19 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 1 (fatorial 2^4).

Produtos químicos	Intervalo de dosagens (mg/L)		
	-1	0	1
Pré-oxidante	0,00	5,00	10,00
PAC	20,00	35,00	50,00
P. Catiônico	0,00	0,50	1,00
P. Aniônico	0,00	0,15	0,30

Fonte: Autoria própria (2021).

O Ensaio 1 foi realizado fora do quadro chuvoso da região, desta forma, optou-se por adotar um intervalo de dosagem que atendesse a demanda prevista para o Cenário I, exceto para

o polímero aniônico em que se adotou uma dosagem máxima de 0,30 mg/L. A Tabela 20 retrata os resultados dos ensaios para remoção de turbidez e cor aparente das águas do rio Acaraú, apresentando em destaque a configuração das combinações de tratamento em que foram obtidos os melhores percentuais de remoção.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 1 (fatorial 2⁴).

	Valores em mg/L				Água Bruta		Água Tratada		Remoção (%)	
	PAC	Catiônico	Aniônico	Oxidante	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
1	35,00	0,50	0,15	5,00	40,00	130,00	9,86	40,00	75,35	69,23
2	50,00	0,00	0,30	10,00	40,00	130,00	3,30	17,50	91,75	86,54
3	50,00	0,00	0,30	0,00	40,00	130,00	2,67	20,00	93,33	84,62
4	20,00	0,00	0,00	10,00	40,00	130,00	39,30	100,00	1,75	23,08
5	50,00	0,00	0,00	10,00	40,00	130,00	3,51	20,00	91,23	84,62
6	20,00	0,00	0,00	0,00	40,00	130,00	39,60	125,00	1,00	3,85
7	20,00	1,00	0,00	10,00	40,00	130,00	37,10	100,00	7,25	23,08
8	20,00	1,00	0,30	0,00	40,00	130,00	35,60	100,00	11,00	23,08
9	50,00	0,00	0,00	0,00	40,00	130,00	2,30	25,00	94,25	80,77
10	50,00	1,00	0,30	0,00	40,00	130,00	1,56	20,00	96,10	84,62
11	20,00	0,00	0,30	10,00	40,00	130,00	38,00	125,00	5,00	3,85
12	20,00	1,00	0,30	10,00	40,00	130,00	37,10	100,00	7,25	23,08
13	50,00	1,00	0,00	10,00	40,00	130,00	2,62	20,00	93,45	84,62
14	50,00	1,00	0,00	0,00	40,00	130,00	1,83	20,00	95,43	84,62
15	20,00	0,00	0,30	0,00	40,00	130,00	39,30	125,00	1,75	3,85
16	50,00	1,00	0,30	10,00	40,00	130,00	2,56	20,00	93,60	84,62
17	20,00	1,00	0,00	0,00	40,00	130,00	37,10	110,00	7,25	15,38
18	35,00	0,50	0,15	5,00	40,00	130,00	13,60	60,00	66,00	53,85

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos resultados expostos, constata-se que os intervalos de dosagens se apresentaram satisfatórios, obtendo percentuais de remoção de turbidez de até 96% e, de remoção de cor aparente, de até 86%. Ainda é possível observar que para os valores máximos de dosagem de PAC, os experimentos apresentaram remoção considerável de cor e turbidez, enquanto que, nas dosagens mínimas, os percentuais são quase nulos.

Nos próximos tópicos, serão discutidas as análises estatísticas de cada variável resposta observada (remoção de turbidez e de cor aparente). Primeiramente, serão realizadas análises gráficas sobre os efeitos principais e de interação entre os fatores, permitindo identificar de forma visual os parâmetros que contribuem significativamente nas variações da variável resposta. Em seguida, será realizada a análise da regressão, estimando quantitativamente os efeitos de cada fator e seus erros padrão, obtendo uma expressão matemática que correlaciona

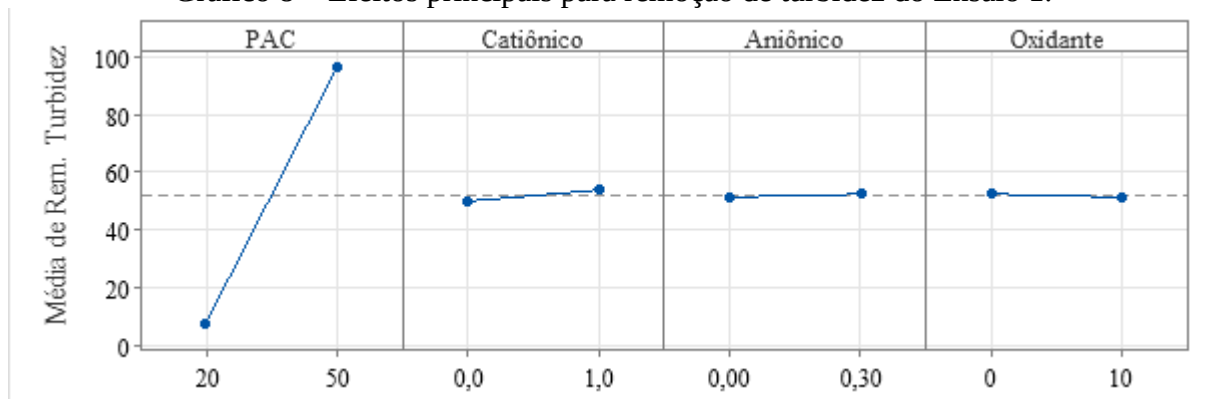
às dosagens de produtos químicos e as remoções de cor aparente e turbidez das águas brutas. Por fim, realizada a análise de variância (ANOVA) que permitirá determinar a significância dos parâmetros do modelo de regressão no processo de clarificação das águas do rio Acaraú.

5.3.1.1 Remoção de Turbidez

O maior percentual de remoção de turbidez, 96,10%, foi observado no experimento 10, e este foi operado sob as condições: (a) PAC: 50,0 mg/L; (b) polímero catiônico: 1,0 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,30 mg/L; e (d) pré-oxidante: sem aplicação. Enquanto que o menor percentual de remoção, 1,0% (experimento 6), foi obtido quando aplicado somente o coagulante PAC na dosagem de 20 mg/L.

Com base nos resultados expostos acima, foram determinados os efeitos principais dos fatores, apresentados a seguir no Gráfico 8. A partir da análise gráfica, observa-se que o fator que exerce maior influência na remoção de turbidez do manancial Acaraú é a dosagem do coagulante PAC, pois este apresenta maior inclinação de reta. Além disso, constata-se que este efeito é positivo no percentual de remoção.

Gráfico 8 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 1.



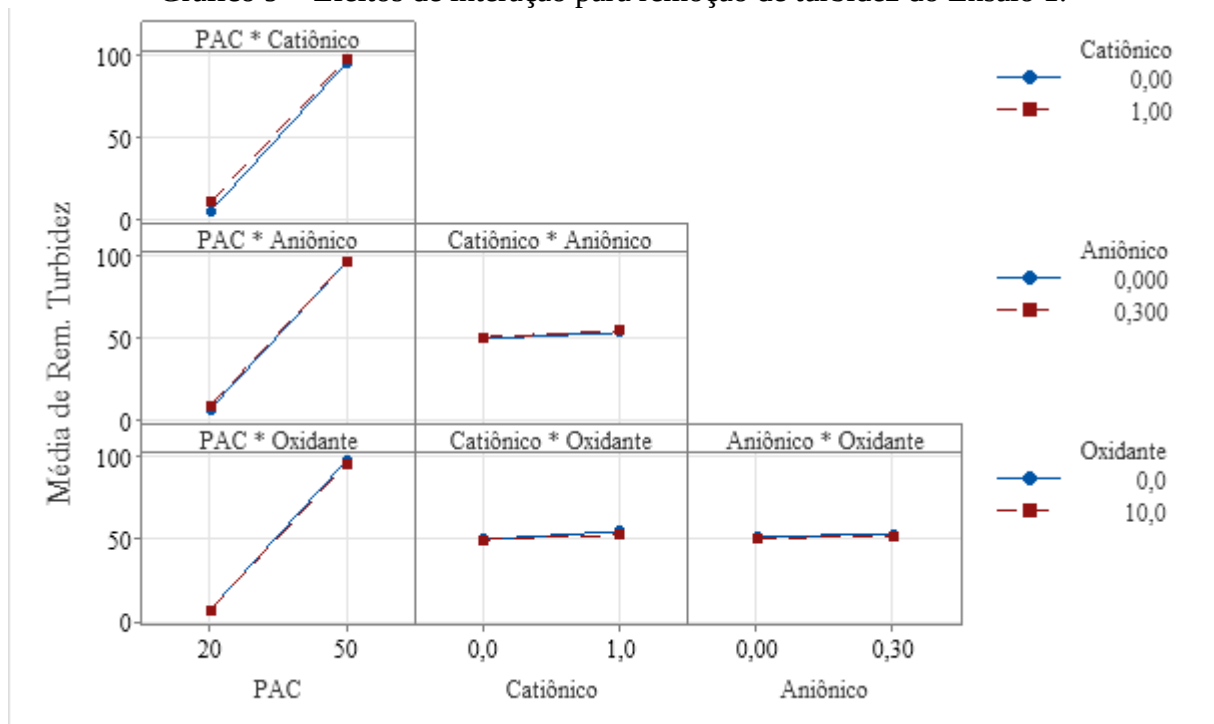
Fonte: Autoria própria (2021).

Para amostras de água coletada para o Ensaio 1, a dosagem usualmente aplicada do coagulante PAC pela ETA Dom Expedito no período de janeiro (35 mg/L) apresentou percentual de remoção de turbidez máximo de 75%, como identificado no experimento 1. Acredita-se que este valor reduzido se deva a baixa dosagem aplicada de polímero aniônico (apenas 0,15 mg/L), comparada as dosagens aplicadas no ano de 2019 (mínimo de 0,50 mg/L). Ainda é possível observar que, para dosagens muito elevadas ou muito baixas de coagulante PAC, o uso dos polímeros tem pouca influência na remoção de turbidez. Dessa forma, para

identificar a influência dos auxiliares de coagulação/floculação seria necessário aumentar as dosagens desses produtos na concentração de 35 mg/L de PAC.

O Gráfico 9 apresenta os efeitos de interação entre os fatores no percentual de remoção de turbidez das águas do manancial Acaraú. Percebe-se que não há efeito de interação significativo entre os parâmetros. Isto é identificado quando observamos que seus gráficos não se interceptam, indicando que não há mudança do efeito de um fator em função da variação de nível de outro fator.

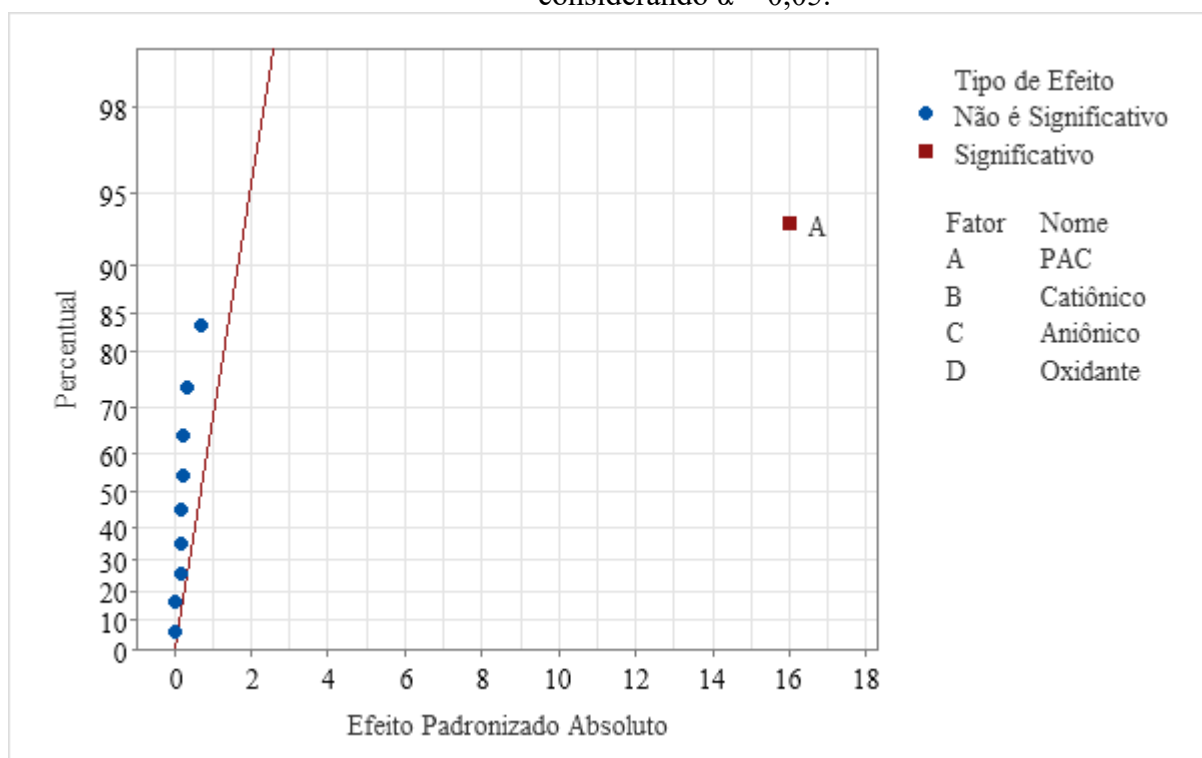
Gráfico 9 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 1.



Fonte: Autoria própria (2021).

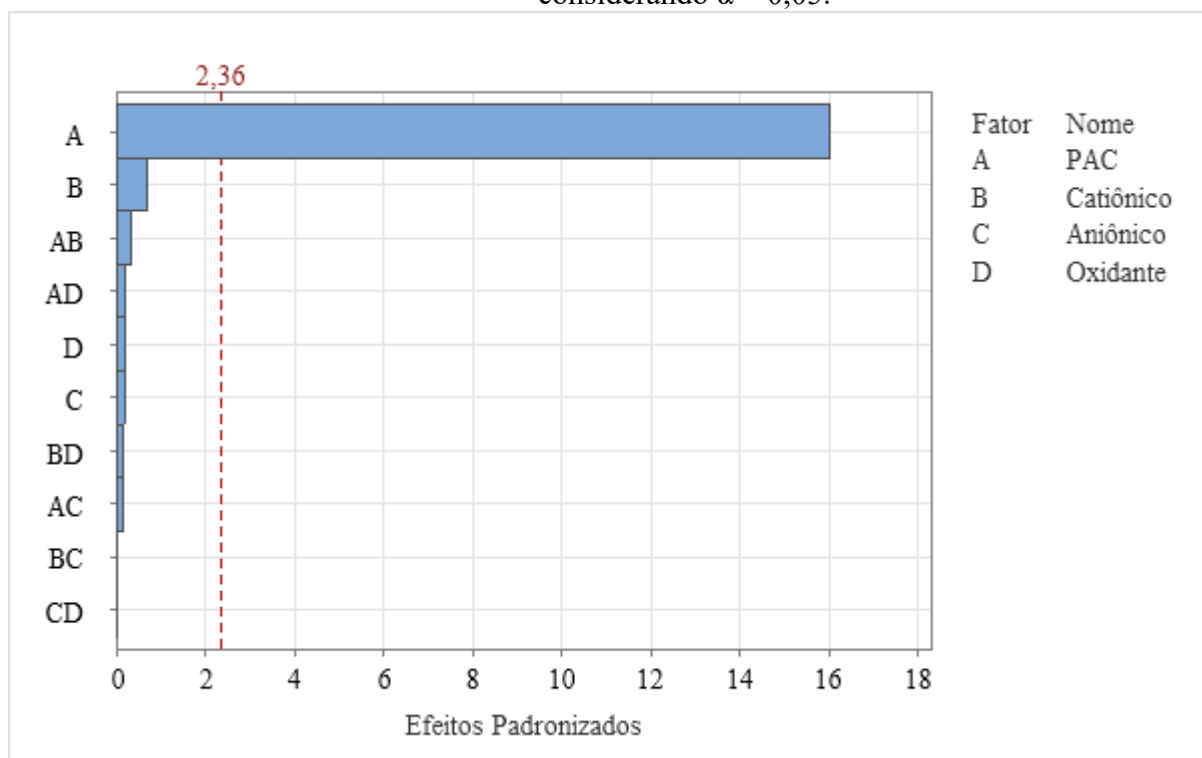
Outra forma de observar os efeitos de cada parâmetro na variável resposta é por meio do gráfico *half* normal e de Pareto (GRÁFICO 10; GRÁFICO 11). O gráfico de probabilidade *half* normal apresenta os valores absolutos dos efeitos padronizados pela estatística *t*. Os pontos são apresentados em relação a uma linha de ajuste de distribuição, que testa a hipótese nula de que o efeito do fator é zero. Dessa forma, os efeitos que estiverem mais afastados em relação a este eixo são estatisticamente mais significativos. A distância necessária para que os pontos possam ser considerados estatisticamente significativos depende do nível de confiança adotado.

Gráfico 10 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 11 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim, como o gráfico *half* normal, o gráfico de Pareto mostra os valores absolutos dos efeitos padronizados pela estatística *t* e apresenta uma linha de referência para a significância estatística que depende do nível de confiança escolhido. No gráfico de Pareto, as barras são ordenadas em ordem decrescente de efeito, sendo aquelas que cruzam a linha de referência consideradas estatisticamente significativas. Ambos os gráficos indicam que a concentração do coagulante PAC teve um efeito significativo na remoção de turbidez das amostras do ensaio preliminar. Esses dados comprovam que o aumento da dosagem de PAC de 20 mg/L para 50 mg/L favoreceu a remoção das partículas em suspensão.

A Tabela 21 mostra os coeficientes de regressão codificados de cada termo avaliado na realização do Ensaio 1, considerando os percentuais de remoção de turbidez. Para a análise de regressão linear, foram considerados os efeitos de interação entre as variáveis e ressaltados os efeitos significativos, considerando um nível de confiança de 95%.

Tabela 21 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 1.

Termo	Efeito	Coeficiente	Erro padrão	<i>t</i>	Valor P (> t)	
Constante		51,82	2,60	19,91	2,020E-07	***
PAC	88,36	44,18	2,76	16,00	9,030E-07	***
Catiônico	3,91	1,95	2,76	0,71	0,502	
Aniônico	1,02	0,51	2,76	0,19	0,858	
Oxidante	-1,10	-0,55	2,76	-0,20	0,847	
PAC:Catiônico	-1,90	-0,95	2,76	-0,34	0,740	
PAC:Aniônico	-0,92	-0,46	2,76	-0,17	0,873	
PAC:Oxidante	-1,17	-0,58	2,76	-0,21	0,839	
Catiônico:Aniônico	0,12	0,06	2,76	0,02	0,983	
Catiônico:Oxidante	-0,95	-0,48	2,76	-0,17	0,868	
Aniônico:Oxidante	-0,04	-0,02	2,76	-0,01	0,994	
Significância:		0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1				

Fonte: Autoria própria (2021).

Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, é possível escrever um modelo empírico para determinar o percentual de remoção de turbidez. A Equação (5) a seguir expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

$$\begin{aligned}
 \text{Rem. Turbidez (\%)} &= 51,82 + 44,18 X_1 + 1,95 X_2 + 0,51 X_3 - 0,55 X_4 \\
 &- 0,95 X_1 X_2 - 0,46 X_1 X_3 - 0,58 X_1 X_4 + 0,06 X_2 X_3 \\
 &- 0,48 X_2 X_4 - 0,02 X_3 X_4
 \end{aligned} \tag{5}$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

A Tabela 22 apresenta a análise de variância para remoção de turbidez do manancial Acaraú. A partir desta análise, é possível quantificar a parcela da variabilidade total dos resultados que é devida a cada fator e à interação entre eles.

Tabela 22 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 1.

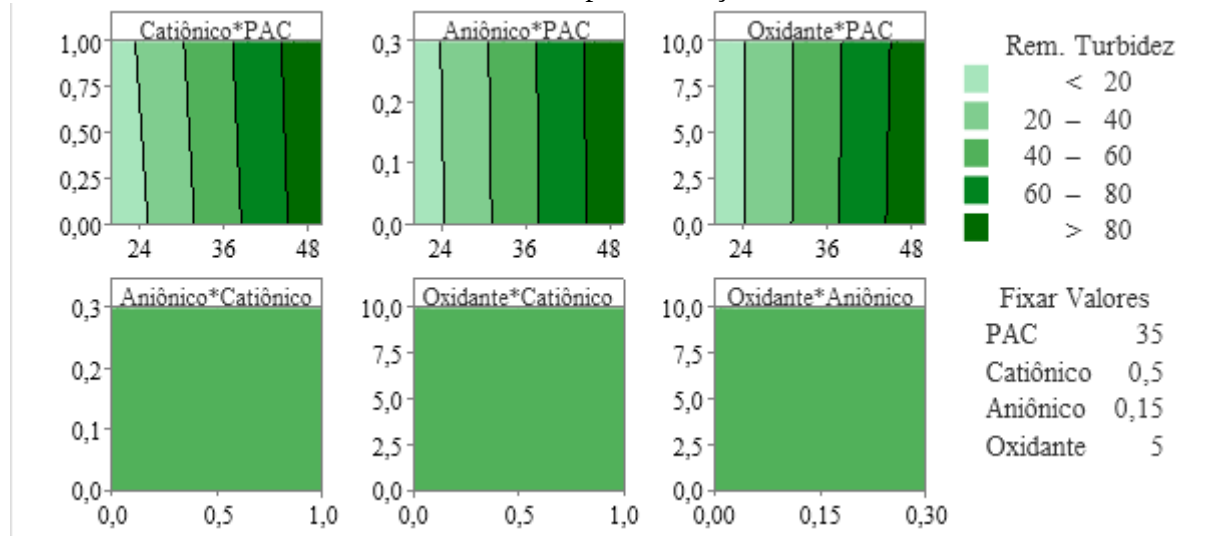
	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	F	Valor $P(>F)$	
Modelo	10	31326,67	3132,67	25,694	1,41E-04	***
Linear	4	31299,69	7824,92	64,180	1,34E-05	***
PAC	1	31229,52	31229,52	256,143	9,03E-07	***
Catiônico	1	61,13	61,13	0,501	0,502	
Aniônico	1	4,18	4,18	0,034	0,858	
Oxidante	1	4,87	4,87	0,040	0,847	
Interações de 2 fatores	6	26,98	4,50	0,037	1,000	
PAC:Catiônico	1	14,49	14,49	0,119	0,740	
PAC:Aniônico	1	3,35	3,35	0,028	0,873	
PAC:Oxidante	1	5,43	5,43	0,045	0,839	
Catiônico:Aniônico	1	0,06	0,06	0,000	0,983	
Catiônico:Oxidante	1	3,63	3,63	0,030	0,868	
Aniônico:Oxidante	1	6,60E-03	6,60E-03	5,42E-05	0,994	
Erro	7	853,45	121,92			
Falta de ajuste	6	809,74	134,96	3,09	0,410	
Erro Puro	1	43,71	43,71			
Total	17	32180,12				
Significância:	0 '****'	0,001 '***'	0,01 '*'	0,05 '.'	0,1 ''	1
	R^2 : 97,35%		R^2 ajustado: 93,56%			

Fonte: Autoria própria (2021).

O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 97,35% e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 96,56%, indicando um bom ajuste do modelo. Para confirmar a significância dos parâmetros do modelo pela análise ANOVA, realizou-se o teste F . Para que o modelo seja considerado estatisticamente significativo, $F_{\text{modelo/resíduos}} > F_{\text{tab}}$. Dessa forma, o valor de F e os valores de P apresentados na coluna ao lado, indicam o nível de significância da regressão. Sendo o valor P menor que 0,05, podemos considerar que há uma regressão significativa.

Considerando que os dados experimentais estão bem representados pelo modelo de regressão, podemos utiliza-lo para fins preditivos dentro do domínio dos fatores estudados. Dessa forma, é possível construir gráficos e curvas de contorno com os dados experimentais estimados. Os maiores percentuais de remoção de turbidez são atingidos para dosagens próximas de 50 mg/L, como mostrado no Gráfico 12 a seguir.

Gráfico 12 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 1.



Fonte: Autoria própria (2021).

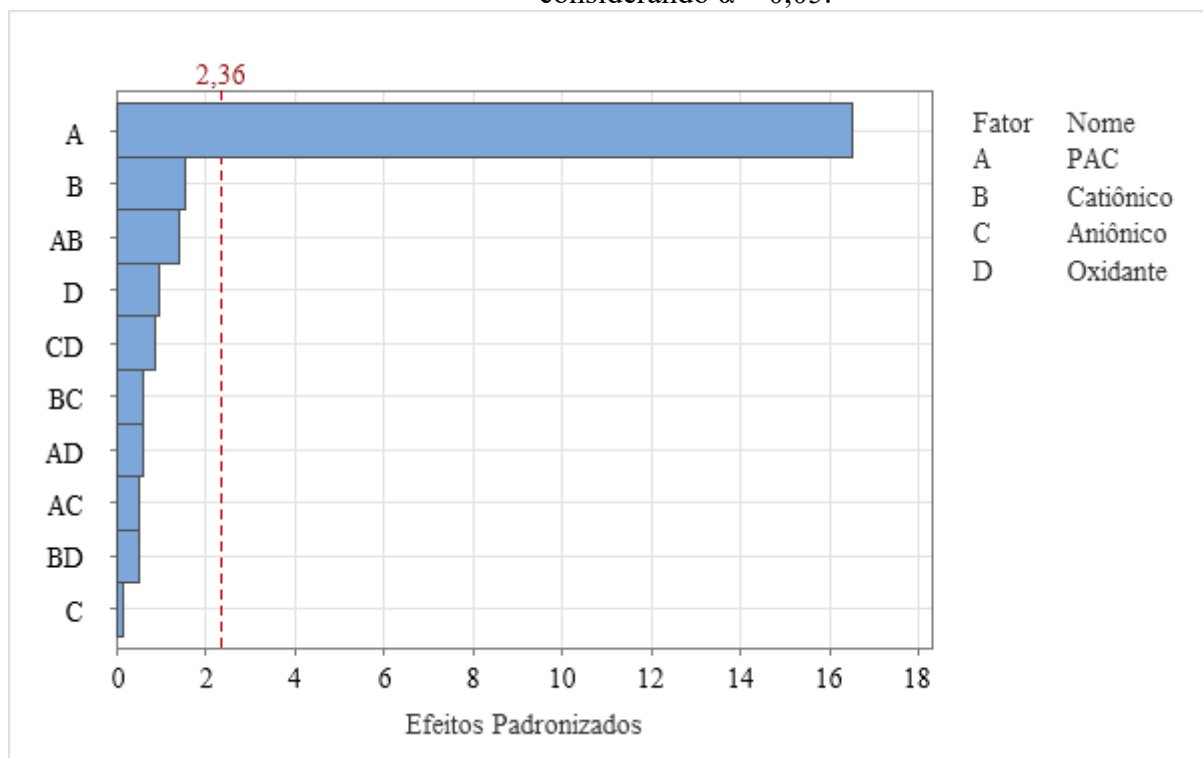
5.3.1.2 Remoção de Cor aparente

Para variável resposta cor aparente, o experimento 2 apresentou o maior percentual de remoção, 86,54%, e foi operado sob as condições: (a) PAC: 50 mg/L; (b) polímero catiônico: 0,0 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,30 mg/L; e (d) pré-oxidante: 10,0 mg/L. E os experimentos 6, 11 e 15 apresentam o pior percentual de remoção de cor aparente, 3,85%. Ambos possuem aplicação de 20 mg/L de PAC, e não tem aplicação de polímero catiônico. Estes ensaios diferem entre si pelas concentrações aplicadas de polímero aniônico e de oxidante. Este resultado indica que, independente da aplicação de outros produtos, a baixas concentrações de PAC não há remoção adequada das impurezas.

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e *half normal*, assim como, as tabelas geradas pela regressão linear e pela análise de variância estão apresentadas no APÊNDICE G. A partir da análise destes e do diagrama de Pareto (GRÁFICO 13), pode-se concluir que, entre todos os fatores, o coagulante PAC foi o único que apresentou efeito significativo sobre a remoção de cor aparente. Os efeitos do polímero catiônico e da interação

entre este e o coagulante PAC são maiores na variável cor aparente do que na variável turbidez. Ainda assim, nenhum destes é estatisticamente significativo.

Gráfico 13 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Assim como para remoção de turbidez, a dosagem usualmente aplicada do coagulante PAC pela ETA Dom Expedito no período de janeiro (35 mg/L) apresentou percentual de remoção de cor aparente máximo de 69%, como identificado no experimento 1. Acredita-se que este valor reduzido se deva a baixa dosagem aplicada de polímero aniônico (apenas 0,15 mg/L), comparada as dosagens aplicadas no ano de 2019 (mínimo de 0,50 mg/L). Dessa forma, para identificar a influência dos auxiliares de coagulação/floculação seria necessário aumentar as dosagens desses produtos na concentração de 35 mg/L de PAC.

Comparando os percentuais de remoção dos experimentos 2 e 3, sem aplicação de pré-oxidante e com aplicação de 10 mg/L, respectivamente, constatou-se que a aplicação do hipocloreto de sódio apresentou pequena influência na remoção de cor aparente.

A Tabela 31 do APÊNDICE G apresenta as estimativas do efeitos da análise do modelo de regressão. Observando o modelo de regressão, tem-se que as dosagens de PAC também atuam positivamente na remoção de cor aparente para as águas do manancial Acaraú. Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, escreveu-se um modelo

empírico que determina o percentual de remoção de cor aparente nas condições em que foram executadas o Ensaio 1. A Equação (6) a seguir expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

$$\begin{aligned}
 \text{Rem. Cor aparente (\%)} &= 50,96 + 34,74 X_1 + 3,25 X_2 - 0,36 X_3 + 2,04 X_4 \\
 &- 3,0 X_1 X_2 + 1,08 X_1 X_3 - 1,32 X_1 X_4 + 1,32 X_2 X_3 \\
 &- 1,08 X_2 X_4 - 1,80 X_3 X_4
 \end{aligned} \quad (6)$$

Onde: X_1 = PAC);

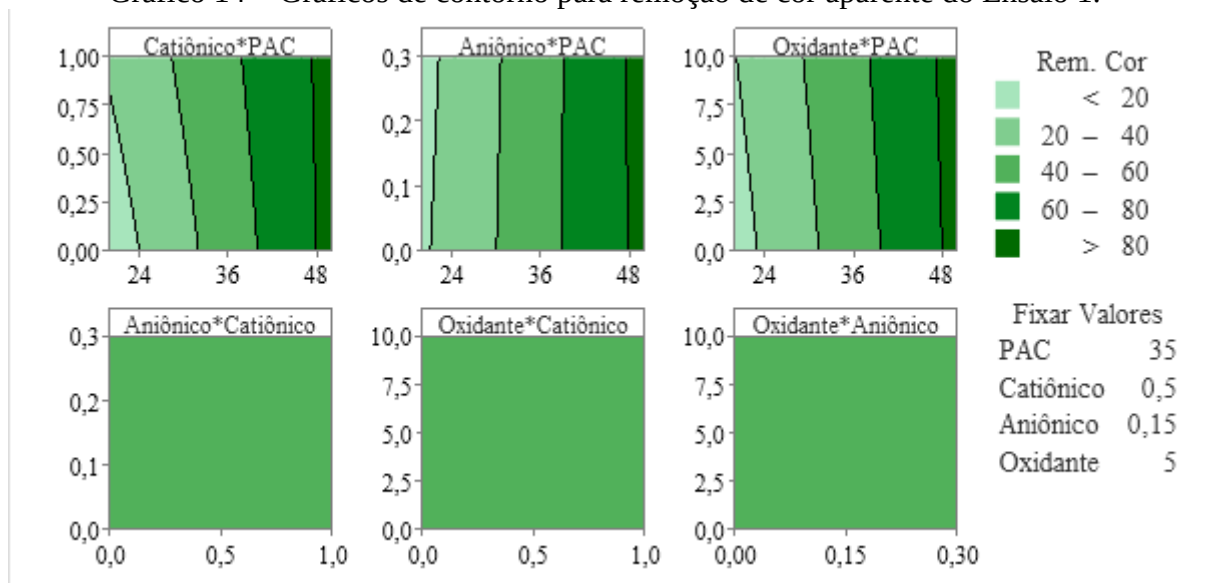
X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 97,56%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 94,08% indicando também um bom ajuste do modelo para remoção de cor aparente. A partir da análise da Tabela 32 presente no APÊNDICE G, pode-se considerar que o modelo é estatisticamente significativo e construir os gráficos e curvas de contorno com os dados experimentais estimados. Os maiores percentuais de remoção de cor aparente também foram atingidos para dosagens próximas de 50 mg/L, como mostrado no Gráfico 14 a seguir.

Gráfico 14 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 1.



Fonte: Autoria própria (2021).

5.3.2 Análise estatística do Ensaio 2

A Tabela 23 apresenta os intervalos de dosagens adotados para realização do Ensaio 2. As características das águas do rio Acaraú no período em que o ensaio foi executado, março de 2020, estão expostas na Tabela 16 da seção 5.2.1. Optou-se por escolher, como pontos centrais, as dosagens que estavam sendo aplicadas na ETA Dom Expedito no momento da coleta das amostras, e abranger o intervalo das concentrações de PAC aos limites mínimos e máximos observados para o Cenário II e apresentados na Tabela 15.

Tabela 23 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 2 (DCCR).

Produtos químicos	Intervalos de dosagens (mg/L)				
	-2,1	-1	0	1	2,1
Pré-oxidante	0,00	4,00	8,00	12,00	16,00
PAC	72,00	100,00	125,00	150,00	178,00
P. Catiônico	0,00	0,50	1,00	1,50	2,00
P. Aniônico	0,00	0,30	0,50	0,70	1,00

Fonte: Autoria própria (2021).

A configuração das combinações de tratamento, assim como os percentuais de remoção de turbidez e cor aparente estão expostos na Tabela 24, com destaque nos experimentos que apresentaram os melhores resultados.

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 2 (DCCR).

(continua)

	Valores em mg/L				Água Bruta		Água Tratada		Remoção (%)	
	PAC	Catiônico	Aniônico	Oxidante	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
1	150,00	1,50	0,70	4,00	60,10	250,00	1,37	30,00	97,72	88,00
2	125,00	2,00	0,50	8,00	60,10	250,00	1,19	25,00	98,02	90,00
3	100,00	0,50	0,30	12,00	60,10	250,00	0,76	17,50	98,74	93,00
4	125,00	1,00	0,50	0,00	60,10	250,00	0,83	20,00	98,62	92,00
5	72,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	0,59	20,00	99,02	92,00
6	125,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	0,82	17,50	98,64	93,00
7	100,00	1,50	0,70	4,00	60,10	250,00	0,95	17,50	98,42	93,00
8	125,00	0,00	0,50	8,00	60,10	250,00	1,19	15,00	98,02	94,00
9	125,00	1,00	0,00	8,00	60,10	250,00	0,65	17,50	98,92	93,00
10	150,00	1,50	0,30	12,00	60,10	250,00	1,18	17,50	98,04	93,00
11	150,00	0,50	0,70	4,00	60,10	250,00	1,43	20,00	97,62	92,00
12	150,00	1,50	0,30	4,00	60,10	250,00	1,44	25,00	97,60	90,00
13	178,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	12,10	70,00	79,87	72,00

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 24 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 2 (DCCR).

(continuação)

Valores em mg/L					Água Bruta		Água Tratada		Remoção (%)	
	PAC	Catiônico	Aniônico	Oxidante	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
14	125,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	0,51	15,00	99,15	94,00
15	125,00	1,00	1,00	8,00	60,10	250,00	0,70	17,50	98,84	93,00
16	150,00	0,50	0,30	4,00	60,10	250,00	1,83	20,00	96,96	92,00
17	100,00	1,50	0,30	12,00	60,10	250,00	0,43	17,50	99,28	93,00
18	150,00	0,50	0,30	12,00	60,10	250,00	1,70	17,50	97,17	93,00
19	100,00	1,50	0,70	12,00	60,10	250,00	0,56	20,00	99,07	92,00
20	125,00	1,00	0,50	16,00	60,10	250,00	0,67	20,00	98,89	92,00
21	100,00	0,50	0,30	4,00	60,10	250,00	0,44	17,50	99,27	93,00
22	100,00	0,50	0,70	12,00	60,10	250,00	0,54	17,50	99,10	93,00
23	125,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	0,97	17,50	98,39	93,00
24	125,00	1,00	0,50	8,00	60,10	250,00	0,89	17,50	98,52	93,00
25	150,00	1,50	0,70	12,00	60,10	250,00	1,92	20,00	96,81	92,00
26	100,00	1,50	0,30	4,00	60,10	250,00	0,73	20,00	98,79	92,00
27	100,00	0,50	0,70	4,00	60,10	250,00	0,39	17,50	99,35	93,00
28	150,00	0,50	0,70	12,00	60,10	250,00	1,74	15,00	97,10	94,00

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos ensaios de bancada, observa-se que grande parte dos experimentos apresentaram remoção de turbidez superior a 97%, com exceção do experimento 13 que possui maior concentração de PAC (178 mg/L). Este experimento apresentou os piores resultados na remoção de turbidez e cor aparente, 79,87% e 72,00%, respectivamente. Acredita-se que a dosagem elevada de coagulante tenha promovido inversão de carga das partículas, causando repulsão e dificultando a formação de flocos.

Os experimentos realizados com a configuração dos pontos centrais apresentaram bons percentuais de remoção de cor aparente e turbidez, indicando que o tratamento que estava sendo realizado no momento pela ETA Dom Expedito era adequado ao tratamento das águas do rio Acaraú. No entanto, observando o experimento 21, constata-se que é possível reduzir as concentrações dos produtos químicos aplicados e ainda obter um percentual de remoção satisfatório, visto que estas águas ainda passarão por um processo de filtração.

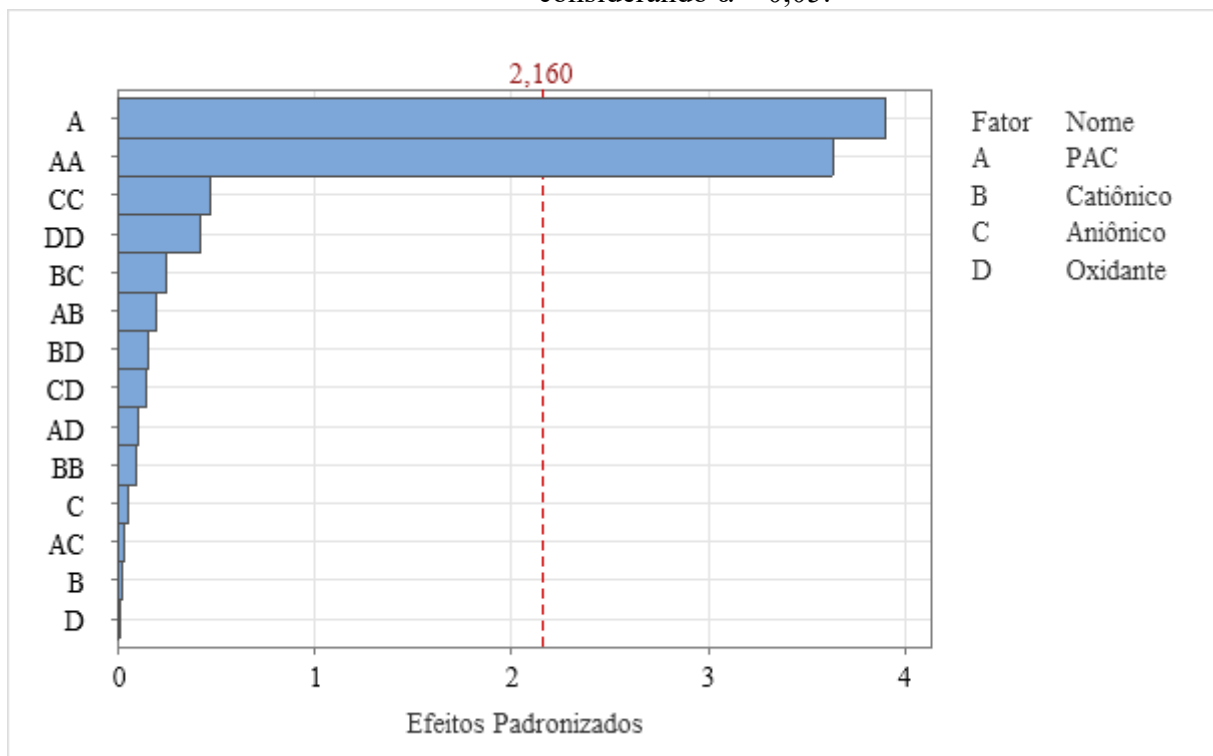
5.3.2.1 Remoção de Turbidez

Analisando a variável remoção de turbidez, tem-se que o maior percentual, 99,35%, foi observado no experimento 27, e este foi operado sob as condições: (a) PAC: 100,0 mg/L; (b)

polímero catiônico: 0,50 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,70 mg/L; e (d) pré-oxidante: 4,0 mg/L. Enquanto que o menor percentual de remoção, 79,87%, identificado no experimento 13, foi obtido sob as premissas: (a) dosagem máxima de coagulante PAC, 178 mg/L; (b) polímero catiônico: 1,0 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,50 mg/L; e (d) pré-oxidante: 8,0 mg/L.

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e *half* normal, assim como, as tabelas geradas pela regressão linear e pela análise de variância estão apresentadas no APÊNDICE H. A partir da análise destes e do diagrama de Pareto (GRÁFICO 15), observa-se que o fator que exerce maior influência na remoção de turbidez do manancial Acaraú é a dosagem do coagulante PAC e seu termo quadrático. No gráfico de efeitos principais, identifica-se que este termo apresenta maior curvatura e um ponto de máximo, indicando que o foi possível encontrar a dosagem ótima de aplicação dos produtos químicos para a região analisada. Não há efeitos de interações estatisticamente significativos.

Gráfico 15 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 33 do APÊNDICE H apresenta as estimativas do efeitos da análise do modelo de regressão. A partir dos coeficientes de regressão, descreveu-se um modelo empírico que determina o percentual de remoção de turbidez nas condições em que foram executadas o Ensaio 2. A Equação (7) expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

$$\begin{aligned}
\text{Rem. Turbidez (\%)} &= 98,92 - 2,14 X_1 + 0,02 X_2 - 0,03 X_3 + 0,01 X_4 \\
&- 1,88 X_1^2 + 0,05 X_2^2 + 0,25 X_3^2 + 0,22 X_4^2 + 0,14 X_1 X_2 \\
&- 0,02 X_1 X_3 - 0,07 X_1 X_4 - 0,17 X_2 X_3 + 0,11 X_2 X_4 \\
&- 0,10 X_3 X_4
\end{aligned} \tag{7}$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 71,76%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 41,36% indicando a necessidade de avaliar o ajuste do modelo para remoção de turbidez. A partir da análise da Tabela 34 presente no APÊNDICE H, constata-se que o modelo não é estatisticamente significativo. Dessa forma, optou-se por retirar da análise os efeitos de interação entre fatores, por serem os termos que se apresentam menos significativos, obtendo-se a seguinte expressão matemática:

$$\begin{aligned}
\text{Rem. Turbidez (\%)} &= 98,92 - 2,14 X_1 + 0,02 X_2 - 0,03 X_3 + 0,01 X_4 - 1,88 X_1^2 \\
&+ 0,05 X_2^2 + 0,25 X_3^2 + 0,22 X_4^2
\end{aligned} \tag{8}$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

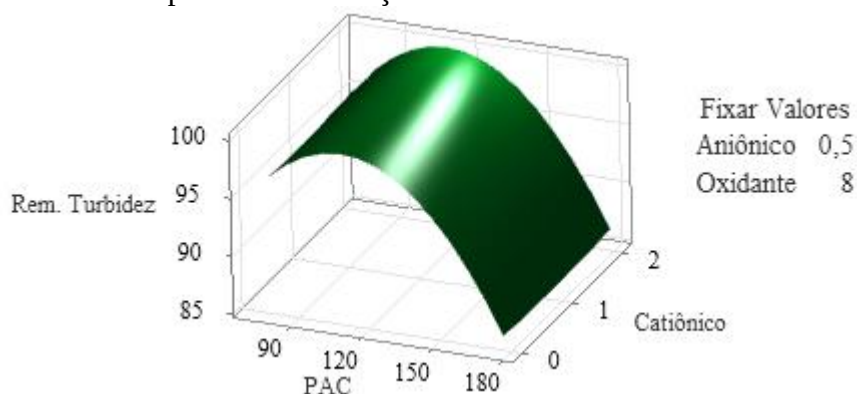
X_4 = Oxidante.

A Tabela 35 do APÊNDICE H apresenta os efeitos estimados e o erro padrão da regressão linear do modelo ajustado. O novo coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 71,41%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 59,37% indicando uma melhora no ajuste da regressão para remoção de turbidez. A partir da análise de variância, presente na Tabela 36 do mesmo apêndice, constata-se que o novo modelo se apresenta estatisticamente significativo.

O gráfico de superfície e as curvas de contorno foram construídos com os dados experimentais estimados (GRÁFICO 16; GRÁFICO 17). Os maiores percentuais de remoção de turbidez foram atingidos para dosagens de PAC próximas de 120 mg/L, havendo uma redução considerável para dosagens acima deste valor. Percebe-se ainda que, para as condições

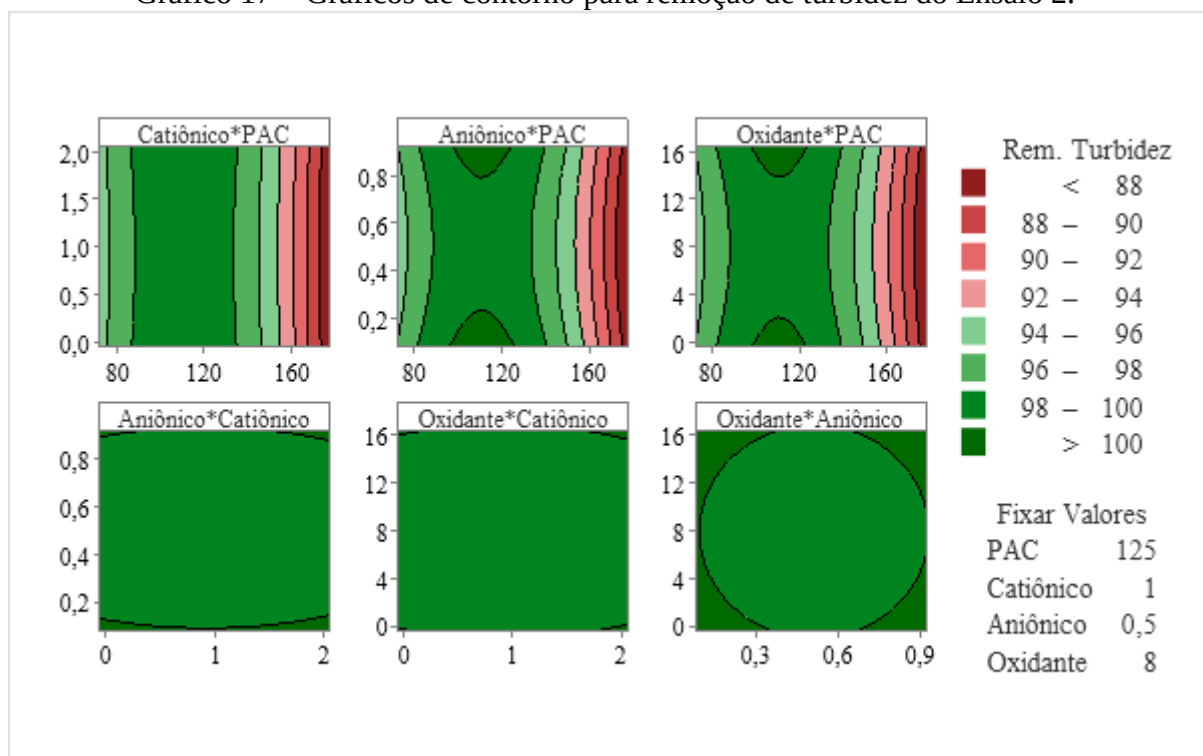
das amostras de água coletas e dentro dos limites de dosagens estabelecidos, a redução nas dosagens de aniônico e de pré-oxidante se mostram favoráveis ao processo de clarificação das águas do manancial Acaraú.

Gráfico 16 – Gráfico de superfície de remoção de turbidez do Ensaio 2: PAC versus catiônico.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 17 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 2.



Fonte: Autoria própria (2021).

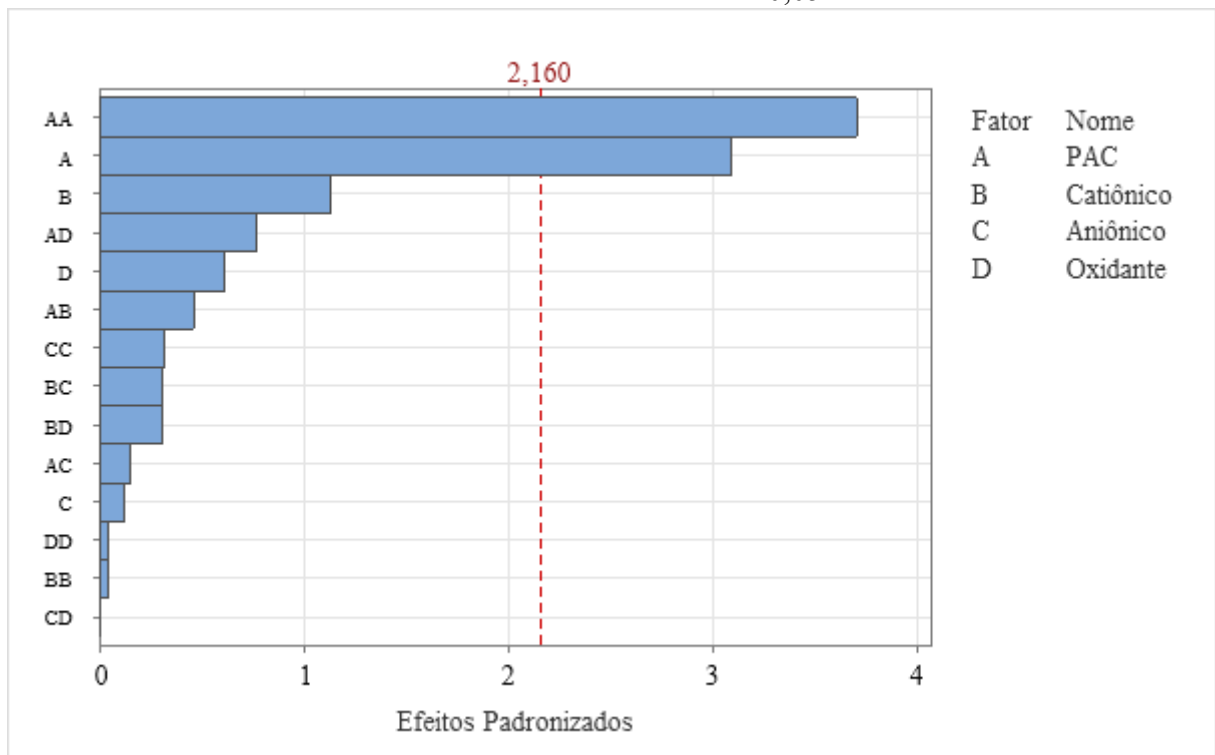
5.3.2.2 Remoção de Cor aparente

Para variável resposta cor aparente, três experimentos apresentaram um percentual de remoção de 94,0% (experimentos 8, 14 e 28). E o que apresentou menor percentual (72%) foi

o experimento 13, operado sob as condições: (a) PAC: 178 mg/L; (b) polímero catiônico: 1,0 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,50 mg/L; e (d) pré-oxidante: 8,0 mg/L. Assim como para remoção de turbidez, este resultado indica que, para concentrações muito elevadas de coagulante, há redução do percentual de remoção, prejudicando o processo de clarificação das águas.

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e *half normal*, assim como, as tabelas geradas pela regressão linear e pela análise de variância estão apresentadas no APÊNDICE I. A partir da análise destes e do diagrama de Pareto (GRÁFICO 18), pode-se concluir que o coagulante PAC e seu termo quadrático foram os termos que apresentaram efeito significativo sobre a remoção de cor aparente, assim como observado para remoção de turbidez. Os efeitos do polímero catiônico e da interação entre este e o pré-oxidante se apresentam relevantes, no entanto, nenhum destes é estatisticamente significativo.

Gráfico 18 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 37 do APÊNDICE I apresenta as estimativas dos efeitos da análise do modelo de regressão. Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, escreveu-se um modelo empírico que determina o percentual de remoção de cor aparente nas condições

em que foram executadas o Ensaio 2. A Equação (9) expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

$$\begin{aligned}
 \text{Rem. Cor aparente (\%)} \\
 = 93,57 - 2,02 X_1 - 0,74 X_2 - 0,08 X_3 + 0,40 X_4 - 2,28 X_1^2 \\
 - 0,03 X_2^2 + 0,20 X_3^2 - 0,03 X_4^2 - 0,38 X_1 X_2 - 0,13 X_1 X_3 \\
 + 0,63 X_1 X_4 - 0,25 X_2 X_3 + 0,25 X_2 X_4 - 0,00 X_3 X_4
 \end{aligned} \quad (9)$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 69,09%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 35,80% indicando, assim como para variável turbidez, a necessidade de ajuste do modelo. A análise de variância, exposta na Tabela 38 do APÊNDICE I, comprova que o modelo não é estatisticamente significativo. Sendo assim, optou-se por remover da análise os efeitos de interação entre fatores, pois apresentam significância estatística menor. A partir da nova análise, obteve-se a seguinte expressão matemática:

$$\begin{aligned}
 \text{Rem. Cor aparente (\%)} \\
 = 93,57 - 2,02 X_1 - 0,74 X_2 - 0,08 X_3 + 0,40 X_4 - 2,28 X_1^2 \\
 - 0,03 X_2^2 + 0,20 X_3^2 - 0,03 X_4^2
 \end{aligned} \quad (10)$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

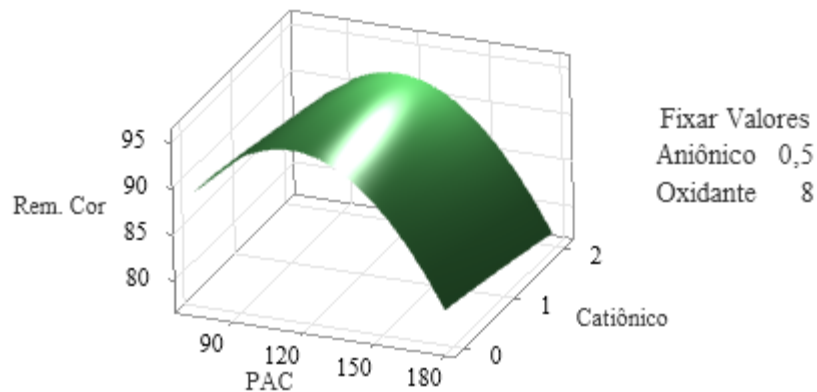
X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

A Tabela 39 do APÊNDICE I apresenta os efeitos estimados e o erro padrão da regressão linear do modelo ajustado. O novo coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 66,68%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 52,65%, mostrando melhora no ajuste da regressão para remoção de cor aparente. E a ANOVA, exposta Tabela 40 do mesmo apêndice, comprova que o novo modelo é estatisticamente significativo.

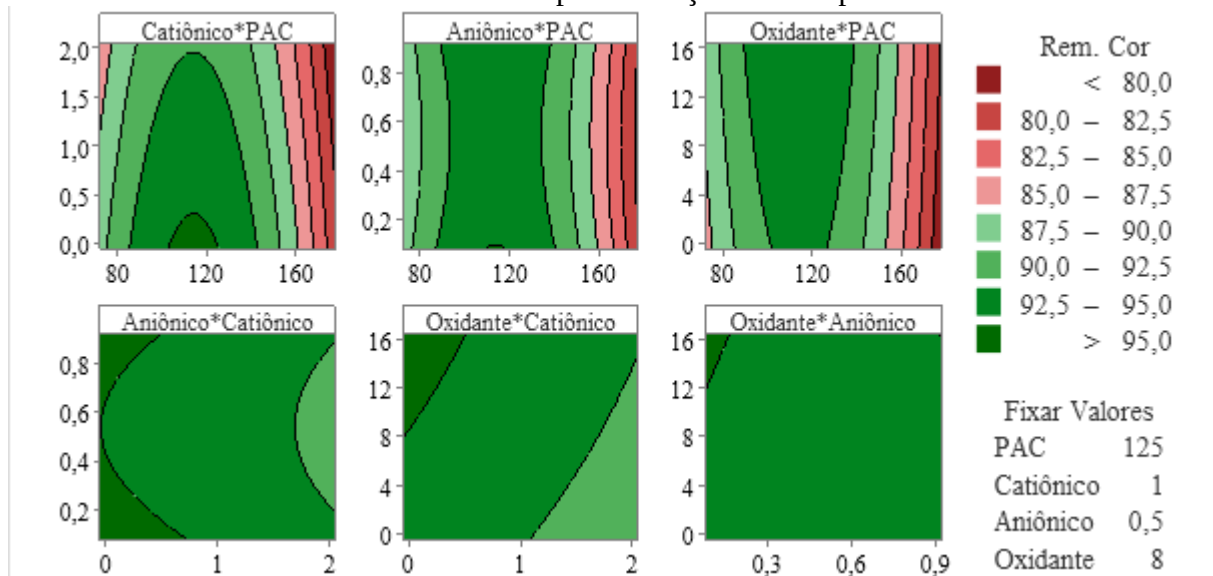
O gráfico de superfície e as curvas de contorno foram construídos com os dados experimentais estimados (GRÁFICO 19; GRÁFICO 20). Assim como para remoção de turbidez, os maiores percentuais de remoção de cor aparente foram atingidos para dosagens de PAC próximas de 120 mg/L, havendo uma redução considerável para dosagens acima deste valor. Percebe-se ainda que, para as condições das amostras de água coletas e dentro dos limites de dosagens estabelecidos, a aplicação do pré-oxidante e a redução nas dosagens de aniônico se mostram favoráveis ao processo de clarificação das águas do manancial Acaraú.

Gráfico 19 – Gráfico de superfície de remoção de cor aparente do Ensaio 2:
PAC versus catiônico.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 20 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 2.



Fonte: Autoria própria (2021).

5.3.3 Análise estatística do Ensaio 3

A Tabela 25 apresenta os intervalos de dosagens adotados para realização do Ensaio 3. As características das águas do rio Acaraú no período em que o ensaio foi executado estão expostas na Tabela 16 da seção 5.2.1. Assim como para o Ensaio 2, optou-se por escolher, como pontos centrais, as dosagens que estavam sendo aplicadas na ETA Dom Expedito no momento da coleta das amostras, e abranger o intervalo das dosagens de produtos químicos aos limites observados para o Cenário II e apresentados na Tabela 15.

Tabela 25 – Dosagens aplicadas no planejamento experimental do Ensaio 3 (DCCR).

Produtos químicos	Intervalos de dosagens (mg/L)				
	-2,2	-1	0	1	2,2
Pré-oxidante	0,00	3,70	7,00	10,30	14,00
PAC	35,00	70,00	100,00	130,00	165,00
P. Catiônico	0,00	0,40	0,80	1,20	1,60
P. Aniônico	0,00	0,30	0,50	0,70	1,00

Fonte: Autoria própria (2021).

A configuração das combinações de tratamento, assim como os percentuais de remoção de turbidez e cor aparente estão expostos na Tabela 26, com destaque nos experimentos que apresentaram os melhores resultados.

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 3 (DCCR).

(continua)

	Valores em mg/L				Água Bruta		Água Tratada		Remoção (%)	
	PAC	Catiônico	Aniônico	Oxidante	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
1	70,00	1,17	0,27	10,25	42,70	300,00	2,52	20,00	94,10	93,33
2	164,56	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	10,50	60,00	75,41	80,00
3	35,44	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	30,40	160,00	28,81	46,67
4	130,00	0,43	0,73	10,25	42,70	300,00	4,24	30,00	90,07	90,00
5	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	1,63	20,00	96,18	93,33
6	100,00	0,80	0,00	7,00	42,70	300,00	2,35	17,50	94,50	94,17
7	70,00	1,17	0,73	3,75	42,70	300,00	0,73	17,50	98,29	94,17
8	70,00	1,17	0,73	10,25	42,70	300,00	1,29	15,00	96,98	95,00
9	70,00	0,43	0,27	10,25	42,70	300,00	12,70	60,00	70,26	80,00
10	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	1,81	20,00	95,76	93,33
11	130,00	1,17	0,27	10,25	42,70	300,00	3,38	17,50	92,08	94,17
12	100,00	0,00	0,50	7,00	42,70	300,00	5,02	30,00	88,24	90,00

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 26 – Resultados dos ensaios de bancada para o Ensaio 3 (DCCR).

(continuação)										
Valores em mg/L					Água Bruta		Água Tratada		Remoção (%)	
	PAC	Catiônico	Aniônico	Oxidante	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor	Turbidez	Cor
13	70,00	0,43	0,73	3,75	42,70	300,00	0,94	25,00	97,80	91,67
14	100,00	1,60	0,50	7,00	42,70	300,00	0,80	15,00	98,13	95,00
15	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	1,41	17,50	96,70	94,17
16	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	1,96	17,50	95,41	94,17
17	70,00	0,43	0,27	3,75	42,70	300,00	2,05	25,00	95,20	91,67
18	130,00	0,43	0,27	3,75	42,70	300,00	1,57	17,50	96,32	94,17
19	130,00	0,43	0,73	3,75	42,70	300,00	2,99	25,00	93,00	91,67
20	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	2,66	17,50	93,77	94,17
21	130,00	1,17	0,27	3,75	42,70	300,00	1,33	12,50	96,89	95,83
22	70,00	1,17	0,27	3,75	42,70	300,00	0,74	15,00	98,27	95,00
23	100,00	0,80	0,50	7,00	42,70	300,00	2,67	15,00	93,75	95,00
24	100,00	0,80	1,00	7,00	42,70	300,00	1,24	10,00	97,10	96,67
25	70,00	0,43	0,73	10,25	42,70	300,00	2,31	15,00	94,59	95,00
26	130,00	1,17	0,73	10,25	42,70	300,00	1,96	12,50	95,41	95,83
27	130,00	0,43	0,27	10,25	42,70	300,00	4,11	17,50	90,37	94,17
28	100,00	0,80	0,50	14,00	42,70	300,00	2,22	15,00	94,80	95,00
29	130,00	1,17	0,73	3,75	42,70	300,00	1,06	15,00	97,52	95,00
30	100,00	0,80	0,50	0,00	42,70	300,00	0,75	12,50	98,24	95,83

Fonte: Autoria própria (2021).

A partir dos ensaios de bancada, observou-se que grande parte dos experimentos apresentaram remoção de turbidez considerável e superior a 90%, com exceção do experimento 3 que possui menor concentração de PAC (35 mg/L). Este experimento apresentou os piores resultados na remoção de turbidez e cor aparente, 28,81% e 46,67%, respectivamente. Esta concentração de coagulante é aplicada frequentemente para o tratamento de águas no Cenário I (período de seca) e, mesmo com dosagens consideráveis de polímeros catiônico e aniônico e de pré-oxidante, é insuficiente para o tratamento das águas no Cenário II.

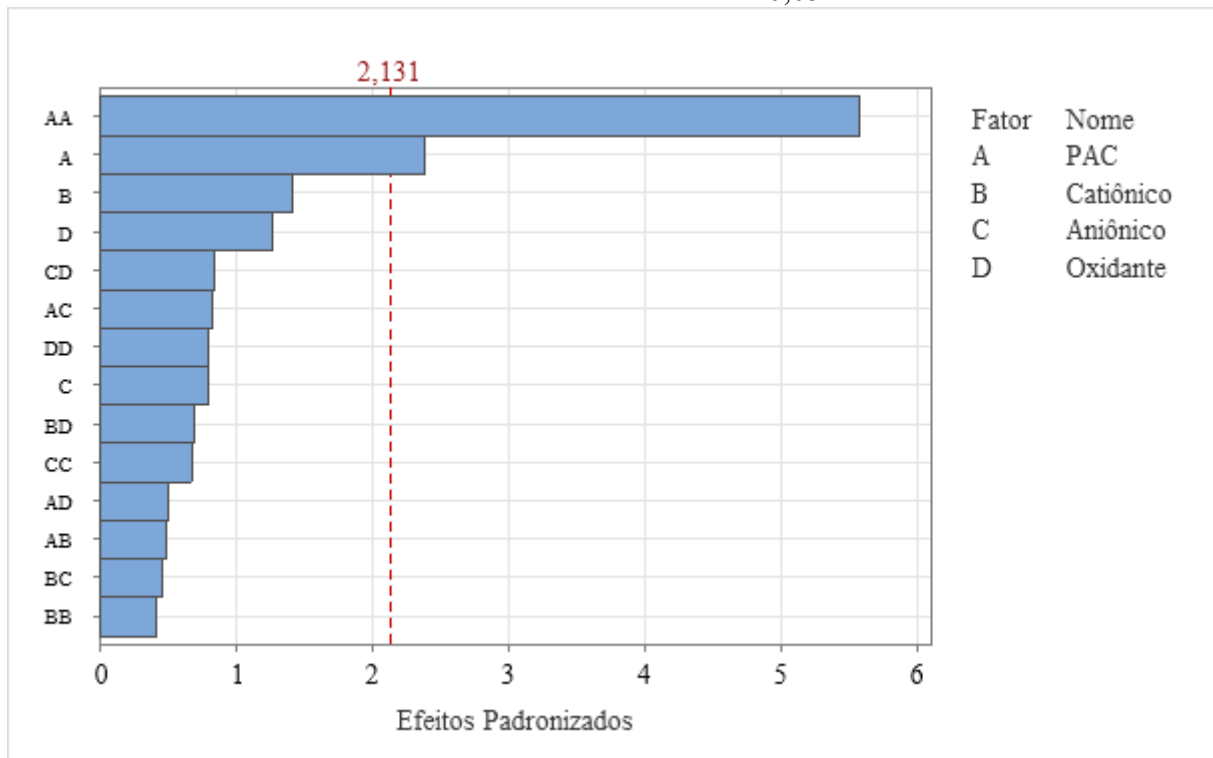
Os experimentos realizados com a configuração dos pontos centrais apresentaram bons percentuais de remoção de cor aparente e turbidez, em média 94%, indicando que o tratamento que estava sendo realizado no momento pela ETA Dom Expedito era adequado ao tratamento das águas do rio Acaraú. No entanto, observando o experimento 30, constata-se que é possível retirar a aplicação de pré-oxidante e ainda obter um percentual de remoção de turbidez e cor aparente maior.

5.3.3.1 Remoção de Turbidez

Analisando a variável remoção de turbidez, tem-se que o maior percentual, 98,29%, foi observado no experimento 7, e este foi operado sob as condições: (a) PAC: 70,0 mg/L; (b) polímero catiônico: 1,20 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,70 mg/L; e (d) pré-oxidante: 4,0 mg/L. Enquanto que o menor percentual de remoção, 28,81%, identificado no experimento 3, foi obtido sob as premissas: (a) dosagem mínima de coagulante PAC, 35 mg/L; (b) polímero catiônico: 0,8 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,50 mg/L; e (d) pré-oxidante: 7,0 mg/L.

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e *half normal*, assim como, as tabelas geradas pela regressão linear e pela análise de variância estão apresentadas no APÊNDICE J. A partir da análise destes e do diagrama de Pareto, exposto no Gráfico 21, observa-se que o fator que exerce maior influência na remoção de turbidez do manancial Acaraú é o termo quadrático do coagulante PAC, seguido de seu fator de primeira ordem.

Gráfico 21 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Diferentemente dos efeitos padronizados para a remoção de turbidez do Ensaio 2 que apresentou valores consideráveis dos termos quadráticos do polímero aniônico e do pré-oxidante, neste ensaio, os termos de primeira ordem do polímero catiônico e do pré-oxidante

que apresentam valores de efeitos mais próximos do nível de significância. Da mesma forma, no gráfico de efeitos principais, identifica-se que o coagulante PAC apresenta maior curvatura e um ponto de máximo. E não há efeitos de interações estatisticamente significativos.

A Tabela 41 do APÊNDICE J apresenta as estimativas do efeitos da análise do modelo de regressão. A partir dos coeficientes de regressão, obtidos pela matriz codificada, escreveu-se um modelo empírico que determina o percentual de remoção de turbidez nas condições em que foram executadas o Ensaio 3. A Equação (11) a seguir expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

$$\begin{aligned}
 \text{Rem, Turbidez (\%)} &= 96,01 + 4,22 X_1 + 2,57 X_2 + 1,42 X_3 - 2,27 X_4 - 8,31 X_1^2 \\
 &+ 0,73 X_2^2 + 1,03 X_3^2 + 1,25 X_4^2 - 1,10 X_1 X_2 - 1,84 X_1 X_3 \\
 &+ 1,12 X_1 X_4 - 1,03 X_2 X_3 + 1,54 X_2 X_4 + 1,89 X_3 X_4
 \end{aligned} \quad (11)$$

Onde: X_1 = PAC;

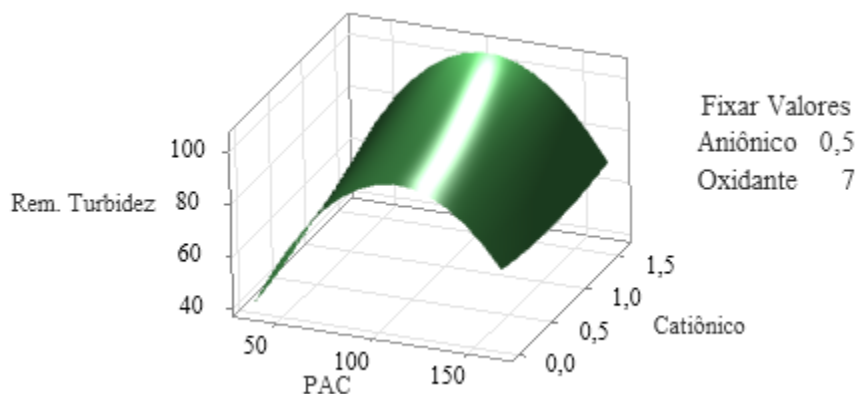
X_2 = Catiônico;

X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

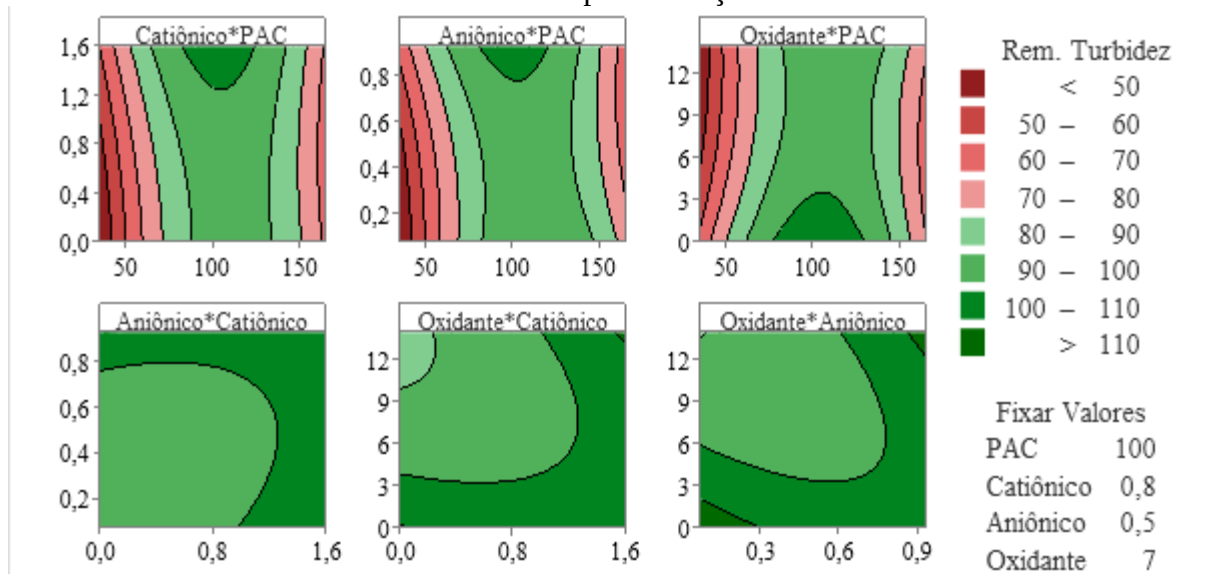
O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 77,06%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 55,65%. E a ANOVA, exposta na Tabela 42 do APÊNDICE J, mostrou que o modelo é estatisticamente significativo. Considerando que os dados experimentais estão bem representados pelo modelo de regressão, foram construídos os gráficos de superfície e das curvas de contorno como os valores estimados pela regressão (GRÁFICO 22; GRÁFICO 23).

Gráfico 22 – Gráfico de superfície de remoção de turbidez do Ensaio 3: PAC *versus* catiônico.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 23 – Gráficos de contorno para remoção de turbidez do Ensaio 3.



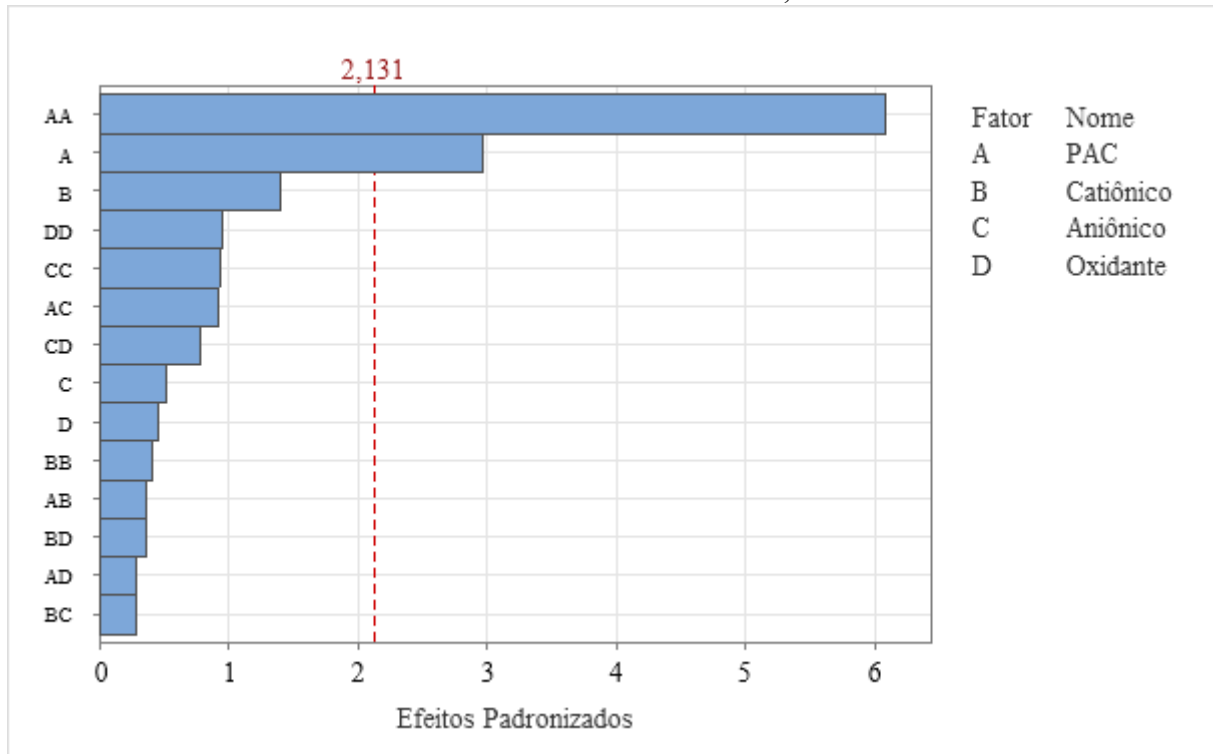
Fonte: Autoria própria (2021).

5.3.3.2 Remoção de Cor aparente

Para variável resposta cor aparente, o experimento 24 apresentou o melhor percentual de remoção, 96,67%, e foi gerado sob as seguintes condições: (a) PAC: 100 mg/L; (b) polímero catiônico: 0,80 mg/L; (c) polímero aniônico: 1,0 mg/L; e (d) pré-oxidante: 7 mg/L. E o que apresentou menor percentual (46,67) foi o experimento 3, operado sob as condições: (a) menor dosagem de PAC: 35,44 mg/L; (b) polímero catiônico: 0,8 mg/L; (c) polímero aniônico: 0,50 mg/L; e (d) pré-oxidante: 7,0 mg/L.

Os gráficos de efeitos principais e de interação entre os fatores e *half normal*, assim como, as tabelas geradas pela regressão linear e pela análise de variância estão apresentadas no APÊNDICE K. A partir da análise destes e do diagrama de Pareto, exposto no Gráfico 24, pode-se concluir que o coagulante PAC e seu termo quadrático foram os termos que apresentaram efeito significativo sobre a remoção de cor aparente, assim como observado para remoção de turbidez. O efeito do polímero catiônico e dos termos quadráticos do polímero aniônico e do pré-oxidante também se mostraram relevantes, no entanto, nenhum destes é estatisticamente significativo.

Gráfico 24 – Pareto dos efeitos padronizados para a remoção de cor aparente do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

A Tabela 43 do APÊNDICE K apresenta as estimativas do efeitos da análise do modelo de regressão. Com os coeficientes de regressão, obtidos a partir da matriz codificada, escreveu-se um modelo empírico que determina o percentual de remoção de cor aparente nas condições em que foram executadas o Ensaio 3. A Equação (12) a seguir expressa este modelo de regressão em unidades codificadas.

Rem, Cor aparente (%)

$$\begin{aligned}
 &= 94,54 + 3,44 X_1 + 1,67 X_2 + 0,61 X_3 - 0,54 X_4 - 5,94 X_1^2 \\
 &+ 0,47 X_2^2 + 0,92 X_3^2 + 0,97 X_4^2 - 0,52 X_1 X_2 - 1,35 X_1 X_3 \\
 &+ 0,42 X_1 X_4 - 0,42 X_2 X_3 + 0,52 X_2 X_4 + 1,15 X_3 X_4
 \end{aligned} \quad (12)$$

Onde: X_1 = PAC;

X_2 = Catiônico;

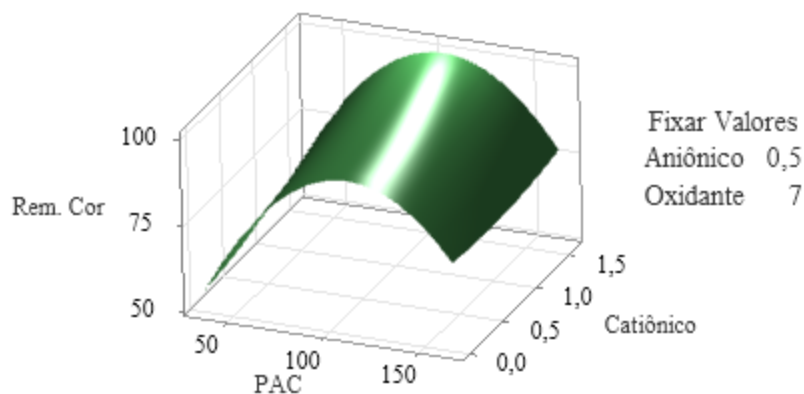
X_3 = Aniônico;

X_4 = Oxidante.

A Tabela 43 do APÊNDICE K apresenta os efeitos estimados e o erro padrão da regressão linear do modelo ajustado. O coeficiente R^2 obtido pela regressão foi de 79,74%, e o coeficiente $R^2_{ajustado}$ foi de 60,82%, mostrando melhora no ajuste da regressão para remoção de cor aparente. E a ANOVA, exposta Tabela 44 do mesmo apêndice, comprova que o novo modelo é estatisticamente significativo.

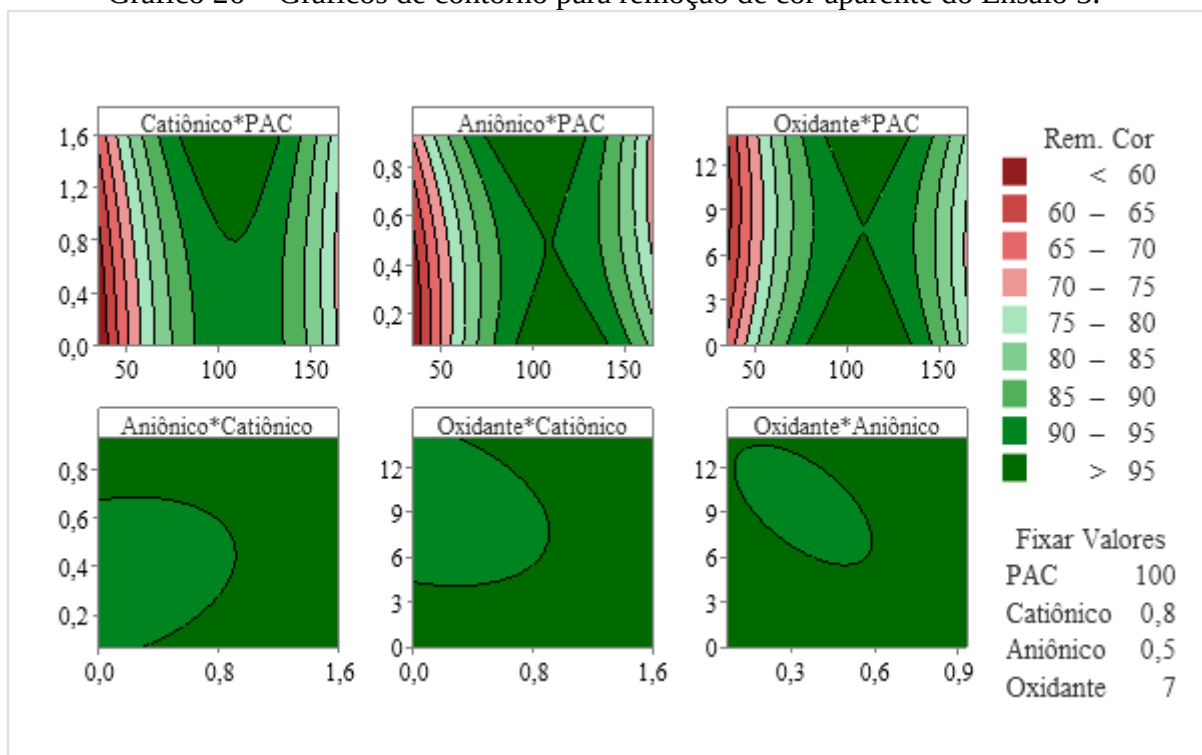
O gráfico de superfície e as curvas de contorno foram construídos com os dados experimentais estimados (GRÁFICO 25; GRÁFICO 26). Assim como para remoção de turbidez, os maiores percentuais de remoção de cor aparente foram atingidos para dosagens de PAC próximas de 120 mg/L, havendo uma redução considerável para dosagens acima deste valor. Percebe-se ainda que, para as condições das amostras de água coletas e dentro dos limites de dosagens estabelecidos, a aplicação do pré-oxidante e a redução nas dosagens de aniônico se mostram favoráveis ao processo de clarificação das águas do manancial Acaraú.

Gráfico 25 – Gráfico de superfície de remoção de cor aparente do Ensaio 3:
PAC *versus* catiônico.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 26 – Gráficos de contorno para remoção de cor aparente do Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria (2021).

6 CONCLUSÕES

A análise dos perfis de qualidade das águas brutas e de dosagem dos produtos químicos do manancial Acaraú permitiu a identificação de dois cenários operacionais. No Cenário I, a ETA opera aplicando dosagens relativamente baixas e constantes dos produtos químicos. Isto porque as águas do rio Acaraú apresentam valores médios baixos de turbidez (4,17 uT) e cor aparente (35,08 uH) ao longo da maior parte do período analisado. No Cenário II, que corresponde aos meses do período chuvoso da região, os produtos químicos são aplicados em dosagens relativamente altas e com grandes variações, visto que as águas do manancial apresentam, principalmente, valores médios de cor aparente elevados.

A partir das médias mensais das características de qualidade das águas brutas do manancial Acaraú, identificou-se que, nos meses de agosto a fevereiro, a turbidez e cor aparente apresentam valores médios inferiores à 50 uT e 50 uH, respectivamente. Segundo Libânio (2008), não se faz necessário a adoção da tecnologia de ciclo completo para águas que apresentam essas características por um longo período de tempo. Dessa forma, pesquisas futuras podem ser realizadas na ETA Dom Expedito a fim de averiguar a possibilidade de implementação de outras tecnologias de tratamento no período de estiagem da região, em especial algumas das tecnologias de filtração direta (FD, FDD, FDA), introduzindo sistemas em *by-pass* que permitam reduzir o tempo de contato das águas no tratamento realizado pela ETA e a aplicação de produtos químicos no processo.

Os parâmetros operacionais foram obtidos com suporte dos projetos arquitetônicos da unidade de tratamento. O tempo de residência em cada etapa de clarificação da água foi calculado com base na vazão média de captação da unidade (347,01 m³/h) e nas dimensões de volume de cada câmara do processo. O tempo de residência de 3 min adotado para unidade de sedimentação nos ensaios de bancada comprovou de forma indireta a importância do emprego dos auxiliares de coagulação, polímeros catiônicos e aniônicos, para formação dos flocos e remoção de partículas, visto que foram obtidos percentuais de remoção satisfatórios no tempo de decantação avaliado (superiores a 90%).

Os planejamentos de experimentos realizado geraram informações importantes para o melhor entendimento da influência dos produtos químicos na remoção de turbidez e cor aparente da água bruta. Foi identificado que o parâmetro crítico para o processo de clarificação é a dosagem de coagulante PAC. Na remoção de turbidez, os polímeros catiônico e aniônico mostraram-se favoráveis, enquanto que o pré-oxidante apresentou efeito negativo em seu percentual de remoção. Já, para remoção de cor aparente, o polímero catiônico e o pré-oxidante

mostraram-se favoráveis na remoção, diferentemente do polímero aniônico. No entanto, para dosagens muito elevadas ou muito baixas do coagulante primário PAC, o uso dos polímeros tem pouca influência na remoção de turbidez e cor aparente. Além disso, nos ensaios 2 e 3, constatou-se que é possível reduzir a dosagem dos auxiliares de coagulação/floculação e do pré-oxidante adotadas pela ETA e ainda obter percentuais satisfatórios de remoção de cor aparente e turbidez.

Por fim, as expressões matemáticas que correlacionam as dosagens de produtos químicos e a remoção de cor aparente e turbidez da água bruta se mostraram estatisticamente significantes, podendo ser utilizados para fins preditivos, dentro do domínio dos fatores estudados. Dentre as expressões que apresentaram melhor ajuste, destaca-se o modelo matemático que quantifica as dosagens de produtos químicos para as águas com características semelhantes às coletadas no Ensaio 1 (turbidez de 40 uT e cor aparente de 130 uH). Estas expressões resultaram em um $R_{ajustado}$ de 96,56% para remoção de turbidez e 94,08% para remoção de cor aparente.

REFERÊNCIAS

- ABREU 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) - Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- ALMEIDA, J. DE F. A.; VIANA, M.; LIBÂNIO, M. Avaliação do desempenho de estações de tratamento de água operadas por companhia estadual de saneamento e autarquias municipais. **23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, n. 1, p. 1–7, 2004.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23rd. ed. New York: APHA, 2017.
- CLARK, T.; STEPHENSON, T. Development of a jar testing protocol for chemical phosphorus removal in activated sludge using statistical experimental design. **Water Research**, v. 33, n. 7, p. 1730–1734, 1999.
- CLAUDINO-SALES, V.; LIMA, E. C.; DINIZ, S. F. Análise Geoambiental da Bacia Hidrográfica de Rio Acaraú, Ceará, Nordeste do Brasil. **REVISTA GEONORTE**, v. 11, n.38, p. 90–109, 2020.
- COGERH (COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS DO ESTADO DO CEARÁ). **Relatório de Diagnóstico Ambiental da Bacia do Acaraú**. Fortaleza, 2016.
- CONSTANTINO, A. F.; YAMAMURA, V. D. Redução do gasto operacional em estação de tratamento de água utilizando o PAC. **Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. Anais. Maringá-PR**, Maringá, ago. 2009.
- CORAL, L. A.; BERGAMASCO, R.; BASSETTI, F. J. Estudo da Viabilidade de Utilização do Polímero Natural (TANFLOC) em Substituição ao Sulfato de Alumínio no Tratamento de Águas para Consumo. **2nd International Workshop Advances in Cleaner Production**, São Paulo, mai. 2009.
- DA SILVA, J. W. .; TORREZÃO, M. E. Estudo sobre a utilização do policloreto de alumínio para a garantia da qualidade das águas de processo no setor sucroalcooleiro. **Cadernos de Pós-Graduação da FAZU**, v. 2, 2012.
- DE OLIVEIRA, M. D.; BIANCHI, D. P. Z.; FONSECA, J. F. R. DA; GORZA JÚNIOR, N. A.; LIBÂNIO, M. Avaliação de fatores intervenientes no desempenho de estações de tratamento de água. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 4, p. 613–625, jul/ago. 2021.
- DELMONICO, E. L.; CONSTANTINO, A. F.; CARNEIRO, C. Uso de polímeros catiônicos e aniônicos como produtos auxiliares no tratamento de água. **Revista Mosaicos: Estudos em Governança, Sustentabilidade e Inovação**, v. 2, n. 1, p. 44–54, 2020.
- DI BERNARDO, A. S. **Influência das condições de aplicação de polímeros catiônicos na eficiência da floculação**. 2000. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed., São Carlos: RiMa, 2005. v. 1.

DOTTO, J.; FAGUNDES-KLEN, M. R.; VEIT, M. T.; PALÁCIO, S. M.; BERGAMASCO, R. Performance of different coagulants in the coagulation/flocculation process of textile wastewater. **Journal of Cleaner Production**, v. 208, p. 656–665, 2019.

ESTATCAMP, E. **Manual de Planejamento de Experimentos**. 2014. Disponível em: <<http://www.portaaction.com.br/ambiente-virtual-de-aprendizado>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

FREITAS, T. K. F. S.; OLIVEIRA, V. M.; SOUZA, M. T. F. DE; et al. Optimization of coagulation-flocculation process for treatment of industrial textile wastewater using okra (*A. esculentus*) mucilage as natural coagulant. **Industrial Crops and Products**, v. 76, p. 538–544, 2015.

GALDÁMEZ, E. V. C. **Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria da qualidade de um processo de fabricação de produtos plásticos**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

GLUSCZAK, A. G. **Água de abastecimento com elevada turbidez: eletrocoagulação/flotação como pré-tratamento em estações de tratamento de água**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2018.

GOMES, F. B. M. **Análise da qualidade ambiental do Rio Acaraú no espaço intraurbano da cidade de Sobral-CE: Efeitos, Consequências e Desafios**. 2017. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Centro de Ciências Humanas, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral, 2017.

HEIDERSCHEIDT, E.; LEIVISKÄ, T.; KLOVE, B. Chemical treatment response to variations in non-point pollution water quality: Results of a factorial design experiment. **Journal of Environmental Management**, v. 150, p. 164–172, 2015.

JIANG, Y.; ZHANG, Y.; BANKS, C.; HEAVEN, S.; LONGHURST, P. Investigation of the impact of trace elements on anaerobic volatile fatty acid degradation using a fractional factorial experimental design. **Water Research**, v. 125, p. 458–465, 2017.

KAWAMURA, S. **Integrated design and operation of water treatment facilities**. 2.ed. John Wiley & Sons, 2000.

KHAYET, M.; ZHRIM, A. Y.; HILAL, N. Modelling and optimization of coagulation of highly concentrated industrial grade leather dye by response surface methodology. **Chemical Engineering Journal**, v. 167, n. 1, p. 77–83, 2011.

LANDIM, A. S. **Avaliação e estudo sobre o uso de alguns polímeros como auxiliares de coagulação, floculação e flotação nas Estações de Tratamento de Água e Esgoto do Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia -MG (DMAE)**. 2005. Dissertação (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.

LEME, F. P. **Teoria e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. Rio de Janeiro: ABES, 1990.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Átomo, 2008.

LIMA, M. R. A.; REALI, M. A. P. Tratamento físico-químico das águas residuárias de uma indústria de papel utilizando-se a flotação por ar dissolvido. *In: XIX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. Anais [...]*. 1997.

LIU, T.; CHEN, Z.; YU, W.; SHEN, J.; GREGORY, J. Effect of two-stage coagulant addition on coagulation-ultrafiltration process for treatment of humic-rich water. **Water Research**, v. 45, n. 14, p. 4260–4268, 2011.

MACEDO, V. A. P. DE. **Tratamento de água de produção de petróleo através de membranas e processos oxidativos avançados**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2009.

MADRONA, G. S. **Extração/purificação do composto ativo da semente da Moringa oleifera Lam e sua utilização no tratamento de água para consumo humano**. 2010. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.

MENDES, C. G. DA N. **Estudo da coagulação e floculação de águas sintéticas e naturais com turbidez e cor variáveis**. 1989. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1989.

MENEZES, P. H. N. DE. **Estudo do desempenho do sulfato de alumínio no processo de clarificação de água de uma refinaria de petróleo e avaliação do tanfloc como agente coagulante alternativo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2018.

MILAN, E. C. **JAR TEST MICROCONTROLADO 6 PROVAS**. Disponível em: <http://www.milan-ec.com.br/produto_interna/id/17/Jar-test-microcontrolado-6-provas>. Acesso em: 10 dez. 2019.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada à engenharia**. Livros Técnicos e Científicos, 2009.

NEPOMUCENO, T. C.; FERREIRA, W. B.; PAIVA, W. DE; DINIZ, T. R.; SANTOS, W. B.; Aplicabilidade de coagulantes a base de tanino em estações de tratamento de água. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 7, p. 110–123, 2018.

PACHECO, L. A. M.; AGOSTO, L. Polieletrólitos como auxiliares de coagulação. **Revista DAE, São Paulo**, v. 102, p. 46–60, 1970.

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 Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos**. São Paulo: ABES, 2006.

PRATI, P.; MORETTI, R. H.; CARDELLO, H. M. A. B. Elaboração de bebida composta por mistura de garapa parcialmente clarificada-estabilizada e sucos de frutas ácidas. **Food Science and Technology**, v. 25, p. 147–152, 2005.

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. Edgard Blucher, 2009.

ROCHA, A. M. H.; QUEIROGA, C. M. F.; SANTOS, E. M. DOS; CASSIANO, D. R.; BUARQUE, H. L. DE B. Otimização do processo de coagulação da água do Açude Gavião, Ceará, utilizando planejamento por variável e planejamento composto central rotacional. **VII Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação**, Palmas, out. 2012.

RODRIGUES, R. DO N. **Resposta hidrológica em cursos efêmeros no semiárido em função da cobertura vegetal e do padrão de chuva**. 2016. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; BELTRÁN-HEREDIA, J.; PERES, J. A. Improvement of the flocculation process in water treatment by using Moringa oleifera seeds extract. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 29, n. 3, p. 495–502, 2012.

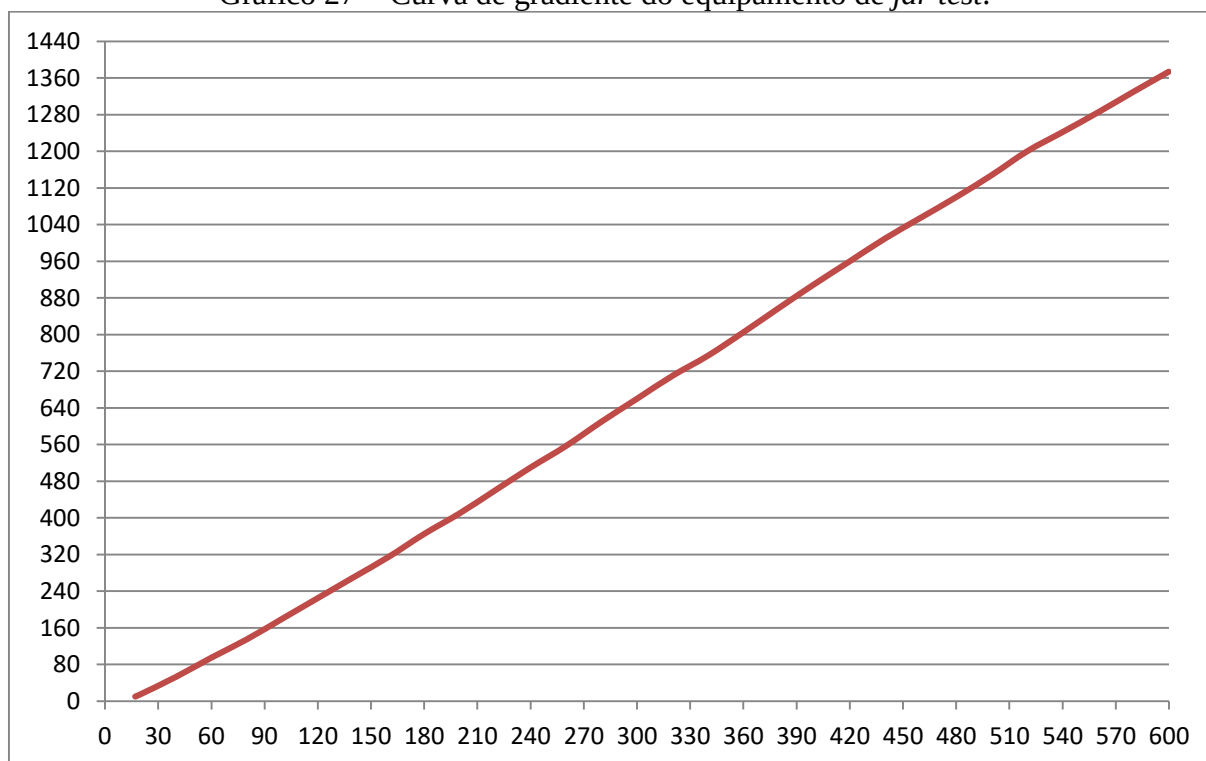
SANECONTROLLER (Ceará). Prefeitura Municipal de Sobral. **Projeto de Ampliação da Estação de Tratamento de Água Dom Expedito Sobral/CE**. Sobral, 2018. Disponível em: <<http://transparencia.sobral.ce.gov.br/arquivo/nome:48ad449ff6eb411cfd54ca84cd4759ab.pdf>> Acesso em: 15 dez. 2021.

SIQUEIRA, S. L.; ISAAC, R. L. Benefícios da otimização de processos em Estações de Tratamento de Água – Estudo de caso SANASA Campinas. **4th International Workshop - Advances in Cleaner Production – Academic Work**, p. 9, 2013.

VANLOOT, P.; BOUDENNE, J. L.; VASSALO, L.; SERGENT, M.; COULOMB, B. Experimental design approach for the solid-phase extraction of residual aluminium coagulants in treated waters. **Talanta**, v. 73, n. 2, p. 237–245, 2007.

ANEXO A – CURVA DE GRADIENTE DO EQUIPAMENTO DE JAR TEST.

Gráfico 27 – Curva de gradiente do equipamento de *jar test*.



Fonte: SAAE (2020).

Tabela 27 – Relação entre os valores de rotação do equipamento de *jar test* e o gradiente de velocidade.

RPM	Gradiente	RPM	Gradiente
17	10	320	710
20	15	340	754
40	53	360	805
60	95	380	858
80	135	400	910
100	180	420	960
120	225	440	1010
140	270	460	1055
160	315	480	1100
180	365	500	1148
200	410	520	1200
220	460	540	1242
240	510	560	1285
260	557	580	1330
280	610	600	1374
300	660	-	-

Fonte: SAAE (2020).

ANEXO B – CÁLCULOS HIDRÁULICOS PARA DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE MISTURA E DO GRADIENTE DE VELOCIDADE NA CALHA PARSHALL

Tabela 28 – Etapas para verificação das condições de mistura na calha Parshall.

Passos	Descrição	Fórmula	Unidade
1	Altura da água na seção de medição	$h_0 = \left(\frac{Q}{\lambda}\right)^{\frac{1}{n}}$	m
2	Largura do Parshall na seção de medição	$D' = \frac{2}{3} (D - W) + W$	m
3	Velocidade na seção da medição	$V_0 = \frac{Q}{D'} h_0$	m/s
4	Vazão específica na garganta do Parshall	$q = \frac{Q}{W}$	m ³ /s/m
5	Carga hidráulica disponível	$E_0 = \frac{V_0^2}{2g + h_0 + N}$	m
6	Ângulo	$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{gq}{\left(\frac{2}{3} g E_0\right)^{\frac{3}{2}}} \right]$	radianos
7	Velocidade antes do ressalto	$V_1 = 2 \cos \frac{\theta}{3} \sqrt{\frac{2}{3} g E_0}$	m/s
8	Altura de água antes do ressalto	$h_1 = \frac{q}{V_1}$	m/s
9	Número de Froude	$F_r = \frac{v_1}{\sqrt{g h_1}}$	
10	Altura do ressalto	$h_2 = \frac{h_1}{2} \left(\sqrt{1 + 8 F_r^2} - 1 \right)$	m
11	Velocidade no ressalto	$V_2 = \frac{Q}{W h_2}$	m/s
12	Altura na seção de saída	$h_3 = h_2 - (N - K)$	m
13	Velocidade na seção de saída do Parshall	$V_3 = \frac{Q}{C h_3}$	m/s
14	Perda de Carga no ressalto	$h_f = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 h_1 h_2}$	m
15	Tempo de mistura	$T = \frac{2G'}{V_2 + V_3}$	s
16	Gradiente de velocidade	$G = \sqrt{\frac{\gamma h_f}{\mu T}}$	s ⁻¹

Fonte: Richter (2009).

ANEXO C – DIMENSÕES PADRONIZADAS E LIMITES DE APLICAÇÃO DOS MEDIDORES PARSHALL COM ESCOAMENTO LIVRE

Tabela 29 – Valores do expoente n e do coeficiente K , unidades métricas, e de limites de aplicação dos medidores Parshall com escoamento livre.

W		Capacidade (L/s)		n	λ
(pol.)	(mm)	Mínima	Máxima		
3"	0,075	0,85	53,8	1,547	0,176
6"	0,150	1,42	110,4	1,580	0,381
9"	0,229	2,55	251,9	1,530	0,535
1'	0,305	3,11	455,6	1,522	0,690
1,5'	0,460	4,25	696,2	1,538	1,054
2'	0,610	11,89	936,7	1,550	1,426
3'	0,915	17,26	1426,3	1,556	2,182
4'	1,220	36,79	1921,5	1,578	2,935
5'	1,525	45,30	2422,0	1,587	3,728
6'	1,830	73,60	2929,0	1,595	4,515
7'	2,135	84,95	3440,0	1,601	5,306
8'	2,440	99,10	3950,0	1,606	6,101
10'	305	200,0	5660,0	-	-

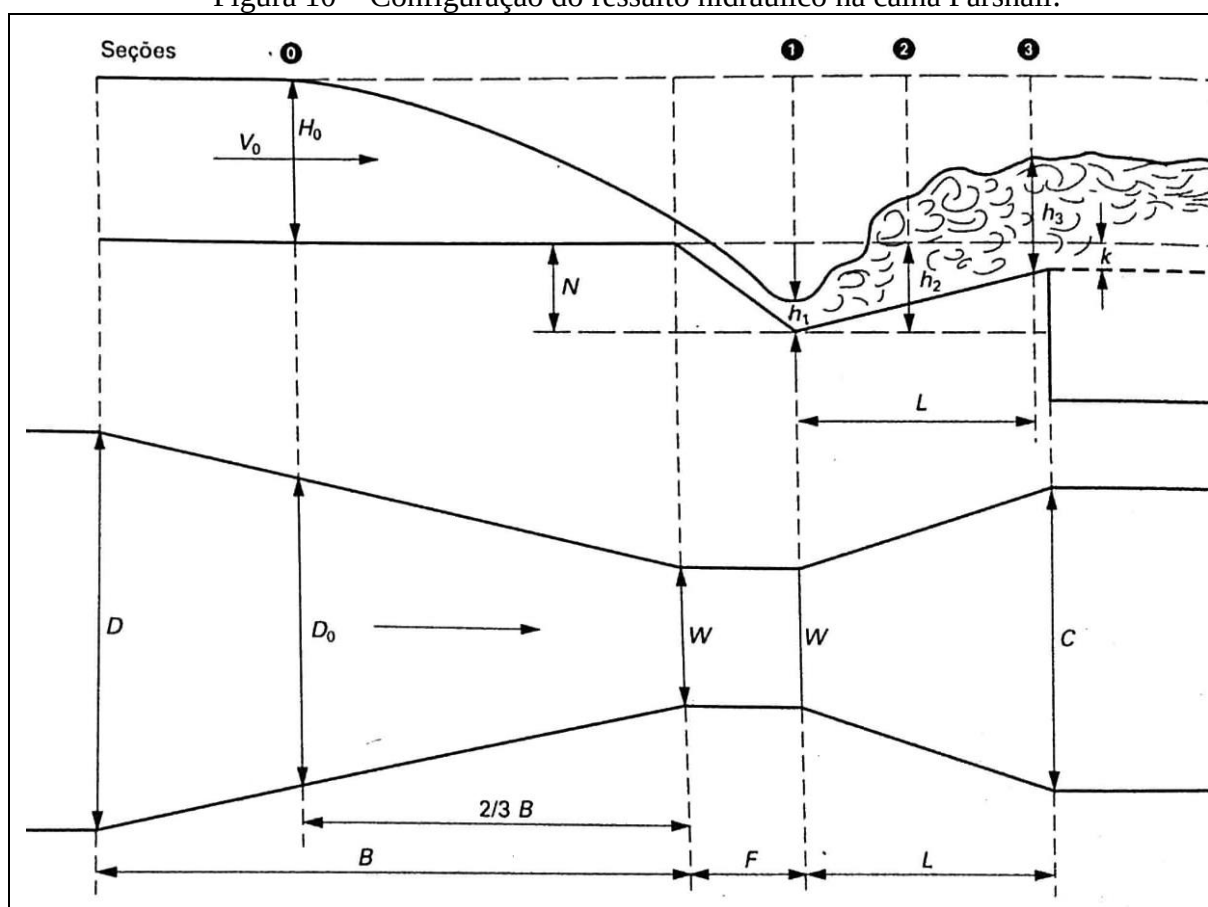
Fonte: Adaptado de Richter (2009).

Tabela 30 – Dimensões padronizadas (em cm) de medidores Parshall.

	W	A	B	C	D	E	F	G	K	N
1"	2,5	36,6	35,6	9,3	16,8	22,9	7,6	20,3	1,9	2,9
3"	7,6	46,6	45,7	17,8	25,9	38,1	15,2	30,5	2,5	5,7
6"	15,2	62,3	61,0	39,4	40,3	61,0	30,5	61,0	7,6	11,4
9"	22,9	88,1	86,4	38,1	57,5	76,2	30,5	45,7	7,6	11,4
1'	30,5	137,1	134,4	61,0	84,5	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
1 $\frac{1}{2}$ '	45,7	144,8	142,0	76,2	102,6	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
2'	61,0	152,3	149,3	91,5	120,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
3'	91,5	167,5	164,2	122,0	157,2	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
4'	122,0	182,8	179,2	152,5	193,8	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
5'	152,5	198,0	194,1	183,0	230,3	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
6'	183,0	213,3	209,1	213,5	266,7	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
7'	213,5	228,6	224,0	244,0	303,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
8'	244,0	244,0	239,0	274,5	340,0	91,5	61,0	91,5	7,6	22,9
10'	305,0	274,5	260,8	366,0	475,9	122,0	91,5	183,0	15,3	34,3

Fonte: Richter (2009).

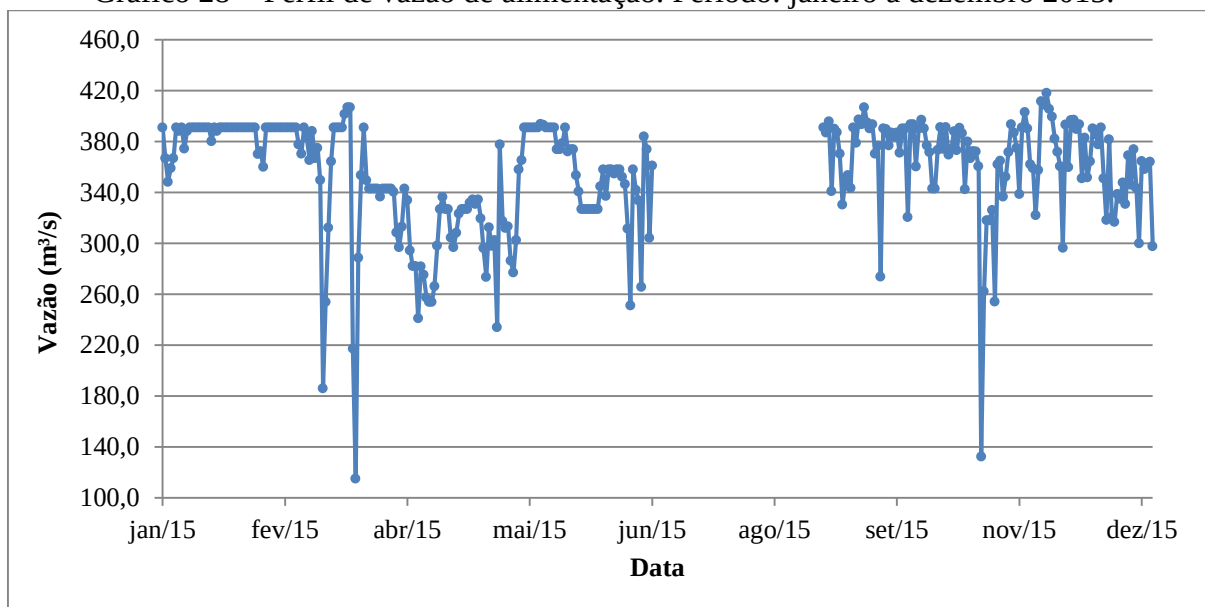
Figura 10 – Configuração do ressalto hidráulico na calha Parshall.



Fonte: Richter (2009).

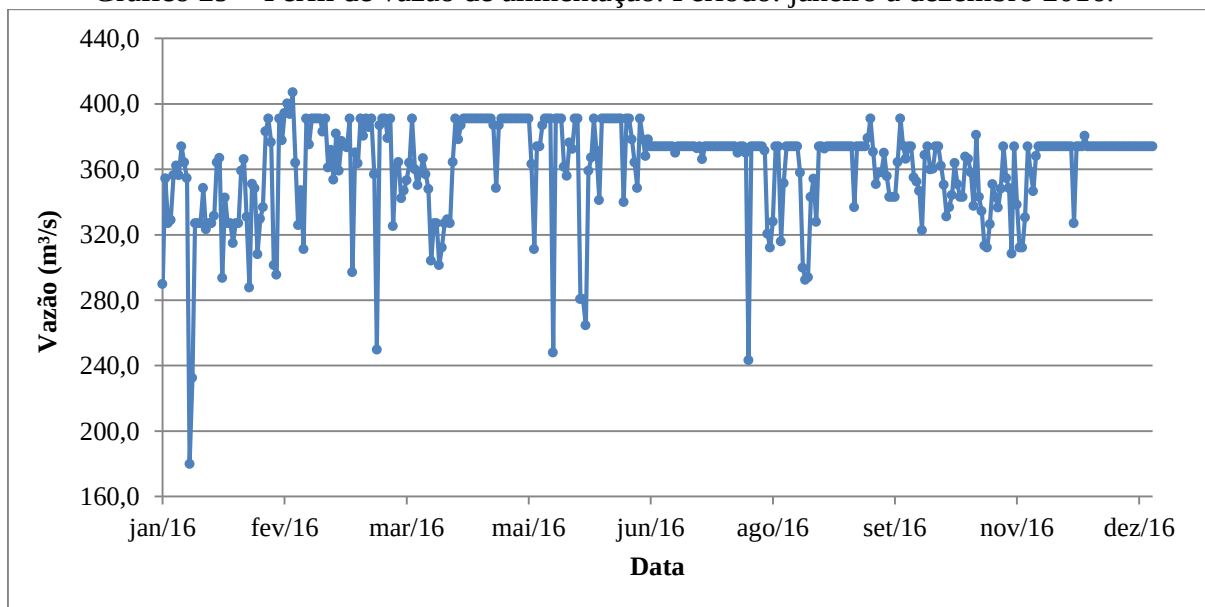
APÊNDICE A – PERFIS DE VAZÃO DE CAPTAÇÃO DA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 28 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2015.



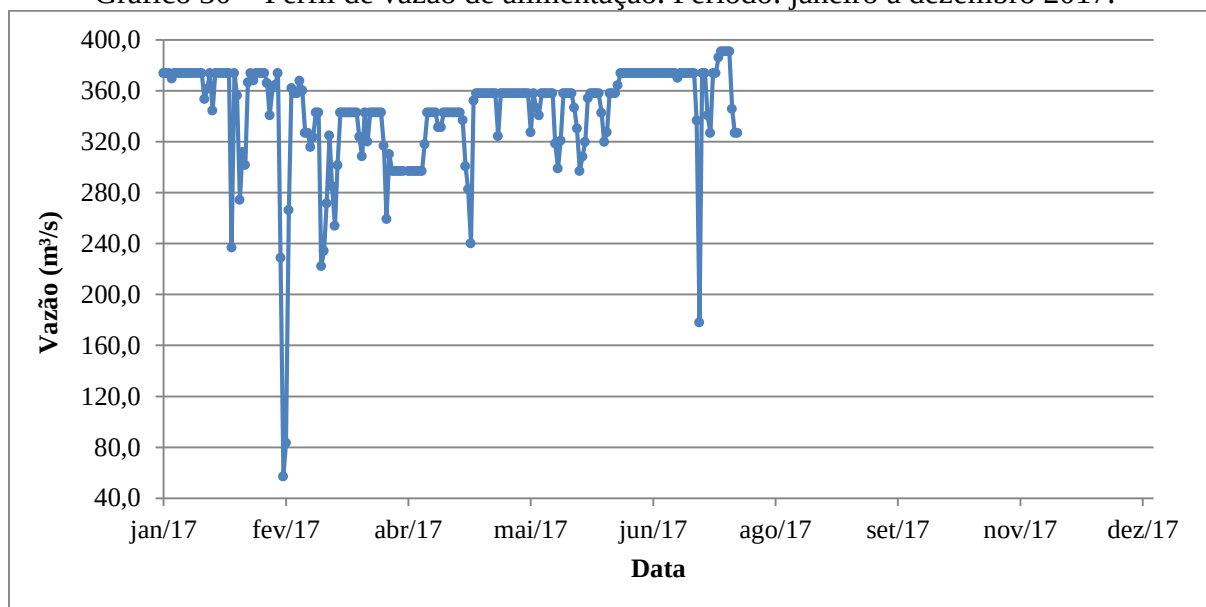
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 29 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

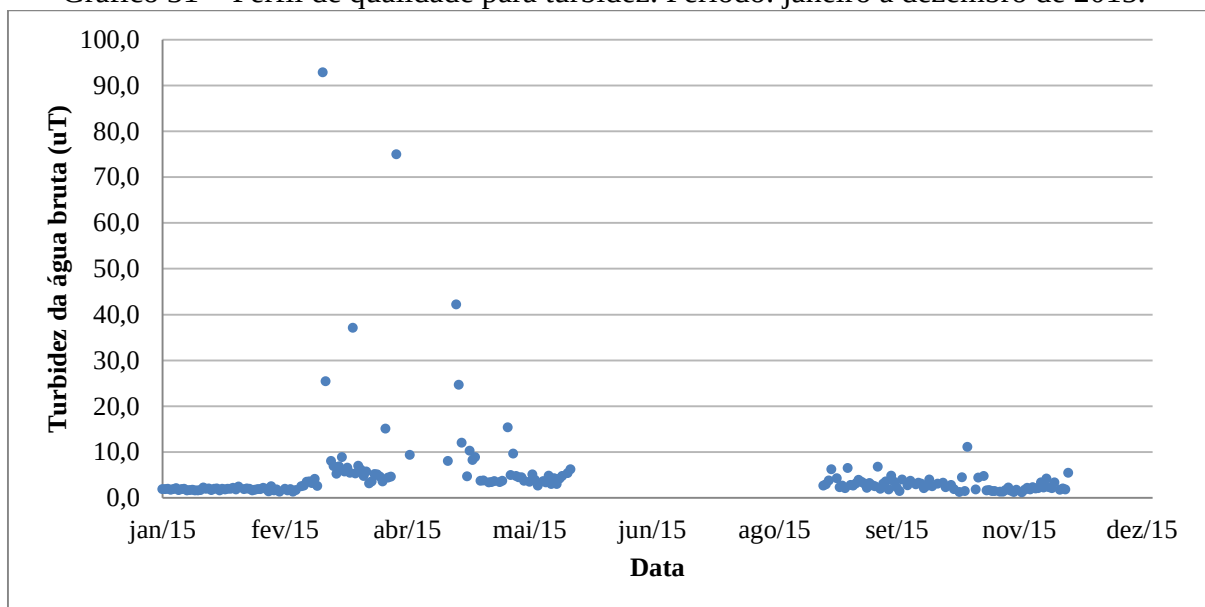
Gráfico 30 – Perfil de vazão de alimentação. Período: janeiro a dezembro 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

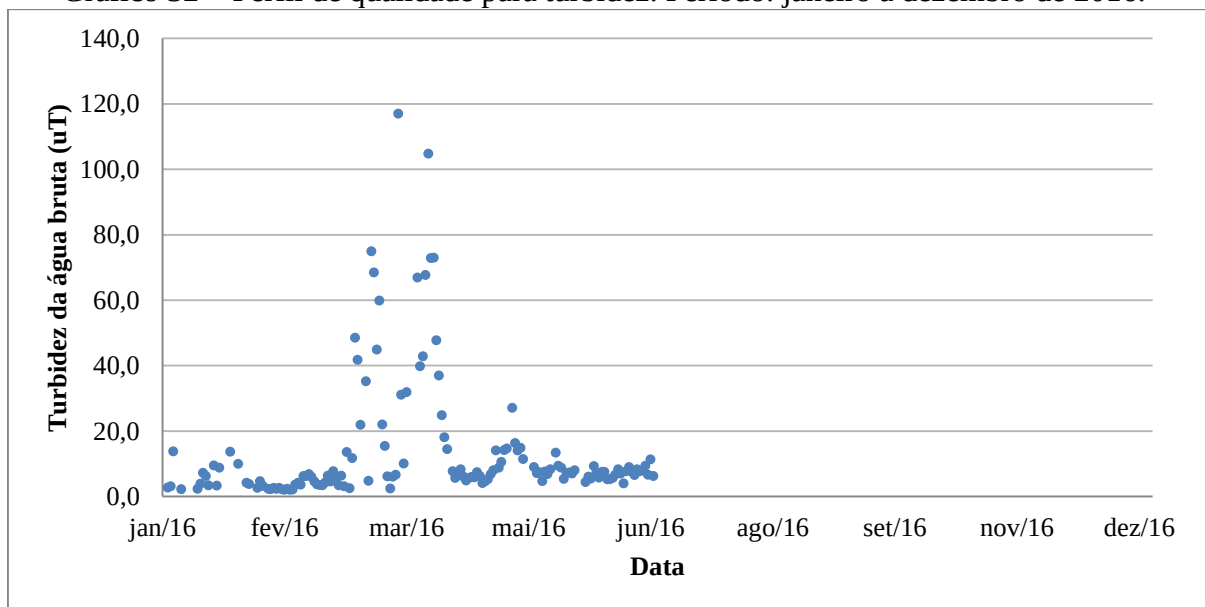
APÊNDICE B – PERFIS DE QUALIDADE PARA TURBIDEZ DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 31 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2015.



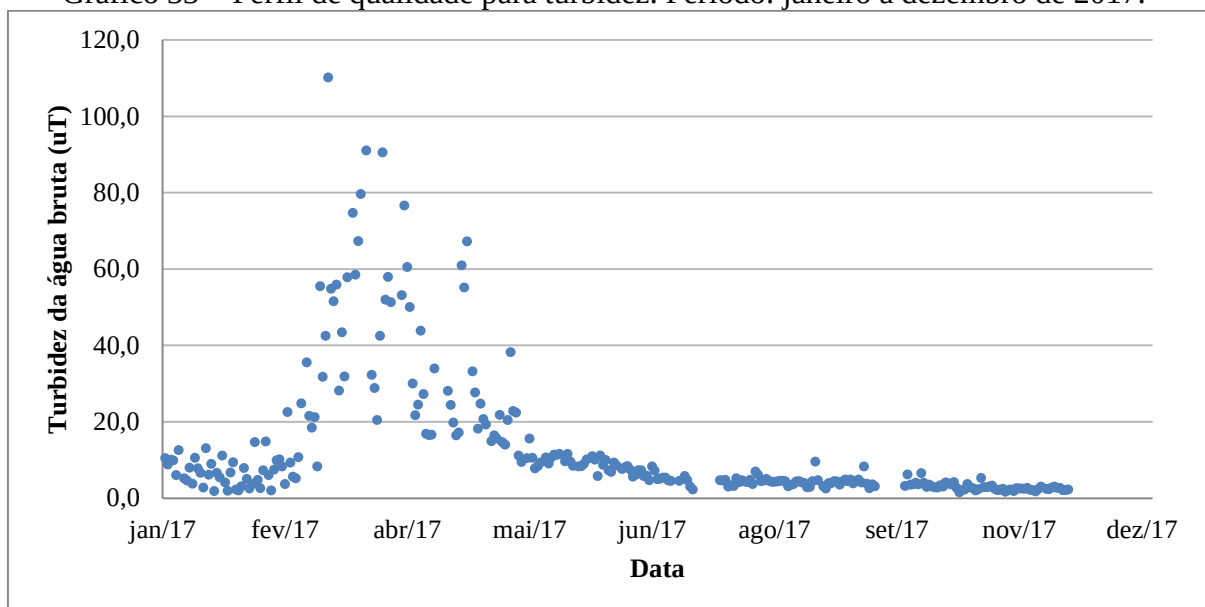
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 32 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

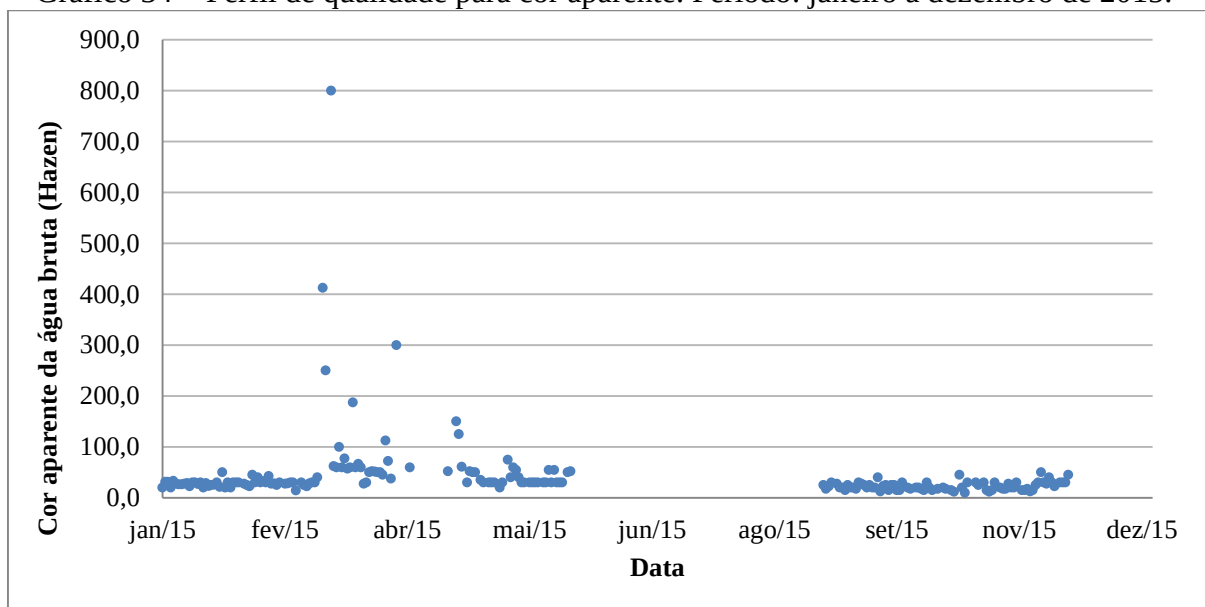
Gráfico 33 – Perfil de qualidade para turbidez. Período: janeiro a dezembro de 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

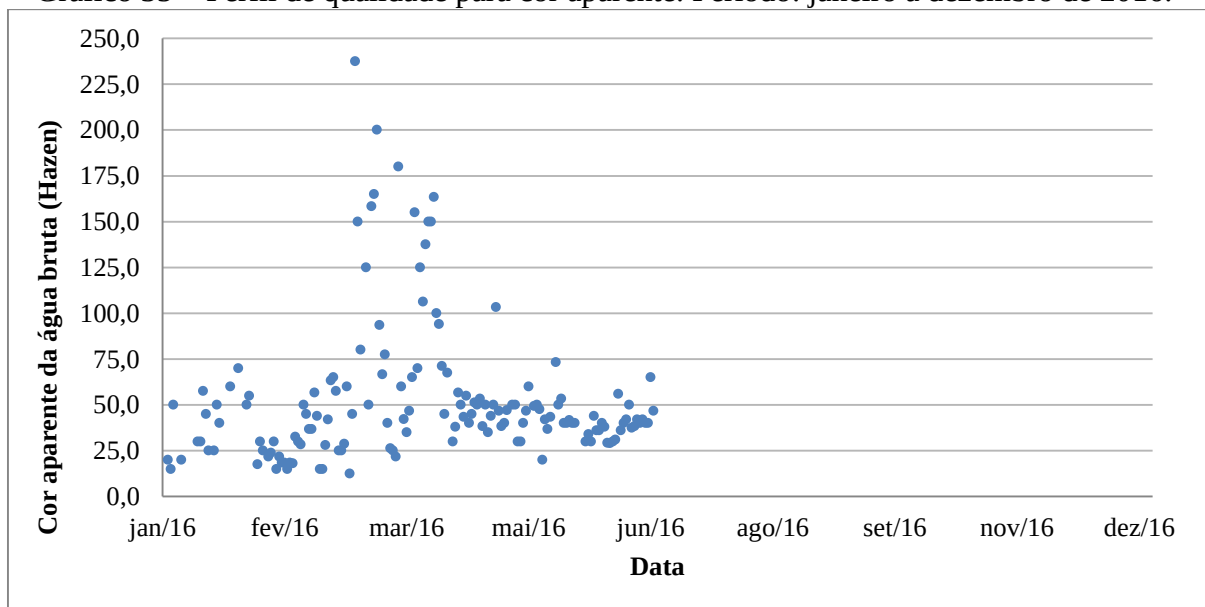
APÊNDICE C – PERFIS DE QUALIDADE PARA COR APARENTE DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 34 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2015.



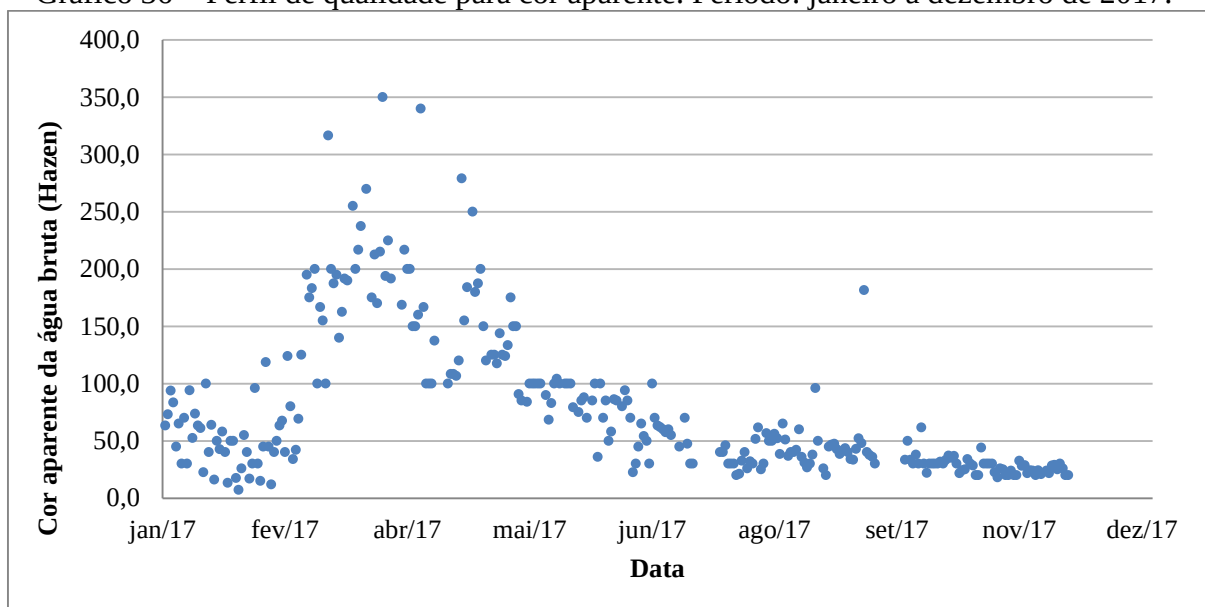
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 35 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

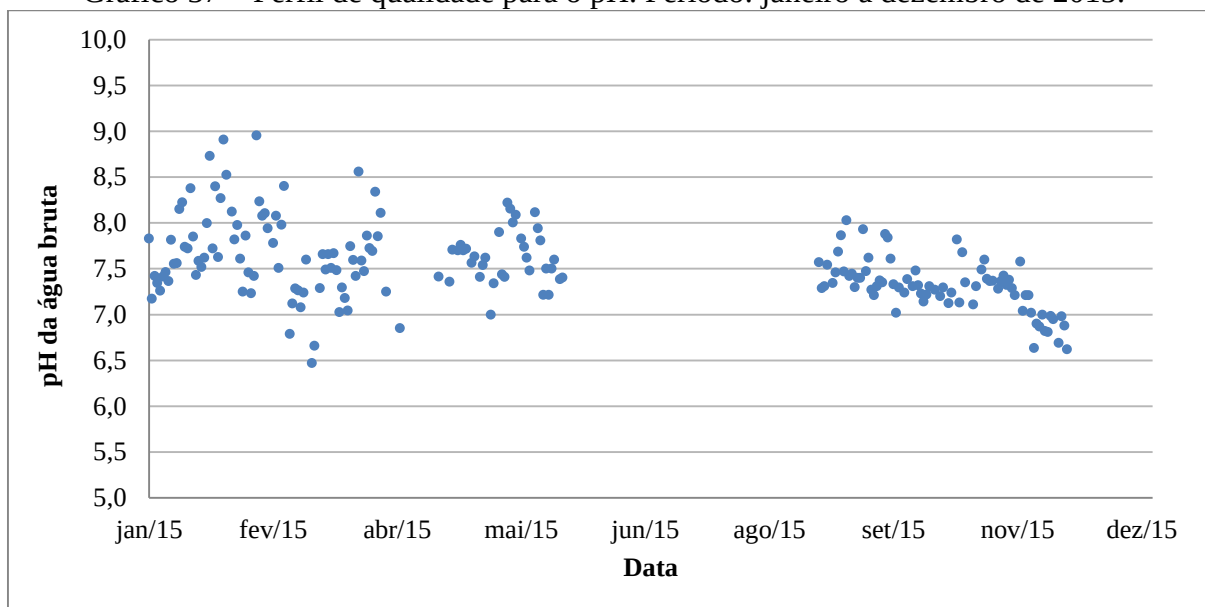
Gráfico 36 – Perfil de qualidade para cor aparente. Período: janeiro a dezembro de 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

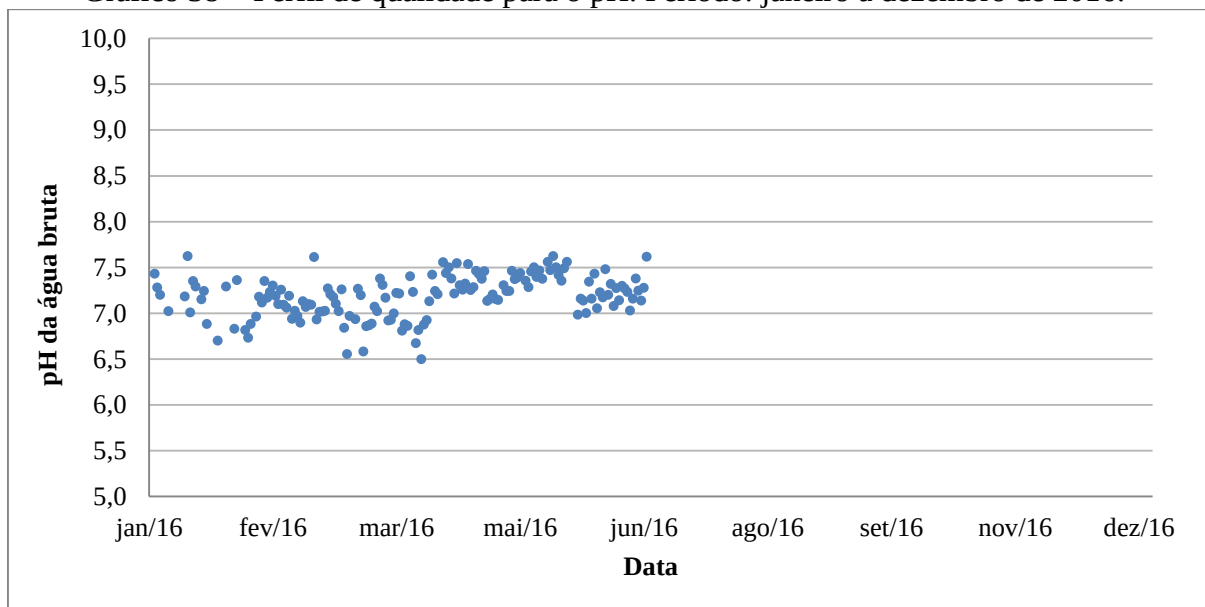
APÊNDICE D – PERFIS DE QUALIDADE PARA O PH DAS ÁGUAS DO RIO ACARAÚ NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 37 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2015.



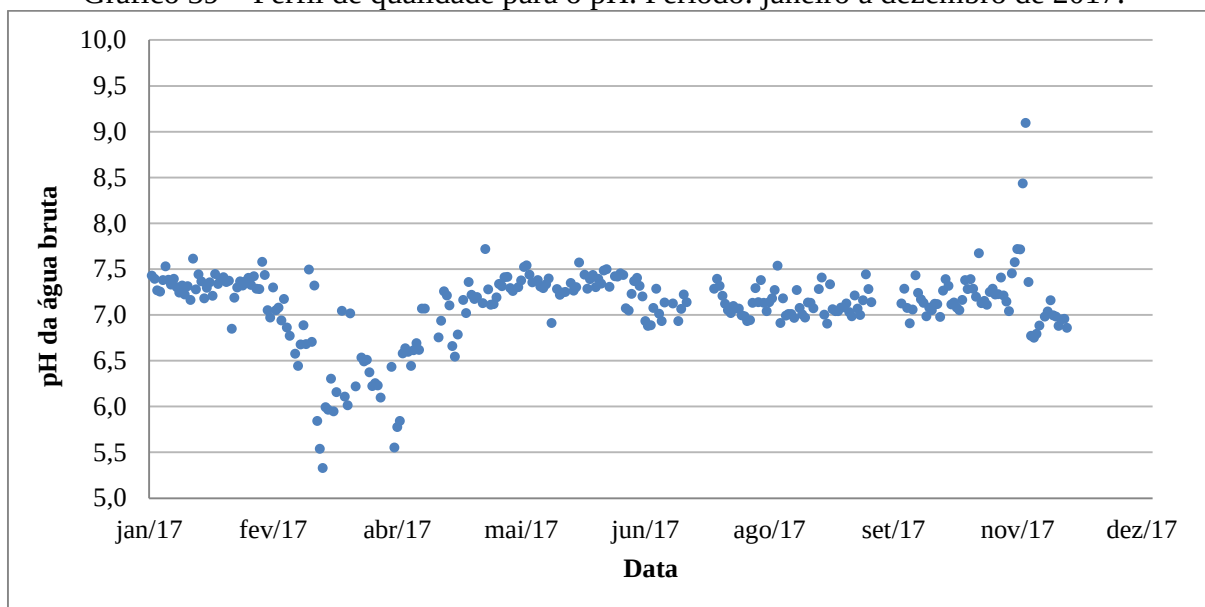
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 38 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

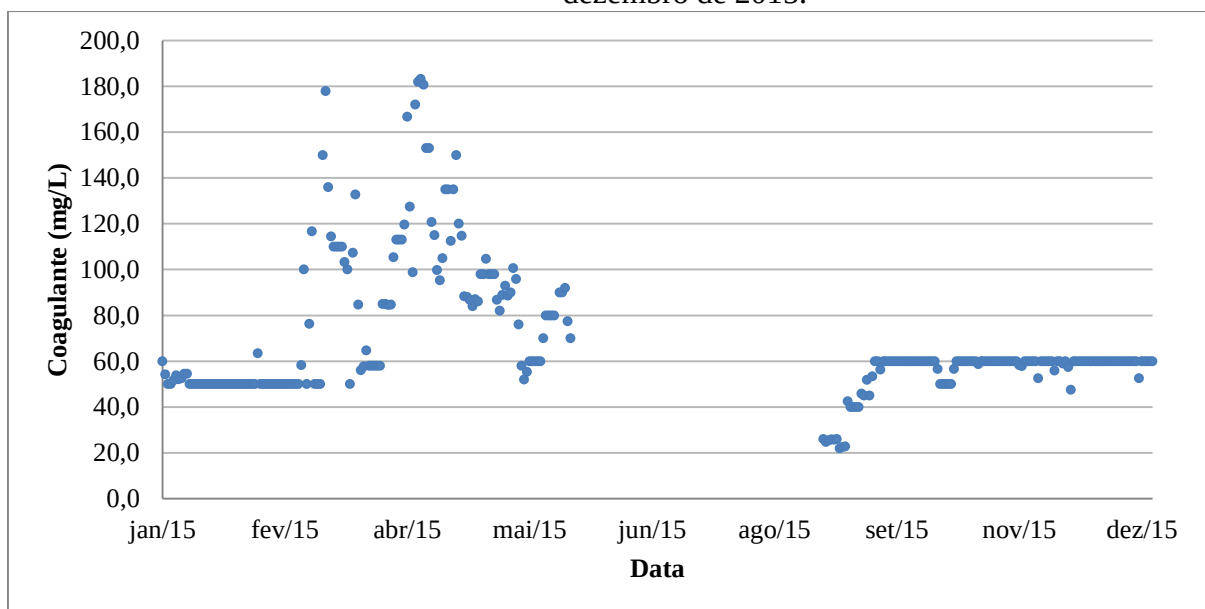
Gráfico 39 – Perfil de qualidade para o pH. Período: janeiro a dezembro de 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

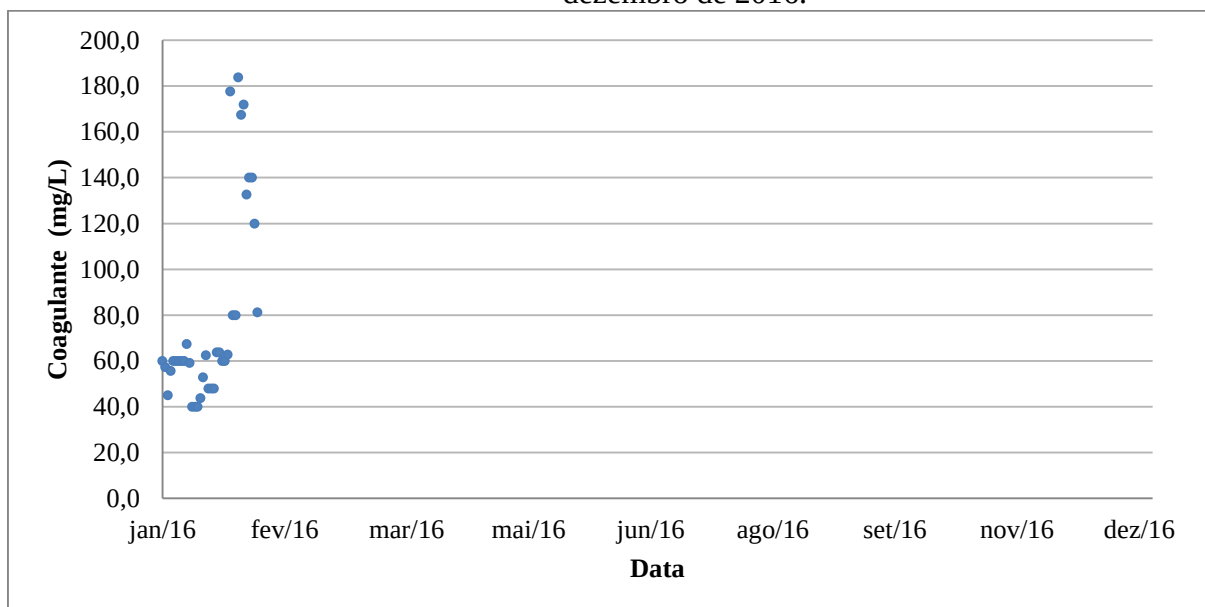
APÊNDICE E – PERFIS DE DOSAGEM DE COAGULANTE PARA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 40 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2015.



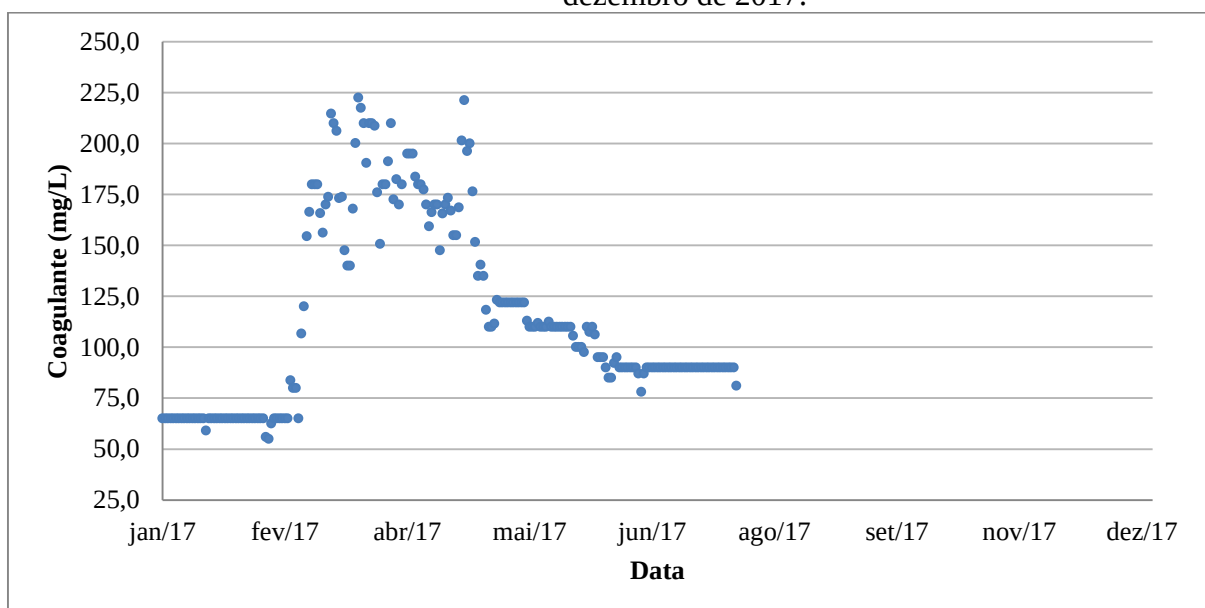
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 41 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

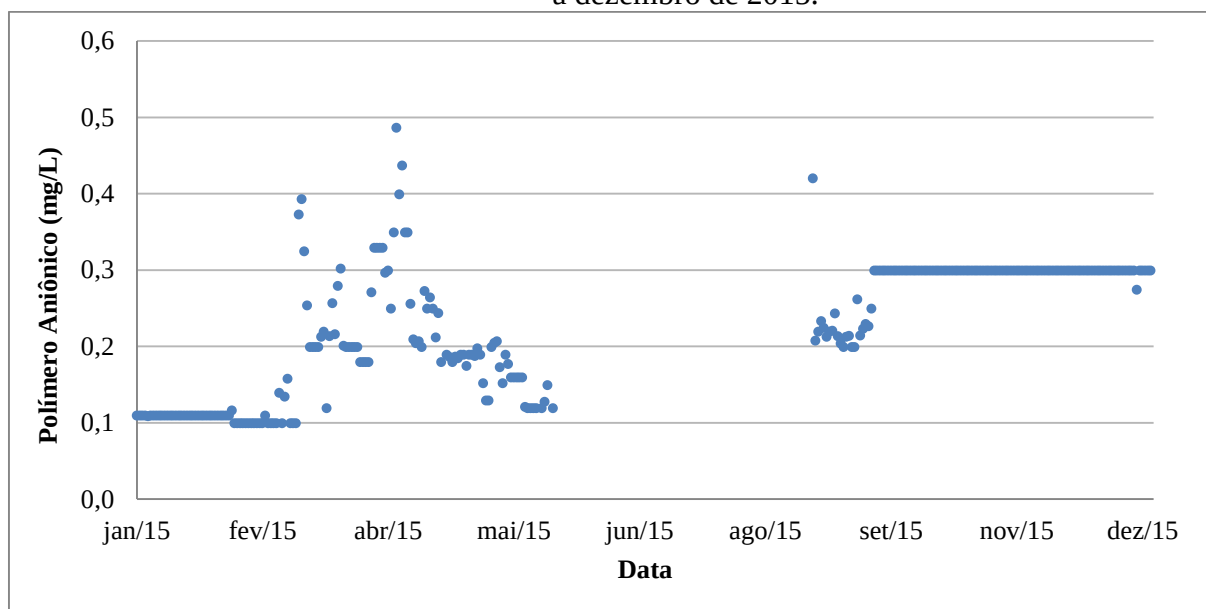
Gráfico 42 – Perfil de dosagem do coagulante da ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

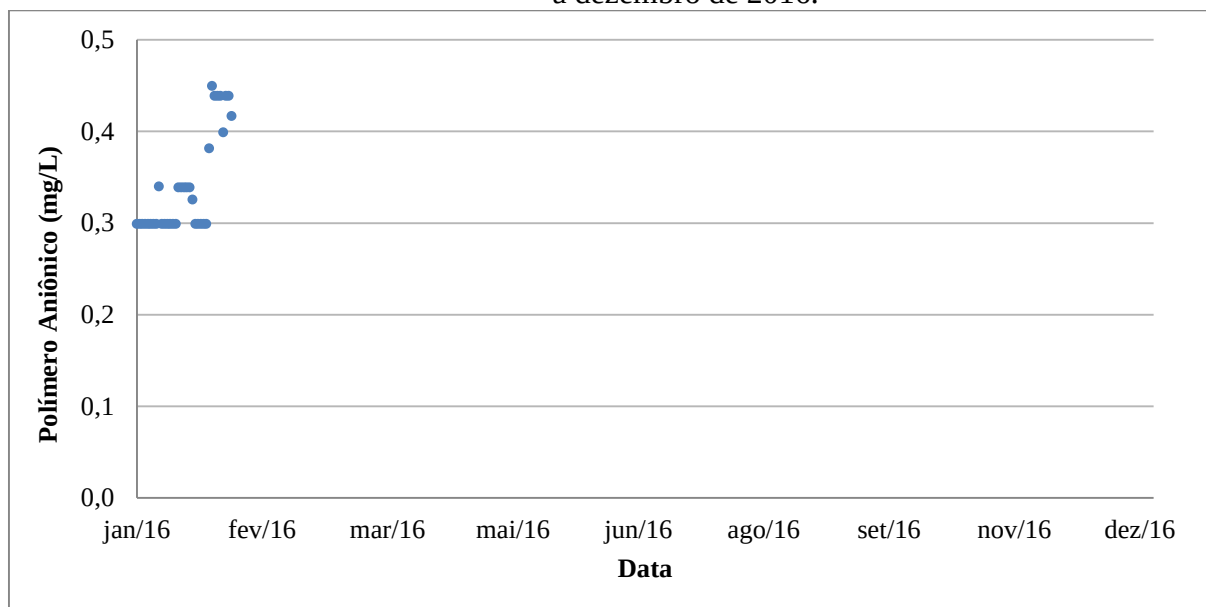
APÊNDICE F – PERFIS DE DOSAGEM DE POLÍMERO ANIÔNICO PARA ETA DOM EXPEDITO NOS ANOS DE 2015 A 2017

Gráfico 43 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2015.



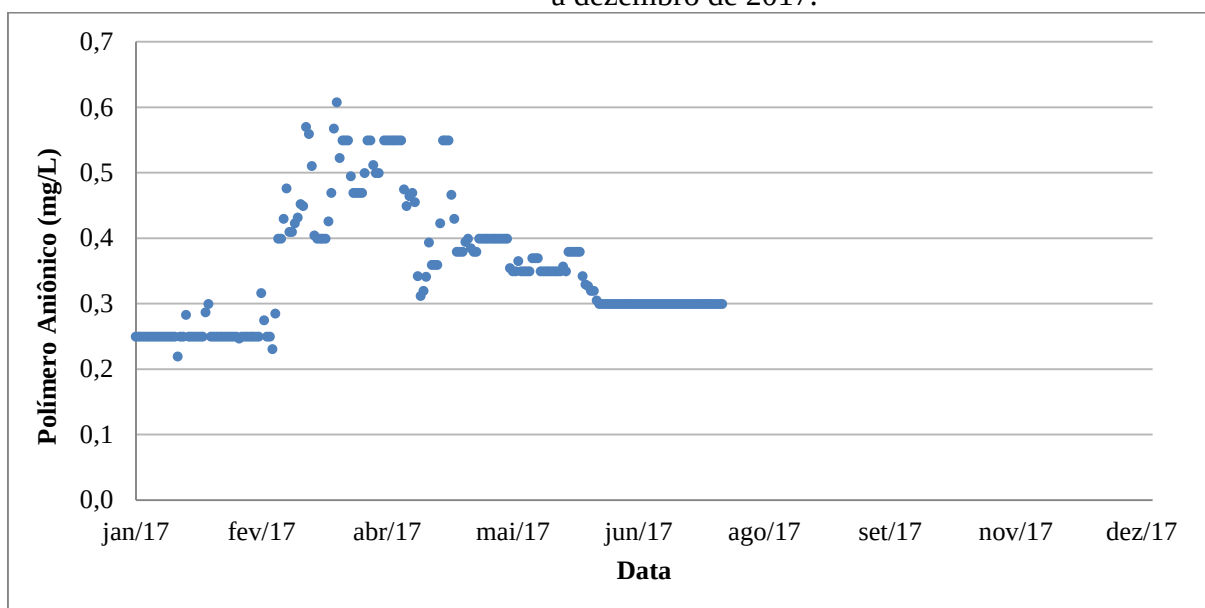
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 44 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2016.



Fonte: Autoria própria (2021).

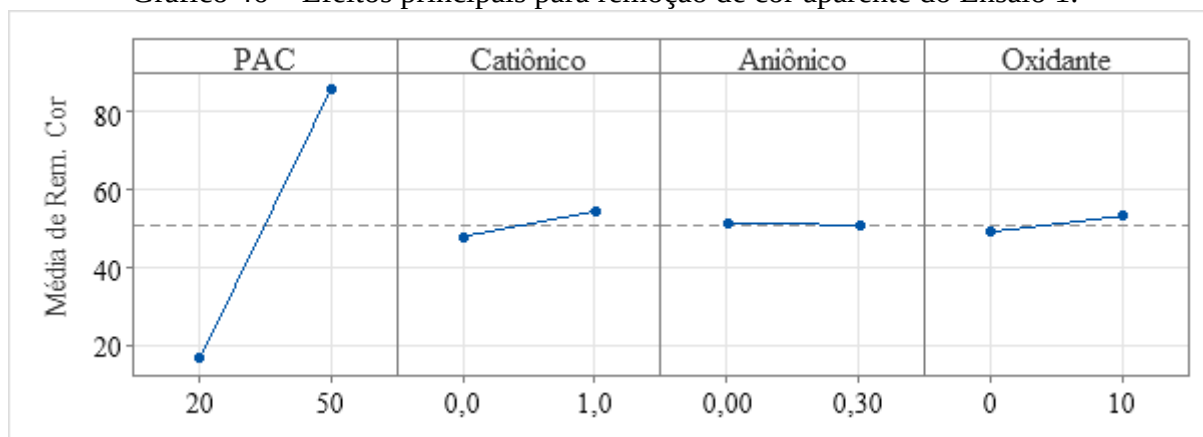
Gráfico 45 – Perfil de dosagem do polímero aniônico na ETA Dom Expedito. Período: janeiro a dezembro de 2017.



Fonte: Autoria própria (2021).

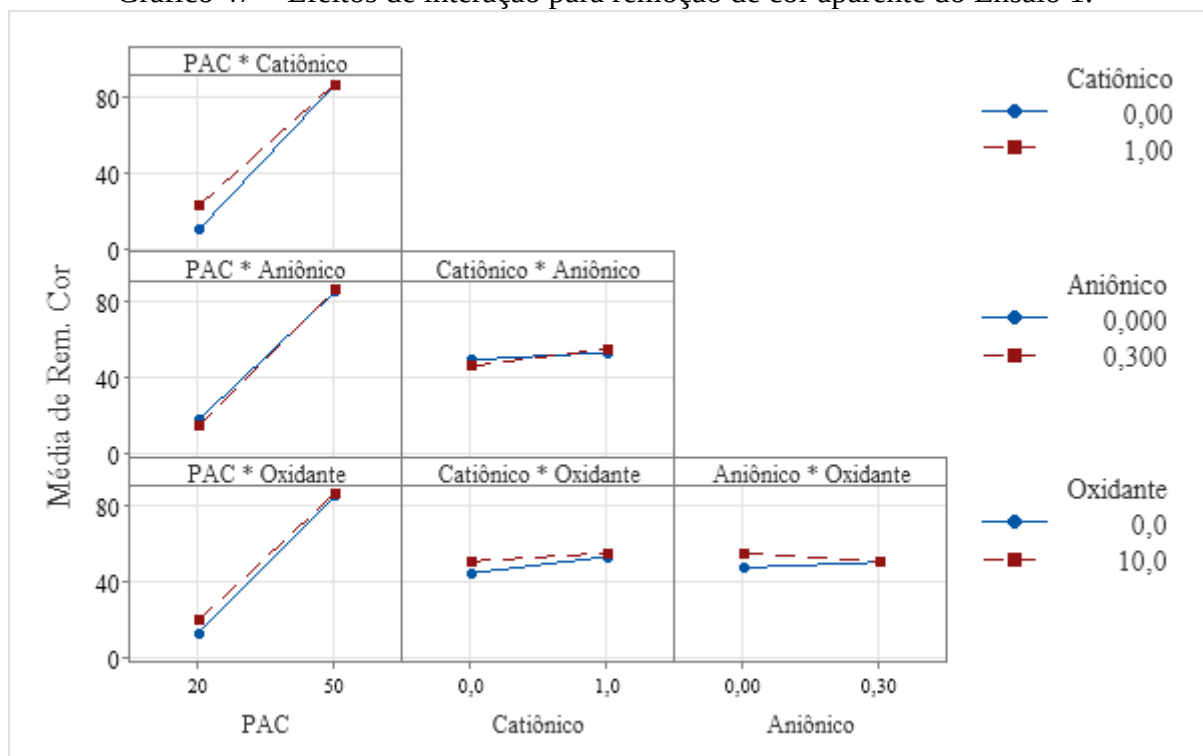
APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO I

Gráfico 46 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 1.



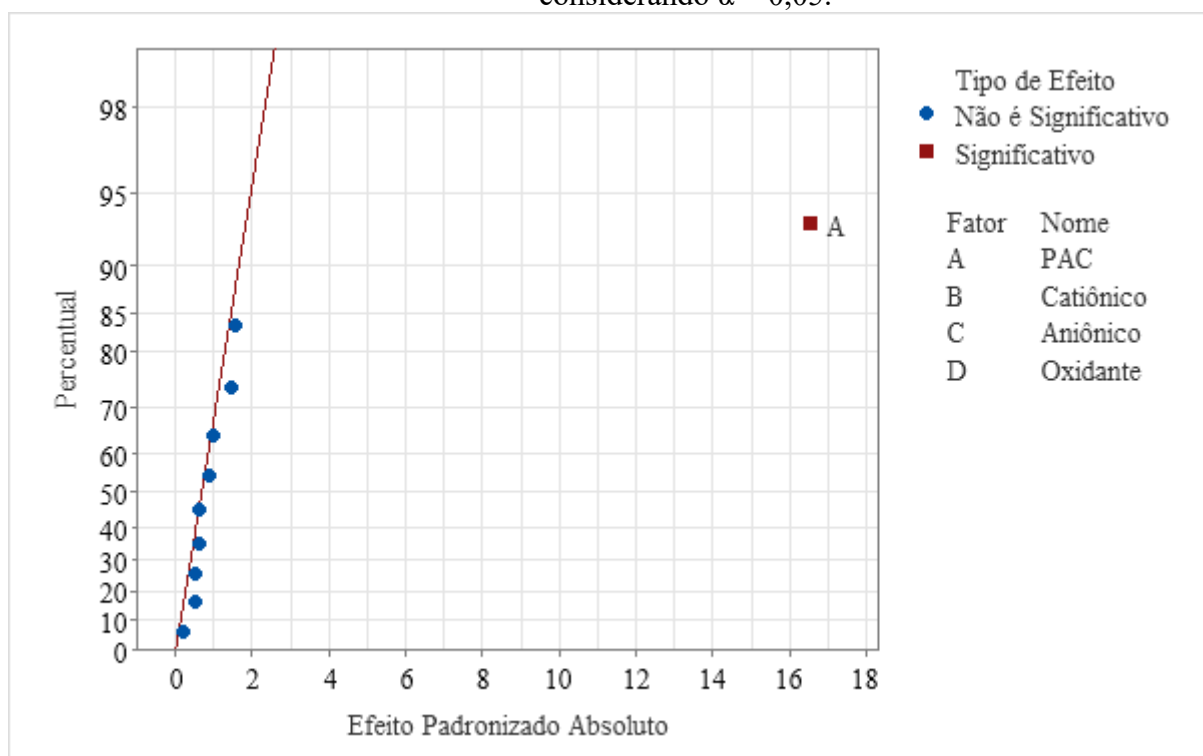
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 47 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 1.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 48 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 1, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 31 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 1.

Termo	Efeito	Coefficiente	Erro padrão	t	Valor P (> t)	
Constante		50,96	1,98	25,71	3,44E-08	***
PAC	69,47	34,74	2,10	16,52	7,27E-07	***
Catiônico	6,49	3,25	2,10	1,54	0,167	
Aniônico	-0,72	-0,36	2,10	-0,17	0,869	
Oxidante	4,09	2,04	2,10	0,97	0,364	
PAC:Catiônico	-6,01	-3,00	2,10	-1,43	0,196	
PAC:Aniônico	2,16	1,08	2,10	0,51	0,623	
PAC:Oxidante	-2,64	-1,32	2,10	-0,63	0,549	
Catiônico:Aniônico	2,64	1,32	2,10	0,63	0,549	
Catiônico:Oxidante	-2,16	-1,08	2,10	-0,51	0,623	
Aniônico:Oxidante	-3,61	-1,80	2,10	-0,86	0,420	
Significância:	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					
R^2 : 97,56%		R^2 ajustado: 94,08%				

Fonte: Autoria própria (2021).

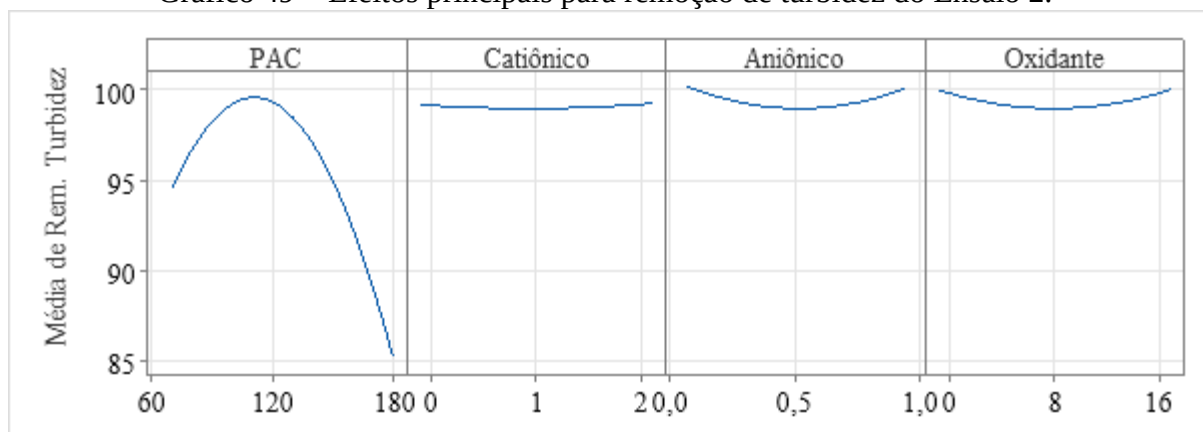
Tabela 32 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 1.

	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	<i>F</i>	Valor <i>P</i> (> <i>F</i>)	
Modelo	10	19832,00	1983,20	28,04	1,05E-04	***
Linear	4	19542,10	4885,50	69,07	1,05E-05	***
PAC	1	19304,70	19304,70	272,93	7,27E-07	***
Catiônico	1	168,50	168,50	2,38	0,167	
Aniônico	1	2,10	2,10	0,03	0,869	
Oxidante	1	66,80	66,80	0,94	0,364	
Interações de 2 fatores	6	289,90	48,30	0,68	0,671	
PAC:Catiônico	1	144,50	144,50	2,04	0,196	
PAC:Aniônico	1	18,70	18,70	0,26	0,623	
PAC:Oxidante	1	28,00	28,00	0,40	0,549	
Catiônico:Aniônico	1	28,00	28,00	0,40	0,549	
Catiônico:Oxidante	1	18,70	18,70	0,26	0,623	
Aniônico:Oxidante	1	52,00	52,00	0,74	0,420	
Erro	7	495,10	70,70			
Curvatura	1	251,70	251,70	6,21	0,047	
Falta de ajuste	5	125,00	25,00	0,21	0,918	
Erro Puro	1	118,30	118,30			
Total	17	20327,10				
Significância:	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1					

Fonte: Autoria própria (2021).

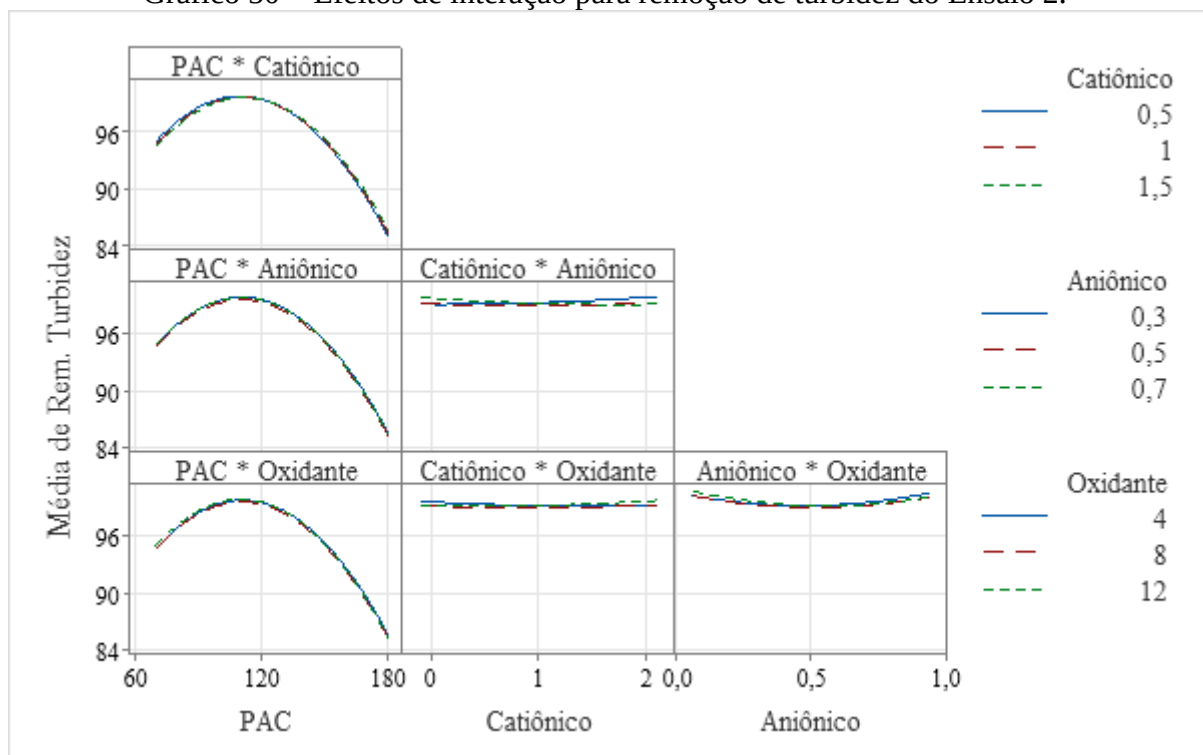
APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ DO ENSAIO II

Gráfico 49 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 2.



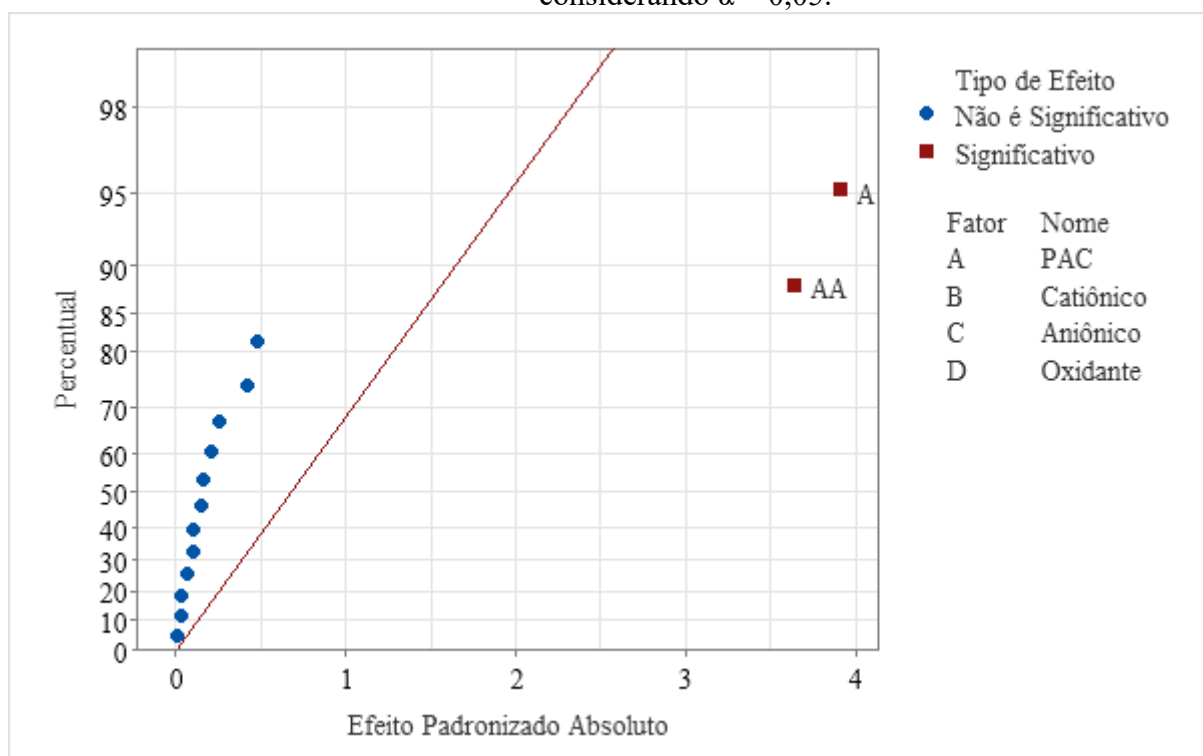
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 50 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 2.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 51 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 33 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 2.

Termo	Coeficiente	Erro padrão	t	Valor P ($> t $)	
Constante	98,92	1,36	72,77	0,00	***
PAC	-2,14	0,55	-3,90	0,002	**
Catiônico	0,02	0,55	0,03	0,976	
Aniônico	-0,03	0,55	-0,06	0,953	
Oxidante	0,01	0,55	0,01	0,992	
PAC²	-1,88	0,52	-3,63	0,003	**
Catiônico ²	0,05	0,52	0,10	0,922	
Aniônico ²	0,25	0,52	0,47	0,644	
Oxidante ²	0,22	0,52	0,42	0,682	
PAC:Catiônico	0,14	0,69	0,20	0,843	
PAC:Aniônico	-0,02	0,69	-0,03	0,973	
PAC:Oxidante	-0,07	0,69	-0,10	0,918	
Catiônico:Aniônico	-0,17	0,69	-0,25	0,806	
Catiônico:Oxidante	0,11	0,69	0,16	0,876	
Aniônico:Oxidante	-0,10	0,69	-0,15	0,883	
Significância:		0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1			
R^2 : 71,76%		R^2 ajustado:		41,36%	

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 34 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 2.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	F	Valor P(>F)	
Modelo	14	247,96	17,71	2,36	0,065	.
Linear	4	114,47	28,62	3,81	0,029	*
PAC	1	114,43	114,43	15,25	0,002	**
Catiônico	1	0,01	0,01	0,00	0,976	
Aniônico	1	0,03	0,03	0,00	0,953	
Oxidante	1	0,00	0,00	0,00	0,992	
Quadrado	4	132,26	33,07	4,41	0,018	*
PAC²	1	98,99	98,99	13,19	0,003	**
Catiônico ²	1	0,08	0,08	0,01	0,922	
Aniônico ²	1	1,68	1,68	0,22	0,644	
Oxidante ²	1	1,32	1,32	0,18	0,682	
Interações de 2 fatores	6	1,23	0,21	0,03	1,000	
PAC:Catiônico	1	0,31	0,31	0,04	0,843	
PAC:Aniônico	1	0,01	0,01	0,00	0,973	
PAC:Oxidante	1	0,08	0,08	0,01	0,918	
Catiônico:Aniônico	1	0,47	0,47	0,06	0,806	
Catiônico:Oxidante	1	0,19	0,19	0,03	0,876	
Aniônico:Oxidante	1	0,17	0,17	0,02	0,883	
Erro	13	97,56	7,51			
Falta de ajuste	10	97,23	9,72	86,73	0,002	
Erro Puro	3	0,34				
Total	27	345,52				
Significância:	0	****	0,001	***	0,01	**
				*	0,05	*
				.	0,1	.
						1

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 35 – Efeitos estimados e erro padrão do modelo ajustado para remoção de turbidez do Ensaio 2.

Termo	Coeficiente	Erro padrão	<i>t</i>	Valor P (> t)	
Constante	98,92	1,13	87,42	0,00	***
PAC	-2,14	0,46	-4,69	1,59E-04	***
Catiônico	0,02	0,46	0,04	0,971	
Aniônico	-0,03	0,46	-0,07	0,943	
Oxidante	0,01	0,46	0,01	0,990	
PAC²	-1,88	0,43	-4,36	3,35E-04	***
Catiônico ²	0,05	0,43	0,12	0,906	
Aniônico ²	0,25	0,43	0,57	0,577	
Oxidante ²	0,22	0,43	0,50	0,621	
Significância:		0 '****'	0,001 '***'	0,01 '*'	0,05 '.'
<i>R</i> ² : 71,41%		<i>R</i> ² ajustado:		59,37%	

Fonte: Autoria própria (2021).

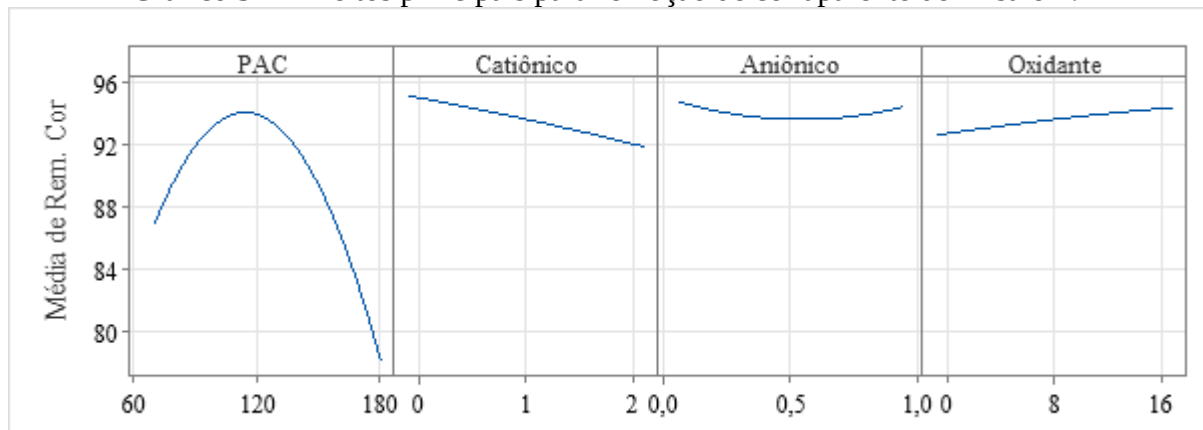
Tabela 36 – Análise de variância do modelo ajustado para remoção de turbidez do Ensaio 2.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	<i>F</i>	Valor <i>P</i> (> <i>F</i>)	
Modelo	8	246,73	30,84	5,93	0,001	***
Linear	4	114,47	28,62	5,50	0,004	**
PAC	1	114,43	114,43	22,01	1,59E-04	***
Catiônico	1	0,01	0,01	0,00	0,971	
Aniônico	1	0,03	0,03	0,01	0,943	
Oxidante	1	0,00	0,00	0,00	0,990	
Quadrado	4	132,26	33,07	6,36	0,002	**
PAC²	1	98,99	98,99	19,04	3,35E-04	***
Catiônico ²	1	0,08	0,08	0,01	0,906	
Aniônico ²	1	1,68	1,68	0,32	0,577	
Oxidante ²	1	1,32	1,32	0,25	0,621	
Erro	19	98,79	5,20			
Falta de ajuste	16	98,46	6,15	54,89	0,003	
Erro Puro	3	0,34	0,11			
Total	27	345,52				
Significância:		0 '****'	0,001 '***'	0,01 '*'	0,05 '.'	0,1 ' ' 1

Fonte: Autoria própria (2021).

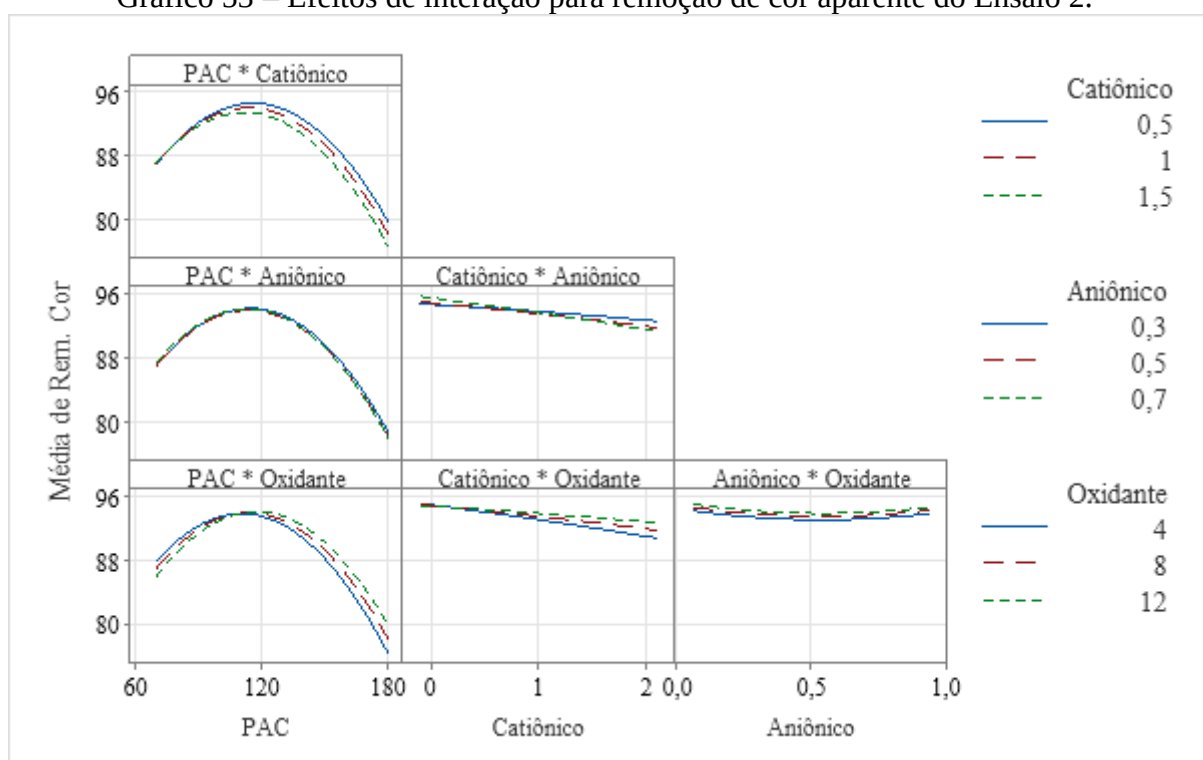
APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO II

Gráfico 52 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 2.



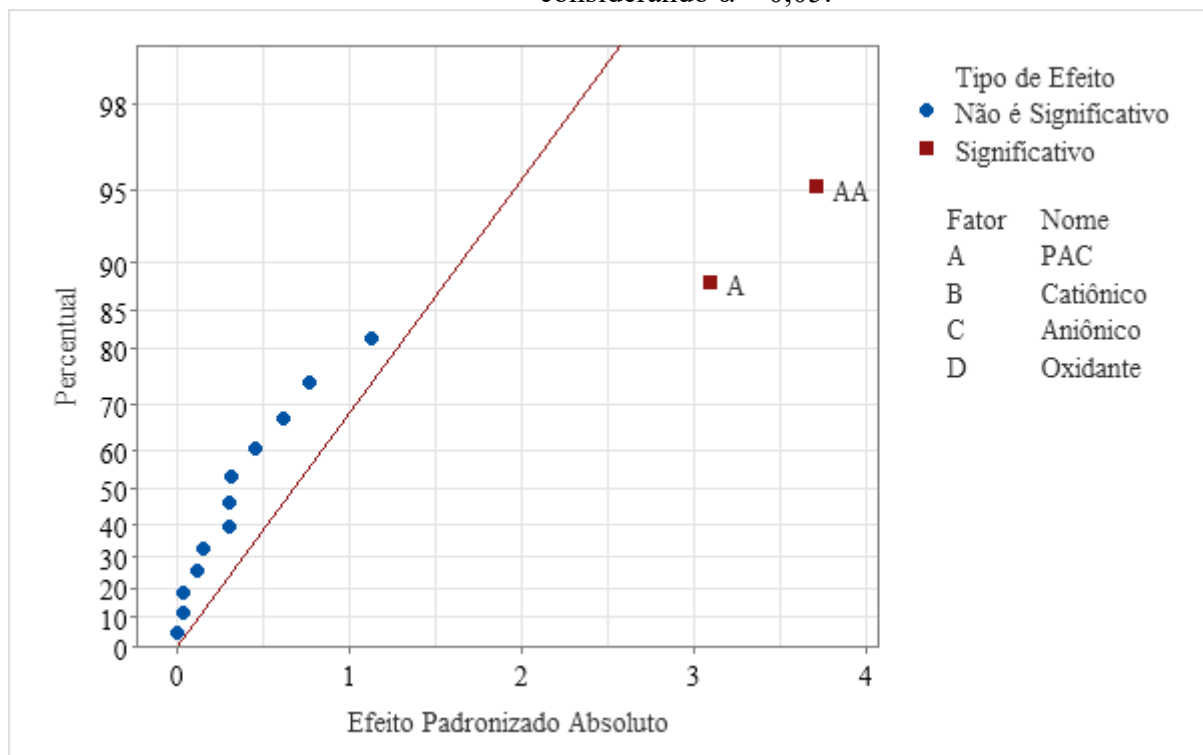
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 53 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 2.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 54 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 2, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 37 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 2.

Termo	Coefficiente	Erro padrão	t	Valor P (> t)	
Constante	93,57	1,62	57,90	0,00	***
PAC	-2,02	0,65	-3,09	0,009	**
Catiônico	-0,74	0,65	-1,13	0,277	
Aniônico	-0,08	0,65	-0,12	0,904	
Oxidante	0,40	0,65	0,62	0,549	
PAC²	-2,28	0,62	-3,70	0,003	**
Catiônico ²	-0,03	0,62	-0,04	0,966	
Aniônico ²	0,20	0,62	0,32	0,752	
Oxidante ²	-0,03	0,62	-0,04	0,966	
PAC:Catiônico	-0,38	0,81	-0,46	0,653	
PAC:Aniônico	-0,13	0,81	-0,15	0,880	
PAC:Oxidante	0,63	0,81	0,77	0,456	
Catiônico:Aniônico	-0,25	0,81	-0,31	0,764	
Catiônico:Oxidante	0,25	0,81	0,31	0,764	
Aniônico:Oxidante	0,00	0,81	0,00	1,000	
Significância:		0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1			
R ² : 69,09%		R ² ajustado:		35,80%	

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 38 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 2.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	F	Valor P(>F)	
Modelo	14	308,22	22,02	2,08	0,099	.
Linear	4	118,93	29,73	2,80	0,070	.
PAC	1	101,10	101,10	9,53	0,009	**
Catiônico	1	13,65	13,65	1,29	0,277	
Aniônico	1	0,16	0,16	0,02	0,904	
Oxidante	1	4,02	4,02	0,38	0,549	
Quadrado	4	178,54	44,64	4,21	0,021	*
PAC²	1	145,43	145,43	13,71	0,003	**
Catiônico ²	1	0,02	0,02	0,00	0,966	
Aniônico ²	1	1,11	1,11	0,10	0,752	
Oxidante ²	1	0,02	0,02	0,00	0,966	
Interações de 2 fatores	6	10,75	1,79	0,17	0,981	
PAC:Catiônico	1	2,25	2,25	0,21	0,653	
PAC:Aniônico	1	0,25	0,25	0,02	0,880	
PAC:Oxidante	1	6,25	6,25	0,59	0,456	
Catiônico:Aniônico	1	1,00	1,00	0,09	0,764	
Catiônico:Oxidante	1	1,00	1,00	0,09	0,764	
Aniônico:Oxidante	1	0,00	0,00	0,00	1,000	
Erro	13	137,89	10,61			
Falta de ajuste	10	137,14	13,71	54,86	0,004	
Erro Puro	3	0,75	0,25			
Total	27	446,11				
Significância:	0	****	0,001	***	0,01	* 0,05 ' ' 0,1 ' ' 1

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 39 – Efeitos estimados e erro padrão do modelo ajustado para remoção de cor aparente do Ensaio 2.

Termo	Coefficiente	Erro padrão	<i>t</i>	Valor P (> <i>t</i>)	
Constante	93,57	1,39	67,42	0,00	***
PAC	-2,02	0,56	-3,59	0,002	**
Catiônico	-0,74	0,56	-1,32	0,202	
Aniônico	-0,08	0,56	-0,14	0,888	
Oxidante	0,40	0,56	0,72	0,482	
PAC²	-2,28	0,53	-4,31	3,76E-04	***
Catiônico ²	-0,03	0,53	-0,05	0,961	
Aniônico ²	0,20	0,53	0,38	0,711	
Oxidante ²	-0,03	0,53	-0,05	0,961	
Significância:		0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1			
<i>R</i> ² : 66,68%		<i>R</i> ² ajustado:		52,65%	

Fonte: Autoria própria (2021).

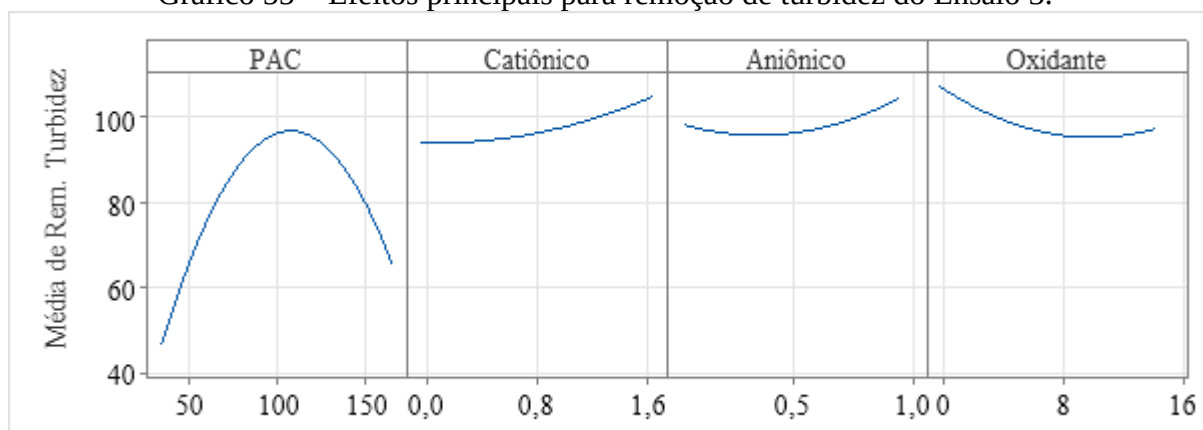
Tabela 40 – Análise de variância do modelo ajustado para remoção de cor aparente do Ensaio 2.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	<i>F</i>	Valor <i>P</i> (> <i>F</i>)	
Modelo	8	297,47	37,18	4,75	0,003	**
Linear	4	118,93	29,73	3,80	0,020	*
PAC	1	101,10	101,10	12,92	0,002	**
Catiônico	1	13,65	13,65	1,74	0,202	
Aniônico	1	0,16	0,16	0,02	0,888	
Oxidante	1	4,02	4,02	0,51	0,482	
Quadrado	4	178,54	44,64	5,71	0,003	**
PAC²	1	145,43	145,43	18,59	3,76E-04	***
Catiônico ²	1	0,02	0,02	0,00	0,961	
Aniônico ²	1	1,11	1,11	0,14	0,711	
Oxidante ²	1	0,02	0,02	0,00	0,961	
Erro	19	148,64	7,82			
Falta de ajuste	16	147,89	9,24	36,97	0,006	
Erro Puro	3	0,75	0,25			
Total	27	446,11				
Significância:		0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1				

Fonte: Autoria própria (2021).

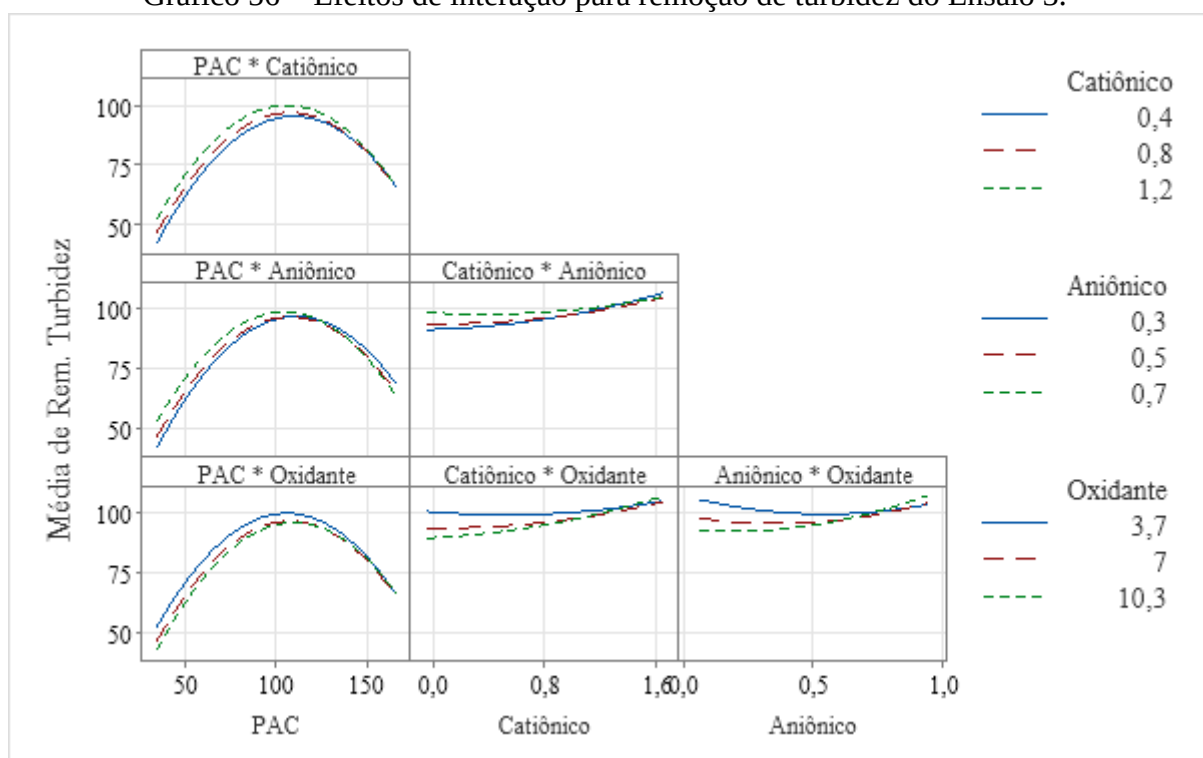
APÊNDICE J – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE TURBIDEZ DO ENSAIO III

Gráfico 55 – Efeitos principais para remoção de turbidez do Ensaio 3.



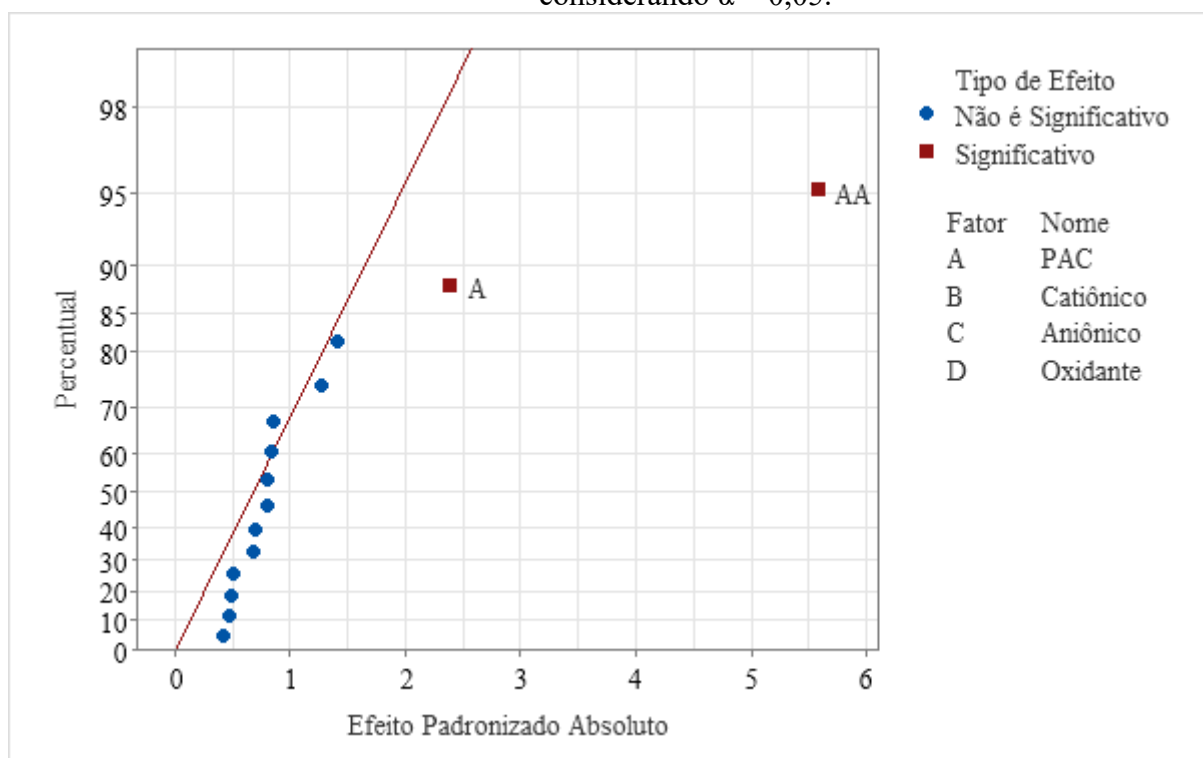
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 56 – Efeitos de interação para remoção de turbidez do Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 57 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de turbidez do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 41 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de turbidez do Ensaio 3.

Termo	Coeficiente	Erro padrão	t	Valor P (> t)	
Constante	96,01	3,62	26,54	5,06E-14	***
PAC	4,22	1,77	2,39	0,031	*
Catiônico	2,57	1,82	1,41	0,178	
Aniônico	1,42	1,77	0,80	0,437	
Oxidante	-2,27	1,78	-1,27	0,222	
PAC²	-8,31	1,49	-5,57	5,31E-05	***
Catiônico ²	0,73	1,72	0,42	0,678	
Aniônico ²	1,03	1,51	0,68	0,507	
Oxidante ²	1,25	1,55	0,80	0,434	
PAC:Catiônico	-1,10	2,23	-0,50	0,627	
PAC:Aniônico	-1,84	2,23	-0,83	0,420	
PAC:Oxidante	1,12	2,23	0,50	0,624	
Catiônico:Aniônico	-1,03	2,23	-0,46	0,651	
Catiônico:Oxidante	1,54	2,23	0,69	0,500	
Aniônico:Oxidante	1,89	2,23	0,85	0,408	
Significância:					0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1
<i>R</i> ² : 77,06%		<i>R</i> ² ajustado:		55,65%	

Fonte: Autoria própria (2021).

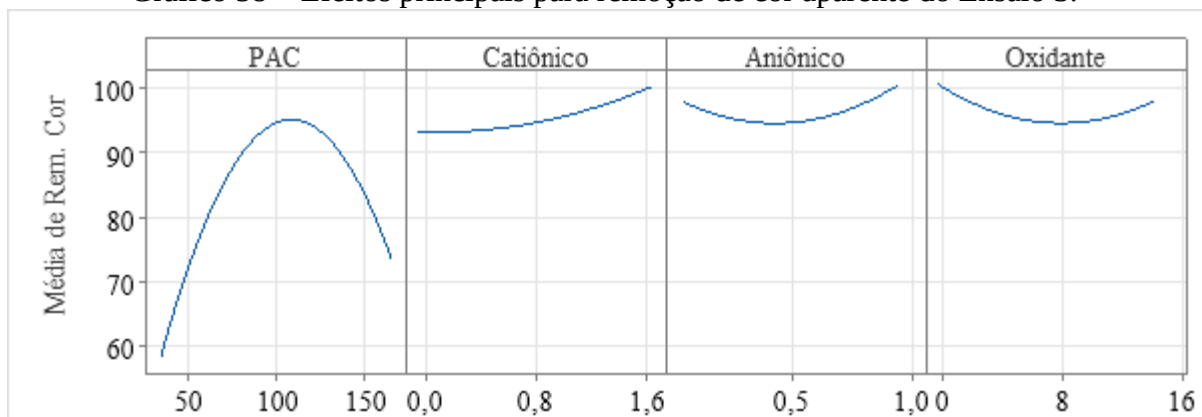
Tabela 42 – Análise de variância para remoção de turbidez do Ensaio 3.

Fonte	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática	F	Valor P(>F)	
Modelo	14	3996,24	285,45	3,60	0,010	**
Linear	4	790,14	197,54	2,49	0,088	.
PAC	1	452,28	452,28	5,70	0,031	**
Catiônico	1	158,55	158,55	2,00	0,178	
Aniônico	1	50,63	50,63	0,64	0,437	
Oxidante	1	128,68	128,68	1,62	0,222	
Quadrado	4	3000,06	750,01	9,46	5,05E-04	***
PAC²	1	2464,26	2464,26	31,08	5,31E-05	***
Catiônico ²	1	14,19	14,19	0,18	0,678	
Aniônico ²	1	36,57	36,57	0,46	0,507	
Oxidante ²	1	51,34	51,34	0,65	0,434	
Interações de 2 fatores	6	206,04	34,34	0,43	0,846	
PAC:Catiônico	1	19,49	19,49	0,25	0,627	
PAC:Aniônico	1	54,42	54,42	0,69	0,420	
PAC:Oxidante	1	19,90	19,90	0,25	0,624	
Catiônico:Aniônico	1	16,89	16,89	0,21	0,651	
Catiônico:Oxidante	1	37,94	37,94	0,48	0,500	
Aniônico:Oxidante	1	57,40	57,40	0,72	0,408	
Erro	15	1189,45	79,30			
Falta de ajuste	10	1181,75	118,17	76,74	7,77E-05	
Erro Puro	5	7,70	1,54			
Total	29	5185,69				
Significância:	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1					

Fonte: Autoria própria (2021).

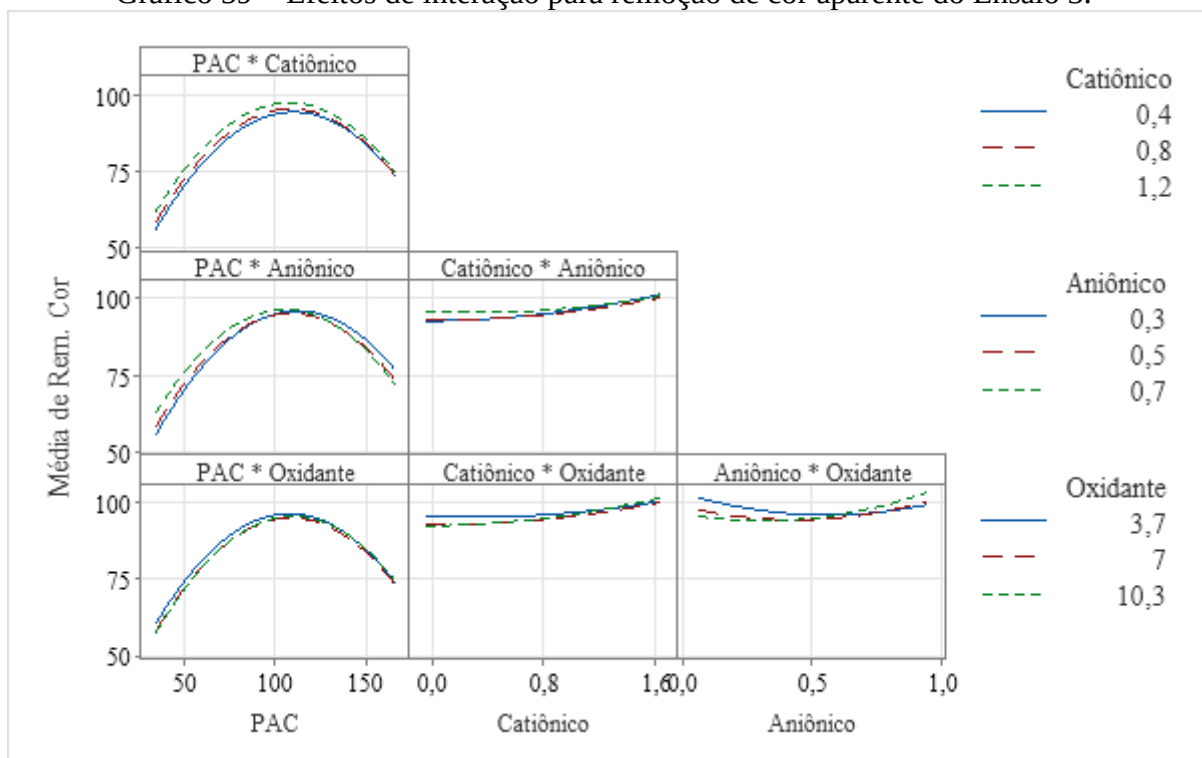
APÊNDICE K – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA REMOÇÃO DE COR APARENTE DO ENSAIO III

Gráfico 58 – Efeitos principais para remoção de cor aparente do Ensaio 3.



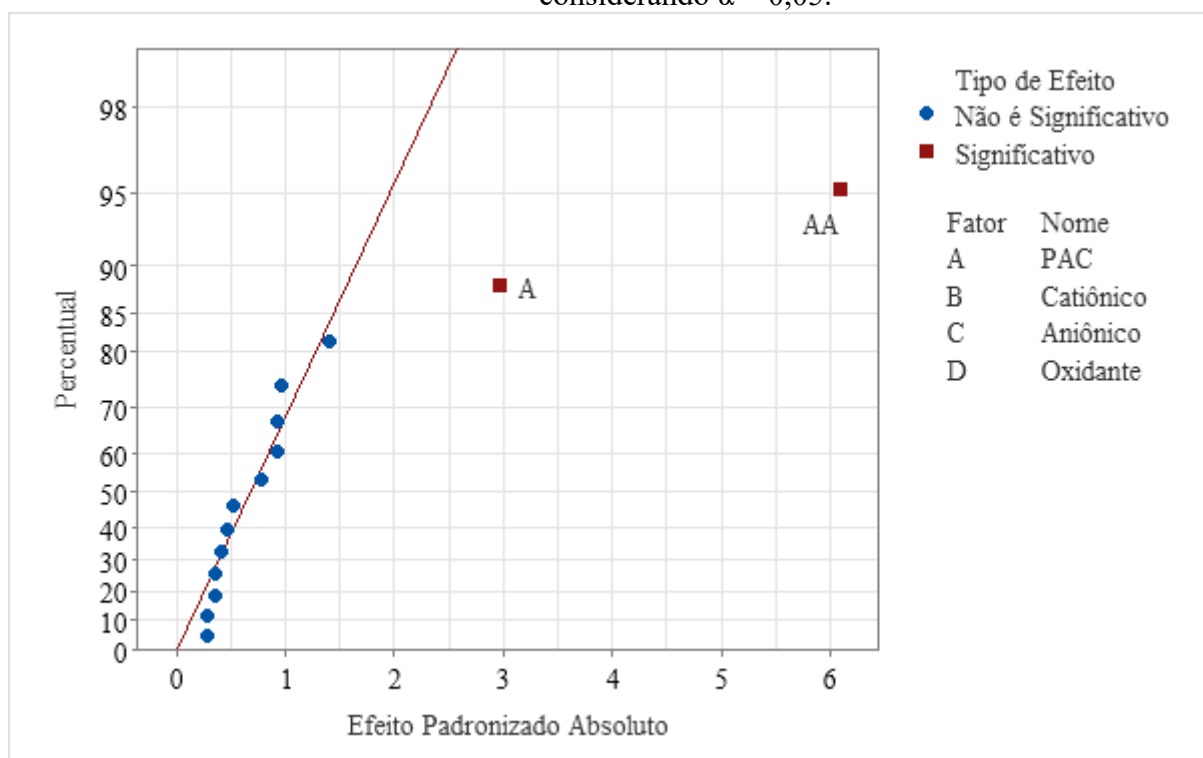
Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 59 – Efeitos de interação para remoção de cor aparente do Ensaio 3.



Fonte: Autoria própria (2021).

Gráfico 60 – *Half Normal* dos Efeitos Padronizados para remoção de cor aparente do Ensaio 3, considerando $\alpha = 0,05$.



Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 43 – Efeitos estimados e erro padrão para remoção de cor aparente do Ensaio 3.

Termo	Coefficiente	Erro padrão	<i>t</i>	Valor P (> t)	
Constante	94,54	2,37	39,93	1,00E-16	***
PAC	3,44	1,16	2,97	0,010	**
Catiônico	1,67	1,19	1,40	0,182	
Aniônico	0,61	1,16	0,52	0,607	
Oxidante	-0,54	1,17	-0,46	0,651	
PAC²	-5,94	0,98	-6,08	2,09E-05	***
Catiônico ²	0,47	1,12	0,42	0,683	
Aniônico ²	0,92	0,99	0,93	0,366	
Oxidante ²	0,97	1,01	0,95	0,355	
PAC:Catiônico	-0,52	1,46	-0,36	0,726	
PAC:Aniônico	-1,35	1,46	-0,93	0,367	
PAC:Oxidante	0,42	1,46	0,29	0,779	
Catiônico:Aniônico	-0,42	1,46	-0,29	0,779	
Catiônico:Oxidante	0,52	1,46	0,36	0,726	
Aniônico:Oxidante	1,15	1,46	0,79	0,444	
Significância:		0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 ' ' 1			
<i>R</i> ² : 79,74%		<i>R</i> ² ajustado:		60,82%	

Fonte: Autoria própria (2021).

Tabela 44 – Análise de variância para remoção de cor aparente do Ensaio 3.

Fonte	<i>F</i>
-------	----------

	Graus de Liberdade	Soma dos Quadrados	Média Quadrática		Valor $P(>F)$	
Modelo	14	2005,23	143,23	4,22	0,004	**
Linear	4	382,90	95,72	2,82	0,063	.
PAC	1	299,65	299,65	8,82	0,010	**
Catiônico	1	66,67	66,67	1,96	0,182	
Aniônico	1	9,36	9,36	0,28	0,607	
Oxidante	1	7,22	7,22	0,21	0,651	
Quadrado	4	1557,75	389,44	11,46	1,83E-04	***
PAC²	1	1257,65	1257,65	37,02	2,09E-05	***
Catiônico ²	1	5,88	5,88	0,17	0,683	
Aniônico ²	1	29,48	29,48	0,87	0,366	
Oxidante ²	1	30,94	30,94	0,91	0,355	
Interações de 2 fatores	6	64,58	10,76	0,32	0,918	
PAC:Catiônico	1	4,34	4,34	0,13	0,726	
PAC:Aniônico	1	29,34	29,34	0,86	0,367	
PAC:Oxidante	1	2,78	2,78	0,08	0,779	
Catiônico:Aniônico	1	2,78	2,78	0,08	0,779	
Catiônico:Oxidante	1	4,34	4,34	0,13	0,726	
Aniônico:Oxidante	1	21,01	21,01	0,62	0,444	
Erro	15	509,60	33,97			
Falta de ajuste	10	507,64	50,76	129,00	2,15E-05	
Erro Puro	5	1,97	0,39			
Total	29	2514,84				
Significância:	0 '***' 0,001 '***' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '' 1					

Fonte: Autoria própria (2021).