



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DE BELO JARDIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA

WEDJA DE SOUZA LINS

**AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ANÁLISE HISTÓRICA DE
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E ENSAIOS DE JAR TEST COM
DIFERENTES COAGULANTES**

Belo Jardim/PE

2026

WEDJA DE SOUZA LINS

**AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ANÁLISE HISTÓRICA DE
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E ENSAIOS DE JAR TEST COM
DIFERENTES COAGULANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Química da Unidade Acadêmica de Belo Jardim da Universidade Federal Rural de Pernambuco, como requisito final para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Thaís Jeruzza Maciel
Póvoas Souto

Coorientador: Prof. Dr. João Pedro Ferreira

Belo Jardim/PE

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Bibliotecário(a): Nubia Matos – CRB-4 2234

- L759a Lins, Wedja de Souza.
Avaliação e otimização do processo de coagulação-floculação em uma estação de tratamento de água: análise histórica de parâmetros físico-químicos e ensaios de Jar Test com diferentes coagulantes / Wedja de Souza Lins. – Belo Jardim, 2026.
71 f.; il.
- Orientador(a): Thaís Jeruzza Maciel Póvoas Souto.
Co-orientador(a): João Pedro Ferreira.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Belo Jardim - UABJ, Bacharelado em Engenharia Química, Belo Jardim, BR-PE, 2026.
- Inclui referências.
1. Tratamento da água. 2. Jar test. 3. Água - coagulação. 4. Sulfato de alumínio 5. Cloreto férrico. I. Souto, Thaís Jeruzza Maciel Póvoas, orient. II. Ferreira, João Pedro, coorient. III. Título

CDD 660.2

WEDJA DE SOUZA LINS

**AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO
EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA: ANÁLISE HISTÓRICA DE
PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E ENSAIOS DE JAR TEST COM
DIFERENTES COAGULANTES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Bacharelado em Engenharia
Química da Unidade Acadêmica de Belo
Jardim da Universidade Federal Rural de
Pernambuco, como requisito final para
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.

Aprovado em: 13/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Thaís Jeruzza Maciel Póvoas Souto (Orientadora)
Unidade Acadêmica de Belo Jardim/UFRPE

Prof. Dr. João Pedro Ferreira (Coorientador)
Unidade Acadêmica de Belo Jardim/UFRPE

Prof. Dr. Anderson Felipe Viana da Silva (Examinador Interno)
Unidade Acadêmica de Belo Jardim/UFRPE

Prof. Dr. Caio Álisson Diniz da Silva (Examinador Interno)
Unidade Acadêmica de Belo Jardim/UFRPE

À minha amada filha, Isabella,

Por ser minha maior inspiração, minha força nos momentos difíceis e a razão pela qual nunca desisti. Que este trabalho represente não apenas uma conquista acadêmica, mas também um exemplo de perseverança e dedicação. Amo você infinitamente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço ao meu Deus, YHVH, o maior engenheiro de todos. Por sua insistência em me amar e cuidar de mim. Obrigada por me conceder saúde, força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados ao longo desta caminhada e por me permitir alcançar mais esta importante conquista. A Ti, toda honra e glória sejam dadas.

À minha amada filha Isabella, que, mesmo sendo apenas uma criança, compreendeu meus momentos de ausência para a realização deste trabalho. Sua existência deu sentido a cada esforço realizado.

À minha família, em especial, ao meu esposo, José Eduardo, e à minha mãe, Gilvânia, que apesar das suas limitações, cuidava da minha filha para que eu, diferentemente dela, pudesse concluir a minha primeira graduação. Essa vitória também é sua.

À minha irmã, Helen, pelo incentivo constante e por sempre acreditar em mim.

Aos professores Dra. Thaís Póvoas e Dr. João Pedro, por sua orientação e apoio. Suas sugestões foram fundamentais para aprimorar a qualidade deste trabalho. Agradeço por dedicarem seu tempo, compartilharem conhecimentos e me incentivarem a concluí-lo.

Aos professores do curso de Engenharia Química da UFRPE/UABJ, pelos conhecimentos compartilhados dentro e fora da sala de aula, pelo comprometimento e pela contribuição para a minha formação acadêmica.

Aos meus colegas e amigos da faculdade, que estiveram presentes durante essa jornada, dividindo conhecimentos, angústias e momentos de descontração. Vocês tornaram a trajetória um pouco mais leve.

Aos que se tornaram mais que amigos, meus irmãos. Que torceram por mim de verdade e que estiveram comigo em todas as ocasiões, os quais levarei para sempre no meu coração: Camila, Denise, André e João Martins.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho e para a conclusão desta importante etapa da minha vida. Minha sincera gratidão.

RESUMO

A crescente demanda por água de qualidade para abastecimento público torna indispensável a otimização dos processos empregados nas Estações de Tratamento de Água (ETA), especialmente da etapa de coagulação, cuja eficiência depende das características da água bruta e da adequada seleção e dosagem do coagulante. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do tratamento convencional de água em uma ETA, por meio da análise de parâmetros operacionais e da comparação do desempenho dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico em ensaios de Jar Test. Inicialmente, foram analisados dados operacionais da estação, referentes aos parâmetros cor aparente, turbidez, pH e cloro residual, verificando sua conformidade com os padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Em seguida, realizaram-se ensaios de Jar Test em escala laboratorial para determinar a dosagem ótima de cada coagulante, considerando a eficiência de remoção de cor e turbidez. Os dados foram tratados utilizando o software Microsoft Excel®, por meio de estatística descritiva e testes estatísticos. Os resultados demonstraram que a ETA apresentou elevada eficiência na remoção de cor aparente e turbidez, com remoções médias de 88,66% e 86,02%, respectivamente, mantendo os parâmetros da água tratada, de modo geral, em conformidade com a legislação vigente. Nos ensaios de Jar Test, ambos os coagulantes apresentaram desempenho satisfatório; entretanto, o cloreto férrico apresentou maior eficiência nas condições avaliadas, com dosagem ótima de 65 mgL^{-1} , enquanto para o sulfato de alumínio a dosagem ótima foi de 55 mgL^{-1} . Os resultados evidenciam a importância dos ensaios de Jar Test como ferramenta para otimização da coagulação, contribuindo para o aumento da eficiência do tratamento e para o aprimoramento operacional de Estações de Tratamento de Água.

Palavras-chave: Tratamento de água; Jar Test; coagulação; sulfato de alumínio; cloreto férrico.

ABSTRACT

The growing demand for high-quality water for public supply makes it essential to optimize the processes used in Water Treatment Plants (WTPs), particularly the coagulation stage, the efficiency of which depends on raw water characteristics and the proper selection and dosage of the coagulant. In this context, this study aimed to evaluate the efficiency of conventional water treatment at a WTP by analyzing operational parameters and comparing the performance of aluminum sulfate and ferric chloride coagulants through Jar Test assays. Initially, the plant's operational data regarding apparent color, turbidity, pH, and residual chlorine were analyzed to verify compliance with the standards established by Ordinance GM/MS No. 888/2021. Subsequently, laboratory-scale Jar Test assays were conducted to determine the optimal dosage for each coagulant, considering color and turbidity removal efficiency. Data were processed using Microsoft Excel® software, employing descriptive statistics and statistical tests. The results demonstrated that the WTP achieved high efficiency in removing apparent color and turbidity—with average removal rates of 88.66% and 86.02%, respectively—while generally maintaining treated water parameters in compliance with current legislation. In the Jar Test assays, both coagulants performed satisfactorily; however, ferric chloride showed greater efficiency under the evaluated conditions, with an optimal dosage of 65 mgL⁻¹, whereas the optimal dosage for aluminum sulfate was 55 mgL⁻¹. The results highlight the importance of Jar Test assays as a tool for optimizing coagulation, contributing to increased treatment efficiency and the operational improvement of Water Treatment Plants.

Keywords: Water treatment; Jar Test; coagulation; aluminum sulfate; ferric chloride.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Etapas do tratamento convencional de água em ETA.....	19
Figura 2 – Vista superior de um dos decantadores da ETA.....	20
Figura 3 – Imagem de decantador da ETA de estudo.....	20
Figura 4 – Imagem dos filtros da ETA.....	21
Figura 5 – Vista superior da calha Parshall da ETA de estudo.....	23
Figura 6 – Câmaras dos floculadores da ETA.....	26
Figura 7 – Equipamento Jar Test.....	35
Figura 8 – Imagem da etapa de filtração.....	40
Figura 9 – Aparelho colorímetro utilizado nas análises de cor.....	55
Figura 10 – Turbidímetro utilizado nas análises de turbidez.....	41
Figura 11 – pHmetro utilizado nas análises de pH.....	42
Figura 12 – Bureta digital utilizada nas análises de alcalinidade.....	43
Figura 13 – Gráfico comparativo da variação de cor.....	45
Figura 14 – Gráfico comparativo da variação de turbidez.....	47
Figura 15 – Imagem da floculação do 1º jar test.....	55
Figura 16 – Imagem da floculação do 2º jar test.....	57
Figura 17 – Visão geral da floculação do 3º jar test.....	59
Figura 18 – Imagem da floculação do 3º jar test.....	59
Figura 19 – Imagem da floculação do 4º jar test.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Procedimentos dos ensaios de jar test.....	39
Tabela 2 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados na ETA.....	44
Tabela 3 – Dados pluviométricos do município no período de estudo.....	46
Tabela 4 – Eficiência de remoção de cor e turbidez nas etapas avaliadas.....	48
Tabela 5 – Resultados dos testes estatísticos aplicados aos parâmetros de cor e turbidez.....	49
Tabela 6 – Conformidade da água tratada com os padrões de potabilidade exigidos.....	50
Tabela 7 – Períodos de maior instabilidade operacional identificados na ETA.....	51
Tabela 8 – Características das amostras de água bruta.....	53
Tabela 9 – Análise do 1º jar test.....	53
Tabela 10 – Análise do 2º jar test.....	56
Tabela 11 – Análise do 3º jar test.....	57
Tabela 12 – Análise do 4º jar test.....	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CRL	Cloro Residual Livre
CV	Coeficiente de Variação
<i>E coli</i>	<i>Escherichia coli</i>
ETA	Estação de Tratamento de Água
GM/MS	Gabinete do Ministro do Ministério da Saúde
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
NTU	Nephelometric Turbidity Unit (Unidade Nefelométrica de Turbidez)
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNSB	Pesquisa Nacional de Saneamento Básico
uC	Unidades de cor
uH	Unidades Haizen
uT	Unidades de turbidez
VMP	Valor Máximo Permitido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo Geral.....	14
1.2	Objetivos específicos.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1	Água	16
2.2	Tratamento convencional de água	17
2.3	Etapas do tratamento em ETA	18
2.4	Coagulação	22
2.4.1	<i>Sulfato de alumínio</i>	23
2.4.2	<i>Cloreto férrico</i>	24
2.5	Floculação.....	25
2.6	Variáveis operacionais da coagulação/floculação	27
2.6.1	<i>Potencial hidrogeniônico (pH)</i>	27
2.6.2	<i>Alcalinidade</i>	28
2.6.3	<i>Dosagem do coagulante</i>	28
2.6.4	<i>Condições de mistura</i>	29
2.6.5	<i>Temperatura da água</i>	30
2.6.6	<i>Características físico-químicas do manancial</i>	30
2.7	Parâmetros de qualidade da água.....	31
2.7.1	<i>Turbidez</i>	31
2.7.2	<i>Cor</i>	32
2.7.3	<i>pH</i>	32
2.7.4	<i>Alcalinidade</i>	33
2.7.5	<i>Cloro residual</i>	33
2.7.6	<i>Parâmetros microbiológicos</i>	34
2.8	Jar Test aplicado à otimização da coagulação/floculação	34
3	METODOLOGIA.....	37
3.1	Origem dos dados	37
3.2	Análise estatística dos dados	37
3.3	Avaliação da eficiência de remoção	38
3.4	Ensaio de Jar Test.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
4.1	Tratamento estatístico dos dados históricos de qualidade da água.....	44
4.2	Eficiência de remoção de cor e turbidez.....	47

4.3	Conformidade da água tratada com os padrões de potabilidade	50
4.4	Períodos de maior instabilidade operacional.....	51
4.5	Avaliação experimental do coagulante e dosagem ideais	52
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64
	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água em quantidade e qualidade adequadas é fundamental para a manutenção da vida e para o desenvolvimento das atividades humanas. Entretanto, os recursos hídricos utilizados para abastecimento podem apresentar contaminantes de natureza física, química e microbiológica, os quais comprometem sua qualidade, representando riscos à saúde da população. Nesse contexto, o tratamento assume papel essencial, ao promover a remoção desses contaminantes, tornando o recurso próprio ao consumo humano (Di Bernardo; Dantas, 2005).

A avaliação da qualidade da água nos sistemas de abastecimento público deve seguir os critérios estabelecidos pela legislação brasileira vigente. Nesse sentido, a Portaria GM/MS nº 888/2021 define os procedimentos de controle e vigilância, bem como os padrões de potabilidade que devem ser atendidos pelos prestadores de serviço de abastecimento. A norma estabelece limites para diversos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos, visando garantir a segurança sanitária e a proteção da saúde da população (Brasil, 2021).

Segundo Libânio (2016), o tratamento de água consiste na remoção de partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica, microrganismos e outras substâncias potencialmente nocivas à saúde humana, buscando conciliar a eficiência do processo com os menores custos de implantação, operação e manutenção e com a redução dos impactos ambientais.

De acordo com a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB), referente ao ano de 2017 e publicada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) em 2020, 75,1% do volume de água tratada distribuída no Brasil é submetido ao tratamento convencional (IBGE, 2020), no qual a água bruta é submetida às etapas de coagulação, floculação, sedimentação, filtração, desinfecção e correção de pH, podendo incluir a fluoretação quando prevista para o sistema de abastecimento (Libânio, 2016).

Dentre estas, merecem destaque as duas primeiras, as quais afetam diretamente o desempenho das unidades de separação subsequentes. Sua eficiência está intrinsecamente ligada às condições operacionais do processo, especialmente

ao pH, à dosagem do coagulante e às condições de mistura, que influenciam a formação, o crescimento e a estabilidade dos flocos (Lopes *et al.*, 2020).

De acordo com Souza e Chagas (2020), a escolha adequada de tais variáveis pode impactar significativamente a eficiência do tratamento, possibilitando maior remoção das impurezas, redução do consumo de produtos químicos, e, conseqüentemente, dos custos operacionais. Para isso, os ensaios de Jar Test são amplamente utilizados, simulando, em escala laboratorial, as etapas de coagulação, floculação e sedimentação. Esses ensaios permitem comparar diferentes coagulantes e dosagens, de modo a otimizar o processo, identificando as condições que proporcionam os melhores resultados (Maciel; Leal, 2024).

No tratamento de água, os coagulantes são essenciais para neutralizar as cargas elétricas das impurezas suspensas, as quais se repelem naturalmente. A adição do coagulante permite que elas se agrupem em flocos maiores, viabilizando sua posterior remoção por decantação e filtração. Entre os coagulantes mais utilizados, destacam-se os sais de alumínio e de ferro, como o sulfato de alumínio, o cloreto férrico, o policloreto de alumínio (PAC), e o sulfato férrico (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Nesse contexto, o presente trabalho propõe avaliar o processo de coagulação-floculação em uma Estação de Tratamento de Água, considerando a análise histórica de parâmetros físico-químicos e a realização de ensaios de Jar Test com diferentes coagulantes.

1.1 Objetivo Geral

Avaliar a eficiência do processo de coagulação-floculação em uma Estação de Tratamento de Água, por meio da análise histórica de parâmetros físico-químicos e da realização de ensaios de Jar Test com sulfato de alumínio e cloreto férrico.

1.2 Objetivos específicos

- Analisar o comportamento e a variabilidade dos parâmetros físico-químicos da água nas diferentes etapas do tratamento, utilizando ferramentas estatísticas para identificar tendências e dispersões operacionais.

- Avaliar a qualidade da água tratada por meio da verificação da conformidade dos parâmetros de cor, turbidez, pH e cloro residual com os padrões de potabilidade, bem como identificar possíveis períodos de instabilidade operacional e correlacioná-los a eventos climáticos ou sazonais, avaliando o impacto desses picos de carga na conformidade da água tratada.
- Comparar o desempenho dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico em ensaios de Jar Test, estabelecendo a dosagem ótima com base na eficiência de remoção de cor e turbidez.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Água

A água deve ser compreendida como um recurso estratégico indispensável ao desenvolvimento econômico e social, pois sua disponibilidade e qualidade condicionam atividade produtivas, o abastecimento humano e a própria organização das sociedades. Nesse sentido, o crescimento populacional e a intensificação do uso dos recursos hídricos ampliam a pressão sobre sua oferta, tornando evidente que não podem ser tratados apenas como bem comum, mas como bem econômico de valor social e ambiental (Barros; Amin, 2008; Tundisi, 2008).

A escassez e a degradação hídrica repercutem diretamente nas condições socioeconômicas dos países, afetando a produção, a saúde pública e a qualidade de vida da população. Mesmo indiretamente, a água tem participação em alguma fase da produção de praticamente todos os produtos hoje disponíveis, sendo fundamental desde atividades mais simples, até as mais complexas. Seu armazenamento e utilização destinam-se principalmente à geração de energia, projetos de irrigação, atividades industriais e fins domésticos, além de outros processos produtivos (Barros; Amin, 2008; Tundisi, 2008; Piroli, 2022).

Por ser considerada o solvente mais eficiente da natureza e, por isso, frequentemente denominada solvente universal, a água possui elevada capacidade de dissolver e transportar diversas substâncias, inclusive contaminantes (Morales *et al.*, 2016). A presença desses poluentes nos corpos hídricos pode alterar significativamente suas características físicas, químicas e biológicas, comprometendo sua qualidade e tornando inviável seu uso para os mais diversos fins (Amorim, 2024).

Entre as principais fontes de poluição das águas superficiais, destacam-se os lançamentos de esgotos domésticos e industriais, a disposição inadequada de resíduos sólidos, o carreamento de agrotóxicos e fertilizantes provenientes de atividades agrícolas, a presença de detergentes e a deposição atmosférica de poluentes (Von Sperling, 2014). Diante desse cenário, a preservação da qualidade dos recursos hídricos e a adoção de técnicas adequadas de tratamento tornam-se essenciais para garantir a segurança e a potabilidade da água destinada ao abastecimento público (Brasil, 2021).

2.2 Tratamento convencional de água

A água destinada ao consumo humano é utilizada para ingestão, preparo de alimentos e higiene pessoal, devendo atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação vigente, de modo a não oferecer riscos à saúde pública (Brasil, 2021). Para isso, a água bruta captada dos mananciais deve ser submetida a uma série de processos, capazes de remover impurezas e microrganismos patogênicos, adequando suas características aos padrões exigidos para consumo (Andrade, 2023).

Quando a água apresenta contaminação microbiológica, pode atuar como veículo de transmissão de diversas doenças. Entre as principais, destacam-se: cólera, febre tifoide, amebíase, giardíase, disenteria bacilar e viroses (Di Bernardo; Dantas, 2005). Logo, os principais objetivos do tratamento de água são de ordem sanitária e organoléptica, visando não apenas eliminar agentes patogênicos e substâncias nocivas, mas também garantir características adequadas de cor, odor, sabor e aparência, tornando-a segura e atrativa para o consumo humano (Brasil, 2021).

Diante disso, o tratamento de água pode ser realizado em diferentes níveis, de acordo com as características da água bruta e com o grau de remoção necessário para atender aos padrões de qualidade (Bittencourt; Paula, 2014). Nesse sentido, os principais níveis de tratamento são:

- Tratamento simplificado: Aplicado em águas de melhor qualidade, geralmente envolvendo etapas como filtração, desinfecção e correção de pH, quando necessário (Bittencourt; Paula, 2014).
- Tratamento convencional: Amplamente utilizado em Estações de Tratamento de Água (ETA), compreendendo etapas de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e correção de pH, com o objetivo de remover partículas suspensas, sólidos coloidais, microrganismos e outros contaminantes (Libânio, 2016).
- Tratamento avançado: Empregado quando o tratamento convencional não é suficiente para atender aos padrões desejados de qualidade, podendo incluir processos complementares como adsorção em carvão ativado, membranas filtrantes, ozonização e outras tecnologias específicas (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017; Costa, 2024; Oliveira, 2010).

O nível do tratamento adotado depende diretamente da qualidade da água captada do manancial, bem como das suas características físicas, químicas e microbiológicas. No tratamento convencional, amplamente empregado no abastecimento público, os processos ocorrem em Estações de Tratamento de Água (ETA) e envolvem operações físicas, químicas, ou a combinação de ambas (Brasil, 2021). O desempenho dessas Estações é avaliado por meio do monitoramento contínuo de parâmetros como cor, turbidez, pH e cloro residual (Libânio, 2016).

No Brasil, compete ao Ministério da Saúde estabelecer os limites permitidos para parâmetros físicos, químicos, microbiológicos e organolépticos da água destinada ao consumo humano. Esses critérios devem ser atendidos tanto pelos sistemas convencionais de abastecimento quanto por soluções alternativas, tais como poços e cisternas, a fim de que a água distribuída esteja em conformidade com os padrões de qualidade exigidos (Brasil, 2021).

Segundo Di Bernardo e Dantas (2005), independente da qualidade inicial, a água pode ser transformada em potável, do ponto de vista tecnológico. No entanto, os custos envolvidos no processo, a complexidade operacional e a confiabilidade do sistema podem tornar inviável a utilização de determinados mananciais como fonte de abastecimento. Desse modo, a escolha do tratamento adequado torna-se fundamental, destacando-se os processos de coagulação e floculação como etapas essenciais no tratamento convencional, especialmente na remoção de partículas suspensas, colóides e redução da turbidez.

2.3 Etapas do tratamento em ETA

A escolha da fonte de abastecimento influencia diretamente a concepção, o dimensionamento e a operação do sistema de tratamento de água. Por isso, buscase, preferencialmente, um manancial bem localizado, capaz de atender à demanda hídrica da comunidade abastecida. A captação da água pode ocorrer em mananciais superficiais ou subterrâneos (Brasil, 2021).

A captação superficial é realizada em rios, lagos e reservatórios, sendo geralmente conduzida por meio de conjuntos motobomba que transportam a água bruta até a ETA através de tubulações. Já na captação subterrânea, realizam-se perfurações no solo para acesso aos aquíferos ou lençóis freáticos, permitindo o

bombeamento da água até a superfície, podendo essa água ser destinada a tratamentos simplificados ou complementares, conforme sua qualidade (Brasil, 2021).

Geralmente, as águas subterrâneas apresentam qualidade superior às águas superficiais, por serem naturalmente protegidas pelo solo e pelas formações geológicas. Logo, costumam apresentar menor turbidez, embora possam exigir tratamentos específicos, como desinfecção, correção de pH, ou remoção de compostos dissolvidos, dependendo das suas características (Di Bernardo; Dantas, 2005).

No tratamento convencional realizado em Estações de Tratamento de Água, a água bruta é submetida a diversas etapas, destinadas à remoção de impurezas e adequação aos padrões de potabilidade, incluindo coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, correção de pH, e, quando aplicável, fluoretação (Di Bernardo; Dantas, 2005). A Figura 1 apresenta uma simulação das etapas do tratamento convencional em uma ETA:

Figura 1 – Etapas do tratamento convencional de água em ETA



Fonte: Gerada por ChatGPT (OpenAI), jun. 2026.

Em síntese, a coagulação ocorre a partir do alcance do pH ideal e da mistura rápida do coagulante, empregando-se grande energia de agitação, a fim de uniformizar bem o coagulante na água bruta. Em seguida, na etapa denominada floculação, reduz-se essa energia para que as impurezas formem flocos, inicialmente pequenos, e, posteriormente, devido aos contínuos choques promovidos pela agitação controlada, mais consistentes e pesados, possibilitando sua sedimentação na etapa subsequente. (Bittencourt; Paula, 2014).

A decantação tem a finalidade de segregar os sólidos agregados nas duas etapas anteriores, por sedimentação. Se os flocos não tiverem sido bem formados

durante a coagulação e a floculação, pode ocorrer novamente a dispersão das impurezas ou a flutuação dos flocos ao invés da sua sedimentação. Como a eficiência dessa etapa não é absoluta para atingir a potabilidade, é necessário realizar a remoção dos flocos remanescentes através da filtração (Bittencourt; Paula, 2014). As Figuras 2 e 3 apresentam decantadores convencionais simples com módulos tipo colmeia, da ETA objeto deste estudo:

Figura 2 – Vista superior de um dos decantadores da ETA



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 3 – Imagem de decantador da ETA de estudo



Fonte: Autoria Própria, 2026.

Conforme Richter (2009), a filtração por gravidade, normalmente utilizada nos processos de tratamento de água, consiste na remoção das partículas suspensas na água através da sua passagem por um meio poroso, sendo a areia e o antracito os mais comuns. Para o autor, ela é provavelmente o processo unitário mais importante do tratamento, podendo ser o único como na filtração lenta, ou precedido somente

pela coagulação e floculação. Os filtros podem ser classificados em lentos e rápidos, de acordo com a taxa que trabalham e o método de limpeza. A Figura 4 mostra os filtros rápidos de camada simples da ETA.

Figura 4 – Imagem dos filtros da ETA



Fonte: Autoria própria, 2026.

Como não é possível assegurar a remoção total dos microrganismos presentes na água, é necessária a desinfecção, cuja finalidade é destruir os microrganismos patogênicos presentes. Entre os agentes de desinfecção, o mais utilizado é o cloro, pois é facilmente disponível como gás (cloro elementar), líquido (hipoclorito de sódio) ou sólido (hipoclorito de cálcio), além de ser barato e de fácil aplicação (Richter, 2009).

Sequencialmente, podem ser realizadas operações complementares destinadas a adequar a qualidade da água aos padrões de potabilidade. Destacam-se a correção do pH e a fluoretação, que têm por objetivo melhorar a estabilidade química da água distribuída e contribuir para a prevenção da cárie dentária na população, respectivamente (Brasil, 2014). Por fim, a água tratada é armazenada em reservatórios para abastecimento da rede de distribuição (COMPESA, 2025).

2.4 Coagulação

Entre os principais constituintes responsáveis pela alteração da qualidade visual da água, destacam-se as partículas suspensas e as soluções coloidais, as quais contribuem para o aumento da turbidez e cor da água bruta, respectivamente. Estas partículas geralmente apresentam carga superficial negativa, dificultando sua agregação natural. Logo, é necessária a neutralização dessas cargas com a adição de coagulantes, possibilitando a formação de flocos maiores e permitindo a sua posterior remoção nas etapas subsequentes do tratamento (Brasil, 2025).

A coagulação consiste, portanto, em uma etapa físico-química do tratamento de água, cuja finalidade é promover a desestabilização das partículas de impureza presentes na água bruta, reduzindo as forças de repulsão entre elas. Quanto à escolha do melhor coagulante a ser utilizado, em geral, os mais empregados são os inorgânicos, os quais são sais trivalentes de ferro e alumínio. Não há uma regra geral, devendo-se analisar caso a caso o mais eficaz por meio do ensaio de jarros (Branco; Zorzin, 2016; Furlan, 2008).

A opção por um ou outro envolve eficiência e custo-benefício, e, em qualquer caso, a água fornecida deve atender aos padrões de potabilidade. Além dos coagulantes empregados nesse processo, também podem ser utilizados produtos auxiliares de coagulação, entre os quais, os mais comuns são os polímeros naturais ou sintéticos, para potencializar a formação de agregados, aumentando a eficiência da remoção das impurezas. Estes têm a função de estruturar os flocos, tornando-os menos frágeis e mais densos (Bittencourt; Paula, 2014; Branco; Zorzin, 2016).

O coagulante deve ser adicionado em regiões de grande agitação da água, caracterizadas por altos gradientes de velocidade, a fim de que seja disperso o mais eficientemente possível e homogeneizado no meio líquido. Essa etapa, conhecida como mistura rápida, pode ocorrer de forma hidráulica ou mecanizada. Na mistura hidráulica, um dos dispositivos comumente empregados é a Calha Parshall, como exemplificada na Figura 5, cuja geometria favorece condições de turbulência adequadas à eficiente dispersão do coagulante na água (Brasil, 2025).

Figura 5 – Vista superior da calha Parshall da ETA de estudo



Fonte: Autoria própria, 2026.

De acordo com Di Bernardo e Dantas (2005), considera-se a coagulação como o resultado da ação individual ou combinada de quatro mecanismos diferentes:

- a) Compressão da dupla camada elétrica: Ocorre quando a adição de íons reduz as forças repulsivas entre partículas carregadas, permitindo sua aproximação.
- b) Adsorção e neutralização de cargas: Os coagulantes adsorvem-se à superfície das partículas, neutralizando suas cargas e favorecendo a agregação.
- c) Varredura: Ocorre quando precipitados formados durante a coagulação (geralmente hidróxidos metálicos) incorporam partículas suspensas e impurezas durante sua sedimentação.
- d) Formação de pontes: Polímeros naturais ou sintéticos ligam várias partículas entre si, formando estruturas maiores e mais densas, as quais podem ser removidas com mais facilidade nas etapas seguintes do tratamento.

2.4.1 Sulfato de alumínio

Dentre os coagulantes mais utilizados em tratamento de água, encontra-se o sulfato de alumínio, o qual apresenta fórmula química $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot n \text{H}_2\text{O}$, onde “n” representa 14 a 18 moléculas de água de cristalização. A sua forma líquida é

produzida a partir de hidrato de alumínio, com teor de água controlado para evitar cristalização. Comercialmente, o produto contém 7 - 8% de alumina (Al_2O_3); teores superiores a 8,26% aumentam o risco de precipitação. Em sua forma sólida, atinge 48,4% de concentração, considerando a água de constituição presente nas moléculas. Quando de boa qualidade, o coagulante não apresenta resíduos insolúveis e é incolor (Pavanelli, 2001).

Sua ampla utilização está relacionada à facilidade de obtenção, transporte, armazenamento, manipulação e ao baixo custo operacional, quando comparado a outros coagulantes disponíveis no mercado. Seu princípio de atuação ocorre a partir de reações de hidrólise que resultam na formação de hidróxidos de alumínio insolúveis. Esses compostos apresentam elevada capacidade de adsorção de impurezas, promovendo o mecanismo conhecido como varredura (Gerhardt, 2018; Gasola *et al.*, 2015).

A eficiência desse processo depende diretamente das características da água bruta, especialmente do pH, da alcalinidade e da temperatura. Em condições inadequadas de pH, a formação dos hidróxidos pode ser comprometida, reduzindo a eficiência da coagulação e aumentando a concentração de alumínio residual na água tratada (Gasola *et al.*, 2015).

Por essa razão, algumas ETAs necessitam da adição de produtos alcalinizantes para corrigir o pH e garantir a eficiência do processo (Freitas, 2011). Apesar dessas limitações, o sulfato de alumínio continua sendo um dos coagulantes mais utilizados no setor de saneamento, constituindo-se como referência para os processos de coagulação e sistemas de tratamento de água no Brasil e em diversos países (Gerhardt, 2018).

2.4.2 Cloreto férrico

Também utilizado como coagulante, o cloreto férrico (FeCl_3) é obtido pela reação entre ácido clorídrico concentrado e minério de ferro (hematita, Fe_2O_3) sob condições de temperatura elevada, seguida de resfriamento e filtração, o que garante elevado índice de pureza. A concentração final do produto depende de variáveis de processo e da temperatura mínima das regiões de aplicação; estabelece-se, em geral,

40% em massa de FeCl_3 , assegurando estabilidade física do composto (Pavanelli, 2001).

Em contextos de crescente demanda por água potável, o uso de cloreto férrico em águas superficiais contaminadas reduz significativamente a turbidez e a DBO, além de eliminar fosfatos e parte expressiva de metais pesados (mercúrio, chumbo) e elementos como arsênio, selênio e bário, especialmente quando a coagulação ocorre em pH elevado (Pavanelli, 2001).

O cloreto férrico é uma alternativa viável para o processo, pois possui características que facilitam o tratamento de água, como a formação de flocos grandes, que sedimentam mais rapidamente (Sousa, 2021). Embora tenha a desvantagem de ter um manuseio operacional mais difícil, a formação dos hidróxidos insolúveis ocorre em uma faixa de pH mais ampla (Di Bernardo; Dantas, Voltan, 2017).

2.5 Floculação

Após a etapa de coagulação, a água segue para a floculação, processo caracterizado pela agitação lenta e controlada, com o objetivo de favorecer o contato entre as partículas desestabilizadas na etapa anterior, promovendo a formação de flocos maiores, mais densos, e, portanto, mais facilmente removíveis nas etapas posteriores do tratamento (Di Bernardo; Dantas, 2005).

Os floculadores dividem-se em dois grupos principais: hidráulicos (promovem o crescimento dos flocos através da energia da própria água) e mecanizados (exigem equipamentos eletromecânicos). Entre os sistemas hidráulicos mais utilizados em estações de tratamento de água, destacam-se os floculadores de chicanas, que podem operar com escoamento vertical ou horizontal. Outros modelos, embora menos frequentes, incluem os floculadores do tipo Alabama (como os que são apresentados na Figura 6) e aqueles que promovem escoamento helicoidal (Bergamin, 2017).

Figura 6 – Câmaras dos flocladores da ETA



Fonte: Autoria própria, 2026.

As câmaras são projetadas para ressaltar as condições de fluxo laminar e evitar a destruição dos flocos. Geralmente, uma mistura lenta tem seu gradiente de velocidade compreendido entre 10 e 100 s^{-1} . Além disso, o tempo de floculação também é um fator determinante na formação do floco (Moraes, 2009).

Comumente, realiza-se a aferição do êxito dessa etapa pelo monitoramento das características de turbidez e cor aparente da água decantada. Além disso, a eficiência também pode ser avaliada mediante as limpezas das unidades de decantação de escoamento horizontal (Libânio, 2016).

No que tange ao processo de floculação no tratamento de água, Libânio (2016) destaca que a aproximação e a subsequente agregação das partículas coloidais ocorrem por meio de três mecanismos de transporte distintos. O primeiro deles é a floculação pericinética, impulsionada pelo movimento browniano, na qual os choques entre as partículas decorrem de sua energia térmica natural.

O segundo mecanismo é a floculação ortocinética, caracterizada pela indução de uma energia externa — mecânica ou hidráulica — que estabelece gradientes de velocidade no fluido e força o contato entre os constituintes. Por fim, o autor aponta a sedimentação diferencial, fenômeno no qual partículas com diferentes tamanhos e densidades deslocam-se verticalmente com velocidades distintas, propiciando a colisão e a aglomeração durante a decantação (Libânio, 2016).

O desempenho da floculação depende diretamente do tempo de detenção e do gradiente de velocidade aplicado à mistura, uma vez que essas variáveis controlam a frequência de colisões entre as partículas e a estabilidade dos flocos formados. Valores excessivos do gradiente de velocidade podem provocar a ruptura dos flocos e reduzir a eficiência da sedimentação subsequente, analogamente ao que ocorre com tempos de detenção muito longos (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

Por outro lado, valores insuficientes estão relacionados à formação de flocos menos densos, e, portanto, menos sedimentáveis. Em ETAs convencionais, a prática operacional normalmente adota gradientes de velocidade decrescentes ao longo das câmaras de floculação, reduzindo progressivamente a intensidade da mistura à medida que os flocos crescem e tornam-se mais suscetíveis à quebra (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

2.6 Variáveis operacionais da coagulação/floculação

A eficiência dos processos de coagulação e floculação relaciona-se diretamente às condições operacionais adotadas. Diversos fatores podem influenciar a formação e desenvolvimento dos flocos. Dentre eles, destacam-se o pH, a alcalinidade, a dosagem do coagulante, velocidade de mistura, a temperatura da água e as características físico-químicas do manancial. O controle adequado de tais variáveis é imprescindível para garantir o bom desempenho do tratamento e a redução do consumo de produtos químicos (Bittencourt; Paula, 2014; Libânio, 2016).

2.6.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

O pH é uma das principais variáveis de influência no processo de coagulação, pois afeta a especiação química e a solubilidade dos hidróxidos de alumínio e ferro formados durante a hidrólise dos coagulantes. Essas alterações interferem diretamente nos mecanismos de formação dos flocos e na eficiência de remoção de partículas responsáveis pela cor e turbidez da água. Valores de pH fora da faixa ideal podem reduzir a formação dos precipitados hidróxidos e comprometer o desempenho da coagulação (Duan; Gregory, 2003; Zhao; Liu; Qu, 2009).

Independentemente do mecanismo predominante no processo, quando a coagulação é realizada por meio de sais de alumínio ou ferro, o pH desempenha papel fundamental na formação e prevalência das espécies hidrolisadas do coagulante

(Libânio, 2016). Em geral, o valor ótimo dependerá do tipo de água a ser tratada e do coagulante a ser empregado no tratamento. Por exemplo, para o sulfato de alumínio, o ideal é que o pH esteja entre 5 e 7 (Alves, 2019). A utilização de coagulantes à base de alumínio requer atenção ao controle do pH, uma vez que valores baixos podem contribuir para o aumento da concentração de alumínio residual na água tratada (Matilainen *et al.*, 2010).

2.6.2 Alcalinidade

A alcalinidade da água influencia a coagulação principalmente quando são utilizados sais de alumínio e ferro, pois participa das reações de hidrólise desses coagulantes e auxilia na manutenção das condições adequadas de pH para a formação dos flocos (Duan; Gregory, 2003; Gregory; Duan, 2001).

Se não for suficientemente alcalina, ou seja, for muito ácida, a água não reagirá adequadamente com o agente coagulante, sendo necessário, portanto, adicionar um alcalinizante para ajuste do pH. Entre os principais, pode-se destacar o hidróxido de cálcio (cal hidratada), o hidróxido de sódio (soda cáustica) e o carbonato de sódio (também conhecido como barrilha) (Freitas, 2011).

Conforme Freitas (2011), para determinar a dosagem adequada do alcalinizante a ser aplicada, é necessária basicamente a caracterização físico-química da água bruta e, assim como no caso da dosagem de coagulante, é realizado o ensaio de clarificação (teste de jarros) para inferir qual o melhor resultado.

2.6.3 Dosagem do coagulante

A determinação da dosagem ideal de coagulante é fundamental para garantir a eficiência dos processos de coagulação e floculação. Quando aplicada a concentração adequada, é possível otimizar o desempenho do tratamento, reduzir os custos operacionais e minimizar a geração de lodo (Teh *et al.*, 2016). Por outro lado, dosagens insuficientes podem comprometer a desestabilização das partículas coloidais presentes na água, resultando em menor eficiência de remoção (Alves, 2019).

De acordo com Matilainen *et al.* (2010) e Nair *et al.* (2014), embora o aumento da concentração de coagulante possa favorecer a remoção da matéria orgânica natural, a aplicação em excesso pode provocar a re-estabilização dos coloides,

afetando a eficiência do processo. Além disso, a dosagem do coagulante influencia diretamente o mecanismo de coagulação predominante. No caso dos coagulantes à base de sais metálicos, concentrações mais baixas tendem a favorecer a neutralização das cargas por meio da compressão da camada elétrica dupla, enquanto dosagens mais elevadas promovem predominantemente o mecanismo de coagulação por varredura (Teh *et al.*, 2016).

Em suma, a dosagem ótima de coagulante deve ser definida de modo a maximizar a eficiência de remoção das impurezas presentes na água, minimizando simultaneamente o consumo de produtos químicos, bem como a geração de lodo, uma vez que o excesso de coagulante pode aumentar os custos operacionais e de disposição dos resíduos produzidos. A busca por esse equilíbrio é um dos principais objetivos da otimização do processo de coagulação em sistemas de tratamento de água (Manamperuma, 2016; Edzwald, 1999).

2.6.4 Condições de mistura

A mistura rápida e a mistura lenta constituem etapas fundamentais do processo de coagulação e floculação no tratamento convencional de água. A mistura rápida corresponde à etapa inicial, na qual o coagulante é disperso homogênea e rapidamente em toda a massa líquida. O objetivo é promover o contato entre o produto químico e as partículas coloidais presentes na água, promovendo a desestabilização das cargas elétricas que mantêm essas partículas em suspensão (Di Bernardo; Penna, 1985).

A eficiência das etapas posteriores depende diretamente da qualidade da mistura rápida, sendo recomendados tempos curtos e elevada intensidade de agitação, garantindo a distribuição uniforme do coagulante (Di Bernardo; Penna, 1985). Este processo está diretamente relacionado à formação dos primeiros complexos de cátions metálicos hidrolisados (Batista, *et al.*, 2016).

Na próxima etapa, ocorre a mistura lenta, também denominada floculação, na qual, a água é submetida a agitação suave e controlada, com menores gradientes de velocidade, de modo a favorecer a agregação das partículas, possibilitando a formação e o crescimento dos flocos, sem provocar a ruptura daqueles já formados (De Julio; Fioravante; Oroski, 2008).

Quando a intensidade da agitação na etapa de floculação é insuficiente, podem ser formados flocos de pequenas dimensões e com baixa capacidade de sedimentação. Por outro lado, agitações excessivamente intensas aumentam a frequência das colisões entre as partículas, mas também podem provocar a fragmentação dos flocos já formados, comprometendo sua estabilidade e sedimentação (Teh *et al.*, 2016). Assim, a velocidade de mistura lenta influencia as propriedades dos flocos formados, e, portanto, deve ser controlada. Essas condições de mistura serão simuladas no Jar Test.

2.6.5 Temperatura da água

Alves (2019) aponta a temperatura como um fator que exerce influência significativa sobre a eficiência dos processos de coagulação e floculação, tendo em vista que afeta tanto a mobilidade dos íons presentes na solução, como também a viscosidade da água. Em condições de baixa temperatura, coagulantes à base de sais metálicos, como o sulfato de alumínio, tendem a apresentar menor eficiência devido à redução da velocidade das reações de hidrólise (Teh *et al.*, 2016).

Por outro lado, temperaturas mais elevadas podem favorecer a remoção de impurezas, acelerar a formação dos flocos e promover sua maior agregação. Além disso, a temperatura também interfere na concentração residual dos metais provenientes dos coagulantes utilizados (Alves, 2019). Em temperaturas mais baixas, é comum ocorrer aumento desses resíduos na água tratada, sendo o controle adequado do pH uma estratégia importante para minimizar esse efeito (Bratby, 2016).

2.6.6 Características físico-químicas do manancial

A qualidade da água bruta representa um dos principais fatores que afetam a eficiência do tratamento. Parâmetros como turbidez elevada, presença de matéria orgânica, contaminantes inorgânicos e microrganismos patogênicos podem representar desafios significativos para as ETAs, dificultando as etapas de tratamento e exigindo maior eficiência operacional (FUNASA, 1997).

Além disso, quando a água bruta é de baixa qualidade, há uma tendência de aumento dos custos operacionais da Estação. Isso ocorre em razão da maior necessidade de insumos químicos e do consumo adicional de energia para o tratamento. Desse modo, águas com características mais complexas geralmente

requerem maior controle dos processos de coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, visando garantir a obtenção de água tratada com qualidade adequada para distribuição e consumo (FUNASA, 1997).

A qualidade da água dos mananciais pode variar bastante em função de influências climáticas sazonais, podendo provocar alterações de cor, pH e turbidez, exigindo, portanto, ajustes operacionais na ETA. Isso porque variações da qualidade da água bruta podem impactar a qualidade da água tratada, o que depende do rigor no controle operacional dos processos de tratamento. Após o tratamento, a qualidade da água tratada pode variar ainda devido ao estado de conservação dos reservatórios e da rede de distribuição (Brasil, 2005).

2.7 Parâmetros de qualidade da água

A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, é a norma do Ministério da Saúde do Brasil que estabelece o padrão de potabilidade da água para o consumo humano (Brasil, 2021). A avaliação dessas características permite compreender o comportamento da água ao longo das diferentes etapas do tratamento, bem como verificar a eficiência dos processos empregados (Oliveira *et al.*, 2023).

Para águas destinadas ao abastecimento público (tratamento convencional), são estabelecidos valores limítrofes para diversos parâmetros físico-químicos e biológicos (Oliveira *et al.*, 2023). Destacam-se entre os parâmetros físicos, a turbidez e a cor aparente. Entre os parâmetros químicos, o pH, a alcalinidade e o cloro residual. Já os coliformes e *Escherichia coli* são os parâmetros biológicos mais relevantes (Di Bernardo; Dantas, 2005).

2.7.1 Turbidez

A turbidez é um parâmetro físico que indica a presença de partículas suspensas na água, como argila, silte, matéria orgânica e microrganismos (Pavanelli, 2001). Trata-se da característica que reflete o grau de transparência da água. Assim, é utilizada para avaliar a presença de material inorgânico insolúvel (Bittencourt; Paula, 2014). Conforme Pavanelli (2001), a qualidade da água é influenciada diretamente por fenômenos climáticos superficiais:

A turbidez pode ser definida como o grau de redução que a luz sofre ao atravessar uma certa quantidade de água, devido à presença das partículas e substâncias que esta contém. Em sua maior parte, a turbidez é provocada

pela ação das chuvas, que, por meio de seus caminhos de escoamento na superfície do solo, carregam partículas de areia e argila (Pavanelli, 2001, p. 6).

Para Bittencourt e Paula (2014), a turbidez mede a resistência que um líquido pode oferecer à passagem de um feixe de luz polarizada. A remoção do material que confere essa característica à água é um dos maiores indicadores da eficiência do tratamento (Lúcio, 2013). Assim, a redução da turbidez é um dos principais sinais de que as etapas de coagulação, floculação, decantação e filtração têm tido um bom desempenho. O Valor Máximo Permitido para esse parâmetro, de acordo com o Ministério da Saúde, para a água distribuída à população, não deve exceder 5,0 unidades de turbidez (uT) (Brasil, 2021).

2.7.2 Cor

Nas águas naturais, a cor indica a presença de matéria orgânica, proveniente da decomposição de plantas e animais. Há dois tipos de cor: a verdadeira e a aparente. A primeira, é medida após a remoção das partículas suspensas, geralmente por filtração ou centrifugação. Já a aparente, é medida sem remoção prévia das partículas suspensas, e, portanto, sofre influência da turbidez (Di Bernardo; Dantas, 2005). Segundo o Ministério da Saúde (Brasil, 2021), o Valor Máximo Permitido (VMP) para a cor aparente da água destinada ao consumo humano é de 15 unidades de cor (uC).

2.7.3 pH

O potencial hidrogeniônico (pH) é um importante parâmetro de qualidade da água, pois indica sua condição ácida, neutra ou alcalina. Seu monitoramento é fundamental nos sistemas de abastecimento, uma vez que o pH influencia diversas reações químicas envolvidas no tratamento da água, afetando a eficiência dos processos e as características finais da água distribuída (Di Bernardo; Dantas, 2005; Brasil, 2021).

Além dos aspectos operacionais, valores inadequados de pH podem favorecer processos de corrosão ou incrustação nas tubulações dos sistemas de abastecimento. Águas excessivamente ácidas tendem a aumentar a corrosividade, enquanto águas alcalinas podem favorecer a formação de depósitos minerais nas redes de distribuição. Por essa razão, o controle desse indicador é essencial para a

preservação da infraestrutura dos sistemas de abastecimento e para a segurança sanitária da água distribuída (World Health Organization, 2022; Health Canada, 2015). No Brasil, a Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece que a água fornecida aos consumidores deve apresentar pH entre 6,0 e 9,5 (Brasil, 2021).

2.7.4 Alcalinidade

Embora seja um importante indicador para o controle operacional das estações de tratamento de água, a Portaria GM/MS nº 888/2021 não estabelece valores mínimos ou máximos de alcalinidade. Esta, representa a capacidade da água de neutralizar ácidos, estando relacionada principalmente à presença de íons bicarbonato, carbonato e hidróxido. Esse parâmetro é importante para a estabilidade química da água e para o controle das reações que ocorrem durante o tratamento (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Coagulantes metálicos, como o sulfato de alumínio, consomem compostos alcalinos durante as reações de hidrólise. Quando a água apresenta baixa capacidade de neutralização de ácidos, podem ocorrer reduções significativas de pH, comprometendo a formação dos flocos e a eficiência da remoção de turbidez e cor. Por esse motivo, a avaliação dessa característica é importante na determinação das condições ótimas de coagulação em ensaios de Jar Test (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

2.7.5 Cloro residual

Trata-se de um parâmetro muito relevante, pois está diretamente relacionado à manutenção da qualidade microbiológica da água ao longo da rede de distribuição. corresponde à concentração de cloro que permanece na água após o processo de desinfecção, reduzindo o risco de recontaminação na rede de abastecimento (World Health Organization, 2011). A legislação brasileira estabelece a obrigatoriedade de manutenção de, no mínimo, $0,2 \text{ mgL}^{-1}$ de cloro residual livre (CRL) em toda a extensão do sistema de distribuição, sendo o valor máximo permitido de $5,0 \text{ mgL}^{-1}$ para água de abastecimento público (Brasil, 2021).

2.7.6 Parâmetros microbiológicos

Os coliformes totais constituem um grupo de bactérias amplamente utilizado como indicador das condições higiênico-sanitárias da água. Embora nem todos os microrganismos desse grupo sejam de origem fecal, sua presença pode indicar falhas nos processos de tratamento ou possíveis contaminações no sistema de distribuição. A avaliação ocorre dentro dos critérios de monitoramento da rede de distribuição e investigação operacional, não sendo simplesmente um "valor máximo" único como ocorre para diversos parâmetros físico-químicos. (Brasil, 2021).

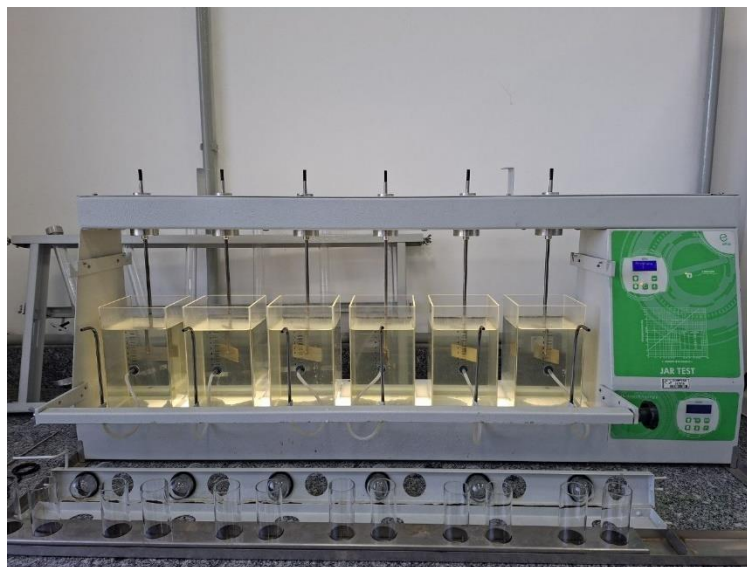
A bactéria *Escherichia coli* (*E. coli*) é considerada o principal indicador de contaminação fecal recente, uma vez que habita o trato intestinal de humanos e animais de sangue quente. Assim, sua detecção na água indica contaminação por material fecal e sugere a possível presença de microrganismos patogênicos capazes de causar doenças de veiculação hídrica, tornando seu monitoramento essencial para a avaliação da qualidade microbiológica da água (World Health Organization, 2022).

A legislação brasileira determina a ausência de *Escherichia coli* nas amostras de água destinadas ao abastecimento público, uma vez que sua detecção pode indicar contaminação fecal recente. Nesse contexto, o monitoramento microbiológico desempenha papel fundamental na verificação da conformidade da água com os requisitos de potabilidade (Brasil, 2021).

2.8 Jar Test aplicado à otimização da coagulação/floculação

O ensaio de Jar Test, também denominado teste dos jarros, exemplificado na Figura 7, consiste em uma ferramenta laboratorial amplamente utilizada para a avaliação das condições de coagulação e floculação, tanto no projeto quanto na operação de Estações de Tratamento de Água (ETA). Esse procedimento permite a obtenção de parâmetros operacionais importantes, especialmente relacionados à dosagem de coagulantes e à aplicação de produtos químicos no tratamento da água (Bartiko; Julio, 2015).

Figura 7 – Equipamento Jar Test



Fonte: Autoria própria, 2026.

A utilização do Jar Test contribui para a otimização dos processos de tratamento, auxiliando na definição das condições mais adequadas de operação e favorecendo o aumento da eficiência global da ETA. Além disso, possibilita a redução do consumo excessivo de produtos químicos, minimizando custos operacionais e contribuindo para o melhor controle da qualidade da água tratada. A quantidade exata de coagulante é determinada pela adição de quantidades crescentes em pH pré-determinado (Bartiko; Julio, 2015).

O ensaio é realizado em equipamento laboratorial composto por múltiplos jarros, nos quais são simuladas, em escala reduzida, condições semelhantes às observadas em uma ETA. Por meio do controle de gradientes de mistura, tempos de agitação e etapas de sedimentação, torna-se possível avaliar diferentes combinações de dosagens de coagulantes e condições operacionais. Dessa forma, busca-se identificar a condição que proporcione melhor clarificação da água, formação de flocos estáveis e maior eficiência na remoção de turbidez (Bartiko; Julio, 2015).

Em suma, os estudos analisados convergem ao apontar que, enquanto o sulfato de alumínio se consolida pela ampla disponibilidade e custo histórico atrativo, o cloreto férrico destaca-se pela maior estabilidade em faixas mais amplas de pH e pela formação de flocos mais densos. Essa dualidade reforça a importância de alinhar as características físico-químicas da água bruta às metas de qualidade estabelecidas pelo Ministério da Saúde (Brasil, 2021). Portanto, com base nessa base conceitual

consolidada, as seções subsequentes deste trabalho dedicam-se a avaliar os resultados práticos dessa comparação, visando determinar a alternativa mais eficiente para as condições específicas deste estudo.

3 METODOLOGIA

O estudo trata-se de uma pesquisa aplicada, descritiva e experimental, com estudo de caso e análise documental/estatística, combinando abordagens qualitativas e quantitativas. Foi desenvolvido a partir da análise de dados operacionais de uma Estação de Tratamento de Água e da realização de ensaios experimentais de coagulação/floculação em escala laboratorial, por meio do equipamento Jar Test. A metodologia foi dividida em duas etapas principais: análise histórica dos parâmetros físico-químicos da ETA e avaliação experimental do desempenho de diferentes coagulantes.

3.1 Origem dos dados

Os dados utilizados foram obtidos de uma Estação de Tratamento de Água real, localizada no município de Belo Jardim, no agreste pernambucano, contemplando registros de monitoramento da água bruta, água decantada, água filtrada e água tratada. Normalmente, a ETA utiliza a mistura de 4 mananciais distintos: Bitury, São Francisco, Tabocas e Ipojuca. Entretanto, no dia da coleta das amostras de água bruta, estava funcionando apenas com a combinação dos dois primeiros. Além disso, sua vazão nominal é 254 L.s^{-1} , porém, operava a 330 L.s^{-1} na data das análises.

Foram analisados dados referentes a um período de dois anos, contendo informações físico-químicas da água em diferentes etapas do tratamento. Para a água bruta, foram avaliados os parâmetros cor, turbidez e pH. Para a água decantada, foram considerados os parâmetros cor e turbidez. Para a água filtrada, foi analisada a turbidez. Já para a água tratada, foram analisados cor, turbidez, pH e cloro residual.

3.2 Análise estatística dos dados

Os dados referidos no item anterior foram organizados e analisados em planilhas eletrônicas, por meio do software Microsoft Excel® (Microsoft Corporation). O programa foi utilizado para o tratamento dos dados, realização das análises estatísticas, incluindo o cálculo das medidas de tendência central e de dispersão, bem como na elaboração de tabelas e gráficos, necessários à interpretação dos resultados. Os procedimentos estatísticos empregados são descritos no item subsequente.

3.3 Avaliação da eficiência de remoção

Os dados históricos de qualidade da água da ETA foram organizados em base mensal, considerando o período de março de 2024 a abril de 2026, totalizando 26 observações mensais. Foram avaliados os parâmetros cor aparente, turbidez, pH e cloro residual, considerando as etapas de água bruta, água decantada, água filtrada e água tratada, conforme disponibilidade dos dados.

Inicialmente, foi realizada estatística descritiva, incluindo média, mediana, valores mínimo e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação. O coeficiente de variação foi utilizado para avaliar a estabilidade dos parâmetros ao longo do período, sendo valores mais elevados indicativos de maior oscilação operacional. A eficiência de remoção de cor e turbidez foi calculada pela equação 1, em que C_i correspondeu ao valor inicial do parâmetro na água bruta e C_f correspondeu ao valor final do parâmetro após a etapa avaliada.

$$\text{Eficiência de remoção (\%)} = [(C_i - C_f) / C_i] \times 100 \quad (1)$$

Para avaliar a significância estatística das reduções entre as etapas do tratamento, aplicou-se o teste t de Student pareado, considerando nível de significância de 5%. O teste pareado foi adotado porque os valores comparados pertencem aos mesmos meses de operação. Além disso, foi aplicado o teste F para comparação das variâncias entre as etapas, com o objetivo de verificar se o tratamento, além de reduzir os valores médios, também contribuiu para diminuir a variabilidade dos parâmetros na água final.

A conformidade da água tratada foi avaliada com base nos padrões de potabilidade vigentes, considerando como referência a Portaria GM/MS nº 888/2021, que estabelece procedimentos de controle, vigilância e padrão de potabilidade da água para consumo humano. Para os parâmetros avaliados, foram considerados os seguintes limites: cor aparente ≤ 15 uH/uC, turbidez $\leq 5,0$ uT/NTU, pH entre 6,0 e 9,5 e cloro residual livre entre 0,2 e 5,0 mgL⁻¹. A Portaria também determina a manutenção mínima de 0,2 mgL⁻¹ de cloro residual livre no sistema de distribuição e nos pontos de consumo.

3.4 Ensaios de Jar Test

Os ensaios foram conduzidos em equipamento de Jar Test da marca Ethik, modelo 218-6, código JAR.218.140130 e Nº de série 36807/13, contendo 6 jarros (Figura 7), com capacidade efetiva de volume de 2L, cada jarro, simulando em escala laboratorial as etapas de coagulação, floculação e sedimentação realizadas em uma ETA convencional, conforme a metodologia descrita por Rossin (1987) e sistematizada por Di Bernardo e Dantas (2017). Foram utilizados os coagulantes: sulfato de alumínio e cloreto férrico.

Ao todo, foram coletadas quatro amostras (A1 - A4) de água bruta. Nas duas primeiras (A1 e A2), utilizou-se o sulfato de alumínio (2%) como coagulante e nas duas últimas (A3 e A4), o cloreto férrico (2%). Estas amostras foram inicialmente caracterizadas quanto aos parâmetros cor, turbidez, pH e alcalinidade. Em seguida, foram adicionadas diferentes dosagens de cada coagulante aos jarros, com o objetivo de identificar a dosagem mais eficiente para cada produto químico avaliado.

Inicialmente, as concentrações foram variadas na escala de 10 mgL^{-1} em cada jarro. Em seguida, variou-se as concentrações na escala de 5 mgL^{-1} , para refiná-las, baseando-se pela eficiência obtida no primeiro ensaio, conforme a Tabela 1, até atingir a dosagem ideal. No dia das análises, a ETA funcionava com vazão de 330 L.s^{-1} , e utilizava a dosagem de 47 mgL^{-1} de sulfato de alumínio. As condições de mistura aplicadas ao Jar Test, programadas para simular o funcionamento da ETA, foram: 300 rpm por 10 segundos, na mistura rápida; 98 rpm por 522 s, 77 rpm por 522 s e 64 rpm por 258 s, simulando a mistura lenta e um tempo de 8 min para a decantação.

Tabela 1 – Procedimentos dos ensaios de jar test.

Amostra de água bruta	Coagulante utilizado (concentração)	Variação de dosagens
A1	Sulfato de alumínio (2%)	Escala de 10 mgL^{-1} (30-80 mgL^{-1})
A2	Sulfato de alumínio (2%)	Escala de 5 mgL^{-1} (40-65 mgL^{-1})
A3	Cloreto férrico (2%)	Escala de 10 mgL^{-1} (30-80 mgL^{-1})
A4	Cloreto férrico (2%)	Escala de 5 mgL^{-1} (50-75 mgL^{-1})

Fonte: Autoria própria, 2026.

Em cada ensaio, as amostras foram submetidas inicialmente à etapa de mistura rápida, com a finalidade de promover a dispersão uniforme do coagulante na água bruta. Em seguida, foi realizada a etapa de mistura lenta, visando favorecer a

formação e o crescimento dos flocos. Após a floculação, as amostras permaneceram em repouso para sedimentação dos flocos formados.

Ao final do período de sedimentação, foi coletado o sobrenadante de cada jarro e filtrado com o auxílio de filtro de papel com espessura de 160 μm , como apresentado na Figura 8. Em seguida, as alíquotas de cada jarro foram encaminhadas para determinação dos parâmetros cor aparente, turbidez, pH e alcalinidade. Os resultados obtidos foram utilizados para calcular a eficiência de remoção de cor e turbidez em cada condição experimental.

Figura 8 – Imagem da etapa de filtração



Fonte: Autoria própria, 2026.

A determinação da cor aparente foi realizada com o uso de um aparelho colorímetro da marca PoliControl, modelo AquaColor Cor SO, N° de série 24034558 (Figura 9), conforme os procedimentos descritos no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA; AWWA; WEF, 2023), os quais foram seguidos também para as análises de turbidez, pH e alcalinidade. O método baseia-se na medição da intensidade da luz transmitida através da amostra e na comparação com padrões da escala platina-cobalto (Pt-Co), sendo o resultado expresso em unidades Hazen (uH).

Figura 9 – Aparelho colorímetro utilizado nas análises de cor



Fonte: Autoria própria, 2026.

A turbidez foi determinada por meio de um turbidímetro da marca Hach, modelo TU5200 (EPA), N° de série 2030148 (Figura 10). O método baseia-se na nefelometria, na qual um feixe de luz é incidido sobre a amostra e a intensidade da luz espalhada pelas partículas em suspensão é medida por um detector posicionado a 90° em relação ao feixe incidente. A intensidade da luz dispersa é proporcional à quantidade de partículas presentes na amostra, sendo os resultados expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU) (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Figura 10 – Turbidímetro utilizado nas análises de turbidez



Fonte: Autoria própria, 2026.

O pH foi determinado utilizando-se um pHmetro da marca Metrohm, modelo 913 pH Meter (Figura 11). O método potenciométrico baseia-se na medição da diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de vidro e um eletrodo de referência, a qual é relacionada à atividade dos íons hidrogênio (H^+) presentes na amostra, permitindo a determinação direta do pH (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Figura 11 – pHmetro utilizado nas análises de pH



Fonte: Autoria própria, 2026.

A alcalinidade foi determinada pelo método de titulação ácido-base, utilizando bureta digital da marca VWR, modelo Digitrate Pro (Figura 12). O método consiste na titulação da amostra com uma solução ácida padronizada até o ponto final previamente estabelecido, permitindo determinar sua capacidade de neutralizar ácidos. Os resultados foram expressos em miligramas por litro (mgL^{-1}) de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) (APHA; AWWA; WEF, 2023).

Figura 12 – Bureta digital utilizada nas análises de alcalinidade



Fonte: Autoria própria, 2026.

O desempenho dos coagulantes foi comparado com base nos valores residuais de cor e turbidez após os ensaios de Jar Test, abordagem semelhante à adotada por Souza e Ferreira (2021) em estudos que avaliam a eficiência de sulfato de alumínio, cloreto férrico e outros coagulantes inorgânicos. Também foi considerada a variação do pH e da alcalinidade após a aplicação dos coagulantes, uma vez que esses parâmetros influenciam diretamente a eficiência da coagulação e a qualidade final da água. Outro ponto importante foi a observação da estrutura dos flocos formados.

A melhor condição experimental foi definida considerando a menor concentração residual de cor e turbidez, a manutenção do pH em faixa adequada e a menor dosagem necessária de coagulante. Além disso, os resultados obtidos foram comparados com os de pesquisas semelhantes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados foram divididos em duas partes: a primeira, relacionada à análise histórica dos dados físico-químicos da ETA no período compreendido entre março/2024 e abril/2026. A segunda, consistiu em uma avaliação experimental do desempenho dos dois diferentes coagulantes.

4.1 Tratamento estatístico dos dados históricos de qualidade da água

A análise estatística descritiva permitiu caracterizar o comportamento dos principais parâmetros de qualidade da água ao longo do período avaliado. Conforme apresentado na Tabela 2, a cor aparente da água bruta apresentou média de 56,19 uC, variando de 38,11 a 103,94 uC, enquanto a água tratada apresentou média de 6,44 uC, com valores entre 2,37 e 19,46 uC. Esse resultado evidencia redução expressiva da cor ao longo do processo de tratamento, principalmente após as etapas de clarificação e filtração.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos parâmetros avaliados na ETA.

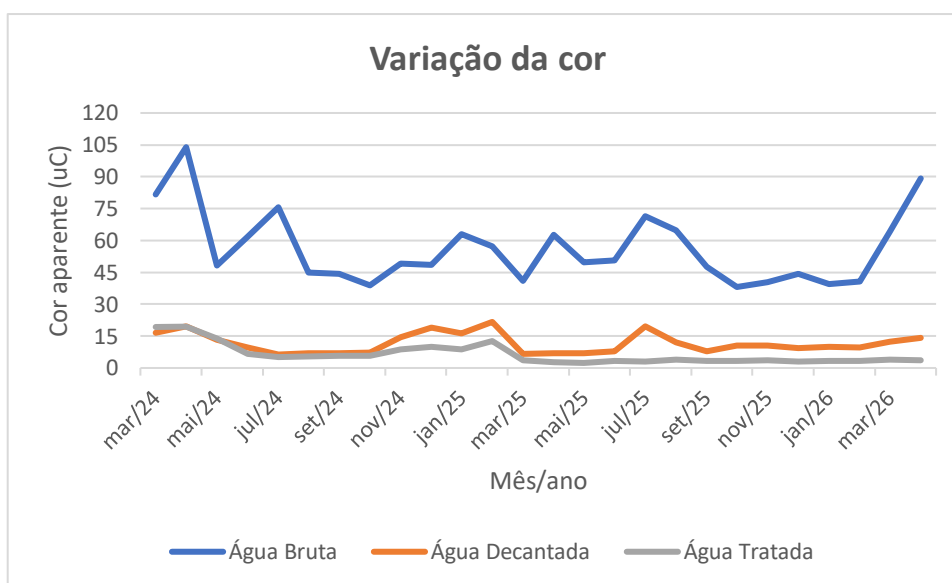
Parâmetro	N	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV (%)
Cor bruta (uC)	26	56,19	49,49	38,11	103,94	17,03	30,30
Cor decantada (uC)	26	11,66	10,29	6,33	21,68	4,71	40,40
Cor tratada (uC)	26	6,44	3,95	2,37	19,46	4,87	75,60
Turbidez bruta (NTU)	26	10,17	8,57	3,78	22,05	4,80	47,20
Turbidez decantada (NTU)	26	2,45	2,41	1,19	3,75	0,72	29,51
Turbidez filtrada (NTU)	26	0,93	0,86	0,59	2,05	0,28	30,35
Turbidez tratada (NTU)	26	1,18	1,13	0,76	2,37	0,30	25,65
pH bruto	26	7,51	7,50	7,49	7,68	0,04	0,48
pH tratado	26	6,50	6,50	6,49	6,52	0,005	0,09
Cloro tratado (mgL ⁻¹)	26	3,37	3,40	3,10	3,41	0,08	2,24

Fonte: Autoria própria, 2026.

A água decantada apresentou média de cor de 11,66 uC, indicando que a decantação contribuiu de maneira importante para a redução da cor antes da etapa final de tratamento, como pode ser visto na Figura 13. No entanto, o coeficiente de variação da cor tratada foi elevado (75,60%), o que está relacionado à ocorrência de valores mais altos no início da série histórica, especialmente em março e abril de 2024.

As pequenas situações de discrepância nos resultados que apresentaram valores superiores a 15,0 uC não estão ligados à falha de resposta da dosagem do coagulante ou mesmo seu range de atuação. Essas discrepâncias dão-se pela junção de erros: a vazão da unidade acima do valor nominal de projeto, além de haver falhas em ajustes operacionais da unidade (lavagens de filtros e descargas em decantadores).

Figura 13 – Gráfico comparativo da variação de cor



Fonte: Autoria própria, 2026.

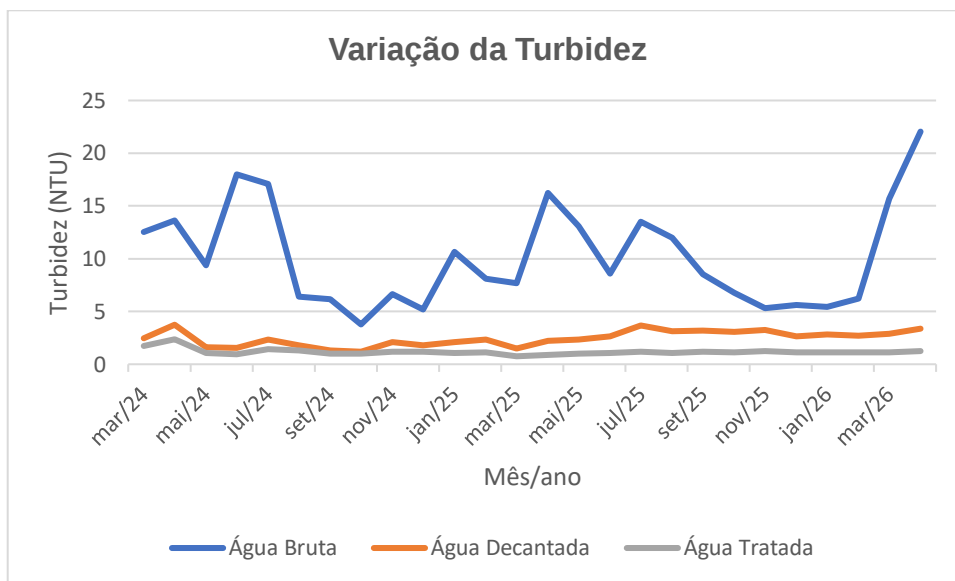
Isso se deve ao fato de que este corresponde ao período que geralmente marca o início do período intenso de chuvas no município, inclusive, em março de 2024 foi registrado um dos maiores índices pluviométricos desse intervalo de tempo, como mostra a Tabela 3. Por isso, devido ao escoamento superficial e transporte de matéria orgânica ao manancial, há oscilações expressivas nos parâmetros cor e turbidez. Assim, embora a média geral da cor tratada tenha sido satisfatória, a dispersão demonstra que houve períodos pontuais de instabilidade operacional.

Tabela 3 – Dados pluviométricos do município no período de estudo.

Mês/ano	Índice pluviométrico (mm)	Maior chuva	Dias com chuva	Mês/ano	Índice pluviométrico (mm)	Maior chuva	Dias com chuva
mar/24	179,6	72,7	7	abr/25	98,4	66,9	4
abr/24	97,3	32	7	mai/25	137,1	28,6	13
mai/24	88,5	33,7	9	jun/25	139,5	28,8	15
jun/24	129,6	20,6	16	jul/25	75,5	28,2	14
jul/24	97,2	35,8	14	ago/25	60	19,2	11
ago/24	12,7	5,3	4	set/25	37,5	10,5	10
set/24	10,4	6,6	2	out/25	0,9	0,9	1
out/24	-	-	-	nov/25	-	-	-
nov/24	2,1	2,1	1	dez/25	10,5	10,5	1
dez/24	36,2	35,3	2	jan/26	3,3	1,7	3
jan/25	188,9	41,7	9	fev/26	104,2	73,5	4
fev/25	17,4	16,1	2	mar/26	150,1	50,2	7
mar/25	15,3	15,3	1	abr/26	123	30,6	13

Fonte: COMPESA, 2024-2026.

Para a turbidez, a água bruta apresentou média de 10,17 NTU, enquanto a água decantada, filtrada e tratada apresentaram médias de 2,45 NTU, 0,93 NTU e 1,18 NTU, respectivamente. A redução progressiva da turbidez confirma a importância das etapas de separação de sólidos e polimento da água. A turbidez tratada apresentou coeficiente de variação de 25,65%, inferior ao observado na água bruta (47,20%), indicando maior estabilidade da água final em relação à água captada, como pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Gráfico comparativo da variação de turbidez

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os parâmetros pH e cloro residual apresentaram comportamento mais estável. O pH tratado apresentou média de 6,50 e coeficiente de variação de apenas 0,09%, enquanto o cloro residual apresentou média de 3,37 mgL⁻¹ e coeficiente de variação de 2,24%. Esses baixos valores de dispersão indicam bom controle operacional nas etapas de correção química e desinfecção.

No artigo de Oliveira *et al* (2023) sobre a ETA de Cavalcante (GO), o pH da água tratada apresentou média de 7,17 mgL⁻¹ no período chuvoso e 7,24 no período seco, com baixa dispersão; já o cloro residual apresentou médias de 1,37 mgL⁻¹ e 1,27 mgL⁻¹, respectivamente, também com baixa variabilidade.

Além disso, em outro trecho do mesmo estudo, os autores afirmam que a variabilidade da água tratada foi menor do que a da água bruta, o que indica menor dispersão após o tratamento e, portanto, melhor controle operacional geral. Porém, o trabalho também mostra que a qualidade do processo não foi uniforme em todos os parâmetros, pois houve maior variabilidade em turbidez e cor aparente, especialmente no período chuvoso.

4.2 Eficiência de remoção de cor e turbidez

A eficiência de remoção de cor e turbidez é apresentada na Tabela 4. A remoção média de cor aparente entre a água bruta e a água tratada foi de 88,66%, com mediana de 90,99%. Esse resultado demonstra desempenho satisfatório do

sistema na remoção de compostos responsáveis pela coloração da água, geralmente associados à presença de matéria orgânica natural, partículas finas e substâncias dissolvidas.

Tabela 4 – Eficiência de remoção de cor e turbidez nas etapas avaliadas.

Indicador	n	Média (%)	Mediana (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
Cor: bruta – decantada	26	78,75	80,99	60,80	91,63
Cor: bruta – tratada	26	88,66	90,99	71,21	95,93
Turbidez: bruta – decantada	26	71,67	72,72	38,85	91,24
Turbidez: bruta – tratada	26	86,02	86,21	72,85	94,78
Turbidez: decantada – tratada	26	48,57	53,75	13,75	67,31

Fonte: Autoria própria, 2026.

A remoção média global de turbidez, considerando a comparação entre água bruta e água tratada, foi de 86,02%, com mediana de 86,21%. Até a etapa de decantação, a remoção média foi de 71,67% da turbidez bruta, enquanto a comparação entre água decantada e tratada indicou remoção média de 48,57%. Esses resultados demonstram que a decantação teve participação relevante na remoção de partículas, mas que a etapa final também contribuiu para o polimento da água.

A mediana constitui uma medida de tendência central robusta, por ser pouco influenciada por valores extremos, representando de forma mais fiel o comportamento típico de uma série de dados quando há assimetria ou ocorrência de outliers (Montgomery; Runger, 2021; Triola, 2021). No presente estudo, sua utilização foi particularmente importante para os parâmetros cor aparente e turbidez, cujos valores apresentaram variações acentuadas em períodos de maior precipitação, permitindo uma representação mais consistente do desempenho rotineiro da ETA em comparação à média.

Para avaliar a significância das reduções observadas, foram aplicados os testes estatísticos apresentados na Tabela 5. A comparação entre cor bruta e cor tratada apresentou diferença estatisticamente significativa pelo teste t pareado ($t = 16,68$; $p < 0,001$), confirmando que a redução da cor foi consistente ao longo do período

analisado. O teste F também indicou diferença significativa entre as variâncias ($F = 12,24$; $p < 0,001$), demonstrando que o tratamento reduziu a variabilidade da cor na água final.

Tabela 5 – Resultados dos testes estatísticos aplicados aos parâmetros de cor e turbidez.

Comparação	Teste aplicado	Estatística	p-valor
Cor bruta x cor tratada	Teste t pareado	$t = 16,68$	$p < 0,001$
Cor bruta x cor tratada	Teste F	$F = 12,24$	$p < 0,001$
Turbidez bruta x turbidez tratada	Teste t pareado	$t = 9,64$	$p < 0,001$
Turbidez bruta x turbidez tratada	Teste F	$F = 250,16$	$p < 0,001$
Turbidez decantada x turbidez tratada	Teste t pareado	$t = 10,08$	$p < 0,001$
Turbidez decantada x turbidez tratada	Teste F	$F = 5,73$	$p < 0,001$

Fonte: Autoria própria, 2026.

A turbidez também apresentou redução significativa entre a água bruta e a água tratada ($t = 9,64$; $p < 0,001$). Além disso, o teste F indicou forte redução da variabilidade após o tratamento ($F = 250,16$; $p < 0,001$), o que reforça a capacidade do sistema em controlar oscilações da água bruta. A comparação entre turbidez decantada e tratada também foi significativa ($t = 10,08$; $p < 0,001$), indicando que a filtração ou etapa final de polimento contribuiu de forma estatisticamente relevante para a qualidade final da água.

Quando comparados com outros estudos, os resultados obtidos para a ETA podem ser considerados satisfatórios, embora não estejam entre os maiores desempenhos relatados para sistemas com maior robustez operacional. Barroso *et al.* (2019), ao avaliarem ETAs convencionais de diferentes portes, observaram que a ETA de médio porte apresentou eficiência mediana de aproximadamente 84% para turbidez e 94% para cor aparente, enquanto estações de pequeno e grande porte apresentaram eficiências próximas ou superiores a 97% para cor e superiores a 99% para turbidez. Nesse contexto, a ETA apresentou remoção de turbidez próxima à observada para a ETA de médio porte estudada por esses autores, porém remoção de cor inferior aos melhores desempenhos relatados.

Oliveira (2012), ao avaliar uma ETA com sistema de dupla filtração, relatou eficiência de remoção de 93,6% para cor aparente e 97,6% para turbidez. Esses valores são superiores aos observados na ETA, principalmente para turbidez, o que

pode estar associado à maior robustez do sistema de dupla filtração frente a variações da água bruta. Por outro lado, Barbosa *et al.* (2019), em ensaios de tratabilidade com coagulantes orgânicos, observaram melhor remoção de 61,61% para cor aparente e 90,25% para turbidez. A ETA estudada apresentou remoção de cor superior à desse estudo experimental e remoção de turbidez próxima ao melhor ensaio, reforçando que o desempenho global foi adequado.

A comparação com outros trabalhos demonstra que o desempenho da ETA se encontra dentro de uma faixa compatível com estudos de tratamento convencional e ensaios de tratabilidade, embora a eficiência de turbidez tenha sido inferior à observada em sistemas de dupla filtração. Esse resultado sugere que o tratamento avaliado apresenta bom desempenho global, mas ainda pode ser otimizado por meio de ajustes operacionais, especialmente na coagulação, floculação e controle da carreira de filtração.

4.3 Conformidade da água tratada com os padrões de potabilidade

A conformidade da água tratada foi avaliada com base nos padrões de potabilidade vigentes, considerando os critérios da Portaria GM/MS n. 888/2021. Conforme apresentado na Tabela 6, a turbidez da água tratada permaneceu em conformidade em todos os meses avaliados, com valores entre 0,76 e 2,37 NTU, inferiores ao limite de 5,0 NTU adotado para água tratada/distribuída.

Tabela 6 – Conformidade da água tratada com os padrões de potabilidade exigidos.

Parâmetro	Critério adotado	Resultado observado	Meses conformes	Conformidade (%)	Observação
Cor aparente	≤ 15 uC	2,37 a 19,46 uC	24/26	92,31	Não conformidades em mar/2024 e abr/2024
Turbidez	$\leq 5,0$ NTU	0,76 a 2,37 NTU	26/26	100,00	Todos os meses abaixo do limite
pH	6,0 a 9,5	6,49 a 6,52	26/26	100,00	Faixa operacional recomendada
Cloro residual livre	0,2 a 5,0 mgL ⁻¹	3,10 a 3,41 mgL ⁻¹	26/26	100,00	Valores dentro da faixa adotada

Fonte: Autoria própria, 2026.

O pH tratado também apresentou conformidade integral no período analisado, mantendo-se entre 6,49 e 6,52, dentro da faixa recomendada de 6,0 a 9,5. O cloro residual livre apresentou valores entre 3,10 e 3,41 mgL⁻¹, permanecendo acima do mínimo exigido de 0,2 mgL⁻¹ e abaixo do valor máximo de 5,0 mgL⁻¹. Esses resultados indicam estabilidade da etapa de desinfecção e manutenção de residual compatível com os critérios de potabilidade exigidos pela Portaria.

A cor aparente da água tratada apresentou conformidade em 24 dos 26 meses avaliados, correspondendo a 92,31% do período. As não conformidades ocorreram em março e abril de 2024, com médias mensais de 19,20 uC e 19,46 uC, respectivamente. Esses valores ultrapassaram o limite de 15 uC e indicam que, nesses meses, houve maior dificuldade do sistema em reduzir a cor aparente até o padrão estabelecido.

É importante destacar que a análise de conformidade foi baseada em médias mensais. Portanto, os resultados permitem uma avaliação histórica do desempenho da ETA, mas não substituem o controle oficial realizado por amostras individuais, conforme frequência e plano de amostragem definidos na legislação. Ainda assim, a avaliação mensal é útil para identificar tendências, períodos críticos e necessidade de ajustes operacionais.

4.4 Períodos de maior instabilidade operacional

A identificação dos períodos de maior instabilidade operacional foi realizada a partir dos meses com maiores valores de cor e turbidez tratadas, menores eficiências de remoção e maiores desvios em relação ao comportamento médio. Os principais períodos críticos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Períodos de maior instabilidade operacional identificados na ETA.

Período	Indicador observado	Resultado
mar/2024	Cor tratada acima do limite	19,20 uC
abr/2024	Cor tratada acima do limite	19,46 uC
abr/2024	Maior cor bruta do período	103,94 uC
abr/2024	Maior turbidez tratada	2,37 NTU
mai/2024	Menor remoção de cor	71,21%

out/2024	Menor remoção de turbidez	72,85%
----------	---------------------------	--------

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os meses de março e abril de 2024 foram os mais críticos para a cor aparente da água tratada, uma vez que apresentaram valores acima do limite de potabilidade. Abril de 2024 também se destacou por apresentar a maior cor bruta do período (103,94uC) e a maior turbidez tratada (2,37NTU). Embora a turbidez tenha permanecido dentro do padrão adotado, esse mês representa um período de maior carga de impurezas na água de entrada e maior pressão sobre o sistema de tratamento.

Maio de 2024 apresentou a menor eficiência de remoção de cor (71,21%), enquanto outubro de 2024 apresentou a menor eficiência de remoção de turbidez (72,85%). Esses resultados indicam que a instabilidade operacional não deve ser avaliada apenas pelos valores finais da água tratada, mas também pela capacidade relativa do sistema em remover os parâmetros ao longo das etapas.

A ocorrência de instabilidade associada à pior qualidade da água bruta também é relatada em outros estudos. Batista *et al.* (2019), ao avaliarem uma ETA influenciada por mistura de mananciais, observaram que a pior qualidade da água de entrada comprometeu o desempenho do tratamento, com maior ocorrência de não conformidades para cor e turbidez, especialmente em períodos relacionados às chuvas.

Esse comportamento é compatível com a interpretação de que aumentos repentinos de cor e turbidez na água bruta podem exigir ajustes de dosagem de coagulante, controle de pH de coagulação, tempo de floculação e acompanhamento da eficiência dos filtros.

4.5 Avaliação experimental do coagulante e dosagem ideais

Foram realizados ensaios com o sulfato de alumínio e o cloreto férrico para a obtenção das dosagens de melhor eficiência no tratamento dos mananciais de estudo. Na Tabela 8 são apresentadas as características das quatro amostras (A1 – A4) da água bruta coletada.

Tabela 8 – Características das amostras de água bruta.

Parâmetros	A1	A2	A3	A4
Cor (uC)	30,2	30,6	30,9	29,2
Turbidez (NTU)	3,21	3,17	3,15	3,01
pH	6,93	7,10	5,81	6,59
Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	31,86	31,86	31,66	32,46

Fonte: Autoria própria, 2026.

A água bruta apresentou valores de cor aparente entre 29,2 e 30,9 uC e turbidez entre 3,01 e 3,21 NTU, indicando baixa variabilidade entre as amostras coletadas. Os valores de pH variaram de 5,81 a 7,10, enquanto a alcalinidade permaneceu praticamente constante, entre 31,66 e 32,46 mg CaCO₃.L⁻¹. A relativa estabilidade dos parâmetros confirma as condições homogêneas da água de entrada durante o período de realização dos ensaios, pois foram coletadas as amostras todas no mesmo dia.

Além disso, a alcalinidade observada pode ser considerada suficiente para auxiliar nas reações de hidrólise dos coagulantes metálicos, favorecendo a formação de precipitados de hidróxidos responsáveis pela remoção de partículas suspensas e substâncias causadoras de cor. Adicionalmente, foram realizadas análises de ferro e manganês. Na água bruta, obteve-se resultado de 0,8 e 0,0 respectivamente. Já na água tratada, o ferro também zerou.

O primeiro ensaio foi realizado com o sulfato de alumínio (2%). Após a aplicação das diferentes dosagens do coagulante, observou-se redução significativa da cor aparente em todos os jarros, conforme mostra a Tabela 9. A água bruta apresentava cor próxima de 30 uC, enquanto os valores após o tratamento variaram entre 6,3 e 13,1 uC. A menor remoção ocorreu na dosagem de 30 mgL⁻¹ (13,1 uC), indicando quantidade insuficiente de coagulante para promover a completa desestabilização das partículas presentes na água.

Tabela 9 – Análise do 1º jar test.

	Concentração (mgL ⁻¹)	Cor (uC)	Remoção de cor (%)	Turbidez (NTU)	pH	Alcalinidade (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)
Jarro 1	30	13,1	56,62	0,7	7,31	19,4
Jarro 2	40	8,6	71,52	0,228	7,3	19,64
Jarro 3	50	6,7	77,81	0,138	7,27	21,44
Jarro 4	60	7	76,82	0,299	7,15	17,03
Jarro 5	70	6,3	79,14	0,145	7,08	13,83

Jarro 6	80	6,6	78,14	0,171	7,01	12,63
---------	----	-----	-------	-------	------	-------

Fonte: Autoria própria, 2026.

Com o aumento da dosagem para 40 e 50 mgL^{-1} , verificou-se melhora progressiva da eficiência de remoção, atingindo 6,7 uC na concentração de 50 mgL^{-1} . O menor valor de cor foi obtido com a dosagem de 70 mgL^{-1} , resultando em 6,3 uC, o que representa aproximadamente 79% de remoção em relação à água bruta. Entretanto, observa-se que acima dessa concentração não houve ganho significativo de desempenho, uma vez que a dosagem de 80 mgL^{-1} produziu valor ligeiramente superior (6,6 uC). Esse comportamento sugere a aproximação da dosagem ótima de coagulação, a partir da qual o aumento da concentração do coagulante não promove melhorias relevantes na remoção de cor.

Em relação à turbidez, o valor inicial era de aproximadamente 3,2 NTU. Após o tratamento, todos os jarros apresentaram valores inferiores a 1 NTU, evidenciando eficiência do processo. A melhor remoção ocorreu no Jarro 3, com dosagem de 50 mgL^{-1} , o qual apresentou turbidez residual de apenas 0,138 NTU. Embora a dosagem de 70 mgL^{-1} tenha produzido a menor cor residual, a diferença em relação ao Jarro 3 foi pequena. Considerando simultaneamente os parâmetros cor e turbidez, a concentração de 50 mgL^{-1} demonstrou desempenho bastante satisfatório, proporcionando a menor turbidez observada e elevada remoção de cor.

Outro aspecto relevante é que todas as amostras tratadas apresentaram turbidez muito inferior ao valor máximo permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para água destinada ao consumo humano, demonstrando a eficiência do tratamento aplicado. Os valores de pH após o tratamento variaram entre 7,01 e 7,31, permanecendo próximos da neutralidade. Observa-se uma discreta tendência de redução do pH com o aumento da dosagem de sulfato de alumínio, comportamento esperado devido à formação de íons hidrogênio durante a hidrólise do coagulante.

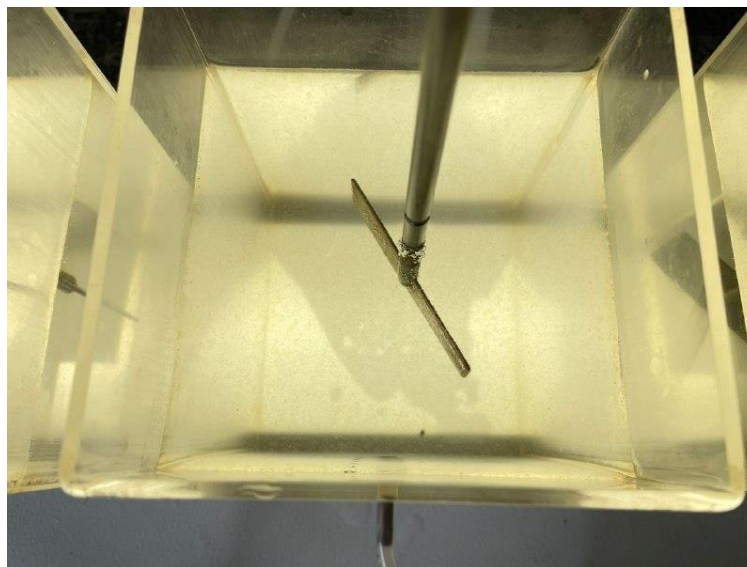
Apesar dessa redução, os valores permaneceram dentro da faixa recomendada para sistemas de abastecimento, indicando que a alcalinidade natural da água foi suficiente para amortecer as alterações provocadas pela adição do coagulante. Os resultados revelam uma redução gradual da alcalinidade à medida que a dosagem de sulfato de alumínio aumenta. Enquanto os jarros com menores dosagens apresentaram alcalinidade próxima de 20 $\text{mg CaCO}_3\cdot\text{L}^{-1}$, os maiores consumos

ocorreram nas concentrações de 70 e 80 mgL⁻¹, que resultaram em valores de 13,83 e 12,63 mg CaCO₃.L⁻¹, respectivamente.

Esse comportamento está diretamente relacionado às reações de hidrólise do sulfato de alumínio, que consomem bicarbonatos presentes na água para formação dos hidróxidos de alumínio responsáveis pela coagulação. O declínio excessivo da alcalinidade pode reduzir a capacidade tampão da água e comprometer o desempenho do processo, especialmente em águas naturalmente pouco alcalinas (Di Bernardo; Dantas, 2005; Libânio, 2016).

Considerando conjuntamente os parâmetros de cor, turbidez, pH e alcalinidade, a dosagem de 50 mgL⁻¹ de sulfato de alumínio apresentou o melhor equilíbrio operacional. Nessa condição foram obtidos valores de cor igual a 6,7 uC e turbidez de 0,138 NTU, associados a pH de 7,27 e alcalinidade residual de 21,44 mg CaCO₃.L⁻¹, além de ter obtido uma das melhores floculações, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Imagem da floculação do 1º jar test



Fonte: Autoria própria, 2026.

Embora a dosagem de 70 mgL⁻¹ tenha proporcionado ligeiramente menor cor residual, o ganho obtido foi pequeno quando comparado ao aumento da quantidade de coagulante empregada e à maior redução de alcalinidade. Dessa forma, a concentração de 50 mgL⁻¹ pode ser considerada a dosagem ótima para as condições avaliadas, por proporcionar elevada eficiência de remoção com menor consumo de produto químico e maior estabilidade operacional.

Em seguida, foi realizado outro ensaio com sulfato de alumínio, a fim de refinar as dosagens do coagulante, as quais variaram de 40 a 65 mgL⁻¹, ajustadas em intervalos de 5 mgL⁻¹ a cada jarro. Os resultados encontrados após o ensaio são apresentados na Tabela 10.

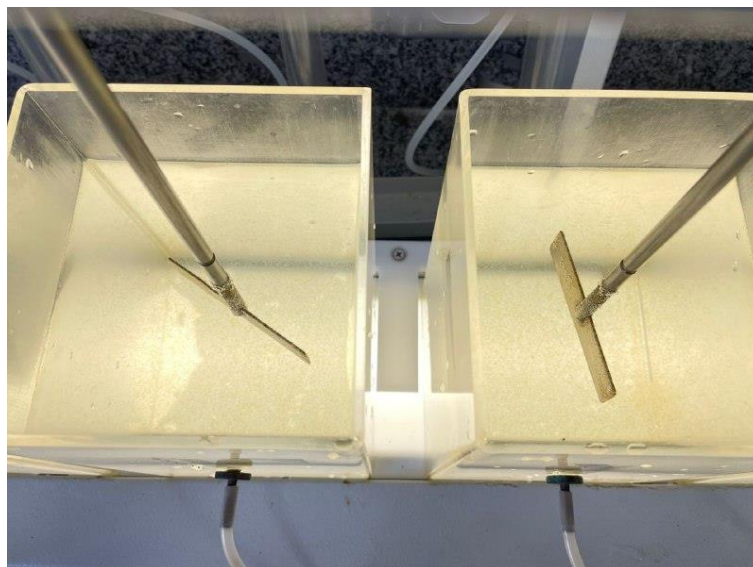
Tabela 10 – Análise do 2º jar test.

	Concentração (mgL ⁻¹)	Cor (uC)	Turbidez (NTU)	pH	Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)
Jarro 1	40	9,8	0,259	6,93	18,24
Jarro 2	45	8,6	0,35	7,01	17,03
Jarro 3	50	7,7	0,238	6,96	17,03
Jarro 4	55	8,1	0,155	6,98	14,83
Jarro 5	60	8,8	0,123	6,94	16,83
Jarro 6	65	9,7	0,14	6,96	9,22

Fonte: Autoria própria, 2026.

Embora a dosagem de 60 mgL⁻¹ tenha produzido a menor turbidez residual (0,123 NTU), a concentração de 50 mgL⁻¹ apresentou a menor cor residual (7,7 uC), turbidez igualmente baixa (0,238 NTU), pH adequado (6,96) e alcalinidade residual superior à observada nas maiores dosagens. Assim, os resultados do segundo Jar Test utilizando sulfato de alumínio indicam que a dosagem de 55 mgL⁻¹ apresentou o melhor equilíbrio entre eficiência de remoção e economia de reagente, corroborando os resultados obtidos no primeiro ensaio.

Dessa forma, a concentração de 55 mgL⁻¹ de sulfato de alumínio pode ser considerada a dosagem ótima para as características da água estudada, pois em caso de eventuais problemas no equipamento de dosagem, e ele tender a uma dosagem maior ou menor, ainda apresentará bons resultados, tanto para a cor aparente quanto para a turbidez. O ensaio revelou maior eficiência da etapa de floculação em relação ao primeiro Jar Test, com a formação de flocos maiores, conforme pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Imagem da floculação do 2º jar test

Fonte: Autoria própria, 2026.

Considerando o ensaio realizado com o coagulante cloreto férrico (2%), o resultado indicou que houve redução expressiva da cor aparente, à medida que a concentração do coagulante foi aumentada. Enquanto a dosagem de 30 mgL^{-1} apresentou cor residual de 41,9 uC, valor superior ao observado na água bruta, as concentrações mais elevadas promoveram remoção progressiva desse parâmetro, atingindo 4,4 uC na dosagem de 80 mgL^{-1} , como pode-se constatar na Tabela 11.

Tabela 11 – Análise do 3º jar test.

	Concentração (mgL^{-1})	Cor (uC)	Turbidez (NTU)	pH	Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$)
Jarro 1	30	41,9	2,01	5,27	11,02
Jarro 2	40	15,6	0,607	5,25	13,83
Jarro 3	50	6,6	0,175	5,04	11,22
Jarro 4	60	5,9	0,202	5	8,82
Jarro 5	70	5,1	0,198	4,85	6,01
Jarro 6	80	4,4	0,213	4,94	4,21

Fonte: Autoria própria, 2026.

Esse aumento em relação à água bruta provavelmente indica subdosagem do cloreto férrico, com formação inadequada de flocos e permanência de espécies férricas dispersas na água, o que pode inclusive aumentar a cor aparente (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017).

A turbidez apresentou comportamento semelhante ao da cor. Na menor dosagem aplicada (30 mgL^{-1}), a turbidez residual foi de 2,01 NTU, indicando coagulação insuficiente para promover a adequada desestabilização das partículas presentes na água. Com o aumento da dosagem, verificou-se redução significativa da turbidez, alcançando o menor valor na concentração de 50 mgL^{-1} , correspondente a 0,175 NTU. A partir dessa dosagem, as variações observadas foram pouco expressivas, indicando que concentrações superiores não proporcionaram ganhos relevantes na remoção de partículas suspensas.

Em relação ao pH, observou-se redução gradual com o aumento da concentração de cloreto férrico. Os valores variaram de 5,27 na dosagem de 30 mgL^{-1} para 4,85 na dosagem de 70 mgL^{-1} , evidenciando o caráter acidificante do coagulante. Esse comportamento está associado às reações de hidrólise dos sais férricos, que liberam íons hidrogênio para o meio e promovem o consumo da alcalinidade natural da água, conforme amplamente descrito por Di Bernardo e Dantas (2005) e Libânio (2016).

Essa redução linear do pH decorrente do aumento da dosagem do sal metálico inorgânico também foi verificada experimentalmente em matrizes de água bruta por Silva *et al.* (2011) e corrobora as discussões de Sousa (2021), que demonstram o consumo dos íons bicarbonato no processo de formação dos precipitados de hidróxido férrico.

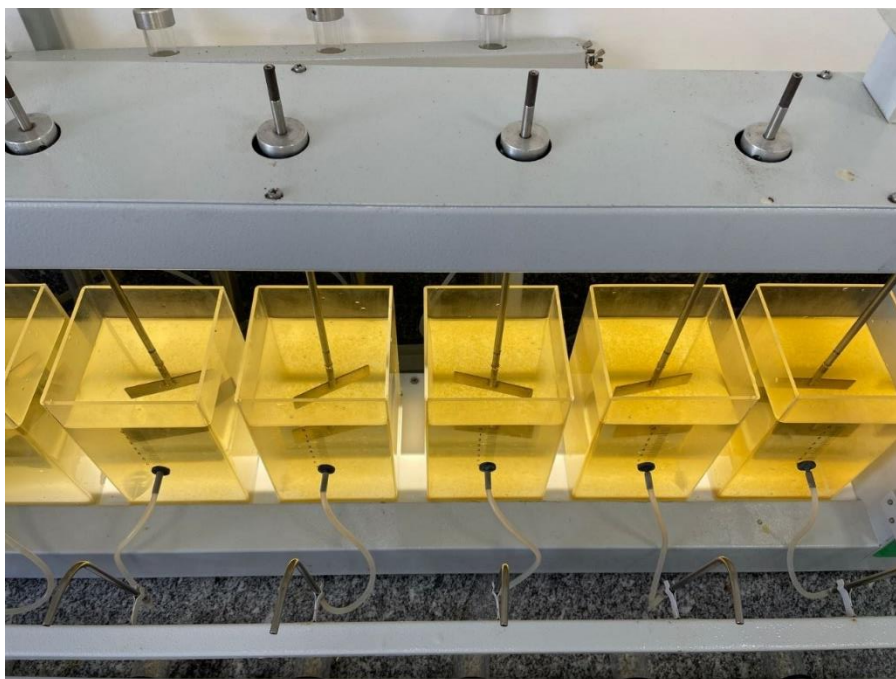
A alcalinidade residual também apresentou diminuição progressiva ao longo do ensaio. Enquanto na dosagem de 40 mgL^{-1} foram observados $13,83 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$, na concentração de 80 mgL^{-1} esse valor reduziu para apenas $4,21 \text{ mg CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. Tal resultado demonstra elevado consumo da capacidade tampão da água, aspecto que deve ser considerado na definição da dosagem ótima, uma vez que valores muito baixos de alcalinidade podem comprometer a estabilidade química do sistema e demandar correções adicionais de pH.

Analisando conjuntamente os resultados obtidos para todos os parâmetros considerados, observa-se que as dosagens entre 50 e 60 mgL^{-1} apresentaram o melhor desempenho global. A concentração de 50 mgL^{-1} resultou na menor turbidez residual (0,175 NTU), mantendo cor reduzida (6,6 uC), pH de 5,04 e alcalinidade

residual de $11,22 \text{ mg.CaCO}_3 \text{ L}^{-1}$. Já a dosagem de 60 mgL^{-1} proporcionou ligeira melhoria na remoção de cor ($5,9 \text{ uC}$), porém com maior redução da alcalinidade.

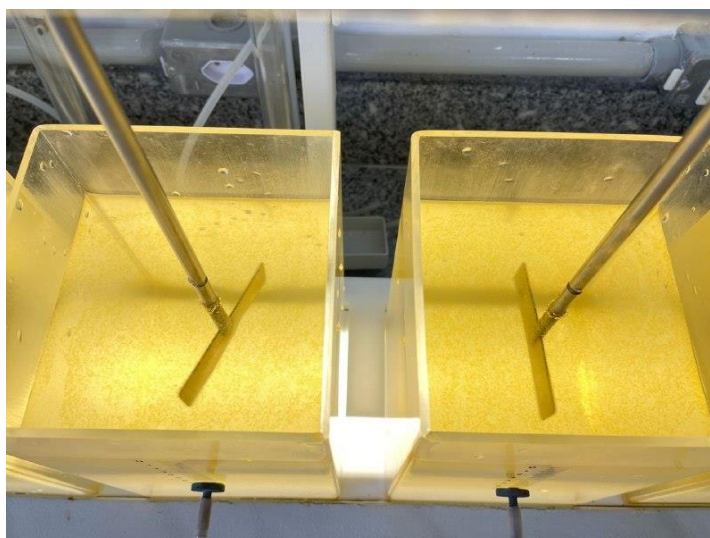
Dessa forma, a faixa entre 50 e 60 mgL^{-1} mostrou-se a mais promissora para o refinamento da dosagem ótima em ensaios posteriores. As Figuras 17 e 18 mostram a formação de flocos bem maiores em relação àqueles formados nos dois primeiros ensaios, utilizando o sulfato como coagulante.

Figura 17 – Visão geral da floculação do 3º jar test



Fonte: Autoria própria, 2026.

Figura 18 – Imagem da floculação do 3º jar test



Fonte: Autoria própria, 2026.

Com o objetivo de refinar a determinação da dosagem ótima de cloreto férrico, foi realizado outro ensaio, sobre o qual os resultados podem ser vistos na Tabela 12, utilizando concentrações compreendidas entre 50 e 75 mgL⁻¹. A escolha dessa faixa foi baseada nos resultados obtidos no ensaio preliminar, no qual as dosagens entre 50 e 60 mgL⁻¹ apresentaram os melhores desempenhos na remoção de cor e turbidez.

Tabela 12 – Análise do 4º jar test.

	Concentração (mgL ⁻¹)	Cor (uC)	Turbidez (NTU)	pH	Alcalinidade (mg CaCO ₃ L ⁻¹)
Jarro 1	50	8	0,206	6,77	17,03
Jarro 2	55	6,5	0,223	6,65	10,02
Jarro 3	60	6,1	0,179	6,58	10,22
Jarro 4	65	5,6	0,119	6,52	8,82
Jarro 5	70	6,5	0,455	5,84	7,01
Jarro 6	75	5,6	0,217	6,36	5,41

Fonte: Autoria própria, 2026.

Os resultados demonstraram que a cor residual apresentou tendência geral de redução com o aumento da dosagem até 65 mgL⁻¹. A concentração de 50 mgL⁻¹ resultou em cor de 8,0 uC, enquanto a dosagem de 65 mgL⁻¹ apresentou o menor valor observado, correspondente a 5,6 uC. No entanto, verificou-se que a aplicação de concentrações superiores não promoveu melhoria adicional significativa, uma vez que a dosagem de 75 mgL⁻¹ apresentou o mesmo valor de cor residual.

Quanto à turbidez, observou-se elevada eficiência do processo em todas as condições avaliadas. O menor valor foi obtido na concentração de 65 mgL⁻¹, com turbidez residual de 0,119 NTU. Esse resultado indica a condição de maior eficiência na remoção das partículas suspensas. Em contrapartida, a dosagem de 70 mgL⁻¹ apresentou aumento da turbidez residual para 0,455 NTU.

Esse comportamento sugere que a dosagem ótima de coagulante foi ultrapassada, favorecendo a re-estabilização das partículas coloidais em decorrência da reversão de carga superficial, reduzindo a eficiência da agregação entre as partículas (Gregory; Duan, 2001). Além disso, o excesso de coagulante pode resultar na formação de flocos menos densos e mecanicamente mais frágeis, tornando-os suscetíveis à ruptura durante a etapa de floculação, em função do gradiente de velocidade aplicado, o que contribui para o aumento da turbidez residual (Duan; Gregory, 2003).

Os valores de pH apresentaram redução gradual com o aumento da concentração de cloreto férrico, variando de 6,77 para 6,36 ao longo do ensaio. Da mesma forma, observou-se diminuição progressiva da alcalinidade, que reduziu de 17,03 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ para 5,41 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$ nas maiores dosagens aplicadas. Embora tenha ocorrido redução da alcalinidade e diminuição do pH, os valores permaneceram em faixa mais próxima da neutralidade quando comparados aos observados no ensaio preliminar.

Esse comportamento confirma o caráter acidificante do cloreto férrico e sua elevada demanda de alcalinidade durante as reações de hidrólise. Em sistemas de abastecimento, essa condição pode comprometer a estabilidade química da água e, associada a outros fatores, favorecer processos corrosivos na rede de distribuição (Maciel, 2019). Por esse motivo, é comum realizar a estabilização química da água por meio da correção do pH e da alcalinidade com a adição de produtos alcalinizantes antes da distribuição (Silva, 2015).

A análise simultânea dos parâmetros avaliados indica que a dosagem de 65 mgL^{-1} apresentou o melhor desempenho global entre as condições testadas. Nessa concentração foram obtidos simultaneamente o menor valor de turbidez (0,119 NTU) e um dos menores valores de cor residual (5,6 uC), associados a pH de 6,52 e alcalinidade residual de 8,82 mg $\text{CaCO}_3 \cdot \text{L}^{-1}$. Dessa forma, a dosagem de 65 mgL^{-1} pode ser considerada a condição ótima para o emprego do cloreto férrico na água estudada, uma vez que proporcionou elevada eficiência de remoção sem comprometer significativamente a estabilidade química da água.

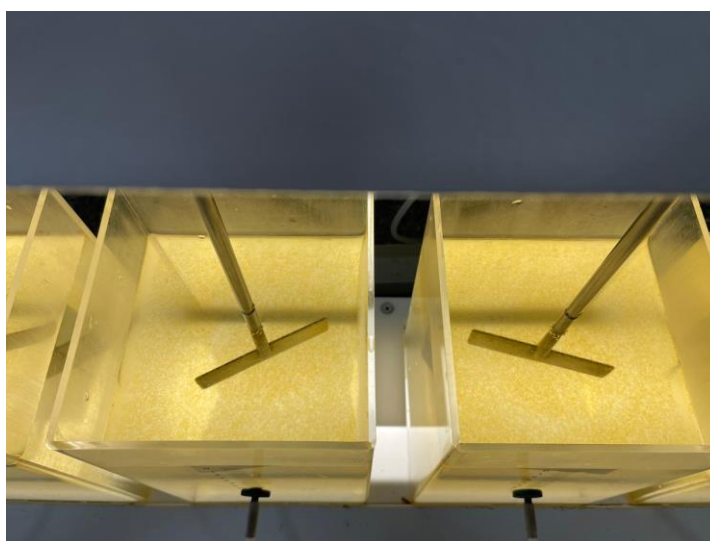
No entanto, apesar de ser adequada para a condição de baixa carga descrita, essa não pode ser assumida automaticamente como dose ótima em eventos críticos de alta turbidez, em que o mecanismo dominante tende a ser o de varredura e o comportamento físico-químico do sistema pode se alterar de forma significativa. Os resultados apresentados indicam um sistema operando em regime relativamente estável, com partículas finas e matéria orgânica natural dominando a matriz da água. Nessas condições, 65 mgL^{-1} de cloreto férrico atua principalmente por neutralização de cargas e formação de flocos com densidade suficiente para decantação eficiente, sem necessidade de grandes excedentes de coagulante para formar “lodo químico” volumoso.

Para que o mecanismo de varredura seja eficaz, é usual a necessidade de doses mais elevadas de coagulante do que aquelas otimizadas para baixa carga, bem como controle estreito de pH na faixa favorável à formação de hidróxidos de ferro (tipicamente pH ácido a ligeiramente neutro, dependendo do sistema) (Di Bernardo; Dantas; Voltan, 2017; Crittenden et al., 2012).

Quando a turbidez e a carga de sólidos aumentam muito, manter a dosagem em 65 mgL^{-1} pode significar “subdosagem química” em relação à massa de partículas presentes, o que se traduz em flocos menores, maior ruptura de floco na floculação e sobrecarga do decantador, com risco de arraste de sólidos e perda de eficiência. Por outro lado, doses excessivas em alta turbidez, sem controle, podem causar problemas operacionais (incremento de lodo, obstrução, maior demanda de descarte e custos), o que reforça que a “dosagem ótima” não é um valor estático, mas um intervalo dependente da carga afluyente (Libânio, 2016).

Os resultados do ensaio de refinamento confirmaram as tendências observadas no teste preliminar, aumentando a confiabilidade da determinação da dosagem ótima e demonstrando a importância da realização de ensaios complementares para o ajuste fino das condições operacionais de coagulação. A Figura 19 mostra o resultado da floculação desse último teste.

Figura 19 – Imagem da floculação do 4º jar test



Fonte: Autoria própria, 2026.

Observando comparativamente o desempenho dos coagulantes, ambos mostraram-se eficientes na remoção de cor aparente e turbidez, no entanto, o cloreto

férrico apresentou desempenho superior ao sulfato de alumínio, alcançando menores valores residuais de cor aparente e turbidez na dosagem ótima de 65 mgL^{-1} , enquanto o sulfato de alumínio apresentou melhor desempenho na dosagem de 55 mgL^{-1} .

Embora tenha requerido uma dosagem superior, o cloreto férrico apresentou maior eficiência global de clarificação da água, frente às especificidades da água bruta utilizada neste estudo. Entretanto, vale salientar que como a ETA já utiliza o sulfato de alumínio como coagulante, uma eventual substituição deve considerar também aspectos operacionais e econômicos, como o custo do produto, consumo de alcalinizantes para possíveis correções de pH e produção de lodo, por exemplo.

Resultados semelhantes foram observados em outros estudos, como o realizado por Marques (2016), que constataram que os flocos formados pelo uso do cloreto férrico tendem a ser mais fortes e resistentes ao processo de ruptura permanente, e o coagulante mostrou elevada eficiência na remoção de partículas. De acordo com Franco (2009), as dosagens ótimas variam conforme a qualidade da água e cada manancial possui características próprias. O autor reforça que não existe uma dosagem universal. E, em várias situações, o cloreto férrico apresentou maior eficiência na remoção de cor e turbidez, comparados aos do sulfato de alumínio.

Em contrapartida, há estudos que mostram que os resultados podem divergir em mananciais distintos. O sulfato de alumínio apresentou-se com melhor desempenho geral no estudo desenvolvido por Pimenta *et al.* (2017), especialmente devido à sua eficiência na remoção de organismos de contaminação fecal, o que reforça a ideia de que a escolha do coagulante deve considerar as especificidades de cada manancial.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise dos dados operacionais da ETA e dos ensaios de Jar Test, foi possível avaliar o desempenho do processo convencional de tratamento e atender aos objetivos propostos. Os resultados históricos indicaram elevada eficiência na remoção de cor aparente e turbidez, além da manutenção, de modo geral, dos parâmetros de pH e cloro residual dentro dos padrões estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. As análises estatísticas confirmaram reduções significativas nos parâmetros avaliados, evidenciando a eficiência do tratamento e a redução da variabilidade da qualidade da água ao longo do período analisado.

Observou-se que as maiores oscilações de cor e turbidez ocorreram em períodos de maior precipitação pluviométrica, demonstrando a influência das condições climáticas sobre a qualidade da água bruta. Mesmo diante dessas variações, a ETA apresentou capacidade de manter a qualidade da água tratada, reforçando a importância do monitoramento contínuo e dos ajustes operacionais.

Nos ensaios de Jar Test, ambos os coagulantes avaliados apresentaram bom desempenho. Contudo, o cloreto férrico demonstrou maior eficiência nas condições estudadas, com dosagem ótima de 65 mgL^{-1} , enquanto o sulfato de alumínio apresentou melhor resultado na dosagem de 55 mgL^{-1} . A escolha do cloreto férrico foi justificada pela melhor remoção de cor e turbidez e pela formação de flocos mais densos e resistentes, favorecendo o processo de coagulação-floculação.

Conclui-se que o Jar Test é uma ferramenta essencial para a otimização operacional de Estações de Tratamento de Água, pois permite definir dosagens mais adequadas de coagulantes, melhorar a eficiência do tratamento, reduzir o consumo de produtos químicos e aumentar a segurança operacional. Recomenda-se, para estudos futuros, a realização de ensaios em diferentes períodos sazonais, a avaliação de outros coagulantes e auxiliares de coagulação, bem como análises econômicas que considerem custos operacionais, geração de lodo e disposição final.

REFERÊNCIAS

- ALVES, B. S. G. **Análise das variáveis do processo de coagulação/floculação para clarificação de água superficial**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.
- AMORIM, A. T. Poluição dos recursos hídricos e políticas para proteção dos recursos hídricos. **Geopauta**, v. 8, e14962, 2024. DOI: 10.22481/rg.v8.e2024.e14962. Disponível em: <https://periodicos2.uesb.br/index.php/geo/article/view/15937>. Acesso em: 4 jun. 2026.
- ANDRADE, V. D. **Aplicação de substâncias húmicas de lodo de estação de tratamento de água na germinação de espécies utilizadas na recuperação de áreas degradadas: *Chloroleucon dumosum* (Benth.) G.P. Lewis**. 2023. Dissertação (Mestrado em Agricultura e Ambiente) – Universidade Federal de Alagoas, Arapiraca, 2023.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC: APHA, 2023.
- BARBOSA, M. G. N. et al. Remoção de cor aparente e turbidez em águas naturais com a utilização de coagulantes orgânicos associado ao carvão ativado e polímero. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2019.
- BARROS, F. G. N.; AMIN, M. M. Água: um bem econômico de valor para o Brasil e o mundo. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional**, Taubaté, v. 4, n. 1, p. 75-108, jan./abr. 2008. Disponível em: <https://www.rbgdr.net/revista/index.php/rbgdr/article/download/116/106/147>. Acesso em: 6 mar. 2026.
- BARROSO, G. R. et al. Melhoria da qualidade da água tratada e aumento da capacidade de ETAs através da escolha adequada de coagulantes e auxiliares, em águas com alcalinidade alta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 30., 2019, Natal. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2019.
- BARTIKO, D.; JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 1-11, 2015.
- BATISTA, D. F. et al. Avaliação da eficiência da Estação de Tratamento de Água João Ednaldo. In: ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE, 12., 2019, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: SRH/SE, 2019.
- BATISTA, M. S.; QUEIROZ, A. L. P.; SILVA, C. K. S.; PEREIRA, D. S. F.; SANTOS, G. Estudo de parâmetros no processo de coagulação/floculação no tratamento de águas. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v.8, n. 1, 2016.
- BERGAMIN, D. P. **Tratabilidade da água do rio Gualaxo do Sul em Mariana-MG: parâmetros otimizados para projeto de unidades de coagulação e floculação**. 2017.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

BITTENCOURT, C.; PAULA, M. A. S. **Tratamento de água e efluentes**: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014.

BRANCO, C. J. M.; ZORZIN, L. A. Avaliação dos processos de coagulação e floculação no tratamento de água. **Revista Brasileira de Engenharia Química e Saneamento**, v. 12, n. 2, p. 45-58, 2016.

BRANCO, G. K.; ZORZIN, L. **Tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos por meio de coagulante orgânico**. 2016. 34 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior em Tecnologia em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde e Ambiente. Departamento de Vigilância em Saúde Ambiental e Saúde do Trabalhador. **Curso básico de vigilância da qualidade da água para consumo humano**: módulo II: abastecimento de água: aula 2: etapas do abastecimento de água. 2. ed. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de controle da qualidade da água para técnicos que trabalham em ETAs**. Brasília: Funasa, 2014.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Panorama do saneamento básico no Brasil**: SNIS 2021. Brasília, DF: MDR, 2021.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5 de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 7 maio de 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_24_05_2021_rep.html. Acesso em: 20 mar. 2026.

BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. **Subsídios para implementação do Decreto nº 5.440/2005 e da Portaria MS nº 518/2004**: comentários ao Decreto Presidencial nº 5.440, de 4 de maio de 2005. Brasília: Ministério da Saúde, 2005.

BRATBY, J. **Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment**. London: IWA Publishing, 2016. ISBN: 9781780407494.

COMPESA. **Tratamento de água**. Recife: Companhia Pernambucana de Saneamento, 2025. Disponível em: https://servicos.compesa.com.br/wp-content/uploads/2025/01/02_Folder-tratamento-de-agua.pdf. Acesso em: 15 mar. 2026.

COSTA, L. R. C. **Integração da ozonização no tratamento de água e efluentes**: uma abordagem para a remoção e mineralização da fármacos e inativação de

patógenos. 2024. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLOUS, G. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. 3. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

DE JULIO, M.; FIORAVANTE, D. A.; OROSKI, F. I. Avaliação da influência dos parâmetros de mistura rápida, floculação e decantação no tratamento de água empregando o sulfato de alumínio e o PAC. **Publicatio UEPG: Ciências Exatas e da Terra**, Ponta Grossa, v. 14, n. 2, 2008. Disponível em: <https://revistas.uepg.br>. Acesso em: 2 abr. 2026.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2005. v. 1.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3. ed. São Carlos: LDiBe Editora, 2017.

DI BERNARDO, L.; PENNA, J. A. Influência da mistura rápida hidráulica nas operações de floculação e sedimentação. **Revista DAE**, São Paulo, v. 45, n.143, p. 408-419, 1985.

DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolyzing metal salts. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 100, p. 475-502, 2003. DOI: 10.1016/S0001-8686(02)00067-2.

EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E. Enhanced coagulation: US requirements and a broader view. **Water Science and Technology**, v. 40, n. 9, p. 63-70, nov. 1999.

FRANCO, E. S. **Avaliação da influência dos coagulantes sulfato de alumínio e cloreto férrico na remoção de turbidez e cor da água bruta e sua relação com sólidos na geração de lodo em estações de tratamento de água**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009.

FREITAS, D. D. B. **Estudo de melhorias dos sistemas de cloração da água de abastecimento da Corsan pela instalação de evaporadores de cloro e lavadores de gases**. 2011. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Química) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

FUNDAÇÃO NACIONAL DE SAÚDE (Brasil). Ministério da Saúde. Departamento de Saneamento. **Manual de saneamento**. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 1997.

FURLAN, F. R. **Avaliação da eficiência do processo de coagulação-floculação e adsorção no tratamento de efluentes têxteis**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

GASOLA, D. L.; MARQUEZI, S. L.; AZZOLINI, J. C. Comparação entre o uso do sulfato de alumínio e do hidroxícloreto de alumínio no tratamento de água para geração de vapor. **Unoesc & Ciência - ACET**, Joaçaba, v. 6, n. 1, p. 7-18, jan./jun. 2015.

GERHARDT, C. M. **Uma alternativa de substituição ao sulfato de alumínio no tratamento de água potável**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Instituto de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/193971/001091936.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 27 mar. 2026.

GREGORY, J.; DUAN, J. Hydrolyzing metal salts as coagulants. **Pure and Applied Chemistry**, Oxford, v. 73, n. 12, p. 2017-2026, 2001.

HEALTH CANADA. **Guidelines for Canadian Drinking Water Quality**: Guideline Technical Document – pH. Ottawa: Water and Air Quality Bureau, Healthy Environments and Consumer Safety Branch, Health Canada, 2015. Disponível em: <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/publications/healthy-living/guidelines-canadian-drinking-water-quality-guideline-technical-document-ph.html>. Acesso em: 4 mar. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico**: 2017: abastecimento de água e esgotamento sanitário. Rio de Janeiro: IBGE, 2020.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4. ed. rev. e ampl. Campinas, SP: Átomo, 2016.

LOPES, V. S. et al. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, n. 4, p. 567-572, jul./ago. 2020. DOI: 10.1590/S1413-41522020193514.

LÚCIO, F. **Avaliação do emprego da filtração direta no tratamento de água com turbidez elevada por meio da pressedimentação**: ensaios em escala de bancada. 2013. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/items/95b375ec-a01d-45f1-852a-404c6a72a9fb>. Acesso em: 2 abr. 2026.

MACIEL, J. R. F. **Influência da água no processo de corrosão em tubulações de ETAs e redes de distribuição**. 2019. 74f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

MACIEL, G. D.; LEAL, M. L. M. Sistema de clarificação na estação de tratamento de águas utilizando jar-test. **Revista Científica da Faculdade de Educação e Meio Ambiente**, Ariquemes, v. 15, n. 2, p. 114–128, 2024. DOI: 10.31072/rcf.v15i2.1457. Disponível em: <https://revista.unifaema.edu.br/index.php/Revista-FAEMA/article/view/1457>. Acesso em: 3 mar. 2026.

MANAMPERUMA, L. D.; RATNAWEERA, H. C.; MARTSUL, A. Mechanisms during suspended solids and phosphate concentration variations in wastewater coagulation process. **Environmental Technology**, v. 37, n. 19, p. 2405-2413, 2016.

MARQUES, R. O. **Cinética de floculação de água bruta com baixa turbidez utilizando sais de alumínio e ferro como coagulante**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São

Paulo, São Paulo, 2016. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3147/tde-20072016-143140/publico/RodrigodeOliveiraMarquesCorr15.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2026.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M. Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: A review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 159, n. 2, p. 189–197, 2010. ISSN: 00018686. DOI: 10.1016/j.cis.2010.06.007.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

MORAES, L. C. K. **Estudo dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para a obtenção de água potável**. 2009. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

MORALES, M. A. M.; ROBERTO, M. M.; ANGELIS, D. F.; ANGELIS, D. A. **Importância da água para a vida e garantia de manutenção da sua qualidade**. Brasília, 2016.

NAIR, A. T.; MAKWANA, A. R.; AHAMMED, M. M. The use of response surface methodology for modelling and analysis of water and wastewater treatment processes: A review. **Water Science and Technology**, v. 69, n. 3, p. 464–478, 2014. DOI: 10.2166/wst.2013.733.

OLIVEIRA, D. C. **Avaliação da eficiência da dupla filtração para remoção de turbidez em uma estação de tratamento de água**. 2012. Monografia (Especialização em Engenharia Sanitária e de Tecnologia Ambiental) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

OLIVEIRA, D. K.; SILVA, L. Q.; BRITO, N. N. Monitoramento de trihalometanos (THMs) e da qualidade da água para abastecimento público da cidade de Cavalcante, Goiás. **Química Nova**, v. 47, n. 4, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/WtBGB9BsQjTjQVpWCKbM9QBK/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 2 abr. 2026.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

OPENAI. **ChatGPT**: [software de inteligência artificial]. Versão 4.0. San Francisco: OpenAI, 2026. Disponível em: <https://chat.openai.com/>. Acesso em: 18 maio 2026.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor e turbidez elevada**. 2001. 233 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-21012003-084719/publico/Pavanelli%2BG.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2026.

PIMENTA, J. A. A.; FERREIRA, J. W. S.; NICOLAU, R. H. G.; FURUYA, D. E. G.; SILVA, L. M. S.; PAZ JÚNIOR, G. J. Avaliação do sulfato de alumínio, policloreto de alumínio e cloreto férrico no tratamento de água bruta do rio Santo Anastácio. **Colloquium Exactarum**, v. 9, n. 3, p. 38-56, 2017. Disponível em: <https://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/2225/2052>. Acesso em: 4 jun. 2026.

PIROLI, E. L. **Água e bacias hidrográficas: planejamento, gestão e manejo para enfrentamento das crises hídricas**. São Paulo: Editora UNESP, 2022. 141 p. Disponível em: <https://doi.org/10.7476/9786557142981>. Acesso em: 3 mar. 2026.

RICHTER, C. A. **Métodos e tecnologia de tratamento de água**. São Paulo: Blucher, 2009.

ROSSIN, A. C. Ensaio de jarros: jar test. In: CETESB. **Técnica de abastecimento e tratamento de água**. São Paulo: Cetesb/Ascetesb, 1987.

SILVA, M. D. B. *et al.* Estudo da alcalinidade total e pH de coagulação após associação de polímero natural com coagulantes metálicos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 26., 2011, Porto Alegre. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2011.

SILVA, Elisa Resende Alvim da. **Avaliação estratégica para a recuperação das águas residuais da ETA Laranjal/RJ**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SOUSA, A. S. **Coagulantes férricos: comparativo no tratamento de água e proposta de obtenção a partir do rejeito de minério de ferro**. 2021. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Tecnológica) – Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2021.

SOUZA, A. T.; CHAGAS, D. Avaliação da eficiência de agentes coagulantes em efluente de frigorífico. **Colloquium Exactarum**, Presidente Prudente, v. 12, n. 1, p. 11-19, 2020. Disponível em: <https://journal.unoeste.br/index.php/ce/article/view/3423>. Acesso em: 3 mar. 2026.

SOUZA, C. D. R.; FERREIRA, I. B. P. Avaliação da eficiência de diferentes coagulantes utilizados em uma estação de tratamento de águas. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, e284101321127, 2021.

TEH, C. Y.; BUDIMAN, P. M.; SHAK, K. P. Y.; *et al.* Recent Advancement of Coagulation-Flocculation and Its Application in Wastewater Treatment. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, v. 55, n. 16, p. 4363-4389, 2016. DOI: 10.1021/acs.iecr.5b04703.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística**. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Carlos, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2005. v. 1.

VON SPERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**: princípios do tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG, 2014. v. 4.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**: fourth edition. Geneva: WHO, 2011. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789241548151>. Acesso em: 4 mar. 2026.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water quality**: fourth edition incorporating the first and second addenda. Geneva: WHO, 2022. Disponível em: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240045064>. Acesso em: 4 mar. 2026.

ZHAO, H.; LIU, H.; QU, J. Effect of pH on the aluminum salts hydrolysis during coagulation process: Formation and decomposition of polymeric aluminum species. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 330, n. 1, p. 105-112, 2009. DOI: 10.1016/j.jcis.2008.10.020.