



EFEITOS DE DIFERENTES PRÉ-OXIDANTES NAS ETAPAS DO TRATAMENTO DE ÁGUA: UMA ANÁLISE COMPARATIVA

Grazielle Cristine Silva Rodrigues⁽¹⁾

Técnica em Química pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG). MBA em “Gestão Estratégica e Formação de Lideranças para o Setor Público”. Atualmente, Técnica de Saneamento e Coordenadora de Processos de Produção (CPP) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Ana Elisa Ferreira de Oliveira Fonseca⁽²⁾

Doutora e Mestre em Ciências, com ênfase em Física e Química de Materiais (FQMat), pela Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Licenciatura e Bacharelado em Química pela UFSJ. Pós-graduação em Engenharia Ambiental e Saneamento Básico. Pós-doutorado em Química Analítica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Vencedora do Prêmio Capes de Tese (2023) na área de Materiais. Atualmente, Analista de Saneamento (Químico I) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Rafael Arromba de Sousa⁽³⁾

Bacharelado e Licenciatura em Química pela Universidade Estadual de Campinas. Mestrado em Química, na área de Química Analítica e Doutorado em Ciências, na mesma universidade. Atualmente é professor Associado IV do Departamento de Química da Universidade Federal de Juiz de Fora (DQ-UFJF).

Vívian Nazareth Oliveira Fernandes⁽⁴⁾

Possui graduação em Farmácia pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), mestrado em Química pela UFJF e Curso Técnico em Leite e Derivados pelo Centro Tecnológico/Instituto de Laticínios Cândido Tostes. MBA em “Gestão Estratégica e Formação de Lideranças para o Setor Público”. Atualmente, Analista de Saneamento (Bioquímico II) e Assessora de Controle da Qualidade (ACQ) na Companhia de Saneamento Municipal de Juiz de Fora (CESAMA).

Endereço⁽¹⁾: Rua Tupi, 260 - Santa Terezinha - Juiz de Fora - MG - CEP: 36045-380 - Brasil - Tel: +55 (32) 99138-2025 - e-mail: grodrigues@cesama.com.br.

RESUMO

O objetivo deste estudo foi analisar o desempenho das diferentes etapas do tratamento de água utilizando diferentes pré-oxidantes, com base em parâmetros físico-químicos. Foram testados cinco agentes oxidantes: hipoclorito de sódio, dicloroisocianurato de sódio, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio e ferrato de potássio. Para isso, foram realizados ensaios de *Jar Test*, permitindo avaliar o comportamento das etapas de pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação e filtração. A qualidade da água foi monitorada ao longo de todo o processo. Os resultados mostraram que o uso de pré-oxidantes contribuiu para uma maior eficiência no tratamento em comparação às amostras que não receberam essa etapa. A combinação da pré-oxidação com a coagulação e floculação se destacou por favorecer a remoção de sólidos. O alumínio residual, proveniente do uso de sulfato de alumínio como coagulante, foi devidamente monitorado e permaneceu dentro dos limites permitidos. Além disso, todas as amostras tratadas atenderam aos padrões de potabilidade para cor e turbidez. Entre os oxidantes avaliados, o hipoclorito de sódio apresentou os melhores resultados.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água; pré-oxidação; oxidantes

INTRODUÇÃO

Os tratamentos de água que usam um sistema de tratamento convencional são geralmente compostos das seguintes etapas: captação, adução, alcalinização, coagulação, floculação, decantação, filtração, correção de pH desinfecção, fluoretação e reservação (Funasa, 2014; Di Bernardo et al., 2017; Ministério da Saúde, 2006). Todas essas etapas são conduzidas antes da distribuição da água para população.

Em síntese, no processo de coagulação são adicionados produtos químicos que farão com que as partículas coloidais na água bruta se tornem desestabilizadas. Logo, as partículas se aglutinam para formar flocos no processo de floculação. Os flocos continuam a aglomerar durante a mistura, formando flocos cada vez maiores e mais pesados

que decantarão com maior facilidade (Di Bernardo et al., 2017). As partículas coloidais, devido ao seu tamanho, decantam naturalmente de forma muito lenta. Logo, é necessário que elas aglomerem a fim de formar partículas maiores para serem eliminadas de forma eficiente na etapa de decantação (EPA, 2002).

A coagulação se inicia logo após a aplicação dos coagulantes, através de um processo de mistura rápida e dura poucos segundos. Os coagulantes adicionados rapidamente hidrolisam e formam precipitados insolúveis que desestabilizam as partículas coloidais carregadas negativamente. ^[3] Logo as partículas coloidais neutralizadas são aglutinadas em partículas de maiores dimensões, ocasionando a formação de flocos maiores, na etapa chamada de floculação (Di Bernardo et al., 2017). Essa etapa consiste na agregação dessas partículas neutralizadas, que vão aumentando de peso e tamanho com o tempo, de modo a possibilitar a sua separação por decantação e/ou filtração. O tempo de contato é geralmente 10 a 20 minutos, onde há uma agitação mecânica lenta que promove o contato entre as partículas e os flocos (Chandranth; Amy, 1996).

Por fim, a decantação separa as partículas sólidas em suspensão na água através das forças gravitacionais, onde as partículas com densidade superior à água depositam-se no fundo do tanque de decantação. Enquanto a filtração remove as partículas remanescentes das etapas de coagulação, floculação e decantação, assegurando a qualidade da água tratada (Chandranth; Amy, 1996; Xie et al., 2013; Xie et al., 2016; Hillebrand; Benetti, 2020).

Sobre a pré-oxidação, existem diversas vantagens da sua aplicação no tratamento de água, como a oxidação da matéria orgânica, a redução da presença de algas, o aumento da eficiência dos processos de coagulação e filtração, remoção de metais e outros materiais particulados, além de redução de gosto e odor da água (Xie et al., 2013; Xie et al., 2016). A etapa de pré-oxidação rompe as ligações entre as partículas e os compostos orgânicos adsorvidos, promovendo a redução da massa molecular da matéria orgânica. Esse processo favorece a desorção de revestimentos orgânicos previamente estabilizados, facilitando a agregação de partículas. Adicionalmente, a pré-oxidação contribui para a diminuição da carga superficial negativa da matéria, aumentando a probabilidade de colisões entre partículas.

OBJETIVOS

O presente estudo teve como objetivo avaliar o desempenho das diferentes etapas do tratamento de água por meio de parâmetros de análise, com foco na aplicação de diferentes agentes oxidantes na fase de pré-oxidação. Os oxidantes selecionados para os ensaios foram: hipoclorito de sódio, dicloroisocianurato de sódio, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio e ferrato de potássio. Foram realizados ensaios de *Jar Test* para caracterizar o comportamento das etapas de pré-oxidação, coagulação, floculação, decantação e filtração, permitindo a comparação do desempenho dos diferentes oxidantes. A qualidade da água tratada foi monitorada por meio de parâmetros físico-químicos representativos. As amostras de água bruta utilizadas nos ensaios foram coletadas nas represas Dr. João Penido e Chapéu D'uvas, cujas águas são destinadas à Estação de Tratamento de Água Marechal Castelo Branco (ETA MCB), operada pela Companhia de Saneamento Municipal (Cesama) de Juiz de Fora/MG.

METODOLOGIA

Reagentes e Kits de Análise

Foram utilizados os seguintes reagentes químicos ao longo do estudo: o hipoclorito de sódio (NaOCl) utilizado foi por meio de síntese própria, utilizando Sistemas Geradores de Cloro Líquido (Hidrogenon). O dicloroisocianurato de sódio ($C_3Cl_2N_3NaO_3$), fornecido pela GR Indústria Química (lote 1620241013AL); peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 35%, da marca Anidrol (lote 50619-1); permanganato de potássio ($KMnO_4$), da empresa Cinética (lote 15605); e ferrato de potássio (Na_2FeO_4), obtido por meio de síntese própria. Como agentes auxiliares no processo de tratamento, foram utilizados hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) como alcalinizante, fornecido pela Geocálcio, e sulfato de alumínio ($Al_2(SO_4)_3$) como coagulante, na formulação Coagulan 20 (lote 67L0619122). Para o monitoramento da qualidade da água, empregaram-se kits de determinação de cloro residual livre na faixa de 0,10 a 5,00 mg/L, da Policontrol (lote 494), e de alumínio na faixa de 0,10 a 1,20 mg/L, da Merck (lote HC280992).

Ensaio de *Jar-Test*

A coleta destinada à realização dos ensaios de Jar Test foi realizada diretamente na ETA MCB, imediatamente antes da adição do agente alcalinizante. Nesse estágio, as águas oriundas das duas represas já se encontravam previamente misturadas. Os ensaios de *Jar-test* reproduzem as condições de agitação, tempo de contato e sedimentação similares às aplicadas no tratamento da água bruta em escala real. Após a realização do ensaio, diversos parâmetros analíticos devem ser verificados para avaliar a qualidade da água tratada (Gaid, 2023).

Inicialmente, 2 litros de água bruta foram adicionados a cada jarro, seguidos pela introdução simultânea do coagulante e do alcalinizante. A etapa de coagulação foi realizada com agitação rápida a 100 rpm por 1 minuto, seguida pela floculação a 70 rpm por 19,5 minutos. Por fim, a sedimentação ocorreu por 4 minutos, sem agitação, permitindo a decantação dos flocos formados.

As condições dos ensaios de *Jar-Test* foram: (1) Pré-Oxidação: tempo de contato de 8 minutos; gradiente de velocidade de 40 rpm; dosagem de oxidante: 0,2 - 2,00 mg/L. (2) Coagulação: tempo de contato de 1,0 minuto; gradiente de velocidade de 100 rpm; dosagem de 20 mg/l; pH: 6,38. (3) Floculação: tempo de contato de 19,5 minutos; gradiente de velocidade de 70 rpm. (4) Decantação: tempo de contato de 4,0 minutos; gradiente de velocidade de 0 rpm. (5) Filtração: filtro de papel *Whatman 40*. Foram realizados dois ensaios de *Jar-Test* em cada condição para compor a amostra final.

Técnicas de Análise

Os ensaios foram conduzidos no Laboratório Central da Cesama, que possui reconhecimento de competência na norma ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 e no laboratório da ETA MCB.

Sobre os residuais de oxidante, a quantificação do Cloro Residual Livre (mg/L) foi realizada com base no método *4500-Cl Chlorine (Residual)*. Este procedimento baseia-se na reação do cloro livre, em meio levemente ácido, com a *n,n*-dietil-*p*-fenilenodiamina, resultando numa coloração rósea (APHA, 2023; SMEWW.4500-Cl.G, 2023). O Peróxido de Hidrogênio (mg/L) foi medido na presença de PAA pelo método colorimétrico *4500- H₂O₂ Hydrogen Peroxide (Residual) (Proposed)*. (APHA, 2023; SMEWW.4500-H₂O₂, 2023). A concentração de Permanganato de Potássio (mg/L) é baseada na absorção da luz da amostra, previamente filtrada, no espectrofotômetro. O método utilizado foi o *4500-KMnO₄ Potassium Permanganate*, 2023 (APHA, 2023; SMEWW. 4500-KMnO₄, 2023). E por último, a concentração de Ferrato de Potássio (mg/L) foi determinada por espectrofotometria UV-Vis. Os íons Fe(VI) apresentam coloração roxo-escuro em solução, com pico máximo de absorvância em 505 nm. A concentração de Fe(VI) é estimada por meio da equação: $\epsilon = A/BC$, na qual “ ϵ ” corresponde ao coeficiente de absorção molar (1070 M⁻¹.cm⁻¹); “A” a absorvância medida; “B”, a concentração de Fe(VI) em molaridade (M); e “C”, o caminho óptico (cm) da célula de quartzo utilizada (Bielski; Thomas, 1987).

A determinação do pH foi feita com o auxílio de um eletrodo de vidro considerando o método *4500-H⁺ B pH - Electrometric Method*, 2023 (APHA, 2023; SMEWW.4500-H₂O₂, 2023). A determinação de Cor Aparente (UC) em águas foi feita pelo método *2120 E. Tristimulus Spectrophotometric Method*, 2023 baseado no método Tristimulus (APHA, 2023; SMEWW. 4500-H⁺ B, 2023; SMEWW.2120-E, 2023). Enquanto a Turbidez (NTU) foi medida no método nefelométrico, baseado em uma comparação da intensidade da luz dispersada pela amostra sob condições definidas com a intensidade da luz dispersada por uma suspensão padrão de referência. A norma utilizada foi a *2130 B Nephelometric Method*, 2023 (APHA, 2023; SMEWW.2130-B, 2023).

A determinação de Condutividade Elétrica (µS/cm) foi feita com o auxílio de uma célula de condutividade com base no método *2510 B Conductivity - Laboratory Method*, 2023 (APHA, 2023; SMEWW.2510-B, 2023). A determinação Oxigênio Dissolvido (mg/L) foi feita com um oxímetro de eletrodo galvânico baseado no método *4500-O G. Membrane-Electrode Method*, 2023. A Temperatura (°C) foi medida com o mesmo oxímetro, pelo método *2550 B Temperature - Laboratory and Field Methods*, 2023 (APHA, 2023; SMEWW.4500-O-G, 2023; SMEWW.2550-B, 2023). Já o ensaio do residual de alumínio (mg/L) é colorimétrico e foi realizado com o auxílio do kit da Hach. A curva de calibração já veio pré-programada no espectrofotômetro utilizado.



Equipamentos

Foram utilizados diversos equipamentos calibrados para garantir a precisão na análise dos parâmetros físico-químicos das amostras. As determinações de pH, turbidez, cor aparente, cloro residual livre, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e temperatura foram realizadas, respectivamente, com os seguintes instrumentos: pHmetro Milwaukee MW151 Max, colorímetro Policontrol AP 2000 WT, colorímetro tristímulus Digimed DM-Cor, colorímetro Policontrol AquaColor Cloro FE, condutivímetro Thermo Scientific Orion Star A212 e oxímetro Hanna HI 98193. As análises colorimétricas complementares foram executadas no espectrofotômetro Hach DR2800, com faixa espectral de 340 a 900 nm.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O ensaio de *Jar-test* foi executado colocando em todos os jarros a mesma amostra de água bruta. Nos jarros 2 a 6, foram colocados os diferentes pré-oxidantes. Já no jarro 1, não foi realizada a etapa de pré-oxidação. A execução do ensaio é resumida na Tabela 1, incluindo as concentrações dos pré-oxidantes, junto ao tempo de contato, volume de coagulante, dosagem de coagulante e volume de alcalinizante utilizados nos ensaios.

Tabela 1 - Resumo do ensaio de *Jar-Test* executado utilizando diferentes oxidantes

Jarro	Oxidante	Concentração Oxidante (mg/L)	Tempo Pré-Oxidação (min)	Volume (mL) Coagulante	Concentração Coagulante (mg/L)	Volume (mL) Alcalinizante
1	Sem Oxidante	-	-	4,0	24,0	1,3
2	Hipoclorito de Sódio	1,5	8,0	4,0	24,0	0,3
3	Dicloroisocianurato de Sódio	1,5	8,0	4,0	24,0	1,0
4	Peróxido de Hidrogênio	1,5	8,0	4,0	24,0	1,0
5	Permanganato de Potássio	0,2	8,0	4,0	24,0	1,0
6	Ferrato de Potássio	2,0	8,0	4,0	24,0	1,0

O tempo de pré-oxidação usado foi de 8 minutos. Nessa etapa os pré-oxidantes testados foram: hipoclorito de sódio, dicloroisocianurato de sódio, peróxido de hidrogênio, permanganato de potássio e ferrato de potássio.

Após os ensaios de *Jar-Test*, as amostras foram coletadas nos seguintes momentos: (1) água bruta, (2) após a pré-oxidação, (3) após a floculação/coagulação, (4) após a decantação e (5) após a filtração. As amostras obtidas foram comparadas por meio de diferentes parâmetros físico-químicos: Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$), Concentração de Alumínio (mg/L), Cor Aparente (UC), Turbidez (NTU), pH, Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Temperatura ($^{\circ}\text{C}$). As Figuras 1, 2 e 5 trazem gráficos dos resultados após cada etapa do tratamento: pré-oxidação, coagulação/floculação, decantação e filtração nos diferentes parâmetros.

Condutividade elétrica e alumínio

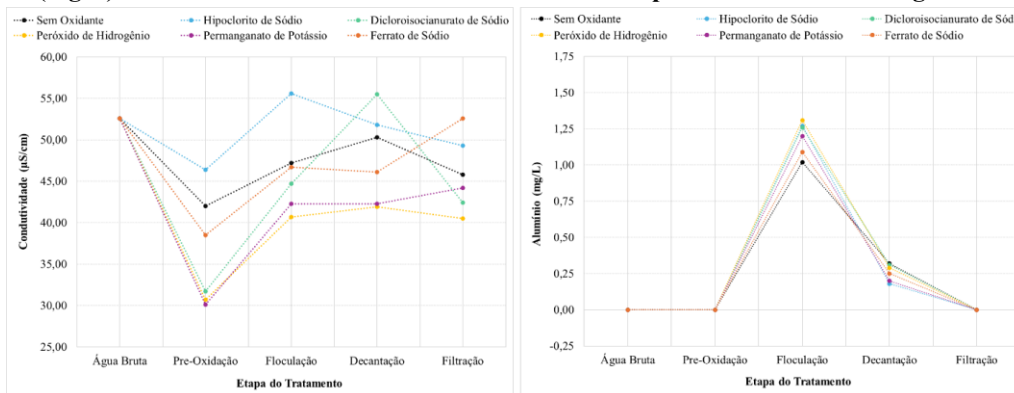
A pré-oxidação foi a primeira etapa do tratamento. Conforme observado na Figura 1, a oxidação resultou em redução da condutividade elétrica em todas as amostras, com destaque para o permanganato de potássio (redução de 42,8%) e menor efeito com o hipoclorito de sódio (11,8%). A concentração de alumínio manteve-se inalterada nessa fase. Essa redução na condutividade pode ser atribuída à formação de compostos menos iônicos ou insolúveis, como cloretos, oxicloretos ou compostos orgânicos clorados, reduzindo os íons livres na solução, e à possível precipitação de hidróxidos metálicos (Chandranth; Amy, 1996; Xie et al., 2013; Xie et al., 2016).

Na etapa de coagulação/floculação, observou-se aumento da condutividade elétrica em todos os tratamentos, em razão da dissociação do sulfato de alumínio, que libera íons na solução (Mortadi et al., 2025; Gandiwa et al., 2020). O dicloroisocianurato de sódio apresentou o maior aumento (41,0%), e o tratamento sem oxidante, o menor (12,4%). Esse comportamento está associado à elevação da concentração de alumínio residual, que variou de 1,02 a 1,31 mg/L.

Durante a decantação, a condutividade variou conforme o oxidante utilizado. Em alguns casos, como nos tratamentos com dicloroisocianurato de sódio e sem oxidante, foi observado aumento da condutividade, associado a maiores teores de alumínio residual. Já na etapa de filtração, os resultados foram variáveis, sem tendência clara (Mortadi et al., 2025; Gandiwa et al., 2020).

Conforme as normas do Ministério da Saúde, o limite de alumínio na água potável é de 0,20 mg/L (Ministério da Saúde, 2017). Após a filtração, os teores de alumínio em todas as amostras foram reduzidos a 0,00 mg/L, assegurando a conformidade com os padrões de potabilidade e a remoção eficaz dos resíduos do coagulante.

Figura 1 - Gráficos mostrando o comportamento da Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) e do Residual de Alumínio (mg/L) ao utilizar diferentes oxidantes em todas as etapas do tratamento de água

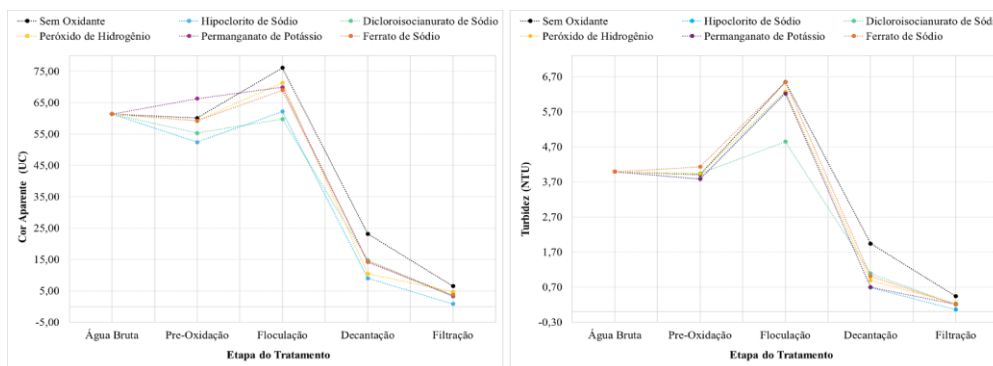


Cor aparente e turbidez

Conforme observado na Figura 2, após a pré-oxidação, observou-se redução na cor aparente e turbidez nas amostras sem oxidante, com hipoclorito de sódio, dicloroisocianurato de sódio e peróxido de hidrogênio, atribuída à decomposição da matéria orgânica. Em contrapartida, o permanganato de potássio aumentou a cor aparente (8,0%) e o ferrato de potássio elevou ligeiramente a turbidez (3,5%), devido à coloração própria desses oxidantes (Vide Figura 2).

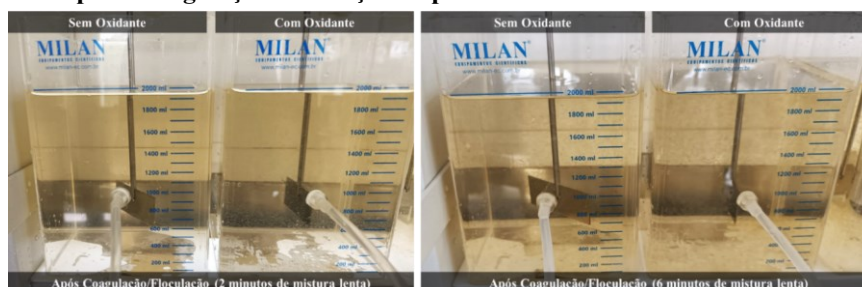
Na etapa de coagulação/floculação, houve aumento geral de cor e turbidez em todas as amostras, causado pela formação de flocos em suspensão. Os aumentos variaram entre 5,4 - 26,6% para cor aparente e 23,1 - 67,5% para turbidez, com destaque para a amostra sem oxidante, que apresentou os maiores valores.

Figura 2 - Gráficos mostrando o comportamento da Cor Aparente (UC) e da Turbidez (NTU) ao utilizar diferentes oxidantes em todas as etapas do tratamento de água e fotos durante a etapa de pré-oxidação



Foi observado durante o experimento, que as amostras com oxidantes apresentaram a formação de flocos mais rápido do que a amostra sem oxidante, além de resultar em flocos maiores e mais pesados. Consulte a Figura 3 para observar esse fenômeno nas amostras sem oxidante e com hipoclorito de sódio, como exemplo.

Figura 3 - Foto da amostra sem oxidante e com oxidante (hipoclorito de sódio), após 2 minutos de mistura lenta na etapa de coagulação/floculação e após 6 minutos de mistura lenta



Esse fenômeno pode ser um indicativo do porquê houve um aumento maior na amostra sem oxidante, em especial na turbidez. Os ensaios foram realizados com a mesma água bruta, logo possuem a mesma quantidade de sólidos em suspensão. Contudo, a amostra sem oxidante, resultou no maior aumento da turbidez, do que as demais. Como a turbidez é proporcional à forma, tamanho e composição da partícula, a diferença no tamanho das partículas pode explicar essa diferença. A amostra sem oxidante possuía uma quantidade maior de partículas menores (menor massa) com forte capacidade de refletir e espalhar a luz. Já as amostras com oxidantes, resultaram em um número menor de partículas maiores (maior massa) dando à água uma turbidez menor (Boqu Instrument, 2024; Cheng et al., 2010; Serajuddin et al., 2019).

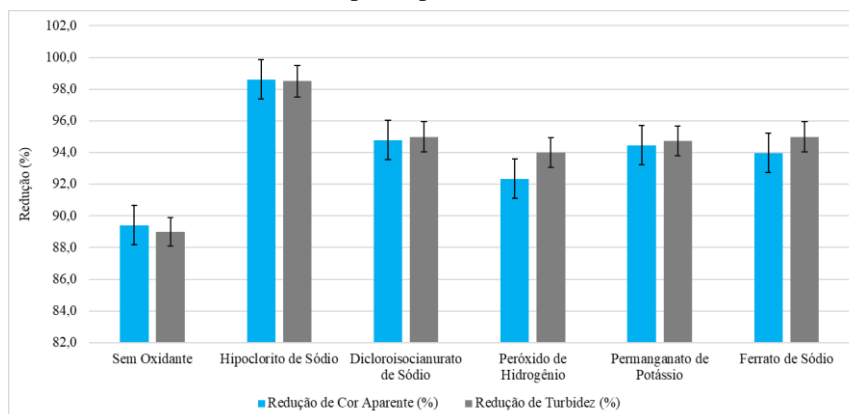
Após a decantação, todas as amostras apresentaram grande redução de cor aparente (69,5% a 85,5%) e turbidez (70,4% a 89,0%), com menor eficiência na amostra sem oxidante.

Por fim é realizada a filtração, onde as partículas remanescentes das etapas anteriores são removidas. As amostras foram filtradas em papel de filtro quantitativo *Whatman 40*. Na etapa de filtração, todas as amostras tiveram redução adicional significativa de cor (55,2% a 90,6%) e turbidez (70,0% a 91,3%).

Frequentemente, as ETAs utilizam os resultados de cor aparente e turbidez dos *Jar-tests* para avaliar a eficiência do tratamento. Assim, é possível comparar os resultados para concluir qual foi o tratamento mais eficiente, mostrados na Figura 4. Os dados, apresentados mostram que o hipoclorito de sódio foi o oxidante mais eficaz, com remoções de 98,6% na cor e 98,5% na turbidez, enquanto a amostra sem oxidante teve as menores remoções (89,4% e 89,0%, respectivamente).

De forma geral, a pré-oxidação aumentou a eficiência do tratamento, e todos os tratamentos testados resultaram em água dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde (15,00 UC para cor e 5,00 NTU para turbidez) (Ministério da Saúde, 2017).

Figura 4 - Gráficos mostrando o comportamento da remoção de Cor Aparente (UC) e da Turbidez (NTU) ao utilizar diferentes oxidantes na etapa de pré-oxidação





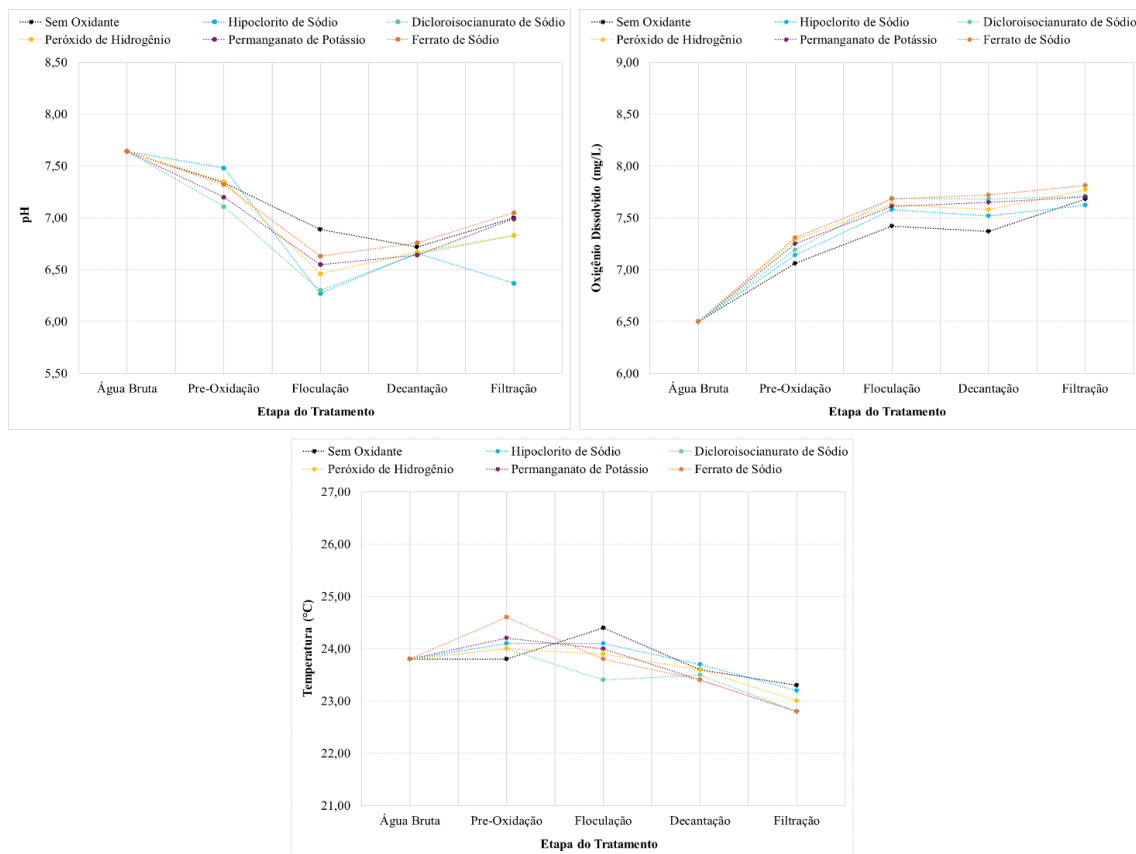
pH, oxigênio dissolvido e temperatura

Os resultados das análises de pH, oxigênio dissolvido e temperatura são exibidos nos gráficos da Figura 5. Durante a pré-oxidação, observou-se uma leve redução no pH (2,1 a 6,9%) e um aumento no oxigênio dissolvido (8,6 a 12,5%) em todas as amostras, inclusive naquelas sem oxidante, sugerindo influência do próprio processo de agitação.

Na etapa de coagulação/floculação, com a adição de sulfato de alumínio e hidróxido de cálcio, o pH foi ajustado visando o valor ideal de 6,83, resultando em redução entre 6,1 e 16,2%. Após a decantação, o pH variou discretamente (-6,2 a 2,5%), com tendência de leve aumento, e o oxigênio dissolvido apresentou variações mínimas (-0,5 a 0,8%). Na filtração, houve pequeno acréscimo tanto no pH (2,4 a 5,3%) quanto no oxigênio dissolvido (0,4 a 4,2%), possivelmente devido à maior aeração.

A temperatura foi monitorada e mostrou-se estável, com coeficiente de variação entre 1,7 e 2,8%, sendo sua influência nos resultados considerada irrelevante.

Figura 5 - Gráficos mostrando o comportamento do pH, Oxigênio Dissolvido (mg/L) e Temperatura (°C) ao utilizar diferentes oxidantes em todas as etapas do tratamento de água



CONCLUSÕES

O uso de diferentes oxidantes no tratamento de água demonstrou maior eficiência em comparação ao processo sem pré-oxidação, especialmente na remoção de sólidos quando associado à coagulação e floculação. Todos os tratamentos atenderam aos padrões de potabilidade para cor e turbidez, com níveis de alumínio residual dentro dos limites estabelecidos pelo Ministério da Saúde. Entre os oxidantes testados, o hipoclorito de sódio apresentou os melhores resultados, destacando-se pela alta eficiência na remoção de cor aparente e turbidez, sem conferir coloração à água. No entanto, são necessários estudos adicionais para avaliar a formação de subprodutos de desinfecção e cianotoxinas associados ao uso desses agentes oxidantes.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023.
2. BIELSKI, B. H. J.; THOMAS, M. J. Studies of hypervalent iron in aqueous solutions. 1. Radiation-induced reduction of iron(VI) to iron(V) by CO²⁻. **Journal of the American Chemical Society**, v. 109, p. 7761-7764, 1987. <https://doi.org/10.1021/ja00259a026>.
3. BOQU INSTRUMENTS. Understanding the Accuracy and Precision of Turbidity Meter Readings. Disponível em: <https://www.boquinstrument.com/a-news-understanding-the-accuracy-and-precision-of-turbidity-meter-readings.html>. Acesso em 20 de Março 2025.
4. CHANDRAKANTH, M. S.; AMY, G. L. Effects of Ozone on the Colloidal Stability and Aggregation of Particles Coated with Natural Organic Matter. **Environmental Science Technology**, v. 30, p. 431-443, 1996. <https://doi.org/10.1021/es9500567>.
5. CHENG, W. P.; CHEN, W. Y.; YU, R. F. Turbidity fluctuation as a measure of floc size in a coagulation pilot study. **Journal of Residuals Science and Technology**, v. 7, p. 87-94, 2010. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.1878>.
6. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos E Técnicas De Tratamento De Água**. 3th ed. São Carlos: LDIBE, 2017.
7. FUNASA. **Manual de Controle da Qualidade da Água para Técnicos que Trabalham em ETAS**. Brasília: Funasa, 2014.
8. GAID, K. **Drinking Water Treatment, Water Quality and Clarification**. John Wiley, 2023.
9. GANDIWA, B. I.; MOYO, L. B.; NCUBE, S.; MAMVURA, T. A.; MGUNI, L. L.; HLABANDANA, N. Optimisation of using a blend of plant based natural and synthetic coagulants for water treatment: (Moringa Oleifera-Cactus Opuntia-alum blend). **SAJCE**, v. 34, p. 158-164, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2020.07.005>.
10. HILLEBRAND, F. J.; BENETTI, A. D. Caracterização da matéria orgânica dissolvida em processos de tratamento de água para consumo humano usando fracionamento rápido. **Eng. Sanit. Amb.**, v. 25, p. 237, 2020. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193488>.
11. MAROBHE, N. J. Effectiveness of crude extract and purified protein from Vigna unguiculata seed in purification of charco dam water for drinking in Tanzania. **International Journal of Environmental Sciences**, v. 4, p. 259, 2013. <https://doi.org/10.6088/ijes.2013040300005>.
12. MINISTÉRIO DA SAÚDE, **Vigilância e Controle da Qualidade da Água para Consumo Humano**. 1st ed. Editora MS: Brasília, 2006.
13. MINISTÉRIO DA SAÚDE. Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2020/arquivos/MinutaConsultan332020.pdf>. Acesso em 20 de Março 2025.
14. MORTADI, A.; LABJAR, E. E. H.; NASRELLAH, H.; CHAHID, E.; MONKADE, M.; MOZNINE, R. E. Monitoring the coagulation mechanism and aluminum sulfate impact on textile wastewater treatment: Insights from impedance spectroscopy. **J. Indian Chem. Soc.**, v. 102, p. 101501, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jics.2024.101501>.
15. SERAJUDDIN, M.; CHOWDHURY, A.; HAQUE, M. M.; HAQUE, M. E. Using Turbidity to Determine Total Suspended Solids in an Urban Stream: A Case Study. **IJETT**, v. 67, p. 83-88, 2019. <https://doi.org/10.14445/22315381/ijett-v67i9p214>.



16. SMEWW.2120-E. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2120 E. Tristimulus Spectrophotometric. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 87.
17. SMEWW.2130-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2130 B. Nephelometric Method. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 89.
18. SMEWW.2510-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2510 B Conductivity - Laboratory Method. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 134.
19. SMEWW.2550-B. Physical and Aggregate Properties of Water and Wastewater: 2550 B Temperature - Laboratory and Field Methods. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 149.
20. SMEWW.4500-Cl.G. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-Cl G. DPD Colorimetric Method. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 357.
21. SMEWW.4500-H⁺ B. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-H⁺ B pH Electrometric Method. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 473.
22. SMEWW.4500-H₂O₂. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-H₂O₂ Hydrogen Peroxide (Residual) (Proposed *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 480.
23. SMEWW.4500-KMnO₄. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-KMnO₄ Potassium Permanganate. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 460.
24. SMEWW.4500-O-G. Inorganic Nonmetallic Constituents of Water and Wastewater: 4500-O G. Membrane-Electrode Method. *In*: APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 24th ed.** Washington DC: APHA Press, 2023, p. 463.
25. XIE, P.; CHEN, Y.; MA, J.; ZHANG, X.; ZOU, J.; WANG, Z. A mini review of preoxidation to improve coagulation. **Chemosphere**, v. 155, p. 550-563, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.003>.
26. XIE, P.; MA, J.; FANG, J.; GUAN, Y.; YUE, S.; LI, X.; CHEN, L. Comparison of Permanganate Preoxidation and Preozonation on Algae Containing Water: Cell Integrity, Characteristics, and Chlorinated Disinfection Byproduct Formation. **Environmental Science and Technology**, v. 47, p. 14051, 2013. <https://doi.org/10.1021/es4027024>.