



DESINFECÇÃO DE EFLUENTES UTILIZANDO DIÓXIDO DE CLORO: ESTUDOS DE CASO E OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO

Luiz Henrique Parolin Massuchetto⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Universidade Metodista de Piracicaba (UNIMEP). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Atualmente é Especialista de Desenvolvimento e Aplicação na Sabará Químicos e Ingredientes.

Éder Lopes Pereira do Prado⁽²⁾

Engenheiro de Produção pela Universidade Cruzeiro do Sul do Estado de São Paulo. Tecnólogo em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC). Atualmente é Consultor Técnico Comercial na Sabará Químicos e Ingredientes.

Daniel D'Angelo⁽³⁾

Cursando Engenharia de Produção pela Universidade Cruzeiro do Sul do Estado de São Paulo. Tecnólogo em Biocombustíveis pela Faculdade de Tecnologia do Estado de São Paulo (FATEC). Atualmente é Consultor Comercial Técnico Sênior na Sabará Químicos e Ingredientes.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Juscelino Kubitschek de Oliveira - nº 878 - Distrito Industrial - Santa Bárbara d'Oeste, São Paulo – CEP: 13.457-190 - Brasil - Cel: +55 (11) 98906-1208 - e-mail: luiz.massuchetto@gruposabara.com.

RESUMO

A crescente importância da qualidade da água distribuída à população e a necessidade de alta eficiência nos processos de tratamento de esgoto, são temas atualmente relevantes que fomentam uma grande diversidade de pesquisas científicas. O dióxido de cloro, oxidante de alto desempenho e excelente agente de desinfecção, vem aumentando sua participação no saneamento básico, garantindo desempenho promissor. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do dióxido de cloro na desinfecção final de efluentes em diferentes ETEs. Para tanto, foram conduzidos três estudos de caso em ETEs com características distintas de tratamento, aplicando-se o dióxido de cloro ao final do tratamento secundário e monitorando-se parâmetros como coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. coli*. Os resultados demonstraram a eficácia do dióxido de cloro na oxidação de impurezas e na desinfecção, permitindo alcançar níveis de desinfecção maiores do que 99,9% de inativação e adequados para atender à legislação, além de melhorar qualitativamente as condições de cor e odor dos efluentes. Além disso, foi possível entender que a aplicação do dióxido de cloro, aliada a estratégias de ambientação e monitoramento contínuo, representa uma alternativa viável e eficiente para o tratamento de efluentes, com potencial para otimizar o desempenho das ETEs.

PALAVRAS-CHAVE: Dióxido de cloro; Desinfecção de efluentes; Coliformes

INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para a vida humana e para o desenvolvimento socioeconômico, tanto que é tema do 6º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que trata da garantia de disponibilidade e manejo sustentável da água e saneamento para todos. O Brasil também possui objetivos relacionados ao saneamento básico como o atendimento de 99% da população com água potável e de 90% dela com coleta e tratamento de esgoto até 2033, por meio da aprovação da lei 14.026 de 2020 “Novo Marco Legal do Saneamento Básico” (BRASIL, 2020). Desta forma, tornou-se ainda mais importante a garantia de qualidade e alta eficiência dos processos de tratamento de água e esgoto para que seja possível atender toda a população.

Com o passar dos anos, nota-se que a qualidade da água, principalmente a água superficial, vem sofrendo alterações significativas, seja por mudanças climáticas, desmatamento como também principalmente por conta da poluição (ANA, 2022). Por conta destas alterações, observa-se um grande esforço para o desenvolvimento de tecnologias para o aumento do desempenho dos sistemas de tratamento de água para consumo humano. No entanto, é fundamental analisar de forma detalhada todas etapas e processos do saneamento básico, não focando apenas para a etapa inicial do tratamento de água, mas também colocando atenção especial à etapa final de tratamento de efluentes e lançamentos nos corpos hídricos.



O consumo da água superficial se dá de forma semelhante a um ciclo, sendo que uma grande parcela da água bruta captada dos rios para tratamento retornará como um efluente. Assim, devido a extensão e distribuição dos corpos hídricos no Brasil, é muito comum encontrar situações em que estações de tratamento de água potável estão posicionadas à jusante do lançamento de efluentes de ETE's. Tal condição exige uma alta qualidade do efluente lançado para que, além de atender legislação e não prejudicar o meio ambiente, não altere a qualidade da água de tal forma que prejudique as condições de tratamento das ETA's que estão captando a água.

No Brasil, há regulamentações federais, estaduais e municipais que estabelecem os limites mínimos de lançamento para certos parâmetros de qualidade do efluente. Dentre as legislações existentes, destacam-se a CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005) e 430/2011 (BRASIL, 2011) estabelecem a classificação dos corpos hídricos e alguns padrões de lançamento de efluentes. Para o estado de São Paulo, segue-se também o Decreto nº 8.468, de setembro de 1976 (SÃO PAULO, 1976), onde acrescenta-se padrões de lançamento que não estão relacionados na legislação federal, inclusive relacionados a desinfecção dos efluentes estabelecendo limites para presença de coliformes que prejudiquem a qualidade da água após o lançamento, como também o Decreto nº 10.755, de novembro de 1977 (SÃO PAULO, 1977) que dispõe sobre o enquadramento dos corpos de água receptores.

A maior parte das estações de tratamento de efluentes no Brasil apresentam ao menos as etapas de tratamento primário e secundário. No entanto, com o crescimento populacional associado a restrições de investimento para ampliação e uso de tecnologias ultrapassadas, fazem que mesmo com o tratamento básico, a qualidade final do efluente lançado nos corpos hídricos seja um desafio. Segundo estimativas da Associação Brasileira das Concessionárias Privadas de Serviços Públicos de Água e Esgoto (ABCON) seria necessário um investimento de cerca de R\$ 900 bilhões até 2033, para alcançar a meta de universalização dos serviços de saneamento básico, segundo metas brasileiras (CORAZZA, L. T., 2025)

Os tratamentos atuais, quando controlados corretamente, apresentam certa eficiência na redução da carga de matéria orgânica, porém a carga de microrganismos patogênicos também é um fator de atenção requerendo uma etapa de desinfecção adequada para assegurar a qualidade do efluente lançado. A utilização de tecnologias tradicionais de desinfecção, como por exemplo o uso de cloro livre, pode não garantir a eficiência adequada de desinfecção devido a limitações de tempo de contato em relação a estrutura da ETE como também podem causar a geração de subprodutos de desinfecção como moléculas organocloradas que são tóxicas e carcinogênicas à saúde humana (COLLIVIGNARELLI, M. C. et al., 2018; AZIM, N. et al., 2020). Ou seja, a utilização de tal tecnologia pode prejudicar a qualidade do efluente, lançando substâncias que não são monitoradas pela legislação de efluentes, mas que podem ser um problema para o tratamento de água para consumo humano.

Neste sentido, a utilização de um agente de desinfecção de alto desempenho, como no caso do dióxido de cloro, é uma alternativa que pode trazer tanto vantagens técnicas como econômicas e ambientais. O dióxido de cloro é um poderoso oxidante e agente de desinfecção de alto desempenho, que à temperatura ambiente se apresenta na forma de um gás, com coloração amarelo-esverdeada e odor pungente característico. Quando comparado ao cloro, o dióxido de cloro tem capacidade oxidante 2,5 vezes superior (MASSCHELEIN e RICE, 1979). O dióxido de cloro apresenta o benefício de não formar substâncias tóxicas e carcinogênicas ao agir sobre a oxidação da matéria-orgânica, como as moléculas organocloradas Trihalometanos e Ácidos Haloacéticos (AIETA e BERG, 1986; MEYERS, 2002; AYYILDIZ, O. et al., 2009; XU et al., 2022), fator decisivo na escolha deste oxidante para desinfecção de efluentes.

Além da ação oxidativa do dióxido de cloro, atua contra uma grande diversidade de microrganismos como, bactérias, vírus, protozoários e cistos, com elevada capacidade de inativação em um curto espaço de tempo, que pode ser de 10 a 1000 vezes mais eficiente do que o cloro ativo para alguns microrganismos, garantindo assim, a segurança do efluente que será lançado no corpo hídrico receptor (PERCIVAL, 2014). Também apresenta a capacidade de remover ferro, manganês e outros compostos inorgânicos que causam turbidez (PIZZI, 2010; GAN et al., 2020), odor e gosto desagradáveis na água (SRINIVASAN, 2011). Mantém sua capacidade desinfetante em diferentes faixas de pH, ao contrário do cloro, que perde eficiência com alterações de pH (EPA, 1999). Combate a formação de biofilmes nas tubulações e reservatórios, prevenindo a proliferação de microrganismos (PRATAS, 2014).



Em suma, o dióxido de cloro apresenta-se como uma substância versátil que permite alcançar a oxidação e desinfecção de efluente e possui um elevado potencial de ganho técnico, no desempenho e qualidade do efluente lançado, econômico e ambiental na substituição de compostos clorados a base de cloro livre. O desafio do mercado de aplicação do dióxido de cloro para desinfecção de efluentes é o de desenvolver tecnologias que apresentem uma elevada eficiência reacional para obtenção do dióxido de cloro empregando insumos com baixo risco agregado; conscientizar o consumidor quanto às estratégias de uso do produto e formas de aplicação para explorar a eficiência do dióxido de cloro; garantir a adequação às demandas de dióxido de cloro para cada tipo de tratamento e para cada característica de efluente.

OBJETIVO

O objetivo principal do presente trabalho foi o de avaliar o desempenho da aplicação do dióxido de cloro, obtido através de gerador, para a desinfecção final efluentes, por meio de 03 estudos de casos efetuados em ETE's distintas. Como objetivo complementar, estabeleceu-se uma avaliação de como as estratégias de aplicação do agente de desinfecção e seu monitoramento podem impactar no desempenho do processo de desinfecção do efluente.

METODOLOGIA UTILIZADA

DEFINIÇÃO DOS ESTUDOS DE CASO

As avaliações do presente trabalho foram divididas em 03 estudos de casos em que o dióxido de cloro foi aplicado em campo em diferentes ETE's e cada qual apresentavam características distintas de tratamento. O nome das empresas em que foram realizados tais testes não serão divulgados, por sigilo, sendo que cada uma será identificada no trabalho de acordo com um código do estudo de caso.

Como em cada localidade estudada o efluente apresentava características completamente diferentes, foi necessário realizar uma avaliação laboratorial prévia, por meio de testes de jarro, para determinar a demanda do dióxido de cloro necessária. Para tanto, preparou-se inicialmente uma solução estoque de dióxido de cloro com aproximadamente 2000 mg/L. Em seguida, efetuou-se a superdosagem de dióxido de cloro no jarro de teste com o efluente, de acordo com a características do efluente de cada localidade, mantendo-os em contato durante tempo suficiente para que a concentração de dióxido de cloro residual se estabilizasse na solução. A concentração residual de dióxido de cloro foi monitorada a intervalos regulares de 2 a 3 minutos utilizando-se um analisador portátil cronoamperométrico (Kemio Disinfection, Fabricante Palintest). O método cronoamperométrico é um dos métodos mais indicados para avaliação de dióxido de cloro apresentando maior precisão e exatidão dos resultados do que quando comparados aos métodos espectrofotométricos normalmente empregados, como por exemplo os métodos com DPD (N,N-dietil-p-fenilenodiamina) ou com verde de Lissamina B (TZANAVARAS *et al.*, 2007; AMMAR *et al.* 2015).

Após a avaliação da demanda de dióxido de cloro em escala laboratorial, em todos os estudos de caso, procedeu-se a etapa de teste em planta. As ETE's estudadas apresentavam configuração convencional possuindo tratamento primário e secundário. Todas as instalações avaliadas contavam com um tanque de contato após a saída dos decantadores e antes do lançamento do efluente final ao corpo hídrico receptor, diferenciando-se apenas no tempo de detenção do efluente. Desta forma, para todos os testes, o dióxido de cloro foi aplicado ao final do tratamento secundário, na entrada do tanque de contato, antes do lançamento final ao corpo hídrico receptor, com o objetivo de promover a desinfecção final e possível oxidação de impurezas que tenham passado pelo processo de tratamento.

Para cada estudo de caso foi realizada uma avaliação de parâmetros de qualidade do efluente lançado como:

- Contagem de Coliformes Totais;
- Contagem de Coliformes Termotolerantes;
- Contagem de *E. Coli*;

Como as características do efluente apresentavam grande oscilações ao longo dos dias, optou-se por realizar a coleta de amostras, citadas acima, em dois pontos diferentes, sendo o primeiro na saída do decantador o qual representa a condição do efluente antes da aplicação do dióxido de cloro e o segundo ao final do tanque de contato, após ação do dióxido de cloro e antes do lançamento final do efluente no corpo receptor. Todas as amostras foram analisadas por laboratórios acreditados terceirizados.



Além de parâmetros analíticos citados acima, realizou-se um monitoramento das condições operacionais de cada ETE com a finalidade de entender mudanças no padrão de tratabilidade do efluente com o uso do dióxido de cloro.

ESTUDO DE CASO 01

O processo avaliado no Estudo de Caso 01 conta com um sistema de tratamento de lodo ativado de aeração prolongada, com capacidade de 420 L/s, tratando efluente doméstico e industrial. O efluente tratado é lançado em um corpo hídrico receptor caracterizado como Classe 2 segundo CONAMA nº 357, 2005 (BRASIL, 2005), com vazão média em 2024 de 120 m³/s. A ETE estudada não utilizava agente de desinfecção final do efluente antes de efetuar o lançamento no corpo receptor.

O dióxido de cloro foi aplicado no ponto de entrada do efluente no tanque de contato, que possui um tempo de detenção aproximado de 25 minutos. O tempo de avaliação do estudo foi de 18 dias de dosagem ininterruptos de dióxido de cloro, sendo que ao longo do teste foi necessário variar as dosagens de dióxido de cloro atingindo valor máximo de 10 mg/L e mínimo de 2 mg/L. Monitorou-se o residual de dióxido de cloro ao longo do tanque de contato, utilizando analisador *Kemio Disinfection*, como também foram efetuadas coletas para análise de coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. Coli*.

ESTUDO DE CASO 02

A ETE avaliada no Estudo de Caso 02 trata o efluente doméstico por meio do uso de lagoas aeróbias para depuração da carga orgânica e lagoas de decantação para sedimentação e mineralização dos sólidos sedimentáveis. A capacidade total instalada de tratamento de efluente é de 270 L/s. O efluente tratado é lançado em um corpo hídrico receptor caracterizado como Classe 2 segundo CONAMA nº 357, 2005 (BRASIL, 2005), com vazão média de 3 m³/s e vazão mínima de 0,93 m³/s no ano de 2024.

A aplicação do dióxido de cloro gerado também foi realizada no ponto de entrada do efluente no tanque de contato, que possui um tempo de detenção aproximado de 10 minutos. O estudo foi conduzido em apenas 1 dia, sendo que as dosagens de dióxido de cloro foram variadas dentro em uma faixa de 3 a 7 mg/L. Durante o teste foram efetuadas coletas de amostras do efluente antes da aplicação do dióxido de cloro e na saída do tanque de contato para análise de coliformes totais e *E. Coli*.

ESTUDO DE CASO 03

O Estudo de Caso 03 foi conduzido em uma estação de tratamento de efluentes que conta com sistema de filtros biológicos aeróbios percoladores com capacidade máxima de tratamento de 610 L/s. O efluente tratado é lançado em um corpo hídrico receptor caracterizado como Classe 2 segundo CONAMA nº 357, 2005 (BRASIL, 2005), com vazão média de 50,26 m³/s no ano de 2024.

O dióxido de cloro foi dosado no ponto de entrada do efluente no tanque de contato, que possui um tempo de detenção aproximado de 5 minutos. O estudo foi efetuado por 9 dias consecutivos com dosagem ininterrupta de dióxido de cloro que variaram de 4 a 14 mg/L. Durante o teste foram efetuadas coletas de amostras do efluente antes da aplicação do dióxido de cloro e na saída do tanque de contato para análise de coliformes totais, coliformes termotolerantes e *E. Coli*.

GERADORES DE DIÓXIDO DE CLORO

Os geradores utilizados nos testes foram projetados para permitir operar com taxas de geração de dióxido de cloro de 0,5 a 25 kg/h. A rota reacional escolhida para obtenção do dióxido de cloro se dá por meio da reação entre o clorito de sódio (precursor do dióxido de cloro) e o ácido clorídrico, conforme a estequiometria da Equação 01. Os geradores utilizados garantem uma eficiência mínima de conversão do clorito de sódio à dióxido de cloro de 95%.



equação (1)



A Tabela 1 apresenta um resumo das informações fundamentais de cada estudo de caso avaliado.

Tabela 1 – Resumo de informações dos estudos de caso conduzidos em ETE's em escala real.

Estudo de caso	Vazão ETE (L/s)	Tempo de contato (min)	Vazão Corpo Receptor (m³/s)	Classe do corpo receptor *
01	420	24	120	2
02	270	10	3	2
03	610	5	50,3	2

*Segundo CONAMA 357, 2005.

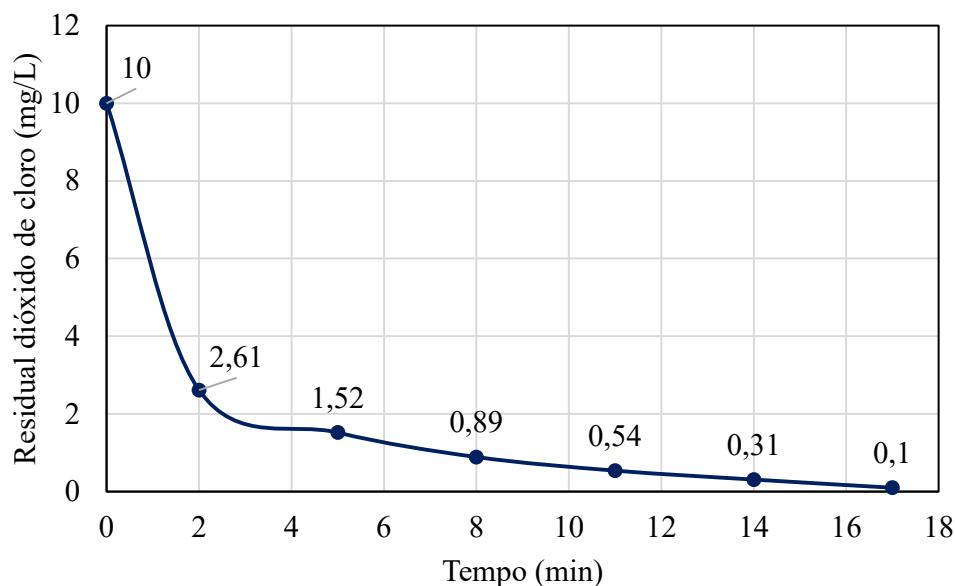
RESUTADOS OBTIDOS

Assim como descrito na metodologia, o presente trabalho consiste na avaliação de uma série de estudos de casos de diferentes estações de tratamento de efluente em que foram utilizadas abordagens específicas para realização dos testes. Desta forma, para melhor organização, os resultados relativos a cada estudo de caso serão apresentados isoladamente.

ESTUDO DE CASO 01

A Figura 1 presenta os resultados do *jar-test* executado incialmente para estimar a demanda de dióxido de cloro para o efluente. O ensaio de demanda foi realizado aplicando-se uma dosagem inicial equivalente a 10 mg/L de dióxido de cloro, em seguida monitorou-se a intervalos de tempo o residual de agente oxidante presente no jarro de teste.

Figura 1 – Ensaio de demanda de dióxido de cloro para tratamento do efluente após tratamento secundário do Estudo de Caso 01.

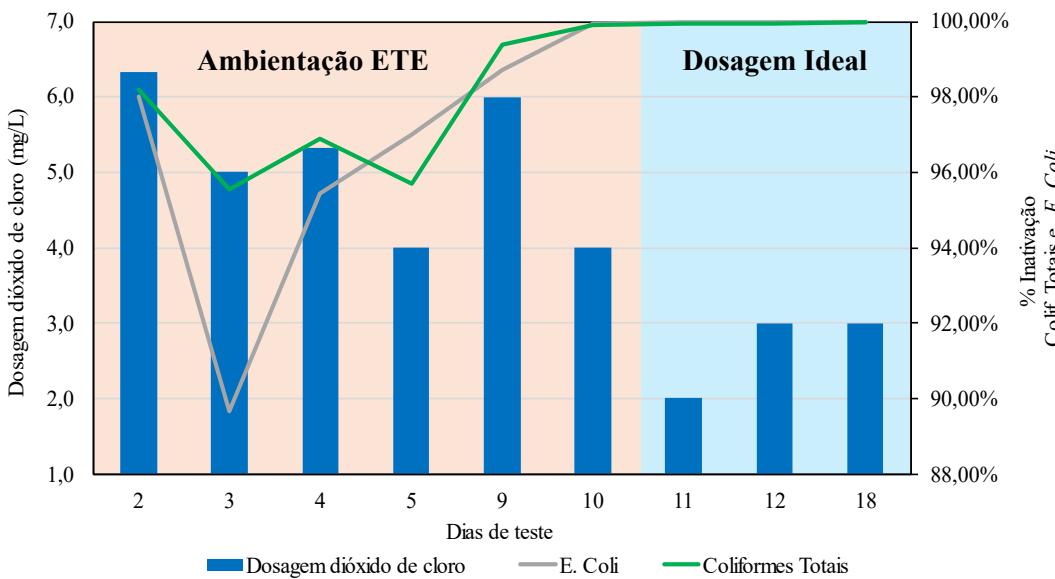


Fonte: Elaborado pelos Autores, (2025).

A Figura 2 representa os resultados obtidos de inativação de Coliformes Totais e E. Coli em função da dosagem de dióxido de cloro ao longo dos dias de teste.



Figura 2 – Inativação de microrganismos em função da dosagem média de dióxido de cloro ao longo do tempo de teste.



Fonte:

Elaborado pelos Autores, (2025).

A Figura 3 representa o aspecto do efluente antes e após o início da aplicação do dióxido de cloro no tanque de contato.

Figura 3 – Aspecto do efluente antes e após a aplicação do dióxido de cloro.



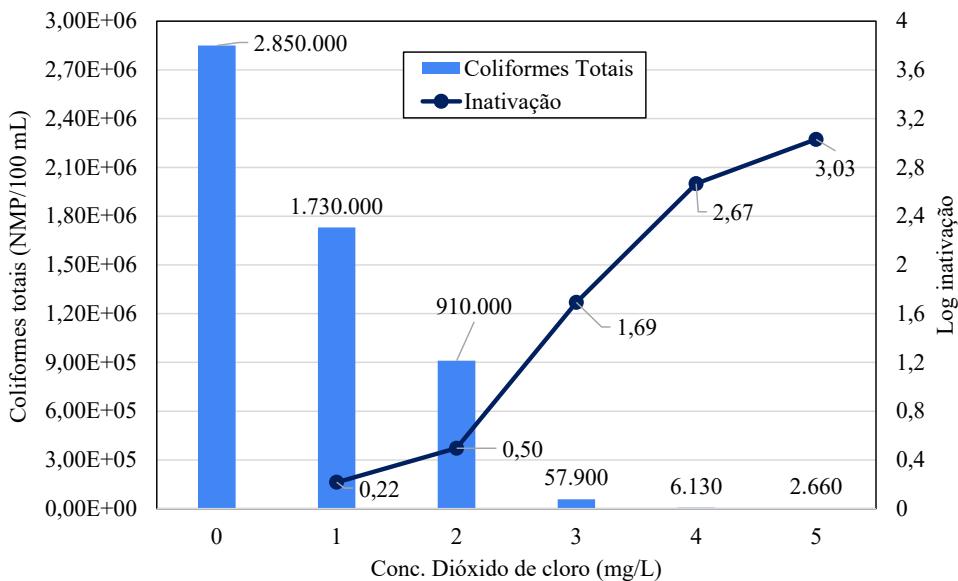
Fonte: Elaborado pelos Autores, (2025).

ESTUDO DE CASO 02

Antes de iniciar a aplicação do dióxido de cloro em planta, foi realizado um ensaio de demanda de dióxido de cloro para desinfecção, conforme apresentado na Figura 4. Neste ensaio, monitorou-se a contagem de Coliformes Totais em função da dosagem de dióxido de cloro para um tempo de contato padrão entre agente oxidante e o efluente de 10 minutos.



Figura 4 – Ensaio de demanda de dióxido de cloro para tratamento do efluente após tratamento secundário do Estudo de Caso 02.



Fonte: Elaborado pelos Autores, (2025).

A Tabela 2 contém resultados do monitoramento de Coliformes Totais e E. Coli para diferentes dosagens de dióxido de cloro aplicadas no teste em planta.

Tabela 2 – Resultados de monitoramento de coliformes totais e E. Coli em função da dosagem de dióxido de cloro no teste em planta.

Dióxido de cloro (mg/L)	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	E. Coli (NMP/100mL)	Log Inativação (Colif. Totais)	Log Inativação (E. Coli)
0	> 2.420.000	> 2.420.000	-	-
3	23.100	4.100	2,02 *	2,77 *
5	12.100	<1.000	2,30 *	3,38 *
7	<1.000	<1.000	3,38 *	3,38 *

* Os dados de inativação foram estimados com base nos valores máximos de 2.420.000 NMP/100 ml para o efluente bruto e para valores mínimos de 1.000 NMP/100 mL devido ao limite de quantificação da metodologia utilizada.

Através dos resultados de Coliformes Totais obtidos do teste em planta, foram realizadas estimativas de qual seria a contribuição na contagem deste parâmetro caso o efluente fosse lançado no corpo hídrico receptor quando ele se encontra em condições de vazão média e de vazão mínima, sendo que tais resultados são expressos na Tabela 3.

Tabela 3 – Estimativas de contribuição na contagem de Coliformes Totais a jusante do lançamento do efluente no corpo receptor.

Dióxido de cloro (mg/L)	Coliformes Totais (NMP/100 mL)	Diluição Média (NMP/100 mL)	Diluição Mínima (NMP/100 mL)
0	>2.420.000	199.817	538.531
3	23.100	1.907	5.141
5	12.100	999	2.693
7	1.000	83	223

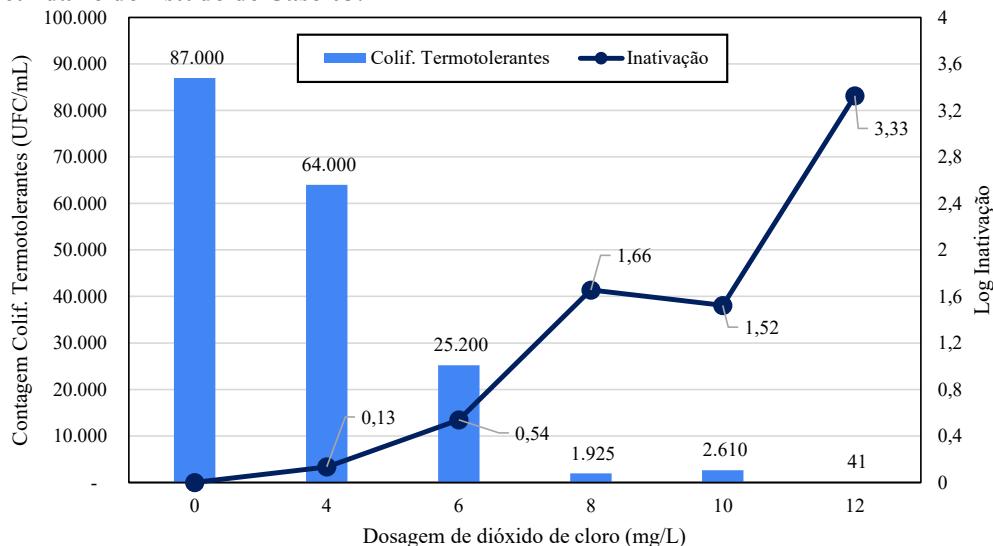
ESTUDO DE CASO 03

No Estudo de Caso 03 também se realizou ensaio prévio de demanda de dióxido de cloro para inativação de microrganismos. Neste ensaio a concentração de dióxido de cloro foi variada e após 10 minutos de contato



entre o dióxido de cloro e efluente foram coletadas amostras para análise de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes. A Figura 5 apresenta os resultados de inativação obtidos para contagem de Coliformes Termotolerantes em função das dosagens do dióxido de cloro. Não foi possível avaliar a inativação de Coliformes Totais visto que todos os resultados das amostras de efluente sem e com dióxido de cloro apresentaram valores acima do limite de quantificação da metodologia utilizada.

Figura 5 – Ensaio de demanda de dióxido de cloro para tratamento do efluente após tratamento secundário do Estudo de Caso 03.



Fonte: Elaborado pelos Autores, (2025).

As tabelas 4 e 5 apresentam respectivamente os resultados de monitoramento da contagem de Coliformes Totais e Coliformes Termotolerantes ao longo do teste com dióxido de cloro na ETE.

Tabela 4 – Monitoramento de Coliformes Totais em função da dosagem de dióxido de cloro e estimativas de contribuição de contagem a jusante do lançamento do efluente no corpo hídrico receptor.

Dias de Teste	Dosagem dióxido de cloro (mg/L)	Entrada (NMP/100mL)	Saida (NMP/100mL)	Diluição (NMP/100 mL)
0	12	>16.000.000	>16.000.000	> 73.219
1	10	>16.000.000	>16.000.000	> 73.219
2	8	>16.000.000	>16.000.000	> 73.219
5	6	>16.000.000	>16.000.000	> 73.219
6	12	>16.000.000	<1	< 0,005
8	14	>16.000.000	<1	< 0,005

Tabela 5 – Monitoramento de Coliformes Termotolerantes em função da dosagem de dióxido de cloro e estimativas de contribuição de contagem a jusante do lançamento do efluente no corpo hídrico receptor.

Dias de Teste	Dosagem dióxido de cloro (mg/L)	Entrada (UFC/mL)	Saida (UFC/mL)	Log Inativação	Diluição (UFC/100 mL)
0	12	210.000	67000	0,50	30.660
1	10	125.000	73000	0,23	31.953
2	8	257.000	161.000	0,20	70.473
5	6	142.000	108.000	0,12	53.720
6	12	120.000	1	5,08	0,43
8	14	45.000	1	4,65	0,30



ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Assim como nas demais seções do presente trabalho, as análises e discussões dos resultados serão divididas de acordo com cada estudo de caso.

ESTUDO DE CASO 01

Os resultados do jar-test, expresso pela Figura 1 mostra um decaimento acentuado do residual de dióxido de cloro, sendo que cerca de 85% da dosagem inicial (consumo de 8,5 ppm de dióxido de cloro) foi consumida dentro dos 5 minutos iniciais de contato, alcançando 99% de consumo após 17 minutos. Tal resultado era esperado, uma vez que o dióxido de cloro é um agente oxidante forte de alto desempenho, promovendo uma ação rápida sobre compostos orgânicos e inorgânicos oxidáveis. No entanto, o elevado consumo de dióxido de cloro não pode ser relacionado exclusivamente ao processo de desinfecção, visto que a ação do dióxido de cloro é ampla, agindo tanto como um oxidante de impurezas, como também um agente de desinfecção. Desta forma, a demanda de dióxido de cloro destinada à desinfecção representa apenas uma parcela do consumo observado. Como o objetivo da aplicação do dióxido de cloro era voltado à eliminação de Coliformes Totais e Termotolerantes, para atendimento das condições estabelecidas no Decreto nº 8.468, de 1976 (SÃO PAULO, 1976), e não a oxidação completa do efluente, optou-se por realizar um teste em planta com o monitoramento periódico dos parâmetros citados acima para determinação da dosagem ideal de dióxido de cloro requerida para desinfecção.

O teste com dióxido de cloro na planta foi realizado por um período de 18 dias consecutivos em que a dosagem deste químico foi alterada com o objetivo de determinar a melhor condição de operação para maximizar a desinfecção do efluente e atendimento às legislações vigentes. Como o foco da aplicação do dióxido de cloro era a desinfecção final, ele foi aplicado no efluente que sai do tratamento secundário e adentra ao tanque de contato, o qual possui um tempo de retenção total de aproximadamente 25 minutos. O teste foi iniciado com dosagens em torno de 10 mg/L de dióxido de cloro, monitorando-se o residual ao longo do tanque de contato por meio do analisador cronoamperométrico Kemio Disinfection.

Logo no início da aplicação do dióxido de cloro no efluente, foi observada a primeira mudança qualitativa da característica do efluente. Notou-se que o efluente com dióxido de cloro apresentava uma coloração mais clara em relação ao efluente que alimentava o tanque de contato, conforme Figura 3. Também foi possível notar uma redução no odor do efluente tratado com dióxido de cloro. A mudança de tais características, mesmo que qualitativamente, indicam que o dióxido de cloro estava interagindo com substâncias oxidáveis que causam cor e odor presentes no efluente. Vale ressaltar que o tanque de contato avaliado no estudo não recebia uma limpeza desde 8 meses antes do início do teste, o que promoveu um acúmulo de sedimentos, matéria orgânica e biofilme no sistema, impurezas tais que contribuirão no consumo do dióxido de cloro para uma função diferente da pretendida, que é a desinfecção do efluente.

No primeiro dia de teste, notou-se que todo o dióxido de cloro estava sendo completamente consumido antes mesmo de completar os 5 minutos iniciais de contato. Com base neste comportamento, empregou-se a estratégia de ambientação da ETE, que consiste em realizar uma dosagem de choque inicial com altas concentrações de dióxido de cloro e ao longo dos dias de testes, promover uma redução gradativa, até observar que o sistema alcançou um ponto ótimo de trabalho. Como as análises de coliformes requerem um elevado tempo para emissão dos resultados, devido necessidade de incubação das amostras, elas não poderiam ser consideradas como parâmetro de resposta para tomada de decisão na alteração da dosagem de dióxido de cloro. Como alternativa, utilizou-se o monitoramento do residual do dióxido de cloro ao longo do tanque de contato, como critério para aumento ou redução da dosagem.

A Figura 02 representa o comportamento do sistema durante o período de teste para a inativação de coliformes totais e *E. Coli* em função da dosagem média de dióxido de cloro ao longo do dia. Nota-se que nos primeiros 10 dias de teste (trecho destacado com fundo laranja no gráfico), mesmo com dosagem elevada de dióxido de cloro, a inativação apresentou oscilações significativas, com valor mínimo de 88,7% no segundo dia de teste. Mesmo assim, após o segundo dia de teste, foi possível observar uma tendência no aumento gradativo no grau de inativação dos microrganismos, com dosagens cada vez menores de dióxido de cloro.

A partir do 11º dia, foram observadas inativações de no mínimo 99,9% (log 3) com dosagens de dióxido de cloro entre 2 e 3 mg/L, permanecendo nesta condição até o último dia de teste. Assim, foi possível concluir



que o processo de ambientação da ETE havia finalizado e alcançado a condição ótima de operação. Nesta condição, pode-se afirmar que o dióxido de cloro dosado estava sendo empregado especificamente para o tratamento do efluente que estava adentrando o tanque de contato, não havendo mais a competição com as impurezas que estavam acumuladas no sistema. Foi possível encontrar residual de dióxido de cloro em praticamente todo o tanque de contato, mostrando que a limpeza do sistema havia sido alcançada. No entanto, foi possível notar que o ajuste da dosagem de dióxido de cloro de acordo com a demanda do sistema foi fundamental para alcançar os resultados observados. Sabe-se que é normal ocorrer oscilações nas características do efluente que deixa o decantador devido a alterações na característica do efluente que adentra a ETE ou até mesmo pela mudança nas características do processo de tratamento, as quais exigirão uma dosagem de dióxido de cloro específica para cada condição encontrada. O acompanhamento do residual de dióxido de cloro no sistema foi um parâmetro fundamental utilizado como indicador indireto do processo de desinfecção, visto que as análises de coliformes levam certo tempo para serem concluídas, o que permitiu tomadas de decisão rápidas para ajustes da dosagem do agente de desinfecção.

A partir dos resultados do Estudo de Caso 01, se entende que a aplicação isolada de um determinado produto sem o acompanhamento das características do processo não é sinônimo de que será alcançado todo o potencial dele. As estratégias de aplicação e monitoramento são fundamentais para alcançar um desempenho eficaz do produto.

ESTUDO DE CASO 02

No Estudo de Caso 02, o *jar-test* foi realizado monitorando-se a inativação de coliformes totais em função da dosagem de dióxido de cloro. Com base nas informações da Figura 4, nota-se que foi possível alcançar inativações acima de log 2 (99%) com aplicação de ao menos 4 ppm de dióxido de cloro. Porém, da mesma forma que no primeiro estudo de caso, o teste em planta é fundamental para avaliar a real demanda de dióxido de cloro para desinfecção do efluente.

A dosagem de dióxido de cloro para o teste em planta foi realizada no efluente que deixava as lagoas de decantação e entravam no tanque de contato, que possuía um tempo de retenção de cerca de 10 minutos. Devido a demanda de ao menos 4 ppm encontrada no *jar-test*, os testes foram realizados com dosagens de 3, 5 e 7 mg/L. Nos testes em planta, foram coletadas amostras para análise de *E. Coli* e Coliformes totais do efluente bruto e tratado para avaliação de inativação, conforme expresso na Tabela 02.

Foi possível alcançar uma inativação de log 2 (99%) de coliformes totais e *E. Coli* com dosagens mínima de 3 mg/L de dióxido de cloro. Com base na informação de contagem de coliformes totais, foi realizada uma estimativa de qual seria a contribuição na contagem deste contaminante no corpo hídrico receptor caso o efluente fosse lançado na condição de vazão mínima e média do mesmo, conforme informações contidas na Tabela 03.

O Decreto nº 8.468, de 1976 (SÃO PAULO, 1976), regulamenta que não poderão ser lançados efluentes que prejudiquem a qualidade do corpo hídrico receptor classe 2 em até 5.000 NMP/100 mL de coliformes, para 80% de pelo menos 5 amostras colhidas num período de 5 semanas consecutivas. Como o tempo de teste não possibilitou a realização de coletas conforme estabelecido na norma, utilizou-se o limite de contagem de coliformes do decreto apenas para comparação com os resultados obtidos das amostras coletadas no dia do teste. Com base nos dados da Tabela 03, observa-se que para dosagens de no mínimo 5 mg/L de dióxido de cloro foi possível alcançar inativações em que o lançamento do efluente no corpo receptor não excederia a contribuição máxima de 5.000 NMP/100 mL conforme estabelecido por legislação, tanto considerando a vazão média como mínima do corpo receptor.

ESTUDO DE CASO 03

Para os Estudo de Caso 03, foi realizado jar-test para determinação da demanda ideal do dióxido de cloro para desinfecção do efluente coletado da saída do tratamento secundário. Foram aplicadas diferentes dosagens de dióxido de cloro no efluente e coletou-se amostras para análise de coliformes totais e coliformes termotolerantes. A Figura 5 apresenta a inativação de coliformes termotolerantes alcançada com as dosagens de dióxido de cloro. Não foi possível avaliar a inativação de coliformes totais visto que todos os resultados,



tanto do efluente bruto como do tratado apresentaram valores acima do limite de quantificação do método utilizado.

Com base na Figura 5, para alcançar inativação cima de log 3 (99,9%) de coliformes termotolerantes foi necessária uma dosagem de 12 mg/L neste estudo de caso, mostrando que o efluente tratado apresentava uma elevada carga de contaminação por compostos oxidáveis como também de microrganismos, requerendo uma dosagem alta de dióxido de cloro quando comparado aos demais casos.

O teste em planta foi realizado durante um período de 8 dias com dosagem ininterrupta, avaliando-se a contagem de coliformes totais e termotolerantes em função das dosagens de dióxido de cloro. A Tabela 04 apresenta os resultados específicos de inativação de coliformes totais. Em todos os dias de teste a contagem na entrada do efluente na etapa de desinfecção apresentou valor acima do limite de quantificação do método que era de 16.000.000 NMP/100 mL. Até o 5º dia de teste, a contagem no efluente após a desinfecção ainda apresentava resultado acima do limite de quantificação. A partir do 6º ao 8º, com dosagens de dióxido de cloro entre 12 e 14 mg/L foi possível alcançar contagem dos microrganismos a ponto de ficar abaixo do limite de quantificação do método que era de 1 NMP/100 mL. Como todos os resultados obtidos de coliformes totais ficaram fora dos limites mínimo e máximo da metodologia aplicada, não foi realizada uma estimativa de inativação nesta condição.

Os resultados de coliformes termotolerantes apresentados na Tabela 05 permitem uma análise mais detalhada da capacidade de inativação de microrganismos pelo uso do dióxido de cloro. Com base no Decreto nº 8.468, de 1976 (SÃO PAULO, 1976), não poderão ser lançados efluentes que prejudiquem a qualidade do corpo hídrico receptor classe 2 em até 1.000 NMP/100 mL coliformes termotolerantes. A partir do 6º dia de teste foi possível alcançar um nível de inativação de microrganismos em que, caso o efluente fosse lançado no corpo receptor, a contribuição da contagem de coliformes termotolerantes ficaria abaixo do limite de estabelecido pela norma.

Durante o período de teste, observou-se que o efluente da ETE apresentava oscilações consideráveis em coloração, odor, carga de sólidos, devido a lançamentos de efluente doméstico e industrial. Tais oscilações exigiam alterações frequentes na dosagem de dióxido de cloro para desinfecção, o que levou a dosagens de 12 a 14 mg/L observadas entre o 6º e 8º dia.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo reunir uma série de estudos de casos que evidenciam o desempenho e vantagens da aplicação do dióxido de cloro para desinfecção final do efluente de ETE's visando solucionar problemas com o atendimento às legislações pertinentes, como também proporcionar melhorias nas condições operacionais das ETE's. Dentre os principais resultados, se destacam:

- O dióxido de cloro é um produto de alto desempenho atuando tanto na oxidação de impurezas orgânicas e inorgânicas como também na desinfecção final dos efluentes. Com a correta dosagem de dióxido de cloro foi possível alcançar níveis de desinfecção suficientes para atendimento da legislação vigente de lançamento de efluente;
- Por meio dos estudos de caso, foi possível observar que as estratégias de ambientação da ETE e acompanhamento contínuo da aplicação são fundamentais para alcançar alto desempenho da aplicação do dióxido de cloro;
- Qualitativamente foi possível notar melhora em condições de coloração e odor dos efluentes, pela ação oxidativa do dióxido de cloro. Para trabalhos futuros, acrescentar avaliações quantitativas de contaminantes orgânicos e inorgânicos, permitirá avaliar de forma mais abrangente o potencial do dióxido de cloro para o tratamento de efluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (BRASIL). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2021 - Relatório Pleno. Brasília: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico.



2022. Disponível em: <https://www.snrh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdir.pdf>

2. AIETA, E. M.; BERG, J. D. A Review of Chlorine Dioxide in Drinking Water Treatment. Journal - American Water Works Association, v. 78, n. 6, p. 62–72, jun. 1986. Disponível em: <<https://www.awwa.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/j.1551-8833.1986.tb05766>>
3. AMMAR, T. A.; ABID, K. Y.; EL-BINARY, A. A.; EL-SONBATI, A. Z.; Comparison of commercial analytical techniques for measuring chlorine dioxide in urban desalinated drinking water. Journal of water and health, v. 13, n. 4, p. 970–984, 14 jul. 2015. Disponível em: <<https://iwaponline.com/jwh/article/13/4/970/28320/Comparison-of-commercial-analytical-techniques-for>>
4. AYYILDIZ, O.; ILERI, B.; SANIK, S. Impacts of water organic load on chlorine dioxide disinfection efficacy. Journal of Hazardous Materials, v. 168, n. 2-3, p. 1092–1097, 15 set. 2009. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389409003598>>
5. AZIM, N.; DIAZ, A.; LI, W.; CALLE, L. M.; IRWIN, T.; Literature Review of Disinfection Techniques for Water Treatment. International Conference on Environmental Systems (ICES). 2020. Disponível em: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20205004388/downloads/ICES_132_Disinfection%20Review.pdf>
6. BRASIL, Resolução CONAMA nº357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional. Disponível em: <https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450>
7. BRASIL, Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Novo Marco Legal do Saneamento Básico. Brasil, 2020. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2020/lei/l14026.htm>
8. BRASIL, Resolução CONAMA nº430, de 13 de maio de 2011. Condições e padrões de lançamento de efluentes. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>>
9. COLLIVIGNARELLI, M. C. et al. Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. Sustainability, v. 10, n. 1, p. 86, 1 jan. 2018. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/86>>
10. CORAZZA, L. T. Desafio do setor de saneamento é levantar R\$ 900 bi até 2033 - ABCON SINCON. Disponível em: <<https://abconsindcon.com.br/desafio-do-setor-de-saneamento-e-levantar-r-900-bi-ate-2033/>>.
11. GAN, W.; GE, Y.; ZHONG, Y.; YANG, X.; The reactions of chlorine dioxide with inorganic and organic compounds in water treatment: Kinetics and mechanisms. Environmental Science: Water Research & Technology, v. 6, n. 9, p. 2287–2312, 2020. Disponível em: <<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ew/d0ew00231c>>
12. MASSCHELEIN, W. J.; RICE, R. G. Chlorine Dioxide, Chemistry and Environmental Impact of Oxychlorine Compounds. USA, Michigan, Collingwood, Ann Arbor Science Publishers, 1979. Disponível em: <<https://www.wiley.com/doi/abs/10.1002/aeh.19830110210>, 1979.>
13. MEYERS, R. B. Encyclopedia of physical science and technology - 3. ed. San Diego: Academic Press, 2002. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/referencework/9780122274107/encyclopedia-of-physical-science-and-technology>>
14. PERCIVAL, S. T. Microbiology of Waterborne Diseases: Microbiological Aspects and Risks. Amsterdam: Elsevier/Academic Press. cap. Chlorine Dioxide, p. 591-598, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/book/9780124158467/microbiology-of-waterborne-diseases>>



15. PIZZI, N. G.; AMERICAN; FIRM, P. Water treatment. Denver, Colo.: American Water Works Association, 2010. Disponível em: <<https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2071763>>
16. PRATAS, M. J. D. C. Dióxido de cloro como Biocida. Dissertação — Instituto Superior de Ciências da Saúde EGAS MONIZ. 2014. Disponível em: <<https://comum.rcaap.pt/handle/10400.26/13068>>
17. SÃO PAULO, Decreto nº 8468, de 08 de setembro de 1976. Prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1976/decreto-8468-08.09.1976.html>>
18. SÃO PAULO, Decreto nº 10.755, de 22 de novembro de 1977. Enquadramento dos corpos de água receptores. Disponível em: <<https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1977/decreto-10755-22.11.1977.html>>
19. SRINIVASAN, R.; SORIAL, G. A. Treatment of taste and odor causing compounds 2-methyl isoborneol and geosmin in drinking water: A critical review. Journal of Environmental Sciences, v. 23, n. 1, p. 1–13, jan. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1001074210603671>>
20. TZANAVARAS, P.; THEMELIS, D.; KIKA, F. Review of analytical methods for the determination of chlorine dioxide. Open Chemistry, v. 5, n. 1, p. 1–12, 1 mar. 2007. Disponível em: <<https://www.degruyter.com/document/doi/10.2478/s11532-006-0054-9/html>>
21. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual. Office of Water. 1999. Disponível em: <<https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/2000229L.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=1995+Thru+1999&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C95thru99%5CTxt%5C00000015%5C2000229L.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=horizontal&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL>>
22. XU, M.Y.; LIN, Y.L.; ZHANG, T. Y.; HU, C. Y.; TANG, Y.L.; DENG, J.; XU, B.; Chlorine dioxide-based oxidation processes for water purification : A review. Journal of Hazardous Materials, v. 436, p. 129195, 15 ago. 2022. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304389422009852>>