# IMPORTÂNCIA DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE DIÓXIDO DE CLORO PARA A SEGURANÇA HÍDRICA

**Gerusa Bartoli**

Química com MBA em Supply Chain e mais de 20 anos de experiência em planejamento, logística, produção e gestão de contas corporativas. Atua na liderança de projetos estratégicos nas indústrias química e de saneamento. Especialista em soluções sustentáveis e tecnologias para tratamento de água. Passagens por áreas operacionais e comerciais. Atualmente na Ecolab, com foco em inovação e eficiência hídrica na América Latina.

Endereço: Av José Puccineli, 130. Condomínio Campos do Conde 1, Rua 16, 181.- Bairro – Cascata, Cidade – Paulínia, Estado – SP, CEP: 13.146-030 - País – Brasil, Tel: +55 (19) 99186-7026 - e-mail: gerusa.bartoli@ecolab.com

## RESUMO

O estudo avalia a importância da eficiência na geração de dióxido de cloro ($ClO_2$) para garantir a segurança hídrica em sistemas de abastecimento de água potável. A pesquisa compara duas rotas de geração — clorito de sódio ($NaClO_2$) e clorato de sódio ($NaClO_3$) — com foco na conversão química, formação de subprodutos e desempenho operacional.

A rota via clorato de sódio demonstrou maior eficiência (95%) em comparação à rota via clorito (83%), resultando em menor formação de subprodutos regulados como íons clorito e clorato, conforme os limites da Portaria GM/MS nº 888/2021. Os testes de demanda e jarros confirmaram que a rota via clorato proporciona melhor clarificação, menor turbidez, menor carga orgânica residual e maior estabilidade de desinfecção.

Além disso, a rota mais eficiente reduz o consumo de reagentes, os custos operacionais e o impacto ambiental. O estudo conclui que a adoção de sistemas de geração de $ClO_2$ com alta eficiência, como a rota via clorato, é recomendada para contextos com águas brutas complexas e alta carga orgânica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Eficiência de geração, Dióxido de cloro, Segurança hídrica

## 1.INTRODUÇÃO

A segurança hídrica é um componente essencial para a saúde pública e o desenvolvimento sustentável, especialmente em contextos nos quais a qualidade da água potável enfrenta ameaças crescentes devido à contaminação orgânica, à presença de microrganismos resistentes e à variabilidade climática. Nesse cenário, o dióxido de cloro ($ClO_2$) tem se destacado como uma solução eficaz e segura para a desinfecção da água, estabilidade em uma ampla faixa de pH e baixa geração de subprodutos nocivos, como os trialometanos (THM) e os ácidos haloacéticos (HAA).

Este estudo técnico explora como a eficiência na geração de dióxido de cloro influencia diretamente a segurança hídrica, avaliando parâmetros como a estabilidade do produto, a redução de subprodutos e a capacidade de resposta diante de variações na qualidade da água bruta.

## 2.- OBJETIVO DO ESTUDO TÉCNICO

Avaliar o impacto da eficiência na geração de dióxido de cloro sobre a segurança hídrica em sistemas de abastecimento de água potável, identificando as melhores práticas que garantam uma desinfecção eficaz, estável e sustentável, minimizando riscos sanitários e ambientais.

## 3.- DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO DE CASO

### 3.1. Diagnóstico inicial da qualidade da água

A principal fonte de água bruta analisada em este estudo de caso é proveniente de um rio localizado em uma região com influência industrial. Essa condição geográfica e ambiental contribui para uma qualidade de água desafiadora (Ver tabela 1), caracterizada por elevados níveis de matéria orgânica, manganês, cor e turbidez.

Do ponto de vista do tratamento, esses parâmetros representam um desafio significativo para as etapas de pré-oxidação e clarificação, pois podem comprometer a eficiência dos processos de coagulação-floculação e filtração. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, a água destinada ao consumo humano deve atender a limites rigorosos para parâmetros como manganês (≤ 0,1 mg/L) e cor aparente (≤ 15 uH) na água tratada, o que reforça a necessidade de um tratamento rigoroso desde a captação. Adicionalmente, a mesma portaria estabelece um limite máximo de 100 µg/L (ppb) para os trialometanos totais (THM) na água tratada para consumo humano. Embora nesta fase ainda não tenham sido detectados THM, a elevada presença de matéria orgânica e compostos aromáticos na água bruta aumenta o risco de sua formação durante as etapas de pré-oxidação e desinfecção com cloro ou outros agentes oxidantes.

Tabela 1: Parâmetros de qualidade da água bruta

| Parâmetros | Valor | Unidade | Método Analítico Estândar |
|---|---|---|---|
| **pH** | 8.1 | Unidade | Eletrometria (SM 4500-$H^+$ B) |
| **Alcalinidade** | 63 | mg/L (ppm) | Titulação com ácido furte (SM 2320 B) |
| **Turbidez** | 9.5 | NTU | Nefelometria (SM 2130 B) |
| **Cor aparente** | 74 | uH | Colorimetria (SM 2120 B) |
| **Ferro (Fe)** | 0.33 | mg/L (ppm) | Espectrofotometria de absorção atómica (SM 3111 B) |
| **Manganês (Mn)** | 0.25 | mg/L (ppm) | Espectrofotometria de absorção atómica (SM 3111 B) |
| **COT** | 11.3 | mg/L (ppm) | Oxidação catalítica y detecção por infrarrojo (SM 5310 B) |
| **DQO (COD)** | 8.9 | mg/L (ppm) | Refluxo cerrado com dicromato (SM 5220 D) |
| **ABS254** | 0.21 | $cm^{-1}$ | Espectrofotometria UV a 254 nm (SM 5910 B) |
| **SUVA** | 2.1 | L/mg·m | Cálculo: ABS254/COT × 100 (SM 5910 B) |
| **THM** | 0 | µg/L (ppb) | Cromatografia de gases com trampa de purga (SM 6232 B) |

Dessa forma, esta água bruta exige uma abordagem de tratamento integrada e eficiente que assegure o cumprimento dos parâmetros exigidos para a água tratada, conforme estabelecido na portaria, as fases dos testes que serão realizados em cada etapa estão descritas abaixo:

- **Pré-oxidação seletiva** – Avaliação de diferentes dosagens de dióxido de cloro por meio das duas rotas de geração selecionadas (Rota do clorito e rota do clorato), a dosagem será realizada de acordo com os testes de demanda
- **Coagulação-floculação eficiente** – Foi utilizado um jar test, os produtos que foram utilizados são PAC (policloreto de alumínio) e polímero catiônico.
- **Filtração** – Etapa essencial para a remoção de sólidos remanescentes, foi utilizado filtros de membrana de microporosidad de 0,45 micras (µm)
- **Desinfecção cuidadosamente controlada** – Para evitar a formação de subprodutos nocivos, nesta fase é dosado o hipoclorito.

### 3.2. O dióxido de cloro como alternativa técnica eficaz

O dióxido de cloro ($ClO_2$) é um agente oxidante seletivo e altamente eficaz, amplamente reconhecido como uma solução robusta para o tratamento de água potável, especialmente em sistemas com concentrações elevadas de ferro ($Fe^{2+}$), manganês ($Mn^{2+}$) e matéria orgânica natural (NOM). Diferentemente de desinfetantes como o cloro livre, o $ClO_2$ não reage com compostos orgânicos para formar subprodutos halogenados, como os trialometanos (THM) ou

os compostos orgânicos halogenados adsorvíveis (AOX), tornando-se uma opção mais segura do ponto de vista sanitário e regulatório.

O uso do dióxido de cloro na pré-oxidação da água potável tem se expandido devido à sua capacidade de melhorar significativamente os processos de clarificação e filtração, resultando em uma redução expressiva dos custos operacionais totais do sistema de potabilização.

**Principais Vantagens Técnicas:**

- **Oxidação eficiente:** O $ClO_2$ oxida $Fe^{2+}$ a $Fe^{3+}$ e $Mn^{2+}$ a $Mn^{4+}$, facilitando sua remoção por sedimentação ou filtração. Essas reações ocorrem rapidamente, mesmo em pH neutro.
- **Controle da matéria orgânica:** O $ClO_2$ degrada compostos fenólicos e outras frações da NOM sem gerar THM ou AOX, reduzindo a carga de carbono orgânico total (COT) e aumentando a eficiência da desinfecção subsequente.
- **Desinfecção microbiológica avançada:** É eficaz contra bactérias, vírus, esporos e macro-organismos como helmintos e algas. Sua ação é independente do pH e apresenta maior penetração em biofilmes do que o cloro livre.
- **Melhoria da clarificação:** Ao oxidar compostos orgânicos e metais antes da coagulação, o $ClO_2$ favorece a formação de flocos mais densos e estáveis, promovendo maior remoção de turbidez e menor demanda de coagulantes.
- **Filtração mais eficiente e duradoura:** A pré-oxidação com $ClO_2$ reduz o acúmulo de biofilmes e matéria orgânica nos meios filtrantes, prolongando sua vida útil e diminuindo a frequência de retrolavagens.
- **Baixa formação de subprodutos:** Os principais subprodutos são o íon clorito ($ClO_2^-$) e o clorato ($ClO_3^-$), gerados em concentrações reduzidas e controláveis por meio de ajustes na dosagem e nas condições operacionais.

### 3.3.- Eficiência de Geração de Dióxido de Cloro

O primeiro passo para a realização dos ensaios de demanda consistiu na medição da concentração de dióxido de cloro ($ClO_2$) em laboratório para cada uma das amostras fornecidas. O estudo foi conduzido com base no método colorimétrico DPD (Standard Method 4500-$ClO_2$ D). A amostragem e o transporte das soluções de $ClO_2$ foram realizados conforme os procedimentos estabelecidos pelo fornecedor da solução.

Rotas avaliadas:

- **Rota via Clorito de Sódio ($NaClO_2$):**
  Concentração teórica (informada): 850 ppm
  Concentração medida em laboratório: 706 ppm

- **Rota via Clorato de Sódio ($NaClO_3$):**
  Concentração teórica (informada): 833 ppm
  Concentração medida em laboratório: 793 ppm

A eficiência de geração refere-se ao percentual de conversão dos precursores químicos em dióxido de cloro. Neste estudo, considera-se a conversão de clorato de sódio e clorito de sódio em $ClO_2$. Uma baixa eficiência de conversão resulta na formação de subprodutos indesejados, como os íons clorito ($ClO_2^-$) e clorato ($ClO_3^-$), ambos classificados como tóxicos e regulados por normas nacionais e internacionais. Além disso, a baixa eficiência reduz a quantidade efetiva de $ClO_2$ disponível para a desinfecção, comprometendo a segurança hídrica do sistema.

- **Rota via Clorito de Sódio ($NaClO_2$):**
  Eficiência de geração = (Concentração medida em laboratório/Concentração teórica) = (706 ppm)/(850 ppm)*100% = 83%

- **Rota via Clorato de Sódio ($NaClO_3$):**
  Eficiência de geração = (Concentração medida em laboratório/Concentração teórica) = (793 ppm)/(833 ppm)*100% = 95%

### 3.4.- Teste de Demanda

Os testes de demanda permitem determinar com precisão a quantidade de dióxido de cloro ($ClO_2$) necessária para alcançar uma oxidação e desinfecção eficaz da água bruta. Este procedimento é essencial, uma vez que a qualidade da água pode variar significativamente conforme sua origem e composição, impactando diretamente a eficiência do tratamento.

A demanda de dióxido de cloro corresponde à quantidade de $ClO_2$ (expressa em ppm ou mg/L) consumida nas reações com os compostos presentes na água, como matéria orgânica, metais, microrganismos, amônio, entre outros. Somente após a neutralização dessa demanda é possível manter um residual eficaz de $ClO_2$, garantindo a desinfecção contínua ao longo do sistema.
Os testes de demanda foram realizados aplicando a mesma dosagem de $ClO_2$ para ambas as amostras de água bruta caracterizadas na seção 1, permitindo uma comparação direta da eficiência de consumo e do comportamento oxidativo frente aos contaminantes presentes.

Tabela 2: Resultados do teste de demanda da rota de clorito de sódio= 1.44 ppm

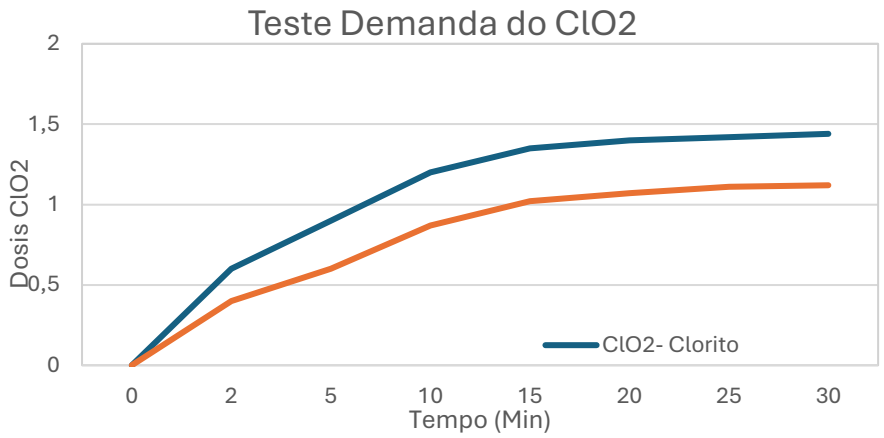
| Rota do Clorito de Sódio | | |
|---|---|---|
| Tempo (min) | Residual (ppm ClO2) | Demanda (ppm ClO2) |
| 0 | 1.5 | 0 |
| 2 | 0.9 | 0.6 |
| 5 | 0.6 | 0.9 |
| 10 | 0.3 | 1.2 |
| 15 | 0.15 | 1.35 |
| 20 | 0.1 | 1.4 |
| 25 | 0.08 | 1.42 |
| 30 | 0.06 | 1.44 |

Tabela 3: Resultados do teste de demanda da rota do clorato de sódio=1.12 ppm

| Rota do Clorato de Sódio | | |
|---|---|---|
| Tempo (min) | Residual (ppm ClO2) | Demanda (ppm ClO2) |
| 0 | 1.5 | 0 |
| 2 | 1.1 | 0.4 |
| 5 | 0.9 | 0.6 |
| 10 | 0.63 | 0.87 |
| 15 | 0.48 | 1.02 |
| 20 | 0.43 | 1.07 |
| 25 | 0.39 | 1.11 |
| 30 | 0.38 | 1.12 |

Em resumo, uma eficiência de geração inferior impacta diretamente no aumento do consumo de precursores químicos necessários para produzir 1 kg de dióxido de cloro ($ClO_2$), o que compromete a sustentabilidade operacional do sistema. Além disso, essa ineficiência afeta negativamente a qualidade da água tratada — como será demonstrado na próxima seção — e contribui para o aumento dos custos operacionais totais, tanto em termos de insumos quanto de controle de subprodutos regulados.

Figura 1: Comparação do teste de demanda de dióxido de cloro




### 3.5. Comparação da Eficiência de Geração de Dióxido de Cloro

A eficiência na geração de dióxido de cloro ($ClO_2$) é um fator crítico para assegurar uma desinfecção eficaz e minimizar a formação de subprodutos indesejados. O $ClO_2$ é um agente oxidante, amplamente utilizado no tratamento de água devido à sua eficácia biocida, estabilidade em ampla faixa de pH e baixa reatividade com matéria orgânica.
Quando a geração de $ClO_2$ é ineficiente, podem ser formados subprodutos como o íon clorito ($ClO_2^-$) e o íon clorato ($ClO_3^-$), ambos regulados devido ao seu potencial risco à saúde. As causas mais comuns dessa ineficiência incluem condições reacionais mal controladas, baixa qualidade dos reagentes ou dosagem inadequada. Por exemplo:

- O clorito é um subproduto direto da decomposição do $ClO_2$.
- O clorato pode se formar por dismutação do clorito ou por reações secundárias, especialmente na presença de excesso de oxidantes ou em temperaturas elevadas.

Uma eficiência de geração superior a 95% é essencial para minimizar esses subprodutos e atender aos limites regulatórios. A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece o limite de 0,7 ppm para os íons clorato e clorito na água tratada.

Em contextos nos quais a segurança sanitária, a eficiência operacional e a sustentabilidade hídrica são prioridades — como em estações de tratamento de água potável —, a rota de geração de dióxido de cloro via clorato de sódio apresenta vantagens significativas. Observa-se uma eficiência de geração superior a 95%, com baixo impacto na formação de subprodutos, atendendo plenamente às exigências regulatórias estabelecidas pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para água potável no Brasil.

Conforme demonstrado na Tabela 4, a rota baseada em clorito de sódio apresenta uma eficiência de geração inferior a 85%, conforme relatado em diversos artigos técnicos de fabricantes dessa tecnologia e na diretriz de desinfetantes da EPA. Essa menor eficiência impacta diretamente na formação de subprodutos como os íons clorito e clorato, frequentemente excedendo os limites permitidos pela regulamentação brasileira.

Tabela 4: Comparação entre métodos de geração de dióxido de cloro e o impacto da eficiência de geração

| ***Mecanismo de Reação*** | | **Rota do Clorito de Sódio** | **Rota do Clorato de Sódio** |
|---|---|---|---|
| *Estequiometria* | | 5 $NaClO_2$ + 4 HCl→ 4 $ClO_2$ + 5 NaCl + 2 $H_2O$ | NaClO3 + ½ H2O2 + ½ H2SO4 → ClO2 + ½ Na2SO4 + H2O + ½ O2 |
| *Consumo Kg/ Kg ClO2* | | 5.84 Kg ($NaClO_2$ 25%) + 6.96 Kg (HCl 33%) → 1 Kg ClO2 | 4.15 Kg (Clorato + Peroxido) + 5.2 Kg (H2SO4 78%)→ 1 Kg ClO2 |
| *Eficiência de geração* | % | 83% | 95% |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| *Dosagem ClO2 ppm para água bruta* | mg/L (ppm) | 0.8 | 1 | 0.8 | 1 |
| *Íon clorito na água tratada devido ao reagente não reagido* | mg/L (ppm) | 0.25 | 0.31 | 0 | 0 |
| *Ion Clorato na água tratada devido a reagente não reagido* | mg/L (ppm) | 0 | 0 | 0.052 | 0.065 |
| *Max íon clorito estimado gerado nas reações de ClO2 com componentes da água (EPA: 70% ClO2)* | mg/L (ppm) | 0.56 | 0.7 | 0.56 | 0.7 |
| *Max íon clorato estimado gerado nas reações de ClO2 com componentes da água (EPA: <30% ClO2)* | mg/L (ppm) | 0.24 | 0.3 | 0.24 | 0.3 |
| *Total estimado íon clorito na água tratada* | mg/L (ppm) | 0.81 | 1.01 | 0.56 | 0.7 |
| *Total estimado íon clorato na água tratada* | mg/L (ppm) | 0.24 | 0.3 | 0.29 | 0.37 |

## 4.- RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos a partir dos ensaios de demanda e dos testes de jarros, conduzidos com as dosagens previamente determinadas para cada amostra de água bruta, permitiram simular com precisão o processo de clarificação e avaliar parâmetros críticos de qualidade da água tratada.

Observou-se que o dióxido de cloro ($ClO_2$) gerado por meio da rota baseada em clorato de sódio apresentou desempenho superior em comparação à rota baseada em clorito de sódio. Especificamente, a rota via clorato demonstrou maior eficiência na redução da formação de trialometanos (THM) e menor geração de subprodutos indesejáveis, como os íons clorito ($ClO_2^-$) e clorato ($ClO_3^-$). Este resultado está diretamente relacionado à maior eficiência de conversão química observada nesta rota, que superou 95%, conforme evidenciado nas análises laboratoriais.

A literatura técnica e diretrizes internacionais, como o guia de desinfetantes da EPA (Environmental Protection Agency), indicam que eficiências inferiores a 85% — como as frequentemente associadas à rota via clorito de sódio — resultam em maior consumo de precursores químicos e aumento significativo na formação de subprodutos regulados. Esses subprodutos, além de representarem riscos toxicológicos, comprometem a conformidade com os limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 para água potável no Brasil, que estipula valores máximos de 0,7 mg/L para íons clorito e clorato.

Além disso, a menor eficiência de geração implica em maior consumo de reagentes por quilograma de $ClO_2$ produzido, o que impacta diretamente nos custos operacionais totais do sistema de tratamento. Isso inclui não apenas o custo dos insumos químicos, mas também o aumento da frequência de manutenção, descarte de resíduos e necessidade de monitoramento analítico mais rigoroso.

Tabela 5: Resultados obtidos nos testes de jarro

| parámetro | Unidades | Agua Bruta | desinfección final | | Limites |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | ClO2-Clorito | ClO2-Clorato | Portaria GM/MS nº 888/2021 |
| Dosis ClO2 | ppm | | 1.4 | 1.1 | |

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| Dosis de Cloro | ppm | | 2 | 2 | |
| pH | Unidad | 8.1 | 7.51 | 7.46 | 6.0 a 9.5 |
| Turbidez | NTU | 9.5 | 0.55 | 0.38 | <= 5 |
| Cor | uH | 74 | 7.5 | 6.4 | <= 15 |
| Ferro (Fe) | ppm | 0.33 | 0.09 | 0.072 | <= 0.3 mg/L |
| Manganês (Mn) | ppm | 0.25 | <0.05 | <0.05 | <= 0.1 mg/L |
| COT | ppm | 9.3 | 4.9 | 4.1 | <= 5 |
| THM | ppb | 0 | 108.3 | 84.3 | <= 100 |
| Cloro residual Libre | | 0 | 0.8 | 1.1 | 0.2 – 2.0 (em redes de distribuição) |
| Chlorate (ClO3-) | ppm | 0 | 0.28 | 0.39 | <= 0.7 mg/L |
| Clorito (ClO2-) | ppm | 0 | 0.85 | 0.7 | <= 0.7 mg/L |

## 5.- CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

O estudo técnico apresentado demonstra de forma clara que a eficiência na geração de dióxido de cloro ($ClO_2$) é um fator determinante para garantir a segurança hídrica, a conformidade regulatória e a sustentabilidade operacional em sistemas de tratamento de água potável. A comparação entre as rotas de geração — clorito de sódio ($NaClO_2$) e clorato de sódio ($NaClO_3$) — evidenciou que a rota via clorato, oferece vantagens técnicas e econômicas significativas.

A rota via clorato de sódio apresentou uma eficiência de conversão de 95%, superior à rota via clorito (83%), resultando em menor formação de subprodutos regulados como íons clorito e clorato, conforme os limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Essa maior eficiência também se traduziu em melhor desempenho nos testes de demanda e clarificação, com menores concentrações residuais de THM, turbidez, cor e compostos orgânicos totais (COT), além de maior estabilidade operacional.

Do ponto de vista econômico-operacional, a rota via clorato demonstrou menor consumo de reagentes por quilograma de $ClO_2$ gerado, menor impacto ambiental e maior controle sobre a dosagem e residual de desinfetante. Esses fatores contribuem diretamente para a redução dos custos totais de operação e para a melhoria da qualidade da água distribuída.

Portanto, a adoção de sistemas de geração de dióxido de cloro com alta eficiência, por rota via clorato de sódio representa uma solução tecnicamente robusta e alinhada com os princípios de saúde pública, sustentabilidade e conformidade normativa. Sua implementação é especialmente recomendada em contextos com águas brutas de alta complexidade, como aquelas com elevada carga orgânica, metais dissolvidos e risco de formação de subprodutos halogenados.

## 6.- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Mapas de Qualidade da Água – 2022. www.gov.br/ana
2. PORTARIA GM/MS Nº 888/2021. Ministério da Saúde – Brasil.
3. U.S. EPA. Alternative Disinfectants and Oxidants Guidance Manual, 1999.
4. 4U.S. EPA. Stage 2 Disinfectants and Disinfection Byproducts Rule, 2020.
5. WHO. Guidelines for Drinking-water Quality, 4th edition.
6. AWWA. Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water, 6th Edition.
7. Ecolab. Purate™ System Technical Manual, 2023.
8. Colorimétrico DPD (Standard Method 4500-$ClO_2$ D)