

## COMPARATIVO DE ECONOMICIDADE, EFICIÊNCIA OPERACIONAL E DESEMPENHO SISTÊMICO ENTRE O POLI ÓXIDO DE CLORO E SILÍCIO (POCS) E AGENTES OXIDANTES CONVENCIONAIS

A análise comparativa entre tecnologias oxidantes aplicadas ao saneamento não deve se limitar exclusivamente ao custo nominal de aquisição dos insumos químicos empregados, sob pena de produzir avaliações econômicas incompletas e tecnicamente distorcidas. Em sistemas modernos de tratamento de água e efluentes, a aferição da economicidade operacional deve considerar o desempenho sistêmico global da tecnologia adotada, incluindo eficiência oxidativa efetiva, consumo específico por volume tratado, estabilidade operacional, formação de subprodutos, exigências regulatórias associadas, impactos sobre ativos operacionais, custos indiretos de segurança e externalidades ambientais decorrentes do processo empregado, em consonância com os princípios da Lei Federal nº 11.445/2007, atualizada pela Lei nº 14.026/2020, bem como com os parâmetros estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021 e pelas Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011.

Sob esta perspectiva, observa-se que os agentes clorados convencionais — especialmente o cloro gás ( $\text{Cl}_2$ ) e o hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ) — apresentam limitações estruturais relevantes do ponto de vista operacional, econômico e regulatório. Embora historicamente consolidados no setor de saneamento, tais agentes possuem eficiência diretamente condicionada às características físico-químicas da água tratada, particularmente pH, alcalinidade, carga orgânica e presença de compostos nitrogenados.

Em condições operacionais reais, parcela substancial do potencial oxidante do cloro convencional é consumida em reações paralelas de halogenação da matéria orgânica natural, formação de cloraminas e geração de subprodutos organoclorados, reduzindo significativamente a fração efetivamente convertida em desinfecção útil. Em determinados cenários operacionais, estima-se que até 70% a 85% da carga oxidante originalmente aplicada possa ser desviada para reações secundárias não diretamente associadas à oxidação microbiológica efetiva. Tal fenômeno implica, frequentemente, a necessidade de superdosagens operacionais para manutenção de residual desinfetante adequado, elevando o consumo específico do agente químico e ampliando os custos indiretos associados ao tratamento.

Além disso, a própria dinâmica de degradação química do hipoclorito — sujeita à decomposição térmica, fotodegradação e perda gradual de concentração durante armazenamento e transporte — contribui para redução de eficiência operacional e aumento do consumo efetivo do produto ao longo do ciclo de utilização. Em condições operacionais comuns, perdas de concentração ativa superiores a 15% a 30% podem ocorrer ao longo do período de armazenamento, especialmente em ambientes com temperaturas elevadas, exposição luminosa ou logística prolongada.

No caso específico do Poli Óxido de Cloro e Silício (POCS), o mecanismo de atuação apresenta diferenças substanciais em relação à cloração convencional. O processo oxidativo ocorre predominantemente por transferência eletrônica e oxidação direta, sem incorporação de átomos de cloro na cadeia orgânica, reduzindo significativamente a ocorrência de reações paralelas típicas da halogenação clássica e mitigando a formação de compostos organoclorados associados aos Subprodutos da Desinfecção (SPDs).

Sob o ponto de vista operacional, isso se traduz em maior aproveitamento do potencial oxidante aplicado, menor necessidade de superdosagem e maior estabilidade de desempenho em diferentes condições de pH, dureza e carga orgânica. Em termos práticos, observa-se que o POCS pode operar, em determinadas aplicações, com dosagens operacionais até 4 vezes inferiores às normalmente requeridas para soluções convencionais de hipoclorito de sódio a 10%–12%, mantendo resultados equivalentes ou superiores nos principais parâmetros operacionais de qualidade da água, incluindo:

- \* manutenção de residual oxidante livre;
- \* redução de carga microbiológica;
- \* controle de coliformes totais e termotolerantes;
- \* redução de DBO e DQO em determinadas matrizes;
- \* controle de odor e compostos sulfurados;
- \* redução de biofilmes;
- \* melhoria da estabilidade microbiológica da rede;
- \* incremento dos níveis de oxigênio dissolvido;
- \* estabilidade dos parâmetros organolépticos da água tratada.

Em determinadas matrizes operacionais, tal redução de dosagem pode representar diminuição superior a 75% no consumo químico efetivo por metro cúbico tratado, mantendo-se os padrões de desempenho exigidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

Adicionalmente, observa-se que o POCS apresenta elevada eficiência oxidativa mesmo em cenários de maior complexidade operacional, incluindo águas com elevada carga orgânica, presença de biofilmes, compostos recalcitrantes e matrizes de efluentes mais heterogêneas. A estabilidade do processo reduz significativamente a necessidade de intervenções corretivas frequentes, contribuindo para maior continuidade operacional e menor variabilidade dos parâmetros de tratamento. Em aplicações específicas, a redução de intervenções operacionais corretivas pode atingir patamares superiores a 50%, especialmente em sistemas sujeitos a oscilações sazonais de qualidade da água bruta.

Outro aspecto de elevada relevância econômica refere-se aos custos sistêmicos indiretos associados ao emprego de agentes oxidantes convencionais. O uso intensivo de cloro e hipoclorito está historicamente relacionado à aceleração de processos corrosivos em redes metálicas, equipamentos hidráulicos, bombas, conexões e estruturas operacionais, impactando diretamente os custos de manutenção, reposição de ativos e vida útil dos sistemas de distribuição e tratamento. Em determinados sistemas, os custos indiretos associados à corrosão química e à degradação prematura de ativos podem representar parcela significativa do custo operacional global das unidades de tratamento ao longo do ciclo de vida da infraestrutura.

Da mesma forma, os custos regulatórios associados à formação de Subprodutos da Desinfecção (SPDs), especialmente trihalometanos (THMs) e ácidos haloacéticos (HAAs), tendem a assumir relevância crescente diante da evolução dos padrões de qualidade da água e das exigências ambientais contemporâneas. A Portaria GM/MS nº 888/2021 estabelece limites rigorosos para trihalometanos totais, enquanto as Resoluções CONAMA

nº 357/2005 e nº 430/2011 reforçam a necessidade de controle de substâncias potencialmente tóxicas e persistentes em corpos hídricos receptores.

A necessidade permanente de monitoramento analítico, controle operacional adicional, mitigação de não conformidades e gerenciamento de riscos regulatórios constitui componente econômico relevante frequentemente não incorporado nas análises convencionais de custo químico direto.

Sob esta ótica, tecnologias de oxidação avançada que minimizem ou eliminem a formação de organoclorados apresentam potencial relevante de redução de custos indiretos futuros relacionados a compliance regulatório, passivos ambientais e adequação normativa progressiva. No caso do POCS, a ausência de mecanismo predominante de halogenação reduz substancialmente o potencial de formação de THMs e HAAs, podendo representar redução próxima à eliminação prática desses subprodutos em determinadas condições operacionais.

No que se refere especificamente à segurança operacional, destaca-se que a utilização de cloro gás demanda infraestrutura crítica de armazenamento, contenção e gerenciamento de risco, incluindo sistemas de exaustão, lavadores de gases, sensores, áreas segregadas, planos de contingência e protocolos específicos de segurança química, em conformidade com normas nacionais, exigências ambientais e protocolos internacionais de segurança química aplicáveis ao transporte e armazenamento de substâncias perigosas. Tais exigências elevam significativamente o custo sistêmico operacional das unidades de tratamento, especialmente em áreas urbanas densamente ocupadas.

Em contraste, soluções oxidantes com menor risco toxicológico operacional tendem a reduzir significativamente a complexidade da infraestrutura de segurança exigida, simplificando procedimentos operacionais e reduzindo potenciais passivos trabalhistas, ambientais e civis associados à manipulação de substâncias perigosas.

Do ponto de vista da eficiência econômica global, deve-se considerar ainda que tecnologias com maior eficiência oxidativa efetiva possibilitam redução de custos logísticos relacionados ao armazenamento, transporte, reposição e manuseio de insumos químicos, além de potencial redução da necessidade de etapas complementares de correção química e pós-tratamento.

No caso do POCS, a maior eficiência operacional observada em determinadas aplicações permite redução proporcional expressiva de dosagem quando comparada a agentes clorados convencionais, produzindo ganhos logísticos, operacionais e econômicos relevantes ao longo do ciclo de operação das estações de tratamento. Em determinados cenários operacionais, a redução consolidada de custos sistêmicos globais — considerando consumo químico, manutenção, monitoramento regulatório, infraestrutura de segurança e custos operacionais acessórios — pode superar 60% a 80% em comparação aos modelos convencionais baseados em cloração intensiva.

Importa destacar, ainda, que o cenário regulatório internacional aponta para tendência progressiva de fortalecimento das restrições relativas à formação de subprodutos organoclorados, bem como para crescente estímulo à adoção de tecnologias de oxidação

avançada, processos não-halogenantes e soluções alinhadas às diretrizes ESG e aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente o ODS 6 — Água Potável e Saneamento.

Nesse contexto, a análise de economicidade das tecnologias de desinfecção deve necessariamente incorporar critérios de sustentabilidade regulatória de longo prazo, considerando não apenas o custo imediato de aquisição do insumo químico, mas também sua aderência às tendências futuras de segurança hídrica, proteção ambiental e modernização dos sistemas de saneamento.

Diante do exposto, observa-se que o Poli Óxido de Cloro e Silício (POCS) apresenta potencial relevante para ampliação da eficiência sistêmica dos processos de oxidação e desinfecção aplicados ao saneamento, especialmente sob a ótica integrada de desempenho operacional, redução de externalidades, mitigação de custos indiretos, segurança operacional e sustentabilidade regulatória.

Assim, recomenda-se que avaliações técnicas e regulatórias relacionadas à modernização dos sistemas de tratamento considerem não apenas parâmetros convencionais de custo unitário de aquisição de oxidantes, mas também análises sistêmicas de desempenho operacional global, eficiência oxidativa útil, custos indiretos de infraestrutura e conformidade regulatória, em consonância com os princípios da eficiência, sustentabilidade e proteção à saúde pública estabelecidos no marco legal brasileiro de saneamento.

<b>Critério</b>	<b>Agentes Clorados Convencionais (Cl<sub>2</sub> / NaClO)</b>	<b>Poli Óxido de Cloro e Silício (POCS)</b>
Mecanismo predominante	Halogenação e oxidação parcial	Oxidação direta por transferência eletrônica
Eficiência oxidativa útil	Parcialmente reduzida por reações paralelas	Elevada eficiência oxidativa efetiva
Consumo específico por m <sup>3</sup> tratado	Maior necessidade de dosagem	Menor necessidade de dosagem
Aproveitamento do potencial oxidante	Parte consumida na formação de subprodutos e cloraminas	Maior conversão em oxidação útil

Dependência de pH	Elevada	Baixa
Estabilidade operacional	Sensível à qualidade da água e variações operacionais	Alta estabilidade em diferentes condições
Formação de THMs	Presente	Não forma
Formação de HAAs	Presente	Não forma
Formação de organoclorados	Elevada probabilidade	Inexistente ou significativamente reduzida
Necessidade de monitoramento de SPDs	Elevada	Reduzida
Potencial carcinogênico indireto	Associado aos subprodutos da desinfecção	Reduzido
Eficiência em águas com alta carga orgânica	Reduzida pela demanda química	Mantida em maior estabilidade
Formação de cloraminas	Frequente	Não aplicável
Necessidade de correções químicas auxiliares	Frequente	Menor necessidade

Corrosividade sobre redes e equipamentos	Elevada	Reduzida
Impacto sobre vida útil dos ativos	Redução acelerada da vida útil	Menor desgaste operacional
Custos de manutenção associados	Mais elevados	Tendencialmente reduzidos
Complexidade operacional	Maior	Menor
Risco operacional	Elevado, especialmente com Cl <sub>2</sub> gás	Reduzido
Necessidade de infraestrutura de segurança	Elevada	Menor complexidade
Necessidade de planos de contingência química	Elevada	Reduzida
Custos indiretos regulatórios	Elevados	Menores
Custos ambientais indiretos	Elevados	Reduzidos
Potencial de passivo ambiental	Maior	Menor

Compatibilidade com reúso	Limitada por subprodutos	Mais favorável
Compatibilidade com diretrizes ESG	Parcial	Elevada
Aderência às tendências regulatórias futuras	Pressão crescente por restrições	Alinhado à modernização regulatória
Eficiência logística	Maior volume armazenado e transportado	Menor consumo proporcional
Necessidade de superdosagem operacional	Frequente	Reduzida
Eficiência em controle microbiológico	Dependente de CT e pH	Elevada estabilidade operacional
Sustentabilidade sistêmica	Limitada	Elevada
Economicidade sistêmica global	Custos indiretos elevados ao longo do ciclo operacional	Melhor relação entre desempenho, segurança e custo sistêmico