AVALIAÇÃO DE SISTEMA MULTIOXIDATIVO® NO TRATAMENTO DE ÁGUAS E EFLUENTES INDUSTRIAIS

Eduarda Freitas Januário Giaccheto[(1)]
Pesquisadora Pleno na Contech, atuando no desenvolvimento e na avaliação de formulações químicas para a indústria de papel e celulose e para o tratamento de água em processos industriais. Engenheira Química, formada pelo UNIFEB (2017), mestre (2020) e doutora (2022) em Engenharia Química pela UEM, na linha de pesquisa em Gestão, Controle e Preservação Ambiental.
Nadia Gabriela Milaneze[(2)]
Pesquisadora Júnior na Contech. Bacharela em Química com habilitação em Química Forense pela Universidade de São Paulo (2023) e mestre em Espectroscopia Avançada em Química pela Universidade de Lille e pela Universidade de Helsinki, com bolsa Erasmus (2025) .
Luiz Antonio Fonseca de Godoy Junior [(3)]
Diretor Industrial e de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação na Contech, com atuação na gestão estratégica das áreas de Pesquisa e Desenvolvimento, Controle de Qualidade e Produção. Bacharel em Química e Química Tecnológica (2004), mestre em Química Orgânica (2006) e doutor em Química Analítica (2011) pela UNICAMP.

Endereço[(1)]**:** Rua Catharina Farsarella Gallego, 126. – Chácaras São Bento – Valinhos – São Paulo - CEP: 13278-073 – Brasil - Tel: +55 (17) 99739-2710 - e-mail: eduarda.januario@contechbrasil.com.

RESUMO

A crescente demanda por recursos hídricos tem impulsionado a busca por tecnologias capazes de promover o tratamento eficiente, a recuperação e o reuso de águas industriais. Processos convencionais, como coagulação e floculação, são amplamente utilizados no tratamento de águas e efluentes, no entanto, sua eficiência pode ser limitada frente à presença de compostos orgânicos complexos e recalcitrantes. Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados destacam-se pela elevada capacidade de degradação de contaminantes de difícil remoção. Diante deste cenário, o Sistema Multioxidativo® consiste em uma tecnologia baseada na combinação controlada de diferentes agentes oxidantes para geração de radicais hidroxila, espécies de elevado potencial oxidante capazes de promover a degradação e mineralização de matéria orgânica dissolvida e coloidal. A aplicação dessa tecnologia possibilita a redução de parâmetros como Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), turbidez e contaminantes orgânicos, contribuindo para a melhoria da qualidade da água. Além disso, a solução amplia o potencial de reuso das correntes hídricas, reduzindo a demanda por água fresca nos processos produtivos. Dessa forma, apresenta-se como uma alternativa sustentável para otimização do gerenciamento hídrico industrial, alinhando ganhos ambientais, operacionais e econômicos.

PALAVRAS-CHAVE: tratamento de água, processos oxidativos avançados, reuso de água.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para os processos industriais e sua disponibilidade tem se tornado uma preocupação crescente em função do aumento da demanda, das restrições ambientais e da necessidade de utilização sustentável dos recursos naturais. Nesse cenário, a adoção de estratégias voltadas à recuperação, ao tratamento e reuso de águas industriais tornou-se um fator importante para a manutenção da competitividade das empresas e para a redução dos impactos ambientais associados às atividades produtivas. Desta maneira, a busca por tecnologias cada vez mais eficientes para o tratamento de águas e efluentes tem se intensificado, visando garantir maior segurança hídrica, redução de impactos ambientais e sustentabilidade para as gerações futuras [1].

Um dos grandes desafios atualmente é o tratamento de efluentes e águas de processo com elevada contaminação orgânica, especialmente na presença de compostos dissolvidos, coloidais ou recalcitrantes. Embora tratamentos convencionais, como processos físico-químicos, lodos ativados, reatores anaeróbios e lagoas de estabilização, sejam amplamente utilizados, sua aplicação pode demandar maiores tempos de retenção, grandes áreas de instalação e custos operacionais significativos, além da geração de resíduos que requerem destinação adequada [2,3]. Nesse contexto, torna-se relevante a avaliação de tecnologias avançadas capazes de promover uma redução mais efetiva desses contaminantes e otimizar a gestão hídrica industrial.

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) destacam-se pela sua alta eficiência na degradação de compostos orgânicos e tem se mostrado uma alternativa promissora para o tratamento de águas superficiais, subterrâneas, solos contaminados e efluentes industriais [3]. Os POAs são caracterizados pela geração de radicais hidroxilas (●OH), espécies altamente reativas e oxidantes, em quantidade suficiente para promover a degradação e, em alguns casos, a completa mineralização da matéria orgânica em dióxido de carbono (CO_2), água (H_2O) e íons inorgânicos [4]. Esses radicais podem ser formados por diferentes processos, classificados como homogêneos ou heterogêneos, na presença ou ausência de catalisadores e/ou irradiação. Radical hidroxila possui alto potencial oxidativo quando comparado a outros agentes oxidantes, garantindo a eficácia da capacidade de oxidação de contaminantes orgânicos tanto do ponto de vista termodinâmico quanto cinético [5,6].

A água tratada por processos oxidativos avançados pode atingir níveis de qualidade que viabilizam sua reutilização em diversas operações. Isso não apenas conserva recursos hídricos, mas também reduz os custos associados à captação de água fresca e ao tratamento convencional de efluentes. Além disso, a redução da carga de poluentes presentes nos efluentes tratados favorece o atendimento aos padrões para descarte, minimizando os impactos sobre corpos d'água receptores e ecossistemas aquáticos adjacentes [5]. Dessa forma, os POAs representam uma alternativa relevante para o fortalecimento das práticas de sustentabilidade industrial.

2. OBJETIVO

Considerando a necessidade de soluções que complementem os sistemas convencionais de tratamento, este trabalho tem como objetivo apresentar estudos que exploram a aplicação de um Sistema Multioxidativo® (SMO®), tecnologia baseada na combinação controlada de diferentes agentes oxidantes associada à soluções mecânicas que intensificam os processos reacionais entre oxidantes e matéria orgânica, promovendo aumento na eficiência da geração dos radicais hidroxila e, consequentemente, a degradação e/ou mineralização parcial ou total da matéria orgânica. Os resultados obtidos demonstram o potencial da tecnologia para o tratamento de águas de processo e efluentes industriais, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e ampliação do potencial de reuso.

3. METODOLOGIA

Os estudos reportados neste trabalho foram realizados com águas de diferentes segmentos industriais, abrangendo águas de processo e efluentes com características distintas. A avaliação da tratabilidade foi conduzida inicialmente em escala laboratorial, visando à caracterização das amostras e à determinação das condições operacionais mais adequadas para aplicação do SMO®. A definição da estratégia de tratamento considerou tanto as características físico-químicas de cada corrente quanto o objetivo final da aplicação, seja para descarte ambientalmente adequado, recuperação ou potencial reuso da água tratada. Após a etapa de otimização em laboratório, quando aplicável, os tratamentos foram avaliados em escala piloto para validação das condições definidas.

3.1. Tratamento de efluente de indústria farmacêutica

Realizou-se um estudo utilizando amostras de efluente provenientes da estação de tratamento de efluentes de uma indústria farmacêutica. Os efluentes gerados por esse segmento industrial são caracterizados pela presença de compostos orgânicos complexos, incluindo princípios ativos, intermediários de síntese e outras substâncias de elevada estabilidade química, frequentemente classificadas como contaminantes persistentes e recalcitrantes. Essas características podem limitar a eficiência dos tratamentos convencionais, tornando necessária a avaliação de tecnologias complementares para sua degradação.

Diante desse cenário, o estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do SMO® na redução da carga orgânica, com foco na diminuição dos níveis de Demanda Química de Oxigênio (DQO), visando tanto o potencial reuso da água tratada quanto a adequação do efluente aos padrões exigidos para descarte. Os ensaios foram conduzidos em escala laboratorial a 45°C, temperatura selecionada para reproduzir as condições operacionais observadas no processo industrial. A eficiência do processo foi determinada por meio da comparação dos parâmetros analíticos antes e após a aplicação do sistema, permitindo avaliar o potencial da tecnologia na complementação do tratamento convencional e na adequação do efluente aos requisitos de qualidade aplicáveis.

3.2. Tratamento de efluente de indústria produtora de suco de laranja

Adicionalmente, foi realizado um estudo utilizando amostras de efluente provenientes da saída do sistema de flotação de uma indústria produtora de suco de laranja. Os efluentes gerados por esse segmento industrial apresentam elevada carga orgânica, composta principalmente por açúcares, ácidos orgânicos, terpenos e matéria orgânica coloidal provenientes do processamento da fruta. Embora muitos desses compostos sejam biodegradáveis, sua elevada concentração pode comprometer a eficiência dos sistemas biológicos de tratamento e aumentar a carga orgânica destinada às lagoas de estabilização, impactando a qualidade dos corpos hídricos receptores. Nesse contexto, o estudo teve como objetivo avaliar a eficiência do SMO® na melhoria da qualidade do efluente e na redução de sua carga orgânica.

Foram recebidos aproximadamente 3 m³ de efluente bruto para realização dos ensaios em escala piloto, operando com vazão de 1 m³/h, permitindo a avaliação do tratamento em regime contínuo. Diferentes condições operacionais foram avaliadas por meio da variação das dosagens dos agentes oxidantes, visando à otimização do processo. A eficiência do tratamento foi determinada pela comparação dos parâmetros analíticos antes e após o tratamento.

3.3. Tratamento de água de indústria papeleira

O estudo foi realizado em uma indústria produtora de papel kraft que apresentava problemas recorrentes relacionados à contaminação do circuito de água branca. O acúmulo de compostos orgânicos ao longo do processo produtivo intensificava a formação de incrustações e depósitos, comprometendo a estabilidade operacional do sistema e a qualidade da água de processo. Diante desse cenário, o trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do SMO® na redução de extrativos lipossolúveis, reconhecidos como importantes precursores da formação de depósitos orgânicos.

Inicialmente, amostras de água branca foram caracterizadas e, em seguida, foram conduzidos ensaios em escala laboratorial utilizando o SMO® para definição da condição de tratamento mais eficiente.

Com base nos resultados obtidos em laboratório, o tratamento foi posteriormente avaliado em sistema piloto, instalado na planta industrial e operando com vazão de até 5 m³/h. O sistema foi composto por etapas de filtração, reator multioxidativo e filtração em carvão ativado. O período de operação foi de 7 dias, incluindo etapa inicial de otimização das dosagens dos agentes oxidantes. Durante o período experimental foram realizadas coletas de amostras antes e após o tratamento para monitoramento dos parâmetros analíticos e avaliação da eficiência do sistema.

4. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados estão compilados representando cada fase avaliada para os ensaios explorados. A partir dos objetivos definidos para cada estudo de caso, bem como das características dos materiais a serem tratados, os ensaios foram realizados avaliando-se a eficácia dos tratamentos empregados.

4.1. Tratamento de efluente de indústria farmacêutica

Os resultados apresentados na Tabela 1 referem-se à condição otimizada do Sistema Multioxidativo®, utilizando dosagem total de 100 ppm de agente oxidante e temperatura de operação de 45°C. Para avaliação da eficiência do tratamento, foi utilizada como parâmetro principal a DQO, uma vez que este indicador representa de forma direta a carga orgânica presente no efluente. Foram avaliadas amostras coletadas tanto na entrada quanto na saída do sistema existente, permitindo verificar o desempenho do SMO® em diferentes condições de carga orgânica.

Tabela 1 - Caracterização das amostras pré- e pós-tratamento do SMO®

Amostras do Efluente	DQO inicial (mg/L)	DQO após SMO® (mg/L)	Eficiência (%)
Entrada	1.442	1.070	31%
Saída	568	444	41%

Fonte: elaboração própria a partir de dados internos.

Vale ressaltar que a associação do SMO® com carvão ativado proporcionou uma ação complementar entre os processos de oxidação e adsorção, na qual a oxidação promove a degradação de contaminantes orgânicos e o carvão ativado atua na remoção de compostos remanescentes, resultando em maior eficiência global do tratamento. Esse

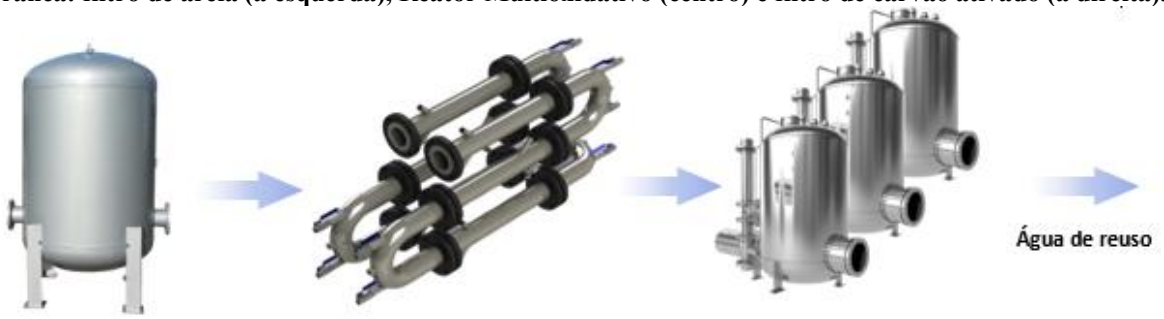
aspecto é particularmente relevante para efluentes farmacêuticos, que frequentemente apresentam compostos orgânicos persistentes e recalcitrantes, resistentes aos tratamentos convencionais, contribuindo para a permanência de carga orgânica residual nos efluentes.

Dessa forma, os resultados indicam que o SMO® pode ser empregado como uma alternativa para complementação de sistemas de tratamento de efluentes farmacêuticos, contribuindo para a redução da carga orgânica, adequação ambiental das correntes tratadas e ampliação do potencial de reuso da água nos processos industriais.

4.2. Tratamento de efluente de indústria produtora de suco de laranja

Os ensaios foram conduzidos em planta piloto composta por etapa de filtração em areia, reator multioxidativo e filtração em carvão ativado, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema representativo do sistema utilizado durante o teste piloto de tratamento da água branca: filtro de areia (à esquerda), Reator Multioxidativo (centro) e filtro de carvão ativado (à direita).



Fonte: autoria própria.

O monitoramento do teste foi realizado por meio de coletas de amostras na entrada do sistema e saída do filtro de carvão ativado, utilizando também a DQO como principal parâmetro de avaliação. Os resultados demonstraram a eficiência do SMO® na redução da carga orgânica do efluente, bem como na melhoria de outros parâmetros físico-químicos relevantes.

Inicialmente, foi realizada uma avaliação de diferentes dosagens de oxidante, visando determinar a condição operacional de maior eficiência. Os resultados, expostos na Tabela 2, indicaram que a dosagem de 125 ppm apresentou o melhor desempenho, promovendo redução de 50% da DQO.

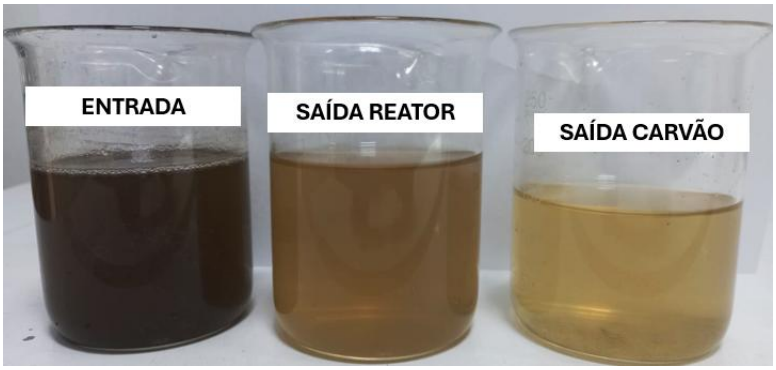
Tabela 2 - Avaliação da DQO em diferentes condições de aplicação do Sistema Multioxidativo®

Dosagem (ppm)	DQO inicial	DQO após SMO®	Eficiência (%)
100		1.093	49%
125	2.164	1.073	50%
150		1.180	45%

Fonte: elaboração própria a partir de dados internos.

Além da redução da DQO, a avaliação visual das amostras evidenciou a melhoria progressiva da qualidade do efluente ao longo das etapas de tratamento.

Figura 2 – Aspecto visual das amostras de entrada, saída do reator multioxidativo e saída do filtro de carvão ativado



Fonte: autoria própria.

Observou-se redução significativa da coloração e da presença de material particulado após a passagem pelo reator multioxidativo, com aperfeiçoamento adicional após a filtração em carvão ativado. Essa observação qualitativa está de acordo com os resultados analíticos obtidos para os parâmetros monitorados (Tabela 3).

Tabela 3 - Caracterização do efluente antes e após tratamento (125 ppm)

Parâmetro	Pré-tratamento	Pós-tratamento	Eficiência (%)
pH	6,8	7,1	-
Condutividade (µS/cm)	2.240	2.100	6%
DQO (mg/L)	2.164	1.093	49%
Turbidez (NTU)	437	90	79%
Dureza (mg$CaCO_3$/L)	333	299	53%
Sólidos Totais (ppm)	2.234	901	60%
Sólidos Dissolvidos (ppm)	968	722	25%
Sólidos Suspensos (ppm)	1.266	179	86%

Fonte: elaboração própria a partir de dados internos.

Os resultados indicam que o SMO® promove a degradação da matéria orgânica presente no efluente e, quando associado à filtração em carvão ativado, contribui para a obtenção de um efluente com melhores características para tratamento subsequente e menor potencial de impacto ambiental sobre os corpos hídricos receptores.

4.3. Tratamento de água de indústria papeleira

Inicialmente, foram realizados ensaios em escala laboratorial para avaliar a eficiência do SMO® na redução dos contaminantes presentes na água branca e definir as condições operacionais para aplicação da tecnologia (Tabela 4). Os resultados demonstraram redução dos parâmetros diretamente associados à formação de depósitos orgânicos e incrustações nos circuitos de processo.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios laboratoriais

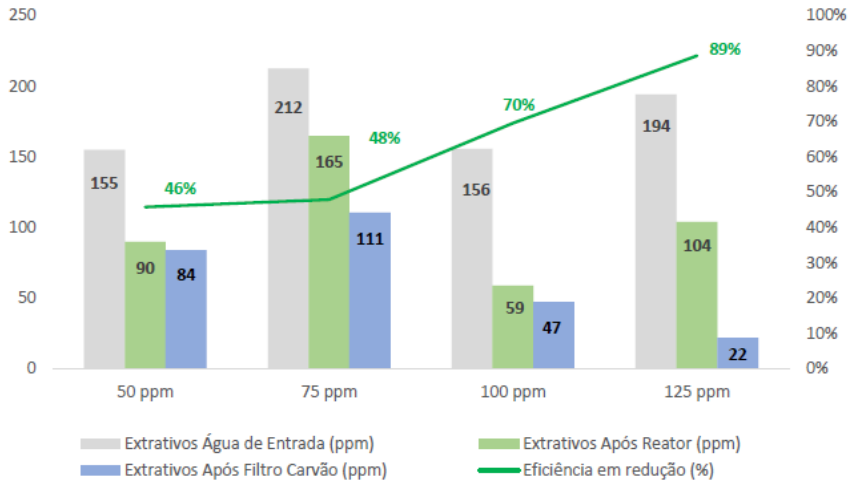
Parâmetros	Amostra inicial	Após SMO®	Eficiência (%)
pH	7,71	7,45	-
Condutividade (µS/cm)	515	503	2%
Turbidez (NTU)	88	45	49%
Extrativos lipossolúveis em DCM (ppm)	140	82	41%
Contagem de contaminantes (milhões/cm^3)	167	98	41%

Fonte: elaboração própria a partir de dados internos.

Após a validação laboratorial, o tratamento foi avaliado em escala piloto diretamente na indústria papeleira, utilizando o sistema composto por filtração, reator multioxidativo e filtração em carvão ativado. O objetivo desta etapa foi verificar a reprodutibilidade dos resultados obtidos em laboratório sob condições reais de operação e avaliar o impacto do tratamento na qualidade da água de processo.

Iniciamos a aplicação do teste avaliando uma rampa de dosagem do produto oxidante, mantendo a vazão de água no sistema piloto de 5m³/h. A Figura 3 apresenta os resultados obtidos em redução dos extrativos após as etapas de saída do reator SMO® e saída do filtro de carvão ativado.

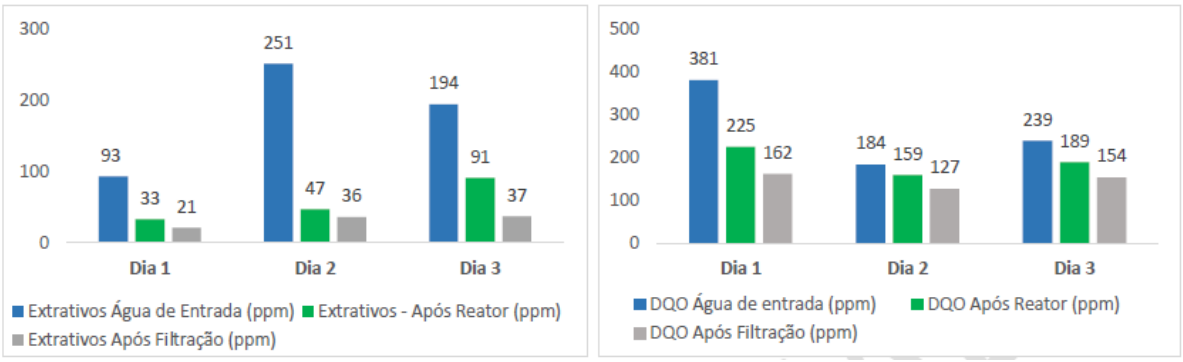
Figura 3 – Remoção de extrativos lipossolúveis – rampa de vazão SMO®



Fonte: autoria própria.

A partir da condição ótima definida (125 ppm de produto oxidante), seguimos a aplicação durante 3 dias consecutivos, avaliando não somente a redução de extrativos lipossolúveis, mas também a redução da DQO. Na Figura 4, é possível observar uma excelente reprodutibilidade na eficiência de remoção da materia orgânica, mantendo-se a eficiência na faixa de 70% a 80%, ao longo dos 3 dias operados.

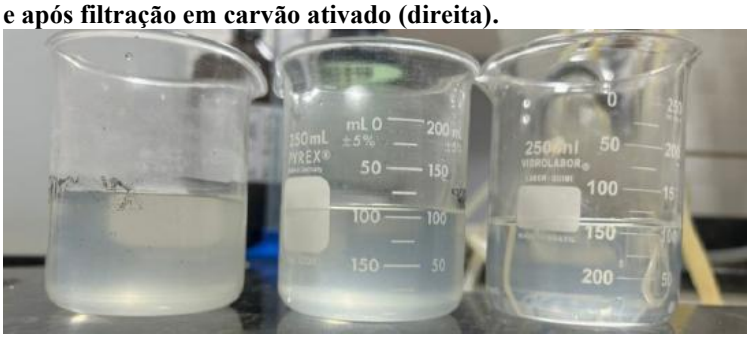
Figura 4 – Aplicação condição otimizada: análise de extrativos lipossolúveis (esquerda) e análise de DQO (direita).



Fonte: autoria própria.

A Figura 5 a seguir apresenta o aspecto visual das amostras coletadas durante a aplicação no dia 1. Observa-se claramente o impacto positivo no tratamento realizado com o SMO®.

Figura 5 – Aspecto visual das amostras coletadas – água de entrada (esquerda), após reator SMO® (centro) e após filtração em carvão ativado (direita).



Fonte: autoria própria.

A execução do teste piloto possibilitou a comprovação da eficiência da tecnologia na remoção da matéria orgânica em tratamento da água branca no processo papeleiro, sendo demonstrado principalmente pela redução no nível de extrativos lipossolúveis e DQO.

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos demonstraram que o SMO® é uma alternativa eficiente para complementação de tratamentos convencionais de águas e efluentes industriais. A tecnologia promoveu a redução da carga orgânica e de contaminantes específicos em diferentes correntes hídricas, contribuindo para a melhoria da qualidade da água e para a mitigação de impactos ambientais.

Além disso, a associação com etapas complementares, como a filtração em carvão ativado, potencializou a eficiência dos tratamentos, ampliando as possibilidades de adequação ambiental, recuperação e reuso da água. Dessa forma, o SMO® apresenta-se como uma solução promissora para otimização da gestão hídrica industrial, alinhando ganhos operacionais, ambientais e de sustentabilidade.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RABELO, M. D. Avaliação da aplicação combinada dos processos foto-Fenton e biológico no tratamento de efluentes de indústria de celulose kraft branqueada. 2005. 116 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

2. KAMALI, M.; KHODAPARAST, Z. *Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment*. Ecotoxicology And Environmental Safety, [s.l.], v. 114, p.326-342, abr. 2015.

3. LINDHOLM-LEHTO, P. C.; KNUUTINEN, J. S.; AHKOLA, H. S. J.; HERVE, S. H. *Refractory organic pollutants and toxicity in pulp and paper mill wastewaters*. Environmental Science And Pollution Research, v. 22, n. 9, p.6473-6499, 4 fev. 2015.

4. GLAZE, W. H.; KANG, J.; CHAPIN, D. H. *The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation*. Ozone: Science & Engineering, [s.l.], v. 9, n. 4, p.335-352, set. 1987. Informa UK Limited.

5. SILVA, T. C. F. Processos oxidativos avançados para tratamento de efluentes de indústria de celulose kraft branqueada. 2007. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Agroquímica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007.

6. TAMBOSI, J. L. Remediação de efluente da indústria de papel e celulose por processos oxidativos avançados e coagulação férrica. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.