



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
INSTITUTO DE QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM QUÍMICA INDUSTRIAL

**AVALIAÇÃO DA OZONIZAÇÃO COMO PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO
NA REMOÇÃO DE MANGANÊS EM EFLUENTE DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE
CASO**

LAURA DEVIDES MARQUES

UBERLÂNDIA-MG
2026

LAURA DEVIDES MARQUES

**AVALIAÇÃO DA OZONIZAÇÃO COMO PROCESSO OXIDATIVO AVANÇADO
NA REMOÇÃO DE MANGANÊS EM EFLUENTE DE MINERAÇÃO: ESTUDO DE
CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso de Química Industrial da Universidade
Federal de Uberlândia como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel, em
Química Industrial.

Orientadora: **Prof^a Dr.^a. Patrícia Angélica
Vieira**

UBERLÂNDIA-MG

2026


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Curso de Graduação em Química Industrial

Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1A, Sala 1A233 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4103 - coqin@iqufu.ufu.br


ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Química Industrial				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - GQB056				
Data:	19/03/2026	Hora de início:	09:00	Hora de encerramento:	10:25
Matrícula do Discente:	12111QID025				
Nome do Discente:	Laura Devides Marques				
Título do Trabalho:	Avaliação da Ozonização como Processo Oxidativo Avançado na Remoção de Manganês em Efluente de Mineração: Estudo de Caso				

A carga horária curricular foi cumprida integralmente?	(x) Sim () Não
--	-------------------

Reuniu-se na sala 204 do bloco 3Q na Universidade Federal de Uberlândia, a Banca Examinadora, designada pelo Coordenador do Curso de Graduação em Química Industrial, assim composta: Prof.^a Dr.^a Patrícia Angélica Vieira - **Orientador(a)**; Prof. Dr. João Flávio da Silveira Petrucci - Titular; Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho - Titular e Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva - Suplente.

Iniciando os trabalhos, o(a) presidente da mesa, Dr.^a Patrícia Angélica Vieira, apresentou a Comissão Examinadora e o(a) candidato(a), agradeceu a presença do público, e concedeu ao(à) discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do(a) discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir o(a) senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

(X) Aprovado(a) Nota: 98,0 pontos
() Reprovado(a)

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **João Flávio da Silveira Petrucci, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/03/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ubirajara Coutinho Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/03/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Angelica Vieira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/03/2026, às 10:28, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7113676** e o código CRC **2A121D50**.

Referência: Processo nº 23117.013749/2026-52

SEI nº 7113676

Dedico este trabalho aos meus pais, Roberto e
Silvana, pelo apoio, carinho e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por me conceder força, sabedoria e saúde para concluir mais esta etapa da minha vida e pela resiliência cultivada ao longo do curso de Química Industrial.

À minha família, especialmente aos meus pais, Silvana e Roberto, sou imensamente grata pelo amor, pelos sacrifícios feitos para que eu pudesse chegar até aqui, pelo apoio incondicional e pelas palavras de incentivo nos momentos mais desafiadores. Vocês foram meu alicerce em cada passo dessa jornada.

À minha irmã Manuela, pelo carinho e companheirismo. Você sempre foi minha força e inspiração, obrigada por sempre torcer por mim.

À minha noiva, Ariane, agradeço por toda paciência, carinho e apoio durante este processo. Sua presença fez toda a diferença.

Aos meus professores, que contribuíram para minha formação, e em especial à minha orientadora, Prof^a Dr^a Patrícia Angélica, pela paciência, dedicação, orientação cuidadosa e por acreditar no meu potencial desde o início deste trabalho.

Aos colegas e amigos que compartilharam comigo os desafios e conquistas da graduação, deixo minha gratidão. Cada conversa, risada e gesto de apoio teve um papel importante na minha trajetória. Um agradecimento especial ao Gabriel Fernandes e à Júlia Bonote, pela amizade e parceria ao longo do curso.

Aos profissionais e instituições que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, seja por meio de suporte técnico, fornecimento de dados ou incentivo à pesquisa, meu sincero reconhecimento.

À banca avaliadora pelo tempo disponibilizado, pelas contribuições e pela construção do diálogo e desenvolvimento da ciência.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta caminhada. Este trabalho é fruto de muitas mãos, trocas de ideias, incentivos e aprendizados compartilhados.

Muito obrigada!

“É justo que muito custe o que muito
vale.”

— Santa Teresa de Ávila

RESUMO

A indústria mineradora enfrenta grandes desafios ambientais relacionados à gestão hídrica de efluentes, especialmente devido à presença de metais dissolvidos que podem persistir mesmo após tratamentos convencionais, que representam riscos severos aos ecossistemas e à saúde pública. Entre esses contaminantes, o manganês destaca-se pela dificuldade de remoção por precipitação química em condições próximas à neutralidade, muitas vezes mostrando-se insuficientes para atender aos rigorosos padrões de lançamento ou geram grandes volumes de resíduos tóxicos. Neste contexto, este trabalho analisa a aplicação da ozonização, classificada como um Processo Oxidativo Avançado (POA), como tecnologia complementar no tratamento de efluentes de mineração. A metodologia baseou-se em uma revisão bibliográfica crítica e na análise de um estudo de caso em escala piloto, onde a ozonização foi aplicada após o tratamento físico-químico convencional (sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS)) para a remoção de manganês em efluentes de mineração de cobre. A revisão da literatura e o estudo de caso analisado demonstram que a ozonização pode atuar de forma sinérgica com sistemas físico-químicos tradicionais, como o processo de lodo de alta densidade (HDS), funcionando como etapa de polimento para adequação final do efluente aos limites ambientais. Além disso, a menor dependência de reagentes químicos e a possibilidade de operação em pH próximo à neutralidade configuram vantagens operacionais relevantes. Contudo, a viabilidade da aplicação em escala industrial depende de fatores como custo de energia elétrica, eficiência da transferência gás-líquido e características específicas do efluente, indicando que o desempenho da tecnologia é fortemente dependente do contexto operacional. Dessa forma, embora a ozonização não substitua integralmente os tratamentos convencionais, ela se consolida como alternativa estratégica para aumentar a eficiência global do sistema de tratamento, reduzir impactos ambientais e contribuir para a sustentabilidade hídrica na mineração. Como contribuição acadêmica, este trabalho integra fundamentos de química oxidativa com a problemática ambiental da remoção de metais em efluentes minerários, destacando a relação entre mecanismos reacionais, desempenho operacional e exigências legais, oferecendo base teórica para futuras investigações experimentais e aplicações em escala real.

Palavras-chave: Manganês. Metais pesados. Mineração. Ozonização. Tratamento de efluentes.

ABSTRACT

The mining industry faces significant environmental challenges related to water management of effluents, especially due to the presence of dissolved metals that can persist even after conventional treatments, posing severe risks to ecosystems and public health. Among these contaminants, manganese stands out due to the difficulty of removal by chemical precipitation under near-neutral conditions, often proving insufficient to meet stringent discharge standards or generating large volumes of toxic waste. In this context, this work analyzes the application of ozonation, classified as an Advanced Oxidation Process (AOP), as a complementary technology in the treatment of mining effluents. The methodology was based on a critical literature review and the analysis of a pilot-scale case study, where ozonation was applied after conventional physicochemical treatment (High-Density Sludge (HDS) system) for the removal of manganese from copper mining effluents. The literature review and the analyzed case study demonstrate that ozonation can act synergistically with traditional physicochemical systems, such as the high-density sludge (HDS) process, functioning as a polishing step for the final adaptation of the effluent to environmental limits. Furthermore, the lower dependence on chemical reagents and the possibility of operation at near-neutral pH represent significant operational advantages. However, the viability of application on an industrial scale depends on factors such as electricity costs, gas-liquid transfer efficiency, and specific effluent characteristics, indicating that the technology's performance is strongly dependent on the operational context. Thus, although ozonation does not entirely replace conventional treatments, it is consolidating itself as a strategic alternative to increase the overall efficiency of the treatment system, reduce environmental impacts, and contribute to water sustainability in mining. As an academic contribution, this work integrates the fundamentals of oxidative chemistry with the environmental problem of metal removal in mining effluents, highlighting the relationship between reaction mechanisms, operational performance, and legal requirements, offering a theoretical basis for future experimental investigations and real-scale applications.

Keywords: Manganese. Heavy metals. Mining. Ozonation. Effluent treatment.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Usos Consuntivos Setoriais e Evaporação Líquida no Brasil.....	24
Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério, com recirculação de água.....	26
Figura 3 - Principais reservas mundiais de Manganês – 2022.....	30
Figura 4 - Diagrama de estabilidade do manganês.....	31
Figura 5 - Processo de oxidação à base de ozônio.....	46
Figura 6 - Fluxograma do processo de oxidação e remoção de manganês por ozonização.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais Tecnologias Aplicadas ao Tratamento de Efluentes de Mineração	
.....	35
Tabela 2 - Comparação de processos aplicáveis à remoção de manganês em efluentes de mineração	
.....	36
Tabela 3 - Principais tipos de Processos Oxidativos Avançados (POAs)	39
Tabela 4 - Limites máximos de metais pesados para águas doces Classe 2 e para lançamento de efluentes segundo as Resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011.	50
Tabela 5 - Comparativo de custos operacionais entre Ozonização e Oxidação por Ferrato.	
.....	75
Tabela 6 - Limitações do Estudo de Caso Analisado	78

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS.....	18
1.1.1 Objetivo Geral.....	18
1.1.2 Objetivos Específicos.....	18
2 METODOLOGIA	20
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
3.1 Uso da água na indústria mineradora	23
3.2 Processo Produtivo e Geração de Efluentes	25
3.3 Aspectos Químicos, Ambientais e Toxicológicos do Manganês	29
3.4 Tecnologias Convencionais de Tratamento de Efluentes da Mineração: Remoção de Manganês	33
3.5 Processos Oxidativos Avançados (POAs).....	38
3.6 O Uso do Ozônio no Tratamento de Efluentes da Mineração	41
3.7 Legislação e Normas Ambientais para Atividades Mineradoras	49
3.8 Aspectos Econômicos e Competitividade	54
4 ESTUDO DE CASO	57
4.1 Metodologia de Análise do Estudo de Caso.....	57
4.2 Contextualização Técnica do Problema	58
4.3 Análises dos Resultados.....	60
4.3.1 Análise da Aplicação da Ozonização em Efluente de Mineração de Cobre	60
4.3.2 Análise do Sistema Experimental e Metodologia Analítica dos Resultados.....	65
4.3.3 Análise dos Mecanismos de Reação e Fundamentação Química.....	66
4.3.4 Análise da Influência dos Parâmetros Operacionais na Eficiência da Remoção	70
4.3.5 Comportamento de Outros Poluentes e Análise de Viabilidade Econômica	74
4.4 Análise Crítica do Estudo de Caso.....	78
4.5 Conclusão do Estudo de Caso	79
5 CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO	80
6 REFERÊNCIAS	82

1 INTRODUÇÃO

A água é reconhecida como um recurso natural finito e de elevada relevância estratégica para o desenvolvimento socioeconômico, desempenhando papel essencial na manutenção da vida e no funcionamento de diversos setores produtivos. Todavia, o crescimento populacional, associado à intensificação das atividades industriais, agrícolas e urbanas, tem ampliado significativamente a demanda por recursos hídricos. Como consequência, observa-se o aumento da pressão sobre mananciais superficiais e subterrâneos, contribuindo para cenários de escassez hídrica e comprometimento da qualidade dos corpos d'água (ANA, 2022).

Nesse contexto, a gestão sustentável dos efluentes industriais consolida-se como um eixo estruturante das estratégias de sustentabilidade corporativa e de conformidade ambiental. Para além do atendimento aos padrões legais de lançamento, torna-se tecnicamente imprescindível a adoção de sistemas de tratamento capazes de promover elevada eficiência na remoção de carga orgânica, nutrientes e contaminantes específicos, aliados à incorporação de tecnologias orientadas ao reuso hídrico. Essa abordagem integrada favorece a redução da demanda por captação em fontes primárias, aumenta a eficiência no uso da água ao longo do processo produtivo e contribui para a mitigação dos impactos ambientais associados às operações industriais (IBRAM, 2022).

Um setor produtivo que merece destaque no uso da água e elevada geração de efluentes de alto grau de toxicidade é o beneficiamento de minérios. Vale ressaltar, que o Brasil se destaca no cenário mundial como uma potência na indústria extrativa mineral, setor que desempenha um papel fundamental na balança comercial e no Produto Interno Bruto (PIB) do país (IBRAM, 2022).

A mineração é intrinsecamente uma atividade de alto impacto ambiental, caracterizada pelo consumo intensivo de água em etapas de beneficiamento, transporte de polpa e controle de poeira. Além do volume consumido, a geração de efluentes complexos representa um desafio técnico significativo, uma vez que as águas residuais da mineração frequentemente carregam elevadas cargas de sólidos suspensos, reagentes químicos de flotação e, principalmente, metais pesados dissolvidos provenientes das rochas mineralizadas (JING, *et al*, 2023; MATEBESE, *et al*, 2024).

Entre os poluentes associados à mineração, os metais dissolvidos merecem destaque por sua persistência e potencial toxicidade. Elementos como ferro, cobre, zinco e manganês podem permanecer na fase líquida mesmo após etapas convencionais de neutralização e precipitação química. Em especial, o manganês apresenta comportamento químico que dificulta sua remoção

por métodos tradicionais, sobretudo em faixas de pH próximas à neutralidade, frequentemente adotadas para minimizar custos operacionais e evitar impactos ambientais adicionais. Esse cenário evidencia a necessidade de tecnologias complementares capazes de promover a transformação química dessas espécies para formas mais facilmente removíveis (SEO et al., 2010; BAROLLI et al., 2016; MATEBESE et al., 2024).

Para superar as deficiências dos métodos convencionais, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) tem se destacado como forma de tratamento mais efetivo de efluentes com altas cargas orgânicas e de elevada complexidade e toxicidade. Essas tecnologias baseiam-se na geração de espécies químicas altamente reativas, principalmente o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que apresenta um potencial de oxidação extremamente elevado ($E^\circ \approx 2,8 \text{ V}$), superior ao da maioria dos oxidantes convencionais, como o ozônio ($E^\circ \approx 2,07 \text{ V}$), o peróxido de hidrogênio ($E^\circ \approx 1,78 \text{ V}$) e o oxigênio molecular ($E^\circ \approx 1,23 \text{ V}$). A aplicação dos POAs permite a degradação de poluentes orgânicos recalcitrantes e a oxidação de metais dissolvidos para estados de valência que favorecem sua precipitação, oferecendo uma rota de tratamento mais eficiente, rápida e com menor geração de subprodutos perigosos em comparação às técnicas tradicionais (AZIZ; MUSTAFA, 2024; COSTA, 2024).

Dentre as diversas modalidades de POAs, a ozonização destaca-se como uma tecnologia promissora e versátil para o tratamento de efluentes minerários. O ozônio (O_3) atua tanto por oxidação molecular direta quanto pela geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies de alto potencial redox ($E^\circ \approx 2,8 \text{ V}$), o que amplia sua eficiência na degradação de contaminantes metálicos e orgânicos em efluentes de mineração. Sua capacidade de oxidar metais como ferro e manganês, transformando-os em óxidos insolúveis de fácil remoção, aliada à sua eficácia na descoloração e desinfecção do efluente, torna-o uma ferramenta estratégica para modernizar as estações de tratamento de águas residuais da mineração (AZIZ; MUSTAFA, 2024; COSTA, 2024).

A ozonização aplicada a efluentes minerários pode promover a oxidação de Mn^{2+} a Mn(IV) , favorecendo a formação de óxidos insolúveis passíveis de remoção por sedimentação ou filtração subsequente. A eficiência desse processo depende de variáveis como pH, dosagem de ozônio, tempo de contato e características da matriz do efluente, incluindo alcalinidade e presença de competidores oxidáveis. Em meio alcalino, a decomposição do ozônio é acelerada, intensificando a formação de radicais hidroxila; em meio ácido, predomina a oxidação direta molecular (GOTTSCALK; LIBRA; SAUPE, 2010; HAO et al., 2025; RIAD et al., 2025). A compreensão desses mecanismos é fundamental para avaliar a viabilidade técnica do processo.

A viabilidade da ozonização também dialoga diretamente com os conceitos de Economia Circular e sustentabilidade industrial. Ao promover um tratamento de alta eficiência, capaz de reduzir a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e remover metais traço, essa tecnologia facilita a implementação de sistemas de circuito fechado e “Descarga Líquida Zero” (ZLD - *Zero Liquid Discharge*) (NDLOVU; ADEWUYI, 2025). Dessa forma, o efluente tratado pode ser reintegrado ao processo produtivo, diminuindo o uso desnecessário de recursos hídricos para a atividade de mineração e transformando o gerenciamento de resíduos de um centro de custo ambiental para um ativo de eficiência de processo.

Apesar do amplo uso da ozonização para degradação de compostos orgânicos, sua aplicação voltada especificamente para a remoção de metais dissolvidos em efluentes de mineração ainda é menos explorada, especialmente sob a ótica integrada entre mecanismos reacionais, desempenho operacional e viabilidade técnica. Assim, torna-se relevante reunir e analisar criticamente informações que relacionem os fundamentos da química oxidativa à prática do tratamento de efluentes minerários.

Nesse sentido, este trabalho contribui academicamente ao integrar o levantamento de fundamentos de química oxidativa com a problemática ambiental da remoção de manganês em efluentes de mineração, enfatizando os mecanismos químicos envolvidos na ozonização e sua relação com a eficiência do processo. Além disso, a análise crítica de estudos recentes permite identificar lacunas operacionais e parâmetros-chave para otimização, fornecendo base teórica para aplicações futuras em escala industrial.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar a aplicação da ozonização como Processo Oxidativo Avançado no tratamento de efluentes de mineração contendo manganês dissolvido, com base em revisão bibliográfica estruturada e análise de estudo de caso, correlacionando mecanismos químicos, parâmetros operacionais e conformidade com a legislação ambiental brasileira.

1.1.2 Objetivos Específicos

São objetivos específicos deste trabalho:

- **Descrever** os mecanismos de oxidação do manganês por ozônio, distinguindo rotas direta e indireta e suas dependências em relação ao pH e ao potencial redox do meio.
- **Sistematizar** dados da literatura referentes à influência de parâmetros operacionais (pH, dosagem de O₃, tempo de contato e características do efluente) na eficiência de remoção.
- **Comparar**, com base em dados secundários, a ozonização e o tratamento convencional por precipitação química quanto à capacidade de atender aos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira.
- **Analisar** criticamente estudo de caso envolvendo a aplicação da ozonização como etapa complementar ao processo HDS, avaliando desempenho e estabilidade operacional.
- **Discutir** condicionantes técnicos, limitações e desafios para aplicação em escala industrial.

2 METODOLOGIA

O presente trabalho caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de abordagem qualitativa com análise técnica de dados secundários, e de natureza exploratória e descritiva, tendo como foco a avaliação da ozonização como Processo Oxidativo Avançado (POA) no tratamento de efluentes de mineração contendo manganês dissolvido.

A estrutura metodológica foi organizada em três etapas principais: (i) revisão bibliográfica estruturada, (ii) seleção e análise crítica de estudo de caso e (iii) integração interpretativa dos resultados à luz dos fundamentos da química oxidativa e da engenharia de processos.

A revisão bibliográfica foi conduzida de forma estruturada entre setembro de 2025 e fevereiro de 2026, contemplando publicações disponíveis no período de 2006 a 2025, de modo a priorizar o estado da arte da temática. Foram consideradas publicações nos idiomas português e inglês.

As buscas foram realizadas nas seguintes bases de dados científicas:

- *Journal of Environmental Chemical Engineering*
- *Journal of Hazardous Materials*
- *Water Research*
- *Science of the Total Environment*
- *Journal of Cleaner Production*
- *Chemical Engineering Journal*
- *Scientific African*
- *REM – Revista Escola de Minas*
- *Química Nova*
- *MDPI Journals*
- *SpringerLink*
- *ScienceDirect*
- *Portal de Periódicos CAPES*

Adicionalmente, foram consultados documentos técnicos, normas e legislações ambientais, incluindo resoluções do *Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)*, bem como relatórios e publicações institucionais da *Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico*, do *Instituto Brasileiro de Mineração* e do *Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos*

Recursos Naturais Renováveis, relacionadas à gestão de efluentes e às atividades do setor minerário.

As estratégias de busca empregaram combinações de palavras-chave em português e inglês, associadas por operadores booleanos (AND/OR), tais como:

- *ozonização e tratamento de efluentes*
- *advanced oxidation processes and mining wastewater*
- *manganese removal and ozonation*
- *mine effluent and heavy metals*
- *processos oxidativos avançados e mineração*

Na segunda etapa, realizou-se a análise de um estudo de caso da literatura sobre a aplicação da ozonização em efluente de mineração com alta concentração de manganês. A escolha desse estudo de caso foi conduzida de forma criteriosa, com o objetivo de garantir representatividade técnica, confiabilidade científica e aderência às condições reais de operação industrial.

Para a seleção do estudo, foram adotados os seguintes critérios:

- Publicação recente, assegurando atualidade e alinhamento com o estado da arte;
- Aplicação da ozonização em efluente real de mineração;
- Utilização do processo em escala piloto, possibilitando maior aproximação com condições operacionais industriais;
- Disponibilidade de dados experimentais detalhados, incluindo pH, dosagem de ozônio, tempo de contato e características do efluente; e
- Avaliação integrada dos aspectos químicos, operacionais e econômicos do processo.

Com base nesses critérios, foi selecionado o estudo de Hao et al. (2025), que investigou a aplicação da oxidação avançada por ozônio como etapa complementar ao tratamento convencional por Lodo de Alta Densidade (High Density Sludge – HDS) para a remoção de manganês em efluente de mineração de cobre. Os dados apresentados no estudo de caso foram reorganizados, interpretados e discutidos à luz dos princípios da química oxidativa, com ênfase na conversão do manganês dissolvido (Mn^{2+}) em formas insolúveis, passíveis de remoção por processos de separação sólido-líquido. A partir dessa análise, realizou-se uma integração crítica dos resultados, relacionando os mecanismos reacionais envolvidos com aspectos operacionais, ambientais e econômicos do processo. Essa abordagem incluiu a comparação da ozonização com métodos convencionais de tratamento, a discussão de sua aplicação como etapa

complementar de polimento e a avaliação do potencial de atendimento à legislação ambiental brasileira.

Assim, a metodologia permitiu organizar e interpretar o conhecimento existente de forma integrada, conectando fundamentos químicos, desempenho do processo e viabilidade prática da ozonização no tratamento de efluentes da mineração.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

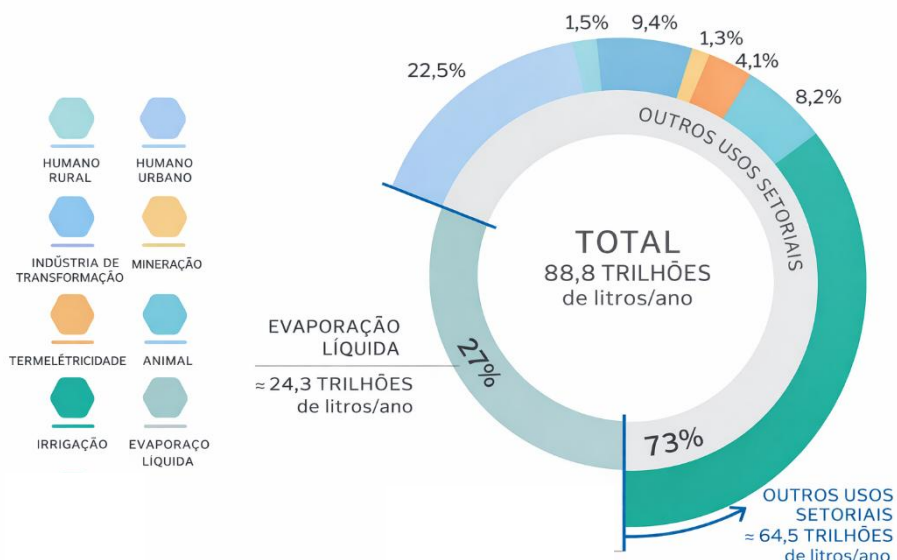
3.1 Uso da água na indústria mineradora

A água é um recurso natural indispensável à vida e apresenta ampla aplicação nas atividades humanas, abrangendo desde o consumo e a agricultura até a geração de energia e o transporte. Os usos da água podem ser divididos em consuntivos e não consuntivos. Os usos consuntivos envolvem a retirada e o consumo parcial ou total da água, como ocorre nas atividades de irrigação e nos processos industriais. Já os usos não consuntivos correspondem àqueles em que a água não é efetivamente consumida, mas sua presença e disponibilidade no ambiente são essenciais para o desenvolvimento da atividade, como acontece nos casos de navegação, geração de energia e recreação (ANA, 2022).

Na indústria mineradora, sua relevância é igualmente destacada, pois participa de praticamente todas as etapas do processo produtivo, desempenhando funções essenciais na extração, no beneficiamento, no transporte de materiais, no controle de poeira, na disposição de rejeitos e nas ações de recuperação ambiental. Além de garantir a eficiência operacional e a segurança das minas, o uso intensivo desse recurso representa um dos maiores desafios ambientais do setor, tornando a mineração uma das atividades industriais com maior potencial de impacto sobre os recursos hídricos, sobretudo em regiões com escassez ou vulnerabilidade ambiental (IBRAM, 2022).

De acordo com a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), a retirada total de água no Brasil é estimada em cerca de 90 trilhões de litros por ano, sendo que o setor de mineração representa aproximadamente 1,3% desse total, conforme ilustrado na Figura 1. As projeções apontam que, até 2040, a demanda de água por setor deverá aumentar cerca de 30% em relação aos níveis observados em 2022 (ANA, 2022).

Figura 1 - Usos Consuntivos Setoriais e Evaporação Líquida no Brasil



Fonte: Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2022).

Segundo Matebese et al. (2024), a mineração consome grandes volumes de água em operações de lavagem, separação e flotação de minerais. As águas residuais geradas contêm compostos orgânicos tóxicos, reagentes de flotação e metais pesados, frequentemente em concentrações superiores aos limites estabelecidos pela Organização Mundial da Saúde (OMS). A liberação inadequada desses efluentes pode causar poluição de corpos d'água, acidificação de solos e contaminação de ecossistemas aquáticos, comprometendo a saúde humana e ambiental.

A escassez hídrica é outro fator crítico, especialmente em regiões áridas e semiáridas onde grande parte das minas está localizada. Ndlovu e Adewuyi (2025) destacam que a indústria mineradora da África do Sul — país que figura entre os 30 mais secos do mundo — enfrenta sérios desafios para equilibrar a demanda por água com a sustentabilidade ambiental. Esse cenário é semelhante ao de outras regiões mineradoras do planeta, evidenciando a necessidade de estratégias mais eficientes de gestão hídrica, baseadas em princípios de economia circular e reuso.

Nesse contexto, observa-se o crescente uso de tecnologias voltadas à recuperação e ao reuso da água nas operações mineradoras. Processos como dessalinização, cristalização, separação por membranas e adsorção têm alcançado taxas de recuperação superiores a 95% da água utilizada (MATEBESE et al., 2024), contribuindo significativamente para a redução do consumo de água nova e a mitigação dos impactos ambientais dos efluentes gerados.

Paralelamente, a aplicação de Processos Oxidativos Avançados (POAs) tem se mostrado promissora no tratamento de águas residuais da mineração. Conforme Shi *et al.* (2023), esses processos promovem a degradação de contaminantes orgânicos refratários e a mineralização de compostos tóxicos por meio de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila e sulfato. Além de melhorar a qualidade da água tratada, os POAs reduzem os riscos de poluição secundária e contribuem para metas de neutralidade de carbono e sustentabilidade ambiental.

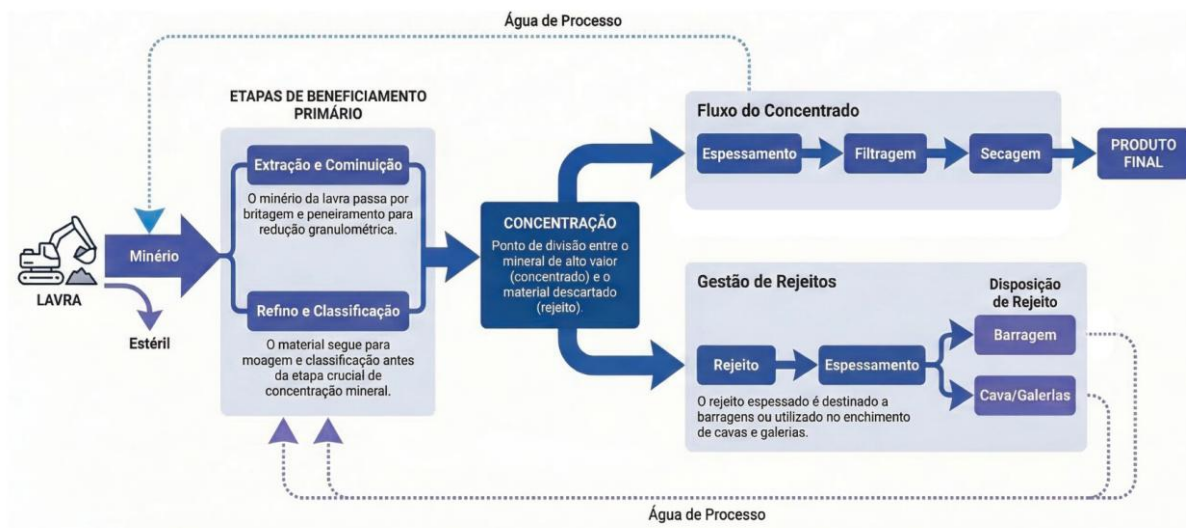
A busca por práticas mais sustentáveis tem levado o setor minerador a adotar sistemas de recirculação interna da água, tecnologias de descarga líquida zero (ZLD) e monitoramento contínuo da qualidade dos efluentes. Tais medidas, conforme apontam Ndlovu e Adewuyi (2025), estão alinhadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas, especialmente os de número 6 (Água Potável e Saneamento) e 12 (Consumo e Produção Responsáveis).

Portanto, a gestão eficiente da água na mineração deve ser compreendida não apenas como uma exigência regulatória, mas como um pilar estratégico da sustentabilidade e competitividade do setor. O avanço das tecnologias de tratamento, aliado a políticas de uso racional e de reaproveitamento hídrico, representa um caminho promissor para reduzir os impactos ambientais e assegurar a continuidade das atividades mineradoras de forma responsável, eficiente e resiliente.

3.2 Processo Produtivo e Geração de Efluentes

O processo produtivo na mineração, conforme definido pela Organização das Nações Unidas (ONU), envolve a extração, elaboração e beneficiamento de minerais presentes na natureza em estado sólido, líquido ou gasoso, abrangendo desde a lavra em minas subterrâneas e de superfície até o preparo do minério para torná-lo comercializável (DNPM-PE, [s.d.]). Esse conjunto de etapas — que inclui extração, britagem, moagem, concentração e disposição de rejeitos — demanda grandes volumes de água e energia, tornando a gestão hídrica um elemento essencial para o funcionamento das indústrias mineradoras (ADEWUYI; AHMED, 2020). A Figura 2 apresenta um fluxograma típico dessas etapas, ilustrando a trajetória do minério ao longo do processo de beneficiamento e destacando os pontos de recirculação de água e geração de rejeitos.

Figura 2 - Fluxograma típico de tratamento de minério, com recirculação de água.



Fonte: Elaboração própria com base em Martini, 2014.

Após o processamento ilustrado no fluxograma, a mineração gera dois grupos principais de resíduos: estéreis e rejeitos. Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), ambos são classificados como resíduos de mineração por serem produzidos durante a pesquisa, lavra ou beneficiamento. A ABNT NBR 13029:2006 define estéril como o material não aproveitável economicamente removido para permitir o acesso ao minério, enquanto a ABNT NBR 13028:2006 caracteriza rejeito como o material descartado após o beneficiamento.

A Resolução CNRH nº 29/2002 complementa que o estéril é gerado e descartado antes do beneficiamento, e o rejeito, após esta etapa. Os estéreis são formados principalmente no decapeamento da jazida e geralmente são dispostos em pilhas ou reaproveitados em atividades como reaterro de áreas mineradas e preenchimento de tanques de decantação. Quando projetadas com critérios geotécnicos adequados, essas pilhas podem se estabilizar e integrar-se à paisagem local (ESPÓSITO, 2000).

Os rejeitos, por sua vez, são constituídos por uma mistura sólida e líquida, com teores entre 30% e 50% de sólidos, apresentando baixa densidade, elevada compressibilidade e reduzida capacidade de suporte (ARAÚJO, 2006; LOZANO, 2006). De acordo com a ABNT NBR 10.004, esses resíduos podem ser classificados como inertes ou não inertes, dependendo de sua solubilidade e comportamento químico. Em muitos casos, os rejeitos de mineração são considerados inertes por não solubilizarem componentes acima dos padrões de potabilidade, exceto parâmetros como turbidez, cor e dureza. Apesar disso, exigem estruturas de contenção

seguras, como barragens de rejeito ou sistemas de empilhamento drenado, para evitar riscos ambientais (MARTINI, 2014).

Ao mesmo tempo, essas operações geram efluentes industriais complexos, geralmente contendo sólidos suspensos, metais pesados, sulfatos, sais e diversos reagentes utilizados no beneficiamento mineral. Como destacam Matebese *et al.* (2024), o grande volume de água empregado nessas etapas, aliado às reações geoquímicas desencadeadas pela exposição dos minerais ao ar e à umidade, favorece a formação de efluentes com elevadas concentrações de contaminantes. Caso não recebam tratamento adequado, esses efluentes podem causar severos impactos ambientais, especialmente sobre corpos hídricos e ecossistemas localizados nas proximidades das atividades mineradoras (VOUDOURIS; VOUTSA, 2012).

A complexidade desses efluentes não se limita à presença de múltiplos contaminantes, mas envolve interações entre pH, potencial redox e especiação metálica, fatores que influenciam diretamente a eficiência das etapas convencionais de tratamento. Metais como manganês, por exemplo, podem permanecer solúveis mesmo após processos de neutralização, especialmente em faixas de pH próximas à neutralidade, dificultando o atendimento aos padrões regulatórios (SPARROW; UREN, 2014; XU *et al.*, 2022).

A composição destes efluentes varia bastante conforme o tipo de minério e o método de beneficiamento. Staszak e Wieszczycka (2023) explicam que processos como flotação, lixiviação e separações hidrometalúrgicas tendem a solubilizar ou concentrar metais como Fe, Mn, Cu, Zn, Ni e Pb, que acabam indo para a água residual. Essa variabilidade impõe limitações significativas aos sistemas convencionais baseados exclusivamente em precipitação química, uma vez que a eficiência de remoção depende fortemente do controle rigoroso do pH e da ausência de agentes complexantes. Em cenários de flutuação na composição do efluente, tais sistemas podem apresentar instabilidade operacional e aumento na geração de lodo.

Entre os principais desafios ambientais da mineração, a drenagem ácida (*acid mine drainage* – AMD) segue sendo um dos mais críticos. Ela surge quando minerais sulfetados são oxidados durante a lavra e o beneficiamento, gerando efluentes com pH muito baixo e alta solubilização de metais. Tong *et al.* (2021) reforçam que a AMD continua sendo uma das maiores fontes de poluição hídrica em regiões mineradas. Farhan *et al.* (2023) destacam que, diante das concentrações tóxicas de metais presentes nesses efluentes, é essencial contar com técnicas capazes de remover ou até recuperar esses elementos. Além da acidez elevada, a AMD favorece a solubilização de manganês em sua forma divalente (Mn^{2+}), espécie altamente estável em meio aquoso e de difícil remoção por precipitação simples. Essa característica reforça a

necessidade de etapas oxidativas capazes de converter Mn^{2+} em formas insolúveis, como MnO_2 (NORDSTROM, 2011; USEPA, 2014).

Diante desse cenário, diversas tecnologias avançadas de tratamento têm sido estudadas. Matebese *et al.* (2024) apresentam uma revisão abrangente que reúne soluções como precipitação química, adsorção, separação por membranas e sistemas híbridos voltados à remoção e recuperação de metais e sais de efluentes mineiros. Os autores também discutem processos como SAVMIN®, SPARRO® e DESALX®, que permitem recuperar simultaneamente água e sais, alinhando o tratamento aos princípios da economia circular.

A tecnologia de membranas também vem ganhando destaque como uma opção eficiente para tratar águas residuais da mineração. Staszak e Wieszcycka (2023) mostram que sistemas como osmose reversa, eletrodialise e membranas cerâmicas têm apresentado ótimos resultados na remoção de metais pesados, produzindo água tratada apta ao reúso industrial. Uma revisão recente publicada na *Scientific African* reforça que avanços no design e nos materiais das membranas têm aumentado a seletividade, reduzido a incrustação e melhorado o desempenho no processamento de efluentes complexos (ZULU *et al.*, 2025).

Embora tecnologias como osmose reversa e eletrodialise apresentem elevada eficiência na remoção de metais dissolvidos, seu custo energético, suscetibilidade à incrustação e necessidade de pré-tratamento rigoroso limitam sua aplicação isolada em efluentes de alta carga sólida. Da mesma forma, processos de precipitação química, embora economicamente acessíveis, geram volumes significativos de lodo metálico, implicando desafios de disposição final. Nesse contexto, tecnologias oxidativas emergem como alternativas intermediárias capazes de promover transformação química do contaminante antes de sua separação física (FU; WANG, 2011; SHANNON *et al.*, 2008; WANG; CHEN, 2009).

Além da remoção de contaminantes, cresce o interesse em recuperar recursos presentes nos efluentes. Farhan *et al.* (2023) destacam que nanocompósitos e outros materiais catalíticos vêm permitindo recuperar metais de alto valor, enquanto Jadaa e Mohammed (2023) apontam que adsorventes avançados podem reduzir a carga tóxica dos metais, diminuindo a necessidade de descarte e reforçando estratégias de economia circular.

A literatura também chama atenção para os impactos ambientais associados ao descarte inadequado de efluentes. Guzmán *et al.* (2022) mostram, por meio de análises hidrogeoquímicas, que cursos d'água próximos a áreas de mineração apresentam concentrações anormais de Zn, Cu, As e Mn, indicando que a ausência de tratamentos eficazes favorece a contaminação tanto de águas superficiais quanto subterrâneas. Esses resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo e de políticas ambientais mais rigorosas.

Apesar dos avanços, ainda existem desafios importantes, desde a viabilidade econômica e a escalabilidade dos processos até a redução de resíduos secundários, como os lodos ricos em metais. Matebese *et al.* (2024) ressalta que muitas tecnologias avaliadas têm grande potencial, mas ainda precisam evoluir para alcançar o nível de maturidade necessário para aplicações em larga escala.

Entre esses desafios, destaca-se a necessidade de processos que conciliem eficiência na remoção de metais dissolvidos, redução na geração de resíduos secundários e viabilidade operacional em escala industrial. A aplicação de processos oxidativos, como a ozonização, insere-se nesse contexto como alternativa potencial para superar limitações associadas à precipitação convencional e aos sistemas de membranas (DHAMORIKAR *et al.*, 2024; MAHMOODI *et al.*, 2025; RAN *et al.*, 2025; ZHENG *et al.*, 2025).

3.3 Aspectos Químicos, Ambientais e Toxicológicos do Manganês

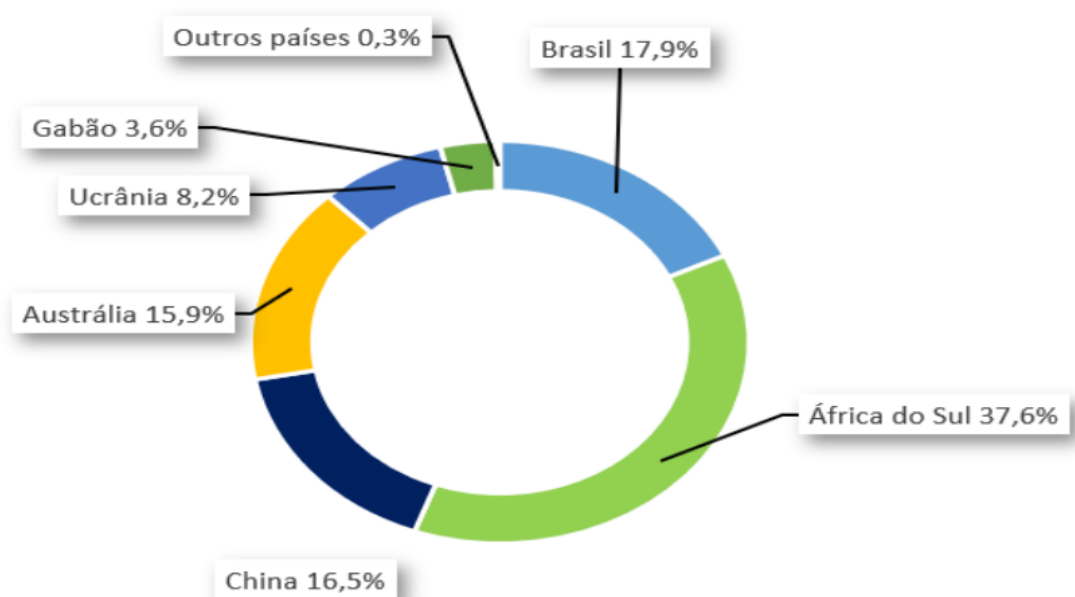
O manganês (símbolo Mn, número atômico 25) é um metal de transição amplamente distribuído na crosta terrestre, representando cerca de 0,1 % da massa total e presente em diversas formas mineralógicas como pirolusita, manganita, hausmannita e rodocrosita. Ele é o terceiro metal de transição mais abundante na crosta terrestre, sua concentração na água do mar é de cerca de 10 mg/L, no solo varia de 7 mg/kg a 9000 mg/kg (média de 440 mg/kg) e na atmosfera é de cerca de 0,1 µg/m³ (BAO, H. *et al.* 2025).

Na natureza, apresenta-se como um metal cinza-escuro, duro e quebradiço (CRQ-SP, 2022). Suas principais valências incluem +2, +3, +4, +6 e +7, sendo que em águas com pH entre 4 e 7 predomina a forma Mn²⁺, enquanto estados de oxidação mais elevados se formam em pH mais alcalino ou em decorrência da oxidação promovida por microrganismos (WU *et al.*, 2022). Além de sua ocorrência natural, o manganês é um elemento estrategicamente importante devido às suas aplicações industriais em ferrocimento, ligas metálicas, baterias, fertilizantes e processos químicos, o que acarreta uma crescente exploração de minérios e um consequente maior potencial de contaminação ambiental (BAO, H. *et al.* 2025).

De acordo com dados da Agência Nacional de Mineração (ANM), em 2022 as reservas brasileiras de manganês somaram aproximadamente 230 milhões de toneladas (Mt). No mesmo ano, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) estimou que as reservas globais de manganês contido alcançaram cerca de 1,9 bilhão de toneladas. A distribuição dessas reservas pelo mundo, em milhões de toneladas, foi a seguinte: África do Sul (600), Austrália (500), China (280), Gabão (61), Índia (34) e outros países (195). A Figura 3 apresenta a

participação percentual de cada região na oferta mundial de manganês.

Figura 3 - Principais reservas mundiais de Manganês – 2022

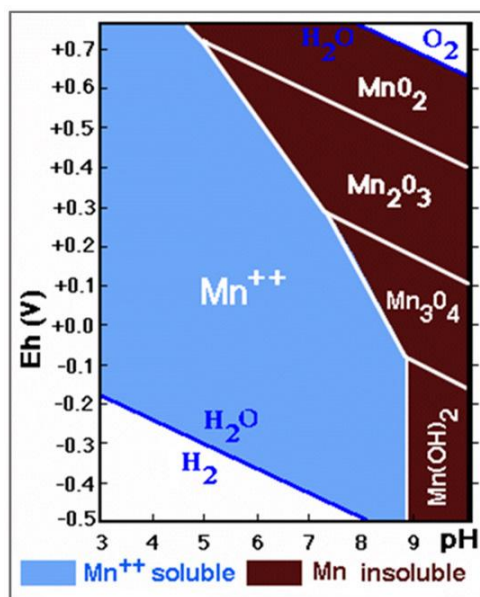


Fonte: Mundo: USGS Mineral Commodity Summaries 2023. Brasil: ANM

No cenário industrial, a China se destaca como o maior produtor, consumidor e exportador mundial de produtos de Mn eletrolítico. Embora o manganês tenha desempenhado papel importante no desenvolvimento industrial e no crescimento econômico regional, sua produção também tem sido associada a impactos ambientais significativos. Entre os resíduos gerados, o Resíduo de Manganês Eletrolítico (EMR) é particularmente preocupante. Este resíduo surge durante a produção de Mn eletrolítico, em processos que envolvem lixiviação com ácido sulfúrico concentrado, neutralização com amônia e filtração por prensagem em filtros de placas, e tem sido identificado como fonte de poluição química relevante em áreas próximas às unidades de produção (WU et al., 2022).

O manganês pode estar presente como Mn^{2+} solúvel, em formas insolúveis como Mn^{3+} e Mn^{4+} , ou associado a partículas coloidais ligadas a substâncias húmicas. Sua presença depende de fatores como pH, potencial redox (Eh), oxigênio dissolvido, temperatura, alcalinidade e presença de compostos complexantes. (ILAVSKÝ et al., 2025). Diagramas de Pourbaix, como o apresentado na Figura 4, permitem prever a predominância relativa de cada espécie em função do pH e do Eh.

Figura 4 - Diagrama de estabilidade do manganês.



Fonte: ILAVSKÝ et al., 2025

No diagrama, observa-se que Mn^{2+} predomina em pH entre 3 e 8 e potenciais redox baixos, enquanto espécies sólidas como MnO_2 e Mn(OH)_2 tornam-se estáveis em pH mais elevado ou em condições oxidantes. A oxidação de Mn^{2+} para MnO_2 em água natural ocorre lentamente quando apenas oxigênio está disponível, acelerando significativamente em pH acima de 8 ou com a presença de oxidantes químicos como cloro, dióxido de cloro, ozônio, permanganato ou ferrato (ILAVSKÝ et al., 2025).

A presença de manganês em efluentes industriais é frequentemente associada à mineração e processos metalúrgicos, especialmente no contexto de drenagens ácidas de minas (AMD – *acid mine drainage*) e efluentes provenientes de resíduos de manganês eletrolítico (EMW – *electrolytic manganese wastewater*). Esses tipos de efluentes podem apresentar concentrações de Mn significativamente elevadas, muito superiores às encontradas em águas subterrâneas (0,5–2,0 mg/L), devido à lixiviação de minerais e rejeitos durante chuvas ou drenagem inadequada. Esses resíduos industriais podem ocorrer como efluentes líquidos diretamente lançados ou lixiviados de pilhas de rejeitos, levando manganês e outros metais pesados a corpos hídricos adjacentes. Esse processo é intensificado em áreas com práticas de gestão ambiental insuficientes, aumentando os riscos de contaminação e de impactos ecológicos (BAO, H. et al. 2025).

Em concentrações normalmente encontradas em águas naturais, o manganês (Mn) não representa risco direto à saúde humana. No entanto, mesmo em níveis baixos, ele pode afetar significativamente as propriedades sensoriais da água, de forma semelhante ao ferro. Estudos

indicam que concentrações acima de 0,1 mg/L podem alterar o sabor, e materiais em contato com a água podem se tornar coloridos, especialmente na presença de bactérias produtoras de manganês. Por esse motivo, os teores de Mn na água potável e em processos industriais são rigorosamente limitados. No Brasil, o Decreto nº 91/2023 estabelece um limite máximo de 0,05 mg/L para manganês na água potável, enquanto a recomendação para águas superficiais é de 0,3 mg/L (Decreto Governamental nº 269/2010) (ILAVSKÝ et al., 2025).

Embora essencial como micronutriente, a exposição prolongada a altos níveis de manganês pode causar toxicidade humana, principalmente neurológica. A ingestão de água contaminada acima dos limites seguros tem sido associada a déficits cognitivos e ao desenvolvimento do chamado manganismo, um distúrbio neurodegenerativo semelhante à doença de Parkinson. Nos estágios iniciais, surgem alterações psicóticas, evoluindo para instabilidade postural, distonia, bradiscinesia, micrografia, expressão facial reduzida e distúrbios da fala. A gravidade do efeito neurotóxico depende da via de exposição: a inalação está frequentemente ligada ao estresse oxidativo e à apoptose neuronal, enquanto a ingestão oral provoca alterações mais sutis na neuroquímica e na cognição. Trabalhadores expostos ocupacionalmente, como soldadores, mineiros e siderúrgicos, apresentam maior risco de manganismo ou de comprometimento respiratório devido à inalação de partículas de Mn (Bao et al., 2025; WU et al., 2022).

O excesso de manganês também provoca impactos ambientais significativos. Em plantas, atua como estresse abiótico, reduzindo a fotossíntese, interferindo na biossíntese de pigmentos e regulando negativamente a condutância estomática e a taxa de transpiração, resultando em menor produtividade e qualidade das culturas. Além disso, o Mn em excesso gera espécies reativas de oxigênio (ROS), causando estresse oxidativo e danos celulares, como peroxidação lipídica e degradação de pigmentos fotossintéticos (WU et al., 2022).

Nos microrganismos do solo, a poluição por Mn altera a composição, diversidade e estabilidade da comunidade microbiana, afetando variáveis estruturais e índices de diversidade. Concentrações elevadas de Mn^{2+} (>300 mg/kg) aumentam a variabilidade e reduzem a estabilidade comunitária, enquanto doses moderadas (250–350 mg/kg) podem estimular algumas comunidades, evidenciando que o efeito do manganês depende da dose e do contexto ecológico (WU et al., 2022; BAO et al., 2025).

Dessa forma, o manganês, embora essencial em baixas concentrações para seres vivos, torna-se um agente tóxico ambiental quando presente em excesso. Sua ocorrência em águas naturais e efluentes industriais pode comprometer a qualidade da água, afetar a saúde humana, reduzir a produtividade agrícola e alterar a composição e a estabilidade de comunidades

microbianas. Esses impactos ressaltam a importância de se desenvolver e aplicar estratégias eficazes de remoção de manganês, tanto em sistemas de abastecimento de água quanto em efluentes industriais, garantindo a proteção da saúde pública e do meio ambiente.

Com base nesses aspectos, torna-se essencial analisar os métodos convencionais e modernos de tratamento de manganês, que buscam reduzir suas concentrações a níveis seguros e minimizar os impactos ambientais e operacionais associados à sua presença em águas naturais e residuais.

3.4 Tecnologias Convencionais de Tratamento de Efluentes da Mineração: Remoção de Manganês

O tratamento de efluentes gerados pela atividade mineradora ainda se baseia, em grande parte, em tecnologias convencionais, tais como coagulação-floculação, precipitação química, neutralização, sedimentação, filtração e, em alguns casos, eletrocoagulação. Esses métodos constituem a base da gestão de águas residuais em diversas operações, especialmente em plantas de beneficiamento mineral que geram efluentes contendo elevadas concentrações de sólidos suspensos, metais dissolvidos e diferentes reagentes químicos (JING et al., 2023; MATEBESE et al., 2024). Dentre essas tecnologias, destacam-se os processos de neutralização e precipitação química, amplamente empregados devido à sua simplicidade operacional e ao baixo custo relativo dos reagentes. No entanto, sua eficiência depende fortemente do controle rigoroso de variáveis como pH, dosagem de reagentes e tempo de retenção hidráulica. Pequenas variações na composição do efluente podem comprometer a estabilidade do processo, sobretudo quando há presença de metais em formas solúveis ou complexadas. Essa limitação técnica evidencia a necessidade de estratégias complementares de tratamento, capazes de promover transformações químicas adicionais e aumentar a eficiência global do processo (OLADIMEJI et al. 2024).

A coagulação-floculação associada à sedimentação é uma das técnicas mais usadas para remover sólidos finos e reduzir a turbidez, sendo especialmente eficiente em águas de mina com alta presença de coloides. Estudos recentes mostram que, quando combinada com filtração de contato, essa etapa melhora bastante a clarificação da água e a remoção de partículas, funcionando como um pré-tratamento antes de processos mais avançados ou do descarte (KANG, X. *et al.*, 2025).

Para efluentes ácidos, como os resultantes da drenagem ácida de mina (AMD), a estratégia mais comum continua sendo a neutralização seguida da precipitação química. Esse conjunto de técnicas consegue reduzir a acidez e precipitar metais e sulfatos presentes na água,

e revisões recentes reforçam que, além de eficiente, é uma solução de bom custo-benefício para operações de médio porte (JING, *et al*, 2023; MATEBESE, *et al*, 2024).

Contudo, a eficiência da precipitação química é diretamente condicionada ao equilíbrio de solubilidade das espécies metálicas. Metais como manganês, cuja forma divalente (Mn^{2+}) apresenta elevada solubilidade em faixas de pH próximas à neutralidade, frequentemente demandam valores de pH mais elevados para precipitação efetiva, o que pode aumentar o consumo de reagentes e a geração de lodo (OLADIMEJI *et al.*, 2024; ZULU *et al.*, 2025).

A eletrocoagulação tem ganhado destaque como alternativa promissora. Ela utiliza correntes elétricas para formar coagulantes diretamente nos eletrodos, promovendo a aglomeração de partículas e a remoção de contaminantes com menor geração de lodo. Por isso, mostra-se especialmente interessante para águas de mina com elevada carga coloidal (ABFERTIAWAN *et al.*, 2024). Apesar dessa vantagem, a eletrocoagulação pode apresentar limitações relacionadas ao consumo energético, passivação dos eletrodos e necessidade de manutenção periódica, fatores que influenciam a viabilidade econômica em larga escala.

Em efluentes que contêm reagentes de flotação e compostos orgânicos, costuma ser necessário combinar diferentes etapas de tratamento, como clarificação, neutralização e precipitação química, além de filtração ou adsorção. Falconi *et al.* (2023) observam que fluxos de tratamento integrados, envolvendo processos físico-químicos e físicos, são recomendados para remover sólidos, resíduos de reagentes e metais antes do descarte ou reúso.

Apesar de amplamente utilizados, os métodos convencionais apresentam limitações relevantes quando aplicados a efluentes com metais dissolvidos em baixas concentrações ou sob condições de elevada complexidade química. A necessidade de grandes dosagens de reagentes alcalinizantes e coagulantes resulta na formação de lodos ricos em metais, cuja disposição final representa custo ambiental e operacional significativo, o que pode dificultar o atendimento a normas ambientais mais rigorosas (JING, *et al*, 2023; MATEBESE, *et al*, 2024). Além disso, tais processos atuam predominantemente por separação física após ajuste químico do meio, não promovendo transformação estrutural das espécies metálicas dissolvidas.

Por isso, muitas operações têm adotado a combinação de técnicas convencionais com recursos mais avançados, como membranas e adsorventes especiais, para aumentar a eficiência e reduzir riscos ambientais (PAN *et al.*, 2026).

Assim, processos como coagulação-floculação, precipitação química, neutralização, sedimentação, filtração e eletrocoagulação seguem como a base do tratamento dos efluentes da mineração. A escolha do método mais adequado depende da composição do efluente, do tamanho da operação e das exigências regulatórias, muitas vezes exigindo a integração com

tecnologias emergentes para garantir maior sustentabilidade e viabilizar o reúso da água (ABFERTIAWAN et al., 2024; JING, *et al*, 2023; MATEBESE, *et al*, 2024; FALCONI *et al.*, 2023; KANG, X. *et al.*, 2025).

Em contraste com processos baseados exclusivamente em precipitação e separação física, tecnologias oxidativas promovem a conversão química das espécies metálicas, alterando seu estado de oxidação e favorecendo a formação de compostos menos solúveis. A abordagem dos processos oxidativos avançados (POAs) pode reduzir a dependência de ajustes extremos de pH e contribuir para maior estabilidade do sistema de tratamento (ARAÚJO et al., 2016).

Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta uma síntese das principais tecnologias empregadas no tratamento de efluentes de mineração, destacando suas aplicações, exemplos de processos e referências associadas.

Tabela 1 - Principais Tecnologias Aplicadas ao Tratamento de Efluentes de Mineração

Categoria / Tipo de Tecnologia	Descrição	Aplicação em Efluentes de Mineração	Exemplos de Processos	Referência
1) Tratamento Físico- Mecânico	Remoção de sólidos suspensos e partículas maiores por meios físicos	Redução de turbidez e particulados antes de etapas químicas ou biológicas	- Gradeamento - Decantadores / sedimentadores - Flotação - Filtração	Matebese et al. (2024)
2) Tratamento Físico- Químico	Uso de reagentes e processos físico-químicos para remover metais e substâncias indesejáveis	Muito comum para remover metais pesados, cianetos, F ⁻ , sulfatos	- Coagulação/Floculação - Precipitação química - Neutralização - Flotação química	Oladimeji et al. (2024)
3) Tratamento Biológico	Uso de microrganismos para degradar matéria orgânica e alguns contaminantes	Aplicado quando há carga orgânica biodegradável (menos comum em mineração, mas usado em rejeitos com matéria orgânica)	- Lodos ativados - Biofiltros - Lagoas de estabilização	De Campos et al. (2025)
4) Processos de Adsorção	Adsorção de contaminantes em materiais de alta superfície ativa	Remoção de metais e compostos específicos após pré-tratamento	- Carvão ativado - Zeólitas - Adsorventes sintéticos	Zheng et al. (2025)

Categoria / Tipo de Tecnologia	Descrição	Aplicação em Efluentes de Mineração	Exemplos de Processos	Referência
5) Processos de Troca Iônica	Remoção seletiva de íons através de resinas	Tratamento de efluentes com metais dissolvidos específicos	- Colunas de resina - Rejeição e regeneração de resina	Villa Gomez (2024)
6) Membranas / Separação Avançada	Separação por membranas com alta eficiência	Muito eficaz na remoção de metais solúveis, sulfatos e sólidos finos	- Osmose reversa - Nanofiltração - Ultrafiltração	Zulu et al. (2025)
7) Processos Avançados de Oxidação (POA)	Geração de radicais para degradar contaminantes persistentes	Pode tratar cianetos, complexos de metais, tensoativos	- Fenton / Photo-Fenton - Ozonização - UV/H ₂ O ₂	Dhamorikar (2024)
8) Técnicas de Recuperação / Reuso	Extração e reutilização de recursos (água e metais)	Em mineração, valorização de metais e economia de água em circuito fechado	- Precipitação seletiva de metais - Eletroextração - Reuso em processos industriais	Matebese et al. (2024)

De forma complementar à classificação geral das tecnologias de tratamento, a Tabela 2 detalha os principais processos aplicáveis à remoção de manganês dissolvido, comparando os mecanismos envolvidos, a eficiência relativa, a faixa de pH operacional e sua aplicabilidade em efluentes de mineração.

Tabela 2 - Comparação de processos aplicáveis à remoção de manganês em efluentes de mineração

Categoria	Mecanismo Principal	Eficiência para Mn	Faixa de pH típica	Aplicabilidade na Mineração	Referências
Precipitação Química (Hidróxidos)	Elevação do pH → formação de Mn(OH) ₂	Moderada	> 9,5	Processo simples, mas requer alto consumo de alcalinizante	Bao, H., et al. (2025)

Oxidação + Precipitação	Oxidação de $\text{Mn}^{2+} \rightarrow$ $\text{MnO}_2(\text{s})$	Alta	8–9	Muito utilizada para polimento final	Bao, H., et al. (2025)
Ozonização (POA)	Oxidação direta por O_3	Alta	6–8	Aplicável quando há complexação ou metais associados	Hao, R. et al. (2025)
Processo Fenton	Formação de $\bullet\text{OH}$	Indireta (via oxidação)	2,5–4	Mais indicado quando há matéria orgânica associada	Hübner, U.; et al. (2024)
Adsorção (Carvão, Óxidos de Fe)	Complexação superficial	Alta (dependente do adsorvente)	5–8	Etapa complementar	Rudi, N.N.; et al. (2020)
Troca Iônica	Substituição iônica seletiva	Alta	4–7	Alta eficiência, custo elevado	Bao, H., et al. (2025)
Membranas (NF/OR)	Exclusão por tamanho/carga	Muito alta	3–8	Produz água de reúso	Ilavský, J. et al. (2025)

À luz da literatura analisada, evidencia-se que as limitações das tecnologias convencionais no tratamento de efluentes de mineração não decorrem apenas de ineficiências operacionais, mas sobretudo da natureza química das espécies metálicas dissolvidas, como o Mn^{2+} , cuja estabilidade em solução dificulta sua remoção por processos físico-químicos tradicionais. A necessidade de elevação significativa do pH para promover sua precipitação, associada ao aumento do consumo de reagentes e à geração de lodo, revela um modelo de tratamento baseado predominantemente em transferência de fase, e não em transformação química da espécie metálica.

Sob essa perspectiva, processos oxidativos avançados — em especial a ozonização — deslocam o enfoque do tratamento da simples precipitação para a modificação do estado de oxidação do manganês, convertendo Mn^{2+} em espécies menos solúveis e mais facilmente removíveis. Tal abordagem permite operar em faixas de pH mais próximas da neutralidade,

reduzindo a dependência de correções químicas extremas e favorecendo maior estabilidade operacional.

Dessa forma, a avaliação da ozonização como Processo Oxidativo Avançado mostra-se tecnicamente pertinente, pois possibilita correlacionar mecanismos reacionais, parâmetros operacionais (como pH, dosagem de ozônio e tempo de contato) e desempenho de remoção, além de analisar sua viabilidade frente aos limites estabelecidos pela legislação ambiental brasileira para lançamento ou reuso de efluentes. Assim, a investigação proposta neste trabalho não apenas compara tecnologias, mas examina criticamente a adequação do processo oxidativo à complexidade química do sistema estudado.

3.5 Processos Oxidativos Avançados (POAs)

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) têm ganhado destaque como alternativas eficientes para tratar efluentes com composição química complexa. Esses processos se baseiam na geração de espécies reativas de oxigênio (ROS), principalmente o radical hidroxila ($\bullet\text{OH}$), reconhecido por seu elevado poder oxidante e pela capacidade de degradar uma ampla gama de contaminantes orgânicos e inorgânicos (AZIZ; MUSTAFA, 2024). O radical hidroxila apresenta potencial padrão de oxidação de aproximadamente 2,8 V, superior ao de oxidantes convencionais como cloro ($E^\circ \approx 2,07 \text{ V}$) e permanganato de potássio ($E^\circ \approx 1,51 \text{ V}$). Essa elevada reatividade permite reações pouco seletivas e rápidas, promovendo a mineralização parcial ou total de compostos orgânicos e a oxidação de espécies metálicas reduzidas (AZIZ; MUSTAFA, 2024; COSTA, 2024).

A partir desse princípio fundamental, diferentes rotas tecnológicas foram desenvolvidas para a geração de radicais hidroxila *in situ*, dando origem a uma variedade de Processos Oxidativos Avançados. Essas tecnologias diferem quanto aos agentes oxidantes empregados, fontes de energia utilizadas e condições operacionais, como faixa de pH e presença de catalisadores (COSTA, 2024). A compreensão dessas diferenças é essencial para a seleção do POA mais adequado às características do efluente e aos objetivos do tratamento.

Nesse contexto, a Tabela 3 apresenta os principais tipos de Processos Oxidativos Avançados, destacando os oxidantes utilizados, os mecanismos predominantes de geração de radicais e suas principais aplicações no tratamento de efluentes.

Tabela 3 - Principais tipos de Processos Oxidativos Avançados (POAs)

Tipo de POA	Oxidante / Fonte de Energia	Mecanismo Principal	Faixa de pH típica	Principais Aplicações	Referências
Ozonização (O₃)	Ozônio molecular	Oxidação direta por O ₃ e indireta por •OH	6–9	Cianetos, metais complexados, compostos orgânicos persistentes	Dhamorikar et al. (2024); Hao et al. (2025)
O₃/UV	Ozônio + radiação UV	Fotólise do O ₃ → geração intensificada de •OH	6–8	Compostos recalcitrantes e efluentes com alta toxicidade	Dhamorikar et al. (2024); Ran et al. (2025)
O₃/H₂O₂ (Peroxone)	Ozônio + peróxido de hidrogênio	Decomposição acelerada do O ₃ com formação de •OH	6–8	Tratamento avançado e polimento final	Dhamorikar et al. (2024); Alazaiza (2026)
Fenton	H ₂ O ₂ + Fe ²⁺	Formação catalítica de •OH	2,5–4	Efluentes com matéria orgânica e metais associados	Hübner et al. (2024); Ran et al. (2025)
Foto-Fenton	H ₂ O ₂ + Fe ²⁺ + UV/Vis	Regeneração de Fe ²⁺ e aumento de •OH	2,5–4	Maior eficiência que Fenton convencional	Hübner et al. (2024); Alazaiza (2026)
UV/H₂O₂	Peróxido + radiação UV	Fotólise do H ₂ O ₂ → •OH	5–8	Contaminantes orgânicos e micropoluentes	Dhamorikar et al. (2024); Ran et al. (2025)
Fotocatálise heterogênea	Semicondutor (ex.: TiO ₂) + UV	Excitação eletrônica → radicais oxidantes	5–8	Compostos orgânicos persistentes	Zheng et al. (2025)

Entre as tecnologias disponíveis, a ozonização se destaca pela versatilidade, pois o ozônio (O₃) pode atuar tanto como oxidante direto quanto como precursor de radicais em condições apropriadas, especialmente em pH alcalino ou quando associado a processos integrados como O₃/UV e O₃/H₂O₂. Em meio aquoso, o ozônio pode reagir diretamente com determinados compostos ou decompor-se gerando radicais hidroxila por mecanismos iniciados pela presença de íons hidroxila (OH⁻). Em pH alcalino, a decomposição do ozônio é acelerada, favorecendo a formação de espécies altamente reativas. Já em pH ácido, predomina a oxidação direta pelo O₃ molecular, que apresenta maior seletividade (GOTTSCALK; LIBRA; SAUPE, 2010; VON GUNTEN, 2003; BELTRÁN, 2004).

No caso específico do manganês, a ozonização apresenta interesse particular, pois promove a oxidação do Mn^{2+} para formas menos solúveis, como Mn^{3+} e Mn^{4+} , que tendem a precipitar como óxidos ou hidróxidos. Diferentemente da precipitação exclusivamente alcalina, a oxidação via ozônio pode ocorrer em faixas de pH mais moderadas, reduzindo a necessidade de ajustes extremos do meio e, conseqüentemente, o consumo de reagentes (GOTTSCALK; LIBRA; SAUPE, 2010; TCHOBANOGLIOUS et al., 2014).

Uma das principais vantagens dos POAs, particularmente no contexto minerador, está na capacidade de descomplexar metais pesados. Em muitos efluentes, metais como Pb, Cd, Ni ou U não se encontram apenas dissolvidos, mas ligados a ligantes orgânicos ou inorgânicos, formando complexos altamente estáveis que dificultam tratamentos tradicionais, como precipitação, adsorção ou filtração. Aziz e Mustafa (2024) demonstraram que os POAs podem atuar na descomplexação de metais pesados ao oxidar ligantes orgânicos, liberando os íons metálicos para posterior remoção. Esse resultado amplia o papel tradicionalmente atribuído aos POAs, geralmente focado em compostos orgânicos, e sugere aplicação promissora em efluentes minerários onde metais se encontram complexados. No entanto, o estudo não aborda aspectos operacionais, como consumo energético, o que limita sua aplicação direta em escala industrial.

Apesar do potencial, a eficiência dos POAs depende fortemente das características do próprio efluente. Parâmetros como pH, teor de matéria orgânica dissolvida e presença de íons como carbonatos e sulfatos podem atuar como sequestradores de radicais ou alterar a especiação dos metais, reduzindo a eficácia do processo. Essa divergência sugere que a composição da matriz do efluente é fator determinante para o desempenho do tratamento, reforçando a necessidade de caracterização prévia antes da implementação em escala real. No contexto da mineração, embora ainda existam poucos estudos aplicados diretamente a efluentes reais, trabalhos como os de Aziz e Mustafa (2024), Hao et al. (2025) e Mahmoodi et al. (2025) indicam que os POAs — especialmente a ozonização — apresentam potencial significativo para a remoção de metais e melhoria da qualidade da água tratada, ainda que sua eficiência dependa fortemente das condições operacionais e da composição da matriz aquosa.

No entanto, a aplicação em escala industrial ainda enfrenta desafios relacionados ao custo energético da geração de ozônio, à eficiência de transferência gás-líquido e à possível formação de subprodutos oxidativos, como bromato e aldeídos (MAHMOODI et al., 2025; ZHENG et al., 2025). Além disso, a presença de íons sequestradores de radicais, como carbonatos e bicarbonatos, pode reduzir significativamente a disponibilidade de $\bullet OH$, exigindo controle rigoroso das condições operacionais (KANAKARAJU et al., 2025; DHAMORIKAR et al., 2024).

Em comparação aos métodos convencionais baseados exclusivamente em neutralização e precipitação química, os POAs promovem transformações químicas estruturais nos contaminantes, alterando seu estado de oxidação e sua reatividade, o que pode representar um diferencial importante para metais dissolvidos em formas estáveis ou complexadas (HAO et al., 2025; AZIZ E MUSTAFA., 2024).

3.6 O Uso do Ozônio no Tratamento de Efluentes da Mineração

O uso de ozônio (O_3) no tratamento de efluentes mineradores tem se consolidado como uma alternativa eficiente e versátil, especialmente quando o objetivo é remover metais dissolvidos, degradar compostos orgânicos remanescentes ou reduzir a toxicidade das águas residuais. Por ser um dos oxidantes mais fortes conhecidos, o ozônio reage rapidamente com diversos contaminantes, transformando metais em estados de oxidação menos solúveis e facilitando etapas subsequentes, como sedimentação e filtração (SEO et al., 2010). Com potencial padrão de oxidação de 2,07 V para o par O_3/O_2 em meio ácido, o ozônio apresenta capacidade suficiente para oxidar espécies metálicas reduzidas, como Fe^{2+} e Mn^{2+} , promovendo sua conversão para formas menos solúveis. Essa característica torna o processo particularmente interessante em efluentes de drenagem ácida de mina, onde metais se encontram predominantemente na forma dissolvida (KANAKARAJU et al., 2025; HAO et al., 2025; MAHMOODI et al., 2025; ZHENG et al., 2025)

Estudos demonstram que a aplicação de ozônio em drenagem ácida de mina (DAM ou AMD) pode promover a precipitação de íons como ferro e manganês, frequentemente presentes em altas concentrações. Em alguns casos, os valores finais ficam abaixo dos limites legais para lançamento ou até próximos aos padrões de potabilidade (SEO et al., 2010). Além disso, experimentos combinando ozônio com microbolhas em misturas de efluentes de mina demonstraram que a tecnologia é capaz de remover até mais de 99% de nitrogênio amoniacal (NH_3-N) e outros compostos nitrogenados (como SCN^- , CN^- e OCN^-), com eficiência variando conforme a concentração inicial. Nesses ensaios, quando o ozônio foi aplicado após um pré-tratamento com cal e floculante para remoção de metais, os resultados indicaram elevada redução dos contaminantes alvo sem observação de toxicidade em bioensaios com *Daphnia magna*. Quando o sistema foi aplicado sem pré-remoção de metais, padrões anormais de toxicidade foram observados em amostras diluídas, possivelmente associados à formação de nanopartículas de óxidos metálicos geradas durante a oxidação por microbolhas, evidenciando

a necessidade de integração de etapas de pré-tratamento para evitar efeitos adversos (RYSKIE, SÉBASTIEN, *et al.*, 2023).

A utilização de microbolhas aumenta a área interfacial gás-líquido, elevando a eficiência de transferência de massa do ozônio para a fase aquosa. Essa melhoria reduz perdas por volatilização e aumenta significativamente a taxa de oxidação dos contaminantes, refletindo ganhos cinéticos importantes no processo de ozonização (XIAO Y. *et al.*, 2025). Estudos aplicados a sistemas de ozonização com micro-bolhas em matrizes industriais reforçam que a maior área de contato promove maior dissolução de O_3 e melhor desempenho oxidativo em comparação com bolhas convencionais, o que é particularmente vantajoso em efluentes com elevada carga química (RYSKIE, SÉBASTIEN, *et al.*, 2023; XIAO Y. *et al.*, 2025).

A oxidação do manganês pelo ozônio ocorre predominantemente pela conversão de Mn^{2+} em Mn^{4+} , formando dióxido de manganês (MnO_2), um sólido de baixa solubilidade. Essa reação é favorecida em pH próximo à neutralidade e apresenta cinética significativamente mais rápida do que a oxidação natural pelo oxigênio dissolvido (RIAD *et al.*, 2025). Diferentemente da precipitação exclusivamente alcalina, que depende fortemente do aumento do pH para deslocar o equilíbrio de solubilidade, a ozonização promove uma transformação química direta do estado de oxidação do metal (SON *et al.* 2025)

Outro benefício relevante da ozonização é o potencial de recuperar metais de valor econômico. Processos de precipitação oxidativa empregando apenas ozônio, sem a adição de outros reagentes químicos, já demonstraram eficiência superior a 95% na recuperação de cobalto e manganês presentes em drenagem ácida de mina. Nesse contexto, Shekarian *et al.* (2022) investigaram experimentalmente um processo de precipitação oxidativa com ozônio aplicado a drenagem ácida de mina (AMD), considerando as condições típicas dessa matriz, como pH ácido e presença de metais críticos dissolvidos. O estudo comparou diferentes agentes oxidantes, incluindo persulfato e permanganato, além da influência de distintos ligantes (hidróxido, carbonato, sulfato, fosfato e amônio) na formação de precipitados contendo Co e Mn. O ozônio destacou-se como o agente oxidante mais eficaz, permitindo a recuperação de mais de 95 % de Co e Mn sem necessidade de adição de reagentes químicos externos para ajuste de pH ou para indução de precipitação convencional, o que simplifica o processo e reduz o consumo de insumos químicos.

Adicionalmente, os autores observaram que o material sólido obtido apresentava teores significativos de manganês (aproximadamente 54,6 %) e cobalto (cerca de 0,9 %), a partir de uma AMD contendo aproximadamente 41,8 ppm de Mn e 0,9 ppm de Co. Esses resultados demonstram a viabilidade de uma rota de oxidação seletiva com ozônio que, além de promover

a remoção eficiente dos metais dissolvidos, possibilita sua recuperação em uma única etapa, reforçando o caráter sustentável e economicamente atrativo da tecnologia (SHEKARIAN et al., 2022).

No Brasil, um dos casos mais expressivos da aplicação direta de ozonização em efluentes de mineração é o estudo de Barolli et al. (2016), realizado na unidade da Indústrias Nucleares do Brasil (INB), em Caldas (MG). Nesse trabalho, os autores avaliaram experimentalmente a aplicação de ozônio em águas de drenagem ácida de mina contendo manganês dissolvido, com concentrações iniciais variando entre 20 e 89 mg/L. O estudo investigou a influência de parâmetros operacionais como pH, vazão de ozônio, tempo de contato e presença de sólidos suspensos sobre a eficiência de remoção do metal.

Os experimentos demonstraram que, sob condições otimizadas de operação — especialmente em pH próximo à neutralidade — a oxidação de Mn(II) pelo ozônio promoveu sua conversão a Mn(IV), com formação de dióxido de manganês (MnO_2), um sólido de baixa solubilidade facilmente removido por sedimentação e filtração. A partir dessa abordagem, foi possível reduzir as concentrações de manganês para valores inferiores a 1 mg/L, atendendo aos padrões ambientais vigentes. Os autores também verificaram que a eficiência do processo estava diretamente relacionada à dosagem de ozônio aplicada e ao controle do pH, uma vez que esses fatores influenciam tanto a cinética de oxidação quanto a estabilidade do MnO_2 formado. Além disso, destacaram que a ozonização reduziu significativamente a necessidade de adição de reagentes alcalinizantes quando comparada à precipitação química convencional, implicando menor geração de lodo e maior simplicidade operacional (BAROLLI et al. 2016).

Esse estudo demonstra, portanto, que a ozonização pode atuar como etapa central no tratamento de drenagens ácidas de mina, promovendo a oxidação química direta do manganês dissolvido e comprovando a viabilidade técnica da aplicação em escala real no contexto brasileiro.

Além da remoção de metais, o ozônio apresenta elevada eficácia na oxidação de compostos orgânicos dissolvidos, desinfecção microbiológica e degradação de micropoluentes orgânicos persistentes, contribuindo para a melhoria global da qualidade da água tratada. Essa versatilidade decorre de sua capacidade de atuar tanto por oxidação direta seletiva, reagindo com duplas ligações, fenóis e aminas, quanto por oxidação indireta via formação de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas e pouco seletivas capazes de promover mineralização parcial ou total de compostos orgânicos complexos (MAHMOODI et al., 2025; ZHENG et al., 2025).

Em efluentes de mineração, essa característica é particularmente relevante porque, além de metais dissolvidos, essas matrizes frequentemente contêm reagentes residuais de flotação (como coletores e espumantes), cianetos, tiocianatos, compostos nitrogenados e matéria orgânica dissolvida proveniente de insumos industriais ou da própria matriz geológica. Estudos recentes demonstram que sistemas baseados em ozônio e processos combinados (como O_3/H_2O_2 ou O_3/UV) são capazes de oxidar cianetos livres e complexados, degradar tiocianatos e reduzir significativamente a toxicidade associada a esses compostos, além de promover desinfecção simultânea (RYSKIE, SÉBASTIEN, *et al.*, 2023; HAO *et al.*, 2025).

Além disso, a aplicação de ozônio pode reduzir a demanda química de oxigênio (DQO) e modificar a estrutura de moléculas orgânicas recalcitrantes, tornando-as mais biodegradáveis e facilitando etapas subsequentes de tratamento biológico. Esse efeito de “pré-oxidação” amplia o escopo de aplicação da tecnologia, permitindo sua integração com sistemas convencionais físico-químicos ou biológicos (MAHMOODI *et al.*, 2025).

Apesar das vantagens, a aplicação do ozônio apresenta limitações operacionais que devem ser consideradas no dimensionamento do processo. De forma geral, a eficiência da ozonização depende fortemente da transferência de massa gás-líquido, da concentração dissolvida de ozônio e do controle do pH, uma vez que o meio alcalino favorece sua decomposição em radicais hidroxila ($\bullet OH$), enquanto a presença de espécies competidoras — como matéria orgânica dissolvida, carbonatos e bicarbonatos — pode consumir ozônio ou atuar como sequestradores de radicais, reduzindo a eficiência oxidativa global (MAHMOODI *et al.*, 2025; ZHENG *et al.*, 2025).

Em sistemas contendo manganês, a oxidação de Mn^{2+} leva à formação de partículas finas de MnO_2 coloidal, o que pode demandar etapas adicionais de coagulação, floculação ou filtração para evitar turbidez residual na água tratada. Esse comportamento foi observado experimentalmente por Ryskie *et al.* (2023), que avaliaram a aplicação de ozônio com microbolhas em drenagem ácida de mina e relataram a necessidade de controle operacional rigoroso para evitar instabilidades na qualidade final do efluente.

Além disso, a literatura aponta que, em matrizes complexas contendo matéria orgânica e íons específicos, a ozonização pode gerar subprodutos intermediários potencialmente tóxicos, como aldeídos, cetonas ou espécies parcialmente oxidadas, especialmente quando não há otimização de dose e tempo de contato (HAO *et al.*, 2025). No estudo de Ryskie *et al.* (2023), embora a remoção de metais tenha sido elevada, os autores destacam a importância do monitoramento contínuo para evitar a formação de partículas oxidantes ultrafinas e garantir estabilidade do processo em escala ampliada.

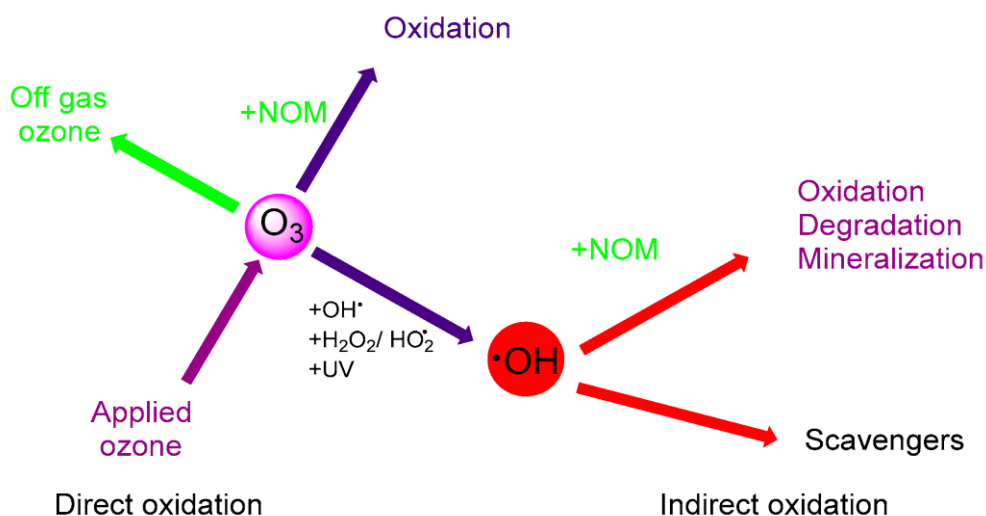
De modo geral, a literatura científica recente destaca a ozonização como uma tecnologia robusta, eficiente e tecnicamente promissora para o tratamento de efluentes provenientes da mineração. O processo pode ser empregado tanto de forma isolada quanto integrado a etapas convencionais, como coagulação, precipitação química ou filtração, dependendo das características físico-químicas do efluente e das metas de qualidade estabelecidas para o efluente tratado. Embora ainda existam desafios operacionais relacionados ao consumo energético, à transferência de massa e ao controle de subprodutos de oxidação, a ozonização apresenta elevado potencial de aplicação em escala industrial. Destaca-se, sobretudo, sua capacidade de promover a remoção simultânea de metais dissolvidos, compostos orgânicos recalcitrantes e contaminantes emergentes, configurando-se como uma alternativa estratégica para sistemas que demandam maior eficiência e segurança ambiental (RYSKIE et al., 2023; SHEKARIAN et al., 2022; MAHMOODI et al., 2025; ZHENG et al., 2025).

Em comparação com métodos convencionais baseados exclusivamente em neutralização e precipitação química, a ozonização apresenta a vantagem de promover a oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}) para espécies de maior valência, como Mn^{3+} e Mn^{4+} , favorecendo a formação de óxidos insolúveis, principalmente $\text{MnO}_2(\text{s})$. Estudos demonstram que esse mecanismo permite a remoção eficiente de manganês mesmo em faixas de pH inferiores às normalmente exigidas para precipitação direta como $\text{Mn}(\text{OH})_2$, que demanda condições fortemente alcalinas ($\text{pH} > 9\text{--}10$) para ser termodinamicamente favorecida (TOBIASON et al., 2016; RYSKIE, SÉBASTIEN, et al., 2023). Dessa forma, a oxidação prévia com ozônio reduz a dependência de ajustes extremos de pH e possibilita maior controle sobre a especiação do metal no meio reacional.

Embora a etapa de separação sólido-líquido ainda seja necessária para a remoção efetiva do precipitado formado, a integração da oxidação com a indução à precipitação pode representar uma alternativa tecnicamente mais eficiente para efluentes com elevada concentração de manganês dissolvido (SHEKARIAN et al., 2022; RYSKIE, SÉBASTIEN, et al., 2023).

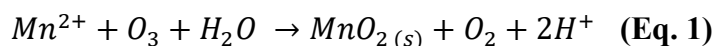
Para a compreensão dos mecanismos envolvidos na remoção de manganês dissolvido por ozonização em efluentes aquosos, é fundamental considerar as diferentes vias de oxidação promovidas pelo ozônio. De modo geral, a oxidação do manganês pode ocorrer por dois mecanismos principais: (i) oxidação direta, promovida pela própria molécula de ozônio (O_3), e (ii) oxidação indireta, mediada por espécies reativas de oxigênio, especialmente os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$) gerados pela decomposição do ozônio em meio aquoso (ZHENG et al., 2025). A Figura 5 apresenta um esquema simplificado desses mecanismos de oxidação direta e indireta em sistemas de ozonização.

Figura 5 - Processo de oxidação à base de ozônio.



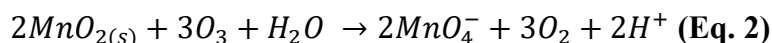
Fonte: ZHENG et al., 2025

Na via direta, o ozônio atua como agente oxidante reagindo diretamente com o íon manganês dissolvido (Mn^{2+}), promovendo sua oxidação e subsequente precipitação sob a forma de dióxido de manganês sólido (MnO_2), conforme representado na Equação (1):



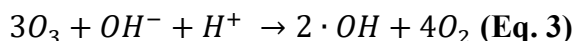
Esse mecanismo é particularmente relevante em condições de pH moderadamente ácido a neutro, nas quais a molécula de ozônio apresenta maior estabilidade em solução aquosa.

Entretanto, um aspecto operacional crítico nos sistemas de ozonização refere-se à dosagem de ozônio aplicada ao processo. Em condições de excesso de ozônio, o dióxido de manganês previamente formado pode sofrer oxidação adicional, levando à formação do íon permanganato (MnO_4^-), espécie altamente solúvel que confere coloração rosada ou violácea à água, o que é indesejável em sistemas de tratamento. Esse processo pode ser representado pela Equação (2):

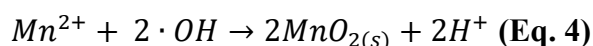


Além da via direta, a oxidação do manganês também pode ocorrer por mecanismos indiretos, associados à formação de radicais livres altamente reativos. Em condições de pH mais elevado, a estabilidade do ozônio diminui e ocorre sua decomposição catalítica, resultando na formação de radicais hidroxila ($\bullet OH$), espécies com potencial de oxidação superior ao do

próprio ozônio. A geração dessas espécies reativas pode ser representada simplificada pela Equação (3):



Os radicais hidroxila formados podem então oxidar o manganês dissolvido, contribuindo para a formação de dióxido de manganês sólido:



Portanto, a eficiência da ozonização para remoção de manganês depende diretamente de parâmetros operacionais como pH, dose de ozônio, tempo de contato e características da matriz aquosa, os quais influenciam a predominância das rotas direta ou radicalar do processo. Esses mecanismos são amplamente discutidos na literatura de engenharia sanitária, química ambiental e processos oxidativos avançados, sendo fundamentais para o adequado dimensionamento e operação de sistemas de ozonização aplicados ao tratamento de águas e efluentes (AZIZ E MUSTAFA, 2024; HAO et al., 2025; MAHMOODI et al., 2025).

Nesse contexto, além dos aspectos operacionais e da eficiência do processo, torna-se fundamental considerar os riscos associados à aplicação do ozônio, especialmente no que se refere à segurança ocupacional. A exposição prolongada ao ozônio (O₃) configura uma preocupação relevante em ambientes industriais que utilizam esse gás como agente oxidante, como em processos de tratamento de efluentes, desinfecção e branqueamento, devido ao seu elevado potencial tóxico e à sua alta reatividade química (HOLM; BALMES, 2021).

Perante o exposto, estimativas globais indicam que a exposição ao ozônio está associada a aproximadamente 423.100 mortes anuais, tendo apresentado um aumento de cerca de 46% entre os anos de 2000 e 2019, o que evidencia a crescente importância desse poluente como um problema de saúde pública em escala mundial (DONZELLI, G. et al., 2024).

Do ponto de vista fisiológico, o ozônio atua como um potente irritante respiratório, capaz de induzir inflamação das vias aéreas, estresse oxidativo e redução da função pulmonar, mesmo em concentrações relativamente baixas (LU, J., YAO, L., 2023; DONZELLI, G. et al., 2024). A exposição crônica está associada ao agravamento de doenças respiratórias, como asma e doença pulmonar obstrutiva crônica (DPOC), além de contribuir para o aumento da morbidade e mortalidade por causas respiratórias e cardiovasculares (RADBEL et al., 2024). Estudos epidemiológicos também indicam que incrementos de 10 ppb na concentração de ozônio podem elevar em aproximadamente 4% o risco de mortalidade respiratória (JERRETT et al., 2009).

Além dos efeitos respiratórios, evidências recentes sugerem que a exposição prolongada ao ozônio pode desencadear respostas inflamatórias sistêmicas, afetando outros órgãos e sistemas. Nesse sentido, há indícios de associação com alterações no sistema nervoso central, incluindo maior risco de desenvolvimento de doenças neurodegenerativas, como Alzheimer e Parkinson, bem como aumento da incidência de distúrbios psiquiátricos, como ansiedade e depressão (YODA et al., 2025). Esses efeitos são atribuídos, em grande parte, ao estresse oxidativo sistêmico e à inflamação crônica induzidos pelo ozônio.

Os riscos associados à exposição ocupacional são particularmente relevantes para trabalhadores que desempenham atividades ao ar livre, uma vez que o aumento da taxa respiratória durante o esforço físico resulta na inalação de maiores volumes de ar e, conseqüentemente, de ozônio (DONZELLI, G. et al., 2024). Em ambientes industriais, como sistemas de tratamento de efluentes que utilizam ozonização, o risco pode ser intensificado por exposições localizadas ou acidentais, incluindo vazamentos, que podem levar a concentrações significativamente elevadas do gás, potencializando efeitos agudos e crônicos à saúde (OLIN et al., 2002).

Adicionalmente, em ambientes fechados, o ozônio pode reagir com materiais e compostos químicos presentes, como produtos de limpeza e revestimentos poliméricos, gerando subprodutos tóxicos, incluindo formaldeído, acroleína e partículas ultrafinas. Esses compostos secundários contribuem para o agravamento dos efeitos respiratórios e ampliam o impacto da exposição ocupacional, especialmente em condições de ventilação inadequada (WESCHLER, 2006). Esses eventos de exposição súbita estão diretamente ligados a uma maior incidência de sintomas asmáticos, sendo que trabalhadores expostos a esses incidentes apresentam uma taxa de novos casos de sibilância (chiado no peito) 3,1 vezes superior à de funcionários não expostos (OLIN et al., 2002).

No que se refere aos limites de exposição, diferentes organismos internacionais estabelecem padrões com o objetivo de reduzir os riscos à saúde. A Organização Mundial da Saúde recomenda um limite de 50 ppb para exposição média de 8 horas, enquanto a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos estabelece um limite de 70 ppb para o mesmo período. A União Europeia adota valores próximos de 60 ppb, e países como Canadá e China apresentam limites na faixa de 62 a 80 ppb para exposições prolongadas. No entanto, evidências científicas recentes indicam que efeitos adversos podem ocorrer mesmo abaixo desses limites, reforçando a necessidade de estratégias preventivas mais rigorosas (HOLM; BALMES, 2021; LU, J., YAO, L., 2023).

Em vista disso, a mitigação dos riscos associados à exposição ao ozônio requer uma abordagem integrada, envolvendo medidas técnicas, operacionais e políticas públicas. Entre as estratégias recomendadas, destacam-se o monitoramento contínuo da qualidade do ar, o uso de sistemas de ventilação e filtragem eficientes, e o planejamento de atividades para evitar períodos de maior concentração de ozônio, geralmente no período da tarde, quando a radiação solar intensifica as reações fotoquímicas. Em ambientes industriais, medidas como manutenção preventiva, controle de vazamentos e uso de equipamentos de proteção individual são fundamentais para reduzir a exposição ocupacional (RADBEL, J. et al., 2024).

Além disso, ações em escala urbana e global, como a redução das emissões de precursores atmosféricos, a adoção de tecnologias de transporte limpo e o aumento de áreas verdes, desempenham papel essencial na diminuição da formação de ozônio troposférico (DONZELLI, G. et al., 2024). Dessa forma, embora a ozonização se destaque como uma tecnologia altamente eficiente e versátil para o tratamento de efluentes mineradores, sua aplicação deve ser cuidadosamente controlada para garantir não apenas a eficiência do processo, mas também a segurança ocupacional. A integração entre desempenho técnico e gestão de riscos é, portanto, essencial para a implementação sustentável dessa tecnologia em escala industrial.

3.7 Legislação e Normas Ambientais para Atividades Mineradoras

A gestão de efluentes na atividade mineradora é orientada por um conjunto de instrumentos legais que estabelecem padrões de qualidade da água, limites para o lançamento de poluentes e exigências quanto ao tratamento prévio antes da disposição final. No ordenamento jurídico brasileiro, destaca-se a Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente e constitui o principal marco estruturante da regulamentação ambiental. Essa lei consagra princípios como a prevenção, o controle da poluição e a responsabilização do poluidor, determinando que atividades potencialmente causadoras de significativa degradação ambiental — como a mineração — adotem medidas eficazes de mitigação e sistemas adequados de tratamento de seus efluentes (BRASIL, 1981).

No caso específico do setor mineral, reconhecido como intensivo no uso de recursos hídricos e potencial gerador de cargas elevadas de metais e sólidos dissolvidos, esses fundamentos legais se articulam com normas técnicas complementares que disciplinam tanto a qualidade dos corpos hídricos receptores quanto as condições e padrões para o lançamento de efluentes. Dessa forma, a gestão hídrica na mineração não se limita ao cumprimento de limites

numéricos, mas integra um sistema normativo que busca assegurar a proteção ambiental e a manutenção dos usos múltiplos da água (ATAKHANOVA, 2023).

Entre os principais instrumentos normativos aplicáveis ao controle da poluição hídrica no setor mineral, destacam-se a Resolução CONAMA 357/2005 e a Resolução CONAMA 430/2011. A Resolução CONAMA 357/2005 classifica os corpos d'água superficiais em classes (Especial, 1, 2, 3 e 4, para águas doces) e estabelece padrões de qualidade ambiental para o corpo receptor, definindo limites específicos conforme o enquadramento e os usos preponderantes da água. Já a Resolução CONAMA 430/2011 complementa esse instrumento ao dispor sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, fixando concentrações máximas permitidas no ponto de descarte, inclusive para metais pesados comumente presentes em efluentes de drenagem ácida de mina. Com o objetivo de conferir maior clareza à análise normativa aplicada à atividade mineradora, a Tabela 4 apresenta os limites máximos permitidos para metais pesados em águas doces Classe 2 — classe frequentemente associada à proteção da vida aquática e ao abastecimento humano após tratamento convencional — conforme estabelecido na Resolução CONAMA 357/2005, bem como os respectivos limites de lançamento previstos na Resolução CONAMA 430/2011. Esses valores constituem referência técnica essencial para avaliar, simultaneamente, a qualidade do corpo hídrico receptor e a conformidade dos efluentes gerados por empreendimentos minerários, permitindo verificar se os processos de tratamento empregados são capazes de atender às exigências legais vigentes e manter o enquadramento ambiental do curso d'água.

Tabela 4 - Limites máximos de metais pesados para águas doces Classe 2 e para lançamento de efluentes segundo as Resoluções CONAMA 357/2005 e 430/2011.

Metal Pesado	Limite	Limite	Unidade
	Qualidade da água CONAMA 357/2005	Lançamento de efluentes CONAMA 430/2011	
Arsênio Total	0,01	0,5	mg/L
Cádmio Total	0,001	0,2	mg/L
Chumbo Total	0,01	0,5	mg/L
Cobre dissolvido	0,009	1,0	mg/L
Cromo Total	0,05	0,5	mg/L
Cromo VI (Cr⁶⁺)	0,05	0,1	mg/L
Ferro dissolvido	0,3	15,0	mg/L

Manganês dissolvido	0,1	1,0	mg/L
Mercúrio Total	0,0002	0,01	mg/L
Níquel Total	0,025	2,0	mg/L
Prata Total	0,01	0,1	mg/L
Selênio Total	0,01	0,30	mg/L
Zinco Total	0,18	5,0	mg/L

Fonte: Adaptado de CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005; Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, DF

Observa-se que, para águas doces Classe 2, a Resolução CONAMA 357/2005 estabelece limite de 0,1 mg/L para manganês dissolvido, enquanto a Resolução CONAMA 430/2011 fixa o valor máximo de 1,0 mg/L para lançamento de efluentes. Considerando que efluentes de drenagem ácida de mina frequentemente apresentam concentrações superiores a 20 mg/L (Barolli et al. 2016), o atendimento aos padrões legais exige elevada eficiência de remoção. Essa diferença evidencia o desafio técnico imposto às operações mineradoras, especialmente quando o manganês se encontra predominantemente na forma solúvel Mn^{2+} , cuja oxidação e precipitação dependem de condições operacionais específicas, como controle rigoroso de pH, potencial redox e tempo de contato, particularmente em matrizes complexas como drenagem ácida de mina (TOBIASON et al., 2016; RYSKIE, SÉBASTIEN, *et al.*, 2023; SHEKARIAN et al., 2022).

Além disso, o licenciamento ambiental e a fiscalização dessas operações seguem diretrizes federais e estaduais que reconhecem a mineração como atividade potencialmente poluidora, impondo a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade dos efluentes e do desempenho das tecnologias empregadas no tratamento (BRASIL, 2024). O descumprimento desses padrões pode resultar em sanções administrativas, multas e até suspensão das atividades, reforçando a necessidade de tecnologias de tratamento estáveis e capazes de operar de forma consistente sob variações de carga e composição do efluente.

No entanto, Passos e Soares (2023) destacam que persistem desafios significativos no que tange à fiscalização, à transparência de dados e à padronização das informações de monitoramento de descargas e ações minerárias no Brasil. No estudo, os autores analisam criticamente a (des)regulamentação estatal e as lacunas na segurança e na governança das barragens de rejeitos, enfatizando que a ausência de sistemas integrados e de dados públicos acessíveis dificulta o acompanhamento da conformidade ambiental por parte da sociedade civil,

órgãos de controle e pesquisadores. Eles destacam que a informação sobre descargas minerárias muitas vezes é fragmentada, não é padronizada entre os diversos órgãos reguladores e não está disponível em formatos que permitam comparações consistentes ou auditoria externa, o que compromete tanto o controle social quanto a eficácia das ações fiscalizatórias. Essa lacuna na transparência e na padronização de dados amplia o risco de irregularidades passarem despercebidas e limita a capacidade de indicadores de desempenho ambiental serem comparados ao longo do tempo ou entre diferentes operações mineradoras, evidenciando a necessidade de instrumentos públicos que unifiquem e sistematizem esses dados de forma clara e acessível (PASSOS & SOARES, 2023).

Em escala internacional, modelos regulatórios como o canadense apresentam níveis de exigência notoriamente mais rigorosos no que se refere à gestão de efluentes de mineração, com normas claras de qualidade da água, limites específicos para descarga de contaminantes e um histórico consistente de conformidade ambiental. No Canadá, o regulamento federal *Metal and Diamond Mining Effluent Regulations (MDMER)* — vigente desde 2002 — estabelece padrões detalhados para a descarga de efluentes provenientes de operações de mineração metálica e de diamante. A norma define limites máximos de concentração para diversos contaminantes, como arsênio (0,10 mg/L), cobre (0,30 mg/L), chumbo (0,20 mg/L), níquel (0,50 mg/L), zinco (0,50 mg/L) e cianeto total (1,0 mg/L), além de restringir o pH entre 6,0 e 9,5 e os sólidos suspensos totais a 15 mg/L (média mensal). O regulamento também exige monitoramento periódico, relatórios obrigatórios às autoridades federais e a realização de ensaios de toxicidade aguda, complementados por programas de *Environmental Effects Monitoring* (EEM) para avaliação contínua dos impactos ecológicos (ATAKHANOVA, 2023).

De acordo com a análise de Atakhanova (2023), a implementação dessas exigências resultou em redução mensurável da contribuição da mineração metálica para as captações e descargas de água no país, com mais de 90 % das operações regulamentadas atendendo aos padrões estabelecidos, mesmo diante do crescimento da produção mineral. Essas experiências internacionais frequentemente servem como referência para o aprimoramento de políticas ambientais em outros países, pois demonstram como instrumentos regulatórios com limites numéricos claros, fiscalização estruturada e monitoramento contínuo podem induzir melhores práticas de gestão hídrica no setor minerário.

Nesse contexto, observa-se que a tendência internacional de progressivo endurecimento dos limites para metais pesados sinaliza um cenário regulatório cada vez mais rigoroso para o setor minerário. Considerando essa perspectiva, é plausível que futuras revisões das normas brasileiras incorporem padrões mais restritivos e exigências adicionais de monitoramento e

controle ambiental. Assim, a adoção de tecnologias capazes de alcançar concentrações residuais cada vez mais reduzidas não deve ser encarada apenas como uma alternativa técnica, mas como uma estratégia preventiva e de planejamento a longo prazo. Investimentos em processos mais eficientes e robustos tendem a ampliar a segurança operacional, reduzir riscos de não conformidade e fortalecer a sustentabilidade ambiental das operações mineradoras frente às exigências regulatórias futuras.

A literatura recente também reforça a relevância de incorporar critérios ecotoxicológicos na regulamentação. Para além dos parâmetros físico-químicos convencionais, tais como pH, sólidos suspensos totais, DBO, DQO e concentrações individuais de metais dissolvidos, cresce a recomendação de incluir bioensaios capazes de avaliar os efeitos tóxicos dos efluentes em organismos aquáticos, assim como Atakhanova (2023) evidenciou que já existe no Canadá e traz resultados positivos. Da Silva et al. (2024) destacam que essa abordagem é especialmente necessária quando há presença predominante de metais pesados, recomendando que futuras atualizações das normas brasileiras incluam testes de toxicidade. Tal recomendação é particularmente relevante para efluentes contendo manganês e outros metais, pois mesmo concentrações abaixo dos limites físico-químicos podem gerar efeitos subletais em organismos aquáticos sensíveis, evidenciando que apenas o cumprimento numérico da legislação pode não refletir totalmente o risco ambiental.

No Brasil, a fiscalização de efluentes provenientes da atividade mineradora é realizada por um conjunto de órgãos federais e estaduais que atuam de forma integrada no âmbito ambiental e regulatório. Essa atuação está fundamentada na Lei nº 6.938/1981, que institui a Política Nacional do Meio Ambiente e estabelece o Sistema Nacional do Meio Ambiente (SISNAMA), definindo o licenciamento ambiental como instrumento de controle das atividades potencialmente poluidoras (BRASIL, 1981). No que se refere aos recursos hídricos, a Lei nº 9.433/1997 estabelece a Política Nacional de Recursos Hídricos e determina a necessidade de outorga para o lançamento de efluentes em corpos d'água (BRASIL, 1997). Essa lei foi modificada e complementada por outros diplomas, como a Lei nº 9.984/2000, que criou a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (BRASIL, 2000), e pela Lei nº 12.334/2010, que instituiu a Política Nacional de Segurança de Barragens (BRASIL, 2010). Reformas posteriores, incluindo a Lei nº 14.600/2023, promoveram ajustes em competências administrativas e penalidades, mantendo, contudo, a Lei nº 9.433/1997 como base estruturante do gerenciamento hídrico brasileiro (BRASIL, 2023).

Os padrões de qualidade da água e as condições para lançamento de efluentes são estabelecidos, respectivamente, pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (BRASIL, 2005) e pela

Resolução CONAMA nº 430/2011 (BRASIL, 2011), que fixam limites e parâmetros técnicos a serem observados pelos empreendimentos minerários. No âmbito específico da mineração, a Lei nº 13.575/2017 criou a Agência Nacional de Mineração (BRASIL, 2017), responsável pela regulação e fiscalização do setor, inclusive quanto à segurança de barragens. Além disso, o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e os órgãos ambientais estaduais exercem o poder de polícia ambiental, promovendo o monitoramento, a fiscalização e a aplicação de sanções administrativas com base também na Lei nº 9.605/1998 (BRASIL, 1998), assegurando que os efluentes mineradores atendam aos padrões legais e minimizem impactos ambientais.

Nesse cenário normativo, torna-se imprescindível analisar tecnologias de tratamento que sejam capazes de atender, de forma integrada, aos padrões legais vigentes, às exigências de monitoramento sistemático e às diretrizes ecotoxicológicas cada vez mais rigorosas. A ozonização destaca-se nesse contexto por seu potencial oxidativo, capaz de promover a conversão e posterior precipitação de metais dissolvidos, como o manganês, favorecendo sua remoção do meio aquoso (HAO, et al., 2025). Dessa forma, a avaliação de sua eficiência e viabilidade operacional no tratamento de efluentes mineradores assume não apenas relevância técnica e ambiental, mas também caráter estratégico para o atendimento às demandas regulatórias atualmente impostas ao setor mineral brasileiro.

3.8 Aspectos Econômicos e Competitividade

A ozonização vem ganhando destaque como uma alternativa promissora para tratar efluentes industriais complexos, incluindo os gerados pela mineração, por sua capacidade de oxidar contaminantes, reduzir DQO, turbidez e até remover metais pesados dissolvidos (ATAKHANOVA, 2023). Sob o ponto de vista econômico, a tecnologia apresenta características distintas quando comparada aos métodos convencionais, como coagulação, floculação, precipitação química e filtração. No contexto minerário, essa característica é particularmente relevante para metais como ferro e manganês, frequentemente presentes em concentrações elevadas na drenagem ácida de mina, cuja remoção por métodos convencionais pode demandar grandes volumes de reagentes alcalinizantes e gerar custos significativos de manejo de resíduos.

Nos processos tradicionais amplamente utilizados na mineração, há elevada dependência de insumos químicos (cal, sulfato de alumínio, polímeros e outros agentes precipitantes), o que implica custos operacionais recorrentes e significativa geração de lodo

metálico, cujo manejo, transporte e disposição final representam parcela expressiva do custo total do tratamento. Em operações de grande porte, o custo associado à aquisição de cal e à disposição de lodos pode representar uma fração significativa do OPEX (*Operational Expenditure* ou Despesas Operacionais) anual do sistema de tratamento, especialmente quando há necessidade de correção contínua de pH para precipitação de manganês, que frequentemente exige valores superiores a 9 para eficiência satisfatória (SKOUSEN et al., 2017; NORDSTROM, 2011; FU; WANG, 2011).

Estudos indicam que a associação da ozonização a essas etapas convencionais pode reduzir o consumo de reagentes químicos, diminuir a produção de lodo e aumentar a eficiência da remoção de contaminantes, resultando em economia operacional e maior estabilidade do processo. (ATAKHANOVA, 2023; JALILI et al., 2022). Em efluentes da mineração de ferro, por exemplo, a aplicação combinada da tecnologia permitiu reduzir o uso de polímeros e otimizar a remoção de metais, tornando o sistema mais competitivo em comparação ao tratamento exclusivamente químico. (JALILI et al., 2022).

Quando comparada a tecnologias como a osmose reversa, frequentemente empregada para obtenção de alta qualidade de água para reuso, a ozonização apresenta custo inicial de implantação potencialmente inferior e menor complexidade operacional. Embora a osmose reversa seja altamente eficiente, seus custos energéticos e de manutenção (troca de membranas e controle de incrustações) são elevados. A ozonização, por sua vez, pode atuar como etapa de pré-tratamento, reduzindo a carga orgânica e minimizando incrustações, o que prolonga a vida útil das membranas e reduz custos indiretos do sistema como um todo (MONTERO-GUADARRAMA et al., 2025).

Todavia, o custo energético da geração de ozônio — normalmente produzido por descarga elétrica em geradores de alta tensão — constitui um dos principais componentes do OPEX do sistema. A eficiência energética do processo depende não apenas da concentração de ozônio gerada, mas também da eficiência de transferência gás-líquido e do tempo de contato, fatores que devem ser cuidadosamente dimensionados para evitar consumo excessivo de energia elétrica. Estudos comparativos recentes demonstram que grande parte da energia é perdida no próprio gerador de ozônio, impactando diretamente os custos operacionais do processo e exigindo escolhas tecnológicas estratégicas para melhorar a eficiência global. Além disso, estimativas do consumo de energia para a produção de ozônio variam numa faixa de aproximadamente 0,4 a 1,0 kWh por kg de O₃ produzido, podendo alcançar 6–15 kWh por kg de O₃ dependendo do método de alimentação (ar ou oxigênio) e do design da planta, o que torna

o custo energético um aspecto crucial a ser avaliado em aplicações de larga escala (SHEKARIAN et al., 2024; LIU et al., 2024; CONCAWE, 2025).

Pesquisas internacionais também indicam que, quando integrada a sistemas de reuso de água industrial, a ozonização apresenta custos operacionais relativamente baixos por metro cúbico tratado e pode oferecer retorno do investimento em poucos anos, especialmente em regiões onde os custos de captação, tratamento e descarte de água são elevados (MONTERO-GUADARRAMA et al., 2025). Em estações de tratamento de esgoto urbano, sua aplicação já mostrou diminuir a produção de lodo, reduzindo custos de operação e manutenção, resultado que pode ser extrapolado para o setor minerário, onde o manejo de lodos metálicos é um dos principais custos do tratamento (CRUTCHIK et al., 2022).

Além dos custos diretos, deve-se considerar o impacto econômico associado ao risco ambiental. Processos mais eficientes na remoção de metais reduzem a probabilidade de autuações, multas e passivos ambientais futuros, o que pode representar vantagem competitiva significativa em um setor fortemente regulado como o da mineração (BADAKHSHAN et al., 2023).

Entretanto, a análise comparativa evidencia limitações importantes. Grande parte dos estudos econômicos disponíveis concentra-se em efluentes urbanos ou industriais genéricos, havendo escassez de avaliações específicas para efluentes minerários ricos em metais pesados e com elevada variabilidade de vazão e composição (JALILI et al., 2022; MONTERO-GUADARRAMA et al., 2025). Além disso, muitos trabalhos não consideram integralmente variáveis críticas no contexto da mineração, como o elevado consumo energético em operações de grande escala, os custos de implantação de sistemas de geração de ozônio, a necessidade de infraestrutura robusta para tratamento contínuo, o manejo de lodo com potencial passivo ambiental e as exigências regulatórias específicas do setor.

Diante desse cenário, avaliações econômicas mais robustas devem incorporar análises detalhadas de custo-benefício, incluindo investimento inicial (CAPEX), custos operacionais (OPEX), consumo energético, redução no uso de insumos químicos, economia com manejo de lodo, potencial de reuso da água tratada e mitigação de riscos ambientais. Além disso, recomenda-se a realização de análises de sensibilidade que considerem variações no preço da energia elétrica, na concentração de metais, na vazão do efluente e nas exigências legais, permitindo estimar o impacto dessas variáveis sobre o tempo de retorno do investimento (payback) e sobre a competitividade da ozonização em relação às técnicas convencionais. (ATAKHANOVA, 2023; MONTERO-GUADARRAMA et al., 2025). A ausência de estudos consolidados com dados de escala industrial dificulta a comparação direta entre ozonização e

precipitação química tradicional em termos de custo por metro cúbico tratado especificamente para manganês. Essa lacuna limita a tomada de decisão baseada em evidências econômicas robustas.

Assim, embora a literatura aponte ganhos operacionais e redução de custos indiretos associados à menor geração de lodo e à redução no consumo de reagentes, ainda são necessários estudos aplicados ao contexto específico da mineração, com foco na remoção de manganês e na análise integrada de desempenho técnico e viabilidade econômica. A combinação entre eficiência oxidativa e competitividade financeira será determinante para consolidar a ozonização como alternativa tecnológica sustentável frente aos métodos convencionais de tratamento.

4 ESTUDO DE CASO

Com o propósito de analisar tecnologias avançadas aplicadas ao tratamento de efluentes industriais, com ênfase na utilização de Processos Oxidativos Avançados (POAs) para a remoção de contaminantes metálicos, foi desenvolvido um estudo de caso fundamentado no artigo científico **“Pilot study of advanced ozone oxidation treatment of mine wastewater for manganese degradation”**, de Hao et al. (2025).

4.1 Metodologia de Análise do Estudo de Caso

O presente estudo de caso foi desenvolvido por meio de **análise técnico-crítica documental**, fundamentada em dados experimentais reportados por Hao et al. (2025), referentes à aplicação de ozonização em escala piloto no tratamento de efluente de mineração de cobre na mina de Yinshan (China).

A abordagem adotada neste trabalho buscou ir além da simples descrição dos resultados apresentados no estudo original, incorporando uma análise técnica dos dados reportados por Hao et al. (2025). Inicialmente, foram extraídos os principais dados quantitativos do processo, como concentrações iniciais e finais de manganês, tempo de contato e dosagem de ozônio. A partir dessas informações, foram realizados cálculos complementares de desempenho, incluindo a estimativa da eficiência de remoção do manganês.

Ademais, foi conduzida uma avaliação crítica da viabilidade técnico-operacional da ozonização, considerando aspectos como consumo energético, necessidade de controle operacional e potencial de aplicação em sistemas de tratamento em escala ampliada. Por fim, os resultados foram comparados com dados reportados na literatura sobre processos oxidativos

aplicados a efluentes minerários, permitindo discutir o potencial da tecnologia no contexto do tratamento de efluentes industriais.

Para a avaliação do desempenho do processo, foram considerados critérios relacionados à eficiência técnica e à viabilidade operacional da tecnologia. Inicialmente, analisou-se a eficiência de remoção de manganês, observando-se a redução da concentração inicial do metal até valores compatíveis com os limites de descarte. Também foi avaliado o consumo específico de oxidante, relacionado à quantidade de ozônio necessária para promover a oxidação do Mn^{2+} . Outro aspecto considerado foi a demanda energética associada ao processo, especialmente devido ao consumo de energia elétrica necessário para a geração de ozônio.

Além disso, discutiu-se o potencial de escalabilidade industrial, analisando se as condições operacionais observadas em escala piloto poderiam ser aplicadas em sistemas de tratamento em maior escala. Por fim, foi considerada a conformidade com os limites ambientais, verificando se as concentrações finais de manganês atendem aos padrões regulatórios aplicáveis ao descarte de efluentes.

4.2 Contextualização Técnica do Problema

O estudo de caso da mina de cobre de Yinshan, na província de Jiangxi, China, refere-se ao tratamento de efluente oriundo de drenagem ácida associada à oxidação de sulfetos, como pirita (FeS_2), caracterizado por pH fortemente ácido, elevada DQO e concentrações significativas de metais dissolvidos, especialmente manganês. Em meio ácido, o Mn permanece como Mn^{2+} , espécie altamente solúvel e de difícil remoção por precipitação convencional. Embora o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS) seja eficiente para Cu e Zn, apresenta limitações para o manganês, cuja precipitação requer pH >9–10, elevando o consumo de cal e a geração de lodo, mantendo concentrações residuais entre 20 e 100 mg/L, superiores ao limite regulatório (<2 mg/L). Diante dessa limitação, avaliou-se a integração da ozonização como etapa complementar, visando a oxidação de Mn^{2+} a $MnO_2(s)$ insolúvel, sob diferentes condições operacionais em substituição a tecnologia tradicional de oxidação com ferrato de potássio, frequentemente prejudicados pelos altos custos operacionais na tentativa de tornar a presente proposta (HDS + ozonização) como uma alternativa tecnológica mais sustentável.

Vale salientar, que o estudo apresentado pelos autores não se limita a ensaios de bancada — eles avaliam a proposta de uma unidade piloto instalada em série após o sistema HDS (High Density Sludge – Lodo de Alta Densidade), devido a complexidade da matriz do

efluente em questão, o que agregou em termos de informações referentes: a dados operacionais reais; mostraram a influência da matriz complexa do efluente; apresentando parâmetros de escala intermediária e indicativos de viabilidade para ampliação industrial. Esse tipo de abordagem é extremamente relevante para um estudo de caso, pois envolve aplicabilidade prática.

Para aprofundar a discussão técnica, foram incorporadas contribuições de estudos que investigaram a aplicação da ozonização na remoção de metais dissolvidos em efluentes de mineração. Nesse contexto, Barolli et al. (2016) avaliaram a utilização do ozônio para remoção de manganês em águas de drenagem ácida de mina, demonstrando que o processo promove a oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}) para dióxido de manganês insolúvel (MnO_2), possibilitando sua posterior remoção por precipitação. Os autores observaram que concentrações iniciais de manganês entre 20 e 89 mg/L puderam ser reduzidas para valores inferiores a 1 mg/L após a ozonização, atendendo aos limites ambientais de descarte. Montero-Guadarrama et al. (2025) investigaram a eficiência de processos oxidativos na remoção de contaminantes presentes em efluentes industriais, analisando variáveis operacionais e o potencial dessas tecnologias para aprimorar o desempenho do tratamento e reduzir a carga de poluentes.

Antes da análise comparativa dos resultados, é importante contextualizar os parâmetros investigados nos estudos utilizados como referência. De modo geral, essas pesquisas avaliaram variáveis operacionais relevantes para processos de oxidação avançada aplicados ao tratamento de efluentes industriais, como pH do meio reacional, dosagem de oxidante, tempo de contato e características da matriz do efluente.

Somado a isso, foram analisadas condições experimentais relacionadas ao desempenho do processo, incluindo eficiência de remoção de contaminantes, consumo de reagentes ou energia e formação de subprodutos. Essas métricas permitiram avaliar tanto a eficiência técnica do tratamento quanto sua viabilidade operacional e econômica, fornecendo base para a comparação dos resultados obtidos no estudo de Hao et al. (2025) com outros trabalhos da literatura sobre aplicação de processos oxidativos avançados em efluentes industriais.

Adicionalmente ao aprofundamento das discussões, foi considerado o estudo desenvolvido por Jalili et al. (2022), que investigou a viabilidade técnico-econômica da aplicação da ozonização no tratamento de efluentes industriais complexos. Os resultados demonstraram que o processo de ozonização apresenta elevada capacidade de oxidação de compostos orgânicos persistentes, promovendo a degradação de poluentes e contribuindo para a redução da carga orgânica e da toxicidade dos efluentes industriais. O estudo também

evidenciou que a aplicação da ozonização pode aumentar a biodegradabilidade do efluente, favorecendo a integração com etapas subsequentes de tratamento biológico e, consequentemente, melhorando a eficiência global do sistema de tratamento.

Do ponto de vista econômico, os autores destacam que, apesar dos custos associados à geração de ozônio, a tecnologia pode apresentar viabilidade técnica e financeira quando aplicada como processo complementar em sistemas de tratamento avançado, especialmente em contextos que exigem maior eficiência na remoção de contaminantes complexos. Dessa forma, as contribuições de Jalili et al. (2022) reforçam o potencial da ozonização como tecnologia promissora para o tratamento de efluentes industriais, tanto sob a perspectiva ambiental quanto operacional.

A integração do estudo de Hao et al. (2025) com as demais referências selecionadas foi conduzida de forma estruturada e comparativa, não se configurando como uma revisão narrativa descritiva. As contribuições da literatura complementar foram sistematicamente incorporadas ao estudo de caso com o objetivo de sustentar, contrastar e aprofundar a interpretação dos resultados obtidos.

Nesse sentido, os dados reportados por Hao et al. (2025) constituem o eixo central da análise, enquanto as demais referências são mobilizadas como suporte crítico para discutir variáveis operacionais, mecanismos reacionais, consumo energético, formação de subprodutos, limitações técnicas e implicações econômicas.

Essa articulação metodológica amplia a análise para além da eficiência de remoção de manganês, permitindo avaliar a robustez do processo sob diferentes condições experimentais e contextos de aplicação. Assim, a discussão passa a apresentar caráter comparativo, mecanístico e avaliativo, fortalecendo a consistência científica do estudo de caso e evidenciando tanto o potencial tecnológico da ozonização quanto os desafios associados à sua implementação em escala industrial.

4.3 Análises dos Resultados

4.3.1 Análise da Aplicação da Ozonização em Efluente de Mineração de Cobre

O estudo de caso selecionado aborda a problemática vivenciada na mina de cobre de Yinshan, localizada na província de Jiangxi, China. Esta unidade mineradora enfrenta desafios significativos relacionados à gestão de seus recursos hídricos, especificamente no que tange à elevada carga de poluentes gerada durante as etapas de extração e beneficiamento do minério.

O efluente bruto caracterizou-se por apresentar pH fortemente ácido ($3,71 \pm 0,5$), elevada Demanda Química de Oxigênio – DQO (150 ± 10 mg/L) e altas concentrações de metais dissolvidos, incluindo cobre ($5,10 \pm 0,3$ mg/L), zinco ($40,5 \pm 2,8$ mg/L), cádmio ($9,66 \pm 0,5$ mg/L) e, principalmente, manganês (1100 ± 300 mg/L). Esses valores evidenciam a complexidade típica de efluentes associados à drenagem ácida de mina, nos quais a oxidação de sulfetos metálicos favorece a formação de meio altamente ácido e promove a solubilização de diversos metais.

A elevada concentração inicial de manganês constitui um dos principais desafios para o tratamento desse tipo de efluente. Em condições de pH ácido, o manganês permanece predominantemente na forma Mn^{2+} , espécie altamente solúvel e termodinamicamente estável em solução aquosa, o que dificulta sua remoção por processos convencionais de precipitação química. Esse comportamento explica por que, mesmo após etapas tradicionais de tratamento, como o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS), ainda podem ser observadas concentrações residuais relativamente elevadas desse metal no efluente tratado.

Resultados semelhantes são reportados na literatura. Fu e Wang (2011) observaram que o manganês apresenta maior persistência em efluentes minerários quando comparado a metais como cobre e zinco, uma vez que o íon Mn^{2+} permanece estável em solução aquosa em condições de pH ácido a neutro, exigindo valores de pH mais elevados para que ocorra sua precipitação eficiente. De modo semelhante, Aziz e Mustafa (2024) destacam que a elevada estabilidade química do manganês dissolvido dificulta sua remoção por processos convencionais de tratamento, sendo frequentemente necessária a aplicação de etapas adicionais de oxidação ou ajuste de pH para promover sua conversão em formas insolúveis. Nesse contexto, a adoção de tecnologias complementares de oxidação, como a ozonização, torna-se uma estratégia relevante para favorecer a conversão do manganês dissolvido em espécies insolúveis, facilitando sua posterior remoção por processos físicos de separação.

Em sistemas de drenagem ácida associados à mineração de sulfetos de cobre, a oxidação de minerais como pirita (FeS_2) e outros sulfetos metálicos favorece a geração de ácido sulfúrico, reduzindo o pH e aumentando a solubilização de metais. Nessas condições, o manganês permanece predominantemente na forma Mn^{2+} , altamente solúvel e termodinamicamente estável em meio ácido. A presença do manganês é particularmente problemática, pois as tecnologias convencionais de precipitação química muitas vezes falham em reduzir sua concentração aos níveis exigidos pelas normas ambientais rigorosas, que estipulam um limite de lançamento inferior a 2 mg/L para este elemento, considerando a GB8978–1996 norma técnica da China e 1 mg/L pela resolução CONAMA 430/2011 no Brasil.

A exigência de concentrações residuais inferiores a 2 mg/L representa um desafio técnico significativo para o tratamento de efluentes minerários, uma vez que a remoção de manganês em meio aquoso apresenta limitações associadas à sua elevada solubilidade e à necessidade de condições mais alcalinas para que ocorra sua precipitação eficiente. Esse limite encontra respaldo na Resolução CONAMA nº 430/2011, que estabelece condições e padrões para o lançamento de efluentes em corpos hídricos no Brasil. Após o tratamento convencional por processos de neutralização e precipitação, como o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS), as concentrações residuais de manganês podem permanecer significativamente acima desse valor, evidenciando a necessidade da aplicação de tecnologias complementares de tratamento para alcançar os padrões ambientais exigidos (FU; WANG, 2011; HAO et al., 2025).

No cenário avaliado, o efluente passou primeiramente por um sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS - *High Density Sludge*), uma tecnologia consolidada na mineração que utiliza neutralização com cal e recirculação de lodo para promover a precipitação da maior parte dos metais pesados. No entanto, embora o sistema HDS seja eficiente para a remoção de cobre ($\approx 98,3\%$) e zinco ($\approx 99,8\%$), ele apresenta limitações termodinâmicas e cinéticas para a remoção completa do manganês, que frequentemente permanece no efluente tratado em concentrações que variam entre 20 e 100 mg/L.

A eficiência da precipitação química de metais por adição de cal está diretamente relacionada às suas constantes de solubilidade (K_{ps}) e ao pH do meio. Desse modo, a diferença de comportamento observada pode ser explicada pelas constantes de solubilidade dos hidróxidos metálicos. Hidróxidos de cobre e zinco apresentam valores de K_{ps} significativamente mais baixos, como $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ($\approx 2,2 \times 10^{-19}$) e $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ($\approx 3,0 \times 10^{-17}$), o que favorece sua precipitação em faixas de pH moderadamente alcalinas (8–10), típicas do processo com cal. Em contrapartida, o $\text{Mn}(\text{OH})_2$ possui constante de solubilidade mais elevada ($\approx 1,9 \times 10^{-13}$), indicando maior solubilidade e, conseqüentemente, menor tendência à precipitação nas mesmas condições operacionais, exigindo valores de pH mais elevados (geralmente acima de 10,5–11), tornando o processo menos eficiente e operacionalmente mais limitado quando se utiliza apenas a alcalinização.

A presença contínua de manganês solúvel (Mn^{2+}) em efluentes representa um risco ambiental significativo, podendo ocasionar descoloração de corpos d'água receptores, toxicidade crônica à biota aquática e problemas operacionais, como a incrustação de tubulações, decorrente de sua oxidação lenta e natural a jusante do ponto de descarte. Esse comportamento está relacionado à elevada solubilidade do $\text{Mn}(\text{OH})_2$ e à cinética lenta de oxidação do Mn^{2+} pelo

oxigênio dissolvido, especialmente em condições de pH moderado e baixa disponibilidade de agentes oxidantes.

O princípio do HDS baseia-se na formação de hidróxidos metálicos por ajuste alcalino do pH, com posterior adensamento do lodo e reaproveitamento parcial como semente de nucleação. Contudo, a precipitação do manganês requer pH elevado (frequentemente acima de 10), o que aumenta o consumo de cal e a produção de resíduos sólidos.

A escolha pelo ozônio após a etapa HDS justifica-se pelo seu elevado potencial de oxidação (2.07 V), capaz de atuar tanto molecularmente quanto através da formação de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas (2.80 V) que aceleram a degradação de poluentes recalcitrantes e a oxidação de metais em estados de valência reduzida. A elevada constante cinética da reação com ozônio permite reduzir significativamente o tempo de residência necessário para atingir concentrações residuais compatíveis com os padrões regulatórios.

A estratégia do estudo baseou-se na premissa de que a ozonização poderia converter o manganês dissolvido (Mn^{2+}) em formas insolúveis (como o dióxido de manganês, MnO_2), permitindo sua subsequente remoção física e garantindo o enquadramento do efluente nos padrões de descarte. Dessa forma, a integração da ozonização ao sistema HDS foi avaliada como estratégia complementar, buscando verificar a eficiência de remoção de manganês sob diferentes condições operacionais de pH, dosagem de ozônio e tempo de contato.

A análise dos resultados indica que a eficiência da ozonização foi fortemente influenciada pelas condições operacionais do processo, especialmente pH, dosagem de ozônio e tempo de contato. As melhores condições observadas ocorreram em pH próximo da neutralidade (≈ 7), com dosagem elevada de ozônio (aproximadamente 55–60 g/Nm³) e tempo de contato em torno de 60 minutos, condições nas quais a concentração de manganês foi reduzida de aproximadamente 108 mg/L para valores inferiores a 2 mg/L, atendendo aos padrões ambientais de descarte. Nessas condições, observou-se a formação significativa de precipitados de MnO_2 , indicando a conversão do manganês dissolvido (Mn^{2+}) em formas insolúveis passíveis de remoção por processos físicos subsequentes.

Do ponto de vista químico, esse desempenho pode ser explicado pela elevada capacidade oxidante do ozônio e pela formação de espécies reativas, como radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que aceleram a oxidação do manganês dissolvido. Em pH próximo à neutralidade, a decomposição do ozônio favorece a geração desses radicais, aumentando a velocidade de oxidação e a formação de MnO_2 sólido. Estudos sobre ozonização aplicados ao tratamento de água indicam que o pH exerce papel determinante na eficiência da oxidação do manganês dissolvido. Em investigações experimentais sobre a remoção de Mn^{2+} por processos oxidativos,

observou-se que condições próximas da neutralidade ou levemente alcalinas favorecem a oxidação do Mn^{2+} e a formação de dióxido de manganês insolúvel (MnO_2), facilitando sua posterior remoção por processos físicos de separação. Em estudo experimental sobre a remoção de manganês por ozonização, verificou-se que a eficiência do processo depende fortemente da combinação entre pH, concentração de ozônio e tempo de contato, sendo esses fatores determinantes para a taxa de remoção do metal dissolvido. Os resultados indicaram que o aumento da concentração de ozônio e a manutenção de condições adequadas de pH contribuem significativamente para a melhoria da eficiência de remoção do manganês.

Nesse sentido, os resultados observados no presente estudo mostram-se consistentes com a literatura, que demonstra que a oxidação do manganês em solução aquosa é favorecida em faixas de pH próximas da neutralidade, enquanto valores muito baixos de pH reduzem a eficiência da reação e condições operacionais inadequadas podem levar à formação de espécies solúveis indesejadas. Dessa forma, a ozonização apresenta potencial relevante como etapa de polimento em sistemas de tratamento de efluentes minerários, especialmente quando integrada a processos convencionais, como o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS).

A unidade de ozonização piloto acoplada ao sistema HDS (encontra-se em detalhe esquemático) no Artigo fonte, consistiu em um gerador de ozônio (capacidade de produção ajustável) e uma torre de oxidação com volume útil de 80 litros. A configuração vertical favoreceu o regime de escoamento ascendente do gás, promovendo maior área interfacial e aumento da eficiência de transferência de massa. A introdução do ozônio na base do reator permitiu maximizar o tempo de residência do gás na fase líquida, reduzindo perdas por volatilização e aumentando a taxa de dissolução do oxidante. O sistema permitiu o ajuste dinâmico de variáveis operacionais fundamentais, como a concentração de entrada de ozônio (20-60 mg/L), o fluxo de gás e o tempo de retenção hidráulica. Pontos de amostragem foram posicionados em diferentes alturas da torre (torneiras de amostragem 1, 2 e 3) para permitir o monitoramento cinético da reação ao longo do perfil do reator, possibilitando uma compreensão detalhada da velocidade de oxidação e da eficiência de remoção em função do tempo e da altura da coluna de líquido.

O pH do efluente foi monitorado continuamente, uma vez que exerce influência direta na cinética de oxidação do manganês e na estabilidade das espécies reativas de oxigênio. Ajustes foram realizados quando necessário para manter condições favoráveis à conversão de Mn^{2+} em MnO_2 .

As concentrações de metais dissolvidos foram determinadas por espectrometria de absorção atômica (AAS) ou técnica equivalente validada, após digestão ácida das amostras, seguindo métodos padronizados para análise de águas residuais.

4.3.2 Análise do Sistema Experimental e Metodologia Analítica dos Resultados

A partir da análise da metodologia empregada no estudo, observa-se que a confiabilidade dos resultados está associada à combinação entre o monitoramento contínuo dos parâmetros operacionais e a utilização de métodos analíticos padronizados para a determinação das concentrações de metais no efluente. Além disso, o emprego de técnicas avançadas de caracterização permitiu identificar os produtos formados durante o processo de oxidação, contribuindo para a compreensão dos mecanismos químicos envolvidos na remoção do manganês. Dessa forma, a integração entre monitoramento operacional e caracterização química fornece base consistente para interpretar o desempenho da ozonização como etapa complementar ao sistema HDS. A concentração de ozônio foi monitorada continuamente para assegurar a estabilidade da dosagem. As concentrações de metais foram determinadas após digestão ácida, utilizando espectrofotometria e métodos padrão de análise de água. Além disso, técnicas avançadas de caracterização de materiais, como a Espectroscopia de Fotoelétrons de Raios-X (XPS), foram empregadas para analisar os precipitados formados, confirmando a natureza química dos subprodutos da oxidação. A detecção de radicais livres, fundamentais para o mecanismo de POA, foi realizada via Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR), comprovando a geração de radicais hidroxila durante o processo.

A análise por XPS permitiu identificar os estados de oxidação do manganês presentes no precipitado, diferenciando Mn^{2+} residual de Mn^{3+} e Mn^{4+} , confirmando a formação predominante de MnO_2 como produto da reação oxidativa.

A detecção dos sinais característicos de radicais hidroxila confirmou a ocorrência de mecanismos típicos de Processos Oxidativos Avançados, evidenciando que a oxidação do manganês não ocorreu exclusivamente por ataque direto do ozônio molecular, mas também por via radicalar.

A combinação entre monitoramento operacional, análise química quantitativa e técnicas avançadas de caracterização estrutural permitiu avaliar de forma integrada o desempenho da ozonização como etapa complementar ao HDS, fornecendo base técnica para análise de eficiência, mecanismos de reação e potencial de aplicação em escala industrial.

As características do efluente analisado evidenciaram a complexidade típica de efluentes minerários, justificando a necessidade de tecnologias complementares aos tratamentos convencionais.

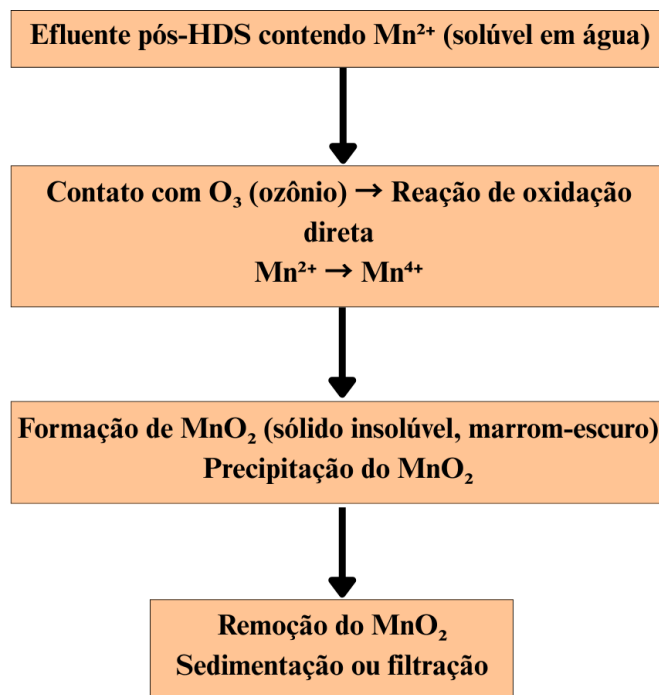
4.3.3 Análise dos Mecanismos de Reação e Fundamentação Química

Os resultados obtidos indicam que a elevada eficiência da ozonização na remoção de manganês está associada à oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}) presente no efluente pós-HDS. Durante o processo, o ozônio atua como forte agente oxidante, promovendo a conversão do Mn^{2+} em espécies de maior valência, principalmente dióxido de manganês (MnO_2), que apresenta baixa solubilidade em meio aquoso. Essa transformação é fundamental do ponto de vista do tratamento de efluentes, pois permite converter o manganês inicialmente dissolvido, de difícil remoção por processos convencionais, em partículas sólidas passíveis de separação por sedimentação ou filtração.

Esse comportamento está de acordo com o que é reportado na literatura sobre processos de ozonização aplicados ao tratamento de água e efluentes, nos quais o ozônio promove a oxidação do Mn^{2+} para MnO_2 insolúvel, facilitando sua separação da fase líquida e contribuindo para a redução da concentração de manganês no efluente tratado.

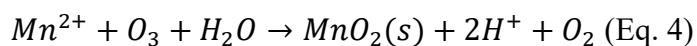
O fluxograma apresentado a seguir (Figura 6) sintetiza esse mecanismo de conversão, evidenciando a transformação do manganês da fase dissolvida para a forma particulada e sua posterior remoção no sistema de tratamento. Dessa forma, os resultados observados no estudo de caso corroboram a aplicação da ozonização como etapa complementar ao sistema HDS, especialmente para a remoção de manganês residual que permanece após os processos convencionais de precipitação química.

Figura 6 - Fluxograma do processo de oxidação e remoção de manganês por ozonização.



Fonte: Elaboração própria, com base em Hao et al. (2025).

A reação principal que governa esse processo pode ser descrita pela Equação 4, conforme detalhado por Hao *et al.* (2025). Esta reação demonstra a estequiometria básica onde uma molécula de ozônio e água participam na oxidação do íon metálico, liberando oxigênio molecular e prótons, o que teoricamente poderia reduzir levemente o pH do meio se não houvesse capacidade tampão.

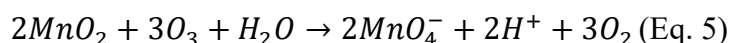


A formação de $\text{MnO}_2(s)$ reduz drasticamente a solubilidade do metal, permitindo sua remoção por processos físicos subsequentes. A geração de H^+ durante a reação pode promover leve acidificação do meio, exigindo controle operacional do pH para manter condições favoráveis à precipitação.

Do ponto de vista cinético, a oxidação do Mn^{2+} pelo ozônio ocorre em escala de minutos, sendo significativamente mais rápida do que a oxidação pelo oxigênio atmosférico, cuja taxa é limitada pela baixa constante de reação e dependência de pH elevado. Essa diferença cinética constitui um dos principais diferenciais da ozonização em relação aos processos naturais de autodepuração.

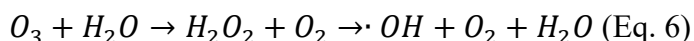
No entanto, o estudo destaca um aspecto crítico do controle operacional: o excesso de ozônio. Caso a dosagem do oxidante seja excessivamente alta em relação à carga de manganês, o MnO_2 formado pode ser superoxidado a permanganato (MnO_4^-), conforme a Equação 5. O íon permanganato é solúvel e apresenta uma coloração púrpura característica (violeta). A formação de permanganato é indesejável, pois redissolve o manganês no efluente tratado, aumentando novamente sua concentração final e violando os parâmetros de descarga, além de conferir cor à água.

A superoxidação do MnO_2 a permanganato (MnO_4^-) representa um risco operacional associado ao excesso de ozônio. O permanganato é termodinamicamente estável em meio oxidante e permanece solúvel, comprometendo a eficiência global do tratamento.



Esse fenômeno evidencia a importância do controle estequiométrico da dosagem de ozônio, de modo a evitar superoxidação e reintrodução do manganês na fase dissolvida.

Além da oxidação direta pelo ozônio molecular, o estudo confirmou a ocorrência de mecanismos de oxidação indireta via radicais hidroxila ($\bullet OH$). A decomposição do ozônio em água, catalisada por íons hidroxila (em pH mais elevado) ou pela própria presença de metais de transição, gera esses radicais, que possuem um potencial de oxidação superior ao do próprio ozônio. Isso indica que efluentes contendo ferro ou outros metais podem apresentar sinergia natural com a ozonização, aumentando a eficiência do processo sem necessidade de adição de catalisadores externos. A Equação 6 ilustra a via de decomposição que leva à formação dessas espécies reativas. A presença confirmada de radicais $\bullet OH$ pelo teste de EPR no estudo de caso sugere que a degradação de matéria orgânica residual (DQO) ocorre simultaneamente à precipitação dos metais, caracterizando o processo como um verdadeiro Tratamento Oxidativo Avançado.



Em pH mais elevado, o ozônio sofre decomposição radicalar, formando espécies como radical hidroxila ($\bullet OH$), cujo potencial de oxidação ($E^\circ \approx 2,80 \text{ V}$) supera o do próprio ozônio molecular. Esses radicais promovem oxidação não seletiva, contribuindo tanto para a degradação da matéria orgânica residual quanto para a oxidação de metais.

A detecção experimental dos radicais $\bullet\text{OH}$ por Ressonância Paramagnética Eletrônica (EPR) confirma que o sistema operou sob regime típico de Processo Oxidativo Avançado, combinando mecanismos diretos e indiretos de oxidação.

A análise via XPS do precipitado gerado confirmou que o produto final é majoritariamente composto por manganês na valência +4 (Mn^{4+}), corroborando a predominância da reação descrita na Equação 1. Isso valida a hipótese de que, sob condições controladas, o ozônio atua eficientemente como agente precipitante oxidativo, transformando poluentes dissolvidos em sólidos suspensos removíveis, sem a necessidade de adição de reagentes químicos sólidos que aumentariam o volume de lodo, como ocorre no uso de ferrato de potássio.

Além da oxidação direta promovida pelo ozônio molecular, o processo pode envolver rotas reacionais complementares que contribuem para o aumento da eficiência do sistema. Em determinadas condições operacionais, especialmente em pH próximo à neutralidade, ocorre a formação de espécies reativas intermediárias que favorecem a conversão do manganês dissolvido em fases sólidas estáveis. A geração e o crescimento dessas partículas sólidas estão associados a fenômenos de nucleação e agregação, que podem ser intensificados pela presença de outros íons metálicos no efluente, promovendo mecanismos de coprecipitação. Esse comportamento é particularmente relevante em concentrações residuais de manganês, nas quais a simples oxidação química pode não ser suficiente para garantir remoção completa apenas por conversão estequiométrica. Estudos aplicados ao tratamento de efluentes minerários indicam que a combinação entre alteração da especiação química e formação de fases sólidas insolúveis é determinante para o desempenho global da ozonização, sobretudo quando integrada a sistemas físico-químicos convencionais (JALILI et al., 2022; STASZAK; WIESZCZYCKA, 2023).

Assim, a compreensão detalhada desses mecanismos permite interpretar os resultados do estudo de caso de forma mais consistente do ponto de vista químico e operacional, uma vez que explica a relação entre a oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}), a formação de dióxido de manganês insolúvel (MnO_2) e a influência de variáveis como pH, dosagem de ozônio e tempo de contato no desempenho do processo. Essa interpretação, associada aos dados experimentais apresentados anteriormente, reforça a viabilidade da ozonização como etapa complementar ao sistema HDS, especialmente para a remoção de manganês residual que não é completamente eliminado pelos processos convencionais de precipitação química.

4.3.4 Análise da Influência dos Parâmetros Operacionais na Eficiência da Remoção

A eficiência da remoção de manganês por ozonização mostrou-se fortemente dependente das condições operacionais do processo, especialmente pH do meio reacional, concentração de ozônio aplicada e tempo de contato. Esses parâmetros influenciam diretamente a cinética de oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}) e a formação de espécies insolúveis passíveis de remoção por separação físico-química.

Entre as condições avaliadas, observou-se que pH próximo da neutralidade (≈ 7) proporcionou os melhores resultados de remoção. Nessa faixa de pH ocorre maior equilíbrio entre a estabilidade do ozônio molecular e a formação de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas que intensificam o processo oxidativo. Como consequência, o manganês dissolvido é convertido mais rapidamente em dióxido de manganês (MnO_2), favorecendo sua posterior remoção por sedimentação ou filtração.

A dosagem de ozônio também demonstrou influência significativa no desempenho do processo. Concentrações mais elevadas do oxidante aumentam a disponibilidade de espécies reativas no meio, acelerando a oxidação do Mn^{2+} e reduzindo o tempo necessário para atingir concentrações compatíveis com os padrões ambientais de descarte. Entretanto, a literatura indica que a aplicação excessiva de ozônio pode resultar em maior consumo energético sem ganhos proporcionais de eficiência, tornando necessário o equilíbrio entre eficiência de remoção e viabilidade operacional.

Outro parâmetro relevante foi o tempo de contato, que apresentou relação direta com a eficiência de remoção do manganês. Nos primeiros minutos de reação observou-se redução mais acentuada da concentração do metal, indicando elevada taxa de oxidação inicial. Com o avanço do processo, a velocidade de remoção tende a diminuir, comportamento típico de sistemas oxidativos em que a concentração do reagente e do contaminante decresce progressivamente.

Esse comportamento é consistente com o que tem sido reportado na literatura sobre ozonização aplicada ao tratamento de águas e efluentes contendo manganês, nos quais a combinação entre pH próximo à neutralidade, adequada dosagem de ozônio e tempo de contato suficiente favorece a conversão do Mn^{2+} em MnO_2 insolúvel, aumentando a eficiência global do tratamento. Dessa forma, os resultados observados reforçam o potencial da ozonização como etapa complementar ao sistema HDS para a remoção de manganês residual em efluentes minerários.

A partir das condições operacionais discutidas, é possível estimar quantitativamente a eficiência global do sistema combinado HDS + ozonização. Considerando a melhor condição operacional avaliada no estudo, na qual a concentração inicial de manganês foi de aproximadamente 108,4 mg/L e a concentração final após a ozonização foi reduzida para valores inferiores a 2 mg/L, a eficiência global de remoção do sistema combinado HDS + ozonização pode ser estimada aplicando-se a Equação 7 de eficiência de remoção:

$$n_{global} = \frac{C_0 - C_{O_3}}{C_0} \times 100 \quad (\text{eq. 7})$$

Substituindo os valores observados no estudo:

$$n_{global} = \frac{108,4 - 2}{108,4} \times 100$$

O resultado indica uma eficiência aproximada de 98,1%, evidenciando o elevado desempenho do sistema combinado HDS + ozonização na remoção do manganês residual presente no efluente tratado.

Esse resultado demonstra que a integração entre o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS) e a etapa de ozonização proporciona um aumento significativo na eficiência de remoção do manganês residual presente no efluente. A elevada eficiência observada indica que a ozonização atua de forma complementar ao tratamento convencional, promovendo a oxidação do manganês dissolvido (Mn^{2+}) em espécies insolúveis, como o dióxido de manganês (MnO_2), o que facilita sua posterior remoção por processos de separação sólido-líquido.

Do ponto de vista operacional, esse desempenho reforça a viabilidade da aplicação da ozonização como etapa adicional em sistemas de tratamento de efluentes minerários que apresentam concentrações residuais de manganês após o processo HDS.

A investigação da cinética de remoção do manganês revelou uma forte dependência do tempo de contato e da concentração de ozônio aplicada. Os resultados experimentais, indicam que a concentração de manganês apresentou redução mais acentuada nos primeiros minutos de ozonização demonstram que a concentração de manganês no efluente decai exponencialmente nos primeiros minutos de reação. Para uma concentração inicial de manganês de 108,4 mg/L e uma dosagem de ozônio de 55-60 g/Nm³, foi possível reduzir o contaminante para níveis abaixo de 2 mg/L em aproximadamente 60 minutos. No entanto, observou-se que após 30 minutos de

reação, a taxa de remoção desacelera, indicando que a maior parte da demanda de ozônio é consumida rapidamente nas fases iniciais, onde a concentração de reagentes é maior, obedecendo a uma cinética de pseudo-primeira ordem.

A concentração do ozônio na fase gasosa mostrou-se um parâmetro determinante para a velocidade da reação. Testes comparativos realizados com concentrações de 20, 40 e 60 mg/L de ozônio indicaram que maiores concentrações aceleram significativamente o processo. Com 20 mg/L de ozônio, foram necessários 60 minutos para atingir o padrão de descarte; ao triplicar a concentração para 60 mg/L, o tempo requerido caiu para cerca de 20 minutos. Isso se explica pelo aumento da força motriz de transferência de massa do ozônio da fase gasosa para a líquida e pela maior disponibilidade de moléculas oxidantes para colidir com os íons de manganês. Essa relação direta sugere que, em escala industrial, é possível reduzir o tamanho dos reatores (e o CAPEX) operando com geradores de ozônio de maior concentração.

A concentração de ozônio foi avaliada tanto na fase gasosa (g/Nm^3) quanto na fase líquida dissolvida (mg/L), sendo esta última diretamente relacionada à cinética de oxidação. O aumento da concentração de ozônio na fase gasosa elevou a pressão parcial do oxidante, intensificando a transferência de massa para o meio líquido e aumentando a constante cinética aparente da reação.

Outro fator importante analisado foi a concentração inicial de manganês no afluente. O estudo demonstrou uma relação linear entre a carga inicial de poluição e o tempo necessário para o tratamento. Através de regressão linear dos dados experimentais, os autores estabeleceram a equação $T = 0,56 \times C_{\text{inicial}} + 2,5$, onde T é o tempo de ação do ozônio e C_{inicial} é a concentração de manganês. Essa correlação matemática é de extrema valia para a automação de plantas industriais, permitindo que o sistema de controle ajuste o tempo de retenção ou a dosagem de ozônio em tempo real com base na leitura de sensores de entrada, garantindo a conformidade ambiental mesmo diante de flutuações na qualidade do efluente bruto.

A taxa global do processo pode ser descrita como função combinada da transferência de massa gás-líquido (kLa) e da reação química na fase líquida. Em concentrações elevadas de ozônio, o sistema tende a operar sob regime controlado pela cinética química; em concentrações mais baixas, a limitação pode estar associada à dissolução do gás.

A razão equivalente entre ozônio e efluente (relação gás/líquido) também foi otimizada. Experimentos variando a proporção de ozônio fornecido demonstraram que razões mais altas (como 7:1 e 5:1) garantem uma remoção rápida e completa, atingindo os padrões de lançamento logo nos primeiros pontos de amostragem da torre. Por outro lado, razões muito baixas (3:1)

resultaram em uma oxidação insuficiente no topo da torre, exigindo todo o comprimento do reator para atingir a conformidade. Isso evidencia a importância de um dimensionamento hidráulico e pneumático correto para evitar "curtos-circuitos" no tratamento e garantir que todo o volume de efluente receba a dose necessária de oxidante.

A relação linear indica que o sistema apresenta comportamento previsível dentro da faixa experimental avaliada, permitindo extrapolação controlada para diferentes cargas de manganês. Contudo, em concentrações extremamente elevadas, podem ocorrer desvios associados à limitação de transferência de massa ou consumo competitivo de ozônio por outras espécies presentes no efluente.

O pH do meio reacional desempenhou um papel fundamental na eficiência e no mecanismo de atuação do ozônio. Os testes variando o pH entre 5 e 8, revelaram que a eficiência de remoção é máxima em pH próximo à neutralidade (pH 7). Em meios muito ácidos, a decomposição do ozônio em radicais hidroxila é inibida, e a oxidação depende majoritariamente do ozônio molecular, que pode ser mais lenta para certos compostos. Em pH alcalino, embora a geração de radicais $\bullet\text{OH}$ seja favorecida, a estabilidade do ozônio diminui drasticamente, podendo levar a um consumo improdutivo do oxidante.

A otimização da razão gás/líquido influencia diretamente o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La), parâmetro fundamental para reatores de ozonização. Valores inadequados podem resultar em arraste de ozônio não reagido ou em zonas mortas no reator, reduzindo a eficiência global do sistema. Além disso, o pH exerce papel decisivo tanto na estabilidade do ozônio quanto na rota de oxidação predominante, estabelecendo um compromisso operacional entre a eficiência de remoção e o custo energético do processo — aspecto particularmente relevante quando se considera a aplicação da ozonização em escala industrial.

Em meio ácido ($\text{pH} < 5$), predomina o mecanismo de oxidação direta pelo ozônio molecular, cuja seletividade pode reduzir a velocidade global da reação com Mn^{2+} . Em pH moderadamente alcalino, a decomposição radicalar é favorecida, aumentando a formação de $\bullet\text{OH}$. Contudo, em pH excessivamente elevado, a decomposição rápida do ozônio pode reduzir sua eficiência efetiva, resultando em consumo improdutivo do oxidante.

A constatação de que o pH 7 é ótimo para o processo é extremamente favorável do ponto de vista operacional, uma vez que o efluente proveniente do sistema HDS já se encontra geralmente neutro ou levemente alcalino. Isso elimina a necessidade de etapas adicionais de correção de pH antes da unidade de ozonização, simplificando o fluxograma do processo e

reduzindo custos com reagentes acidificantes ou alcalinizantes. Além disso, operar em pH neutro minimiza os riscos de corrosão dos equipamentos e tubulações a jusante.

Além disso, operar em pH próximo à neutralidade favorece simultaneamente a estabilidade do MnO_2 precipitado e a manutenção de condições menos agressivas para materiais estruturais, contribuindo para maior vida útil dos equipamentos e menor custo de manutenção.

4.3.5 Comportamento de Outros Poluentes e Análise de Viabilidade Econômica

Além da remoção de manganês, o estudo também avaliou o comportamento de outros parâmetros de qualidade do efluente, buscando compreender os possíveis efeitos adicionais da ozonização sobre a matriz do efluente tratado. A análise desses resultados permite verificar se a aplicação do processo oxidativo apresenta benefícios complementares no tratamento, contribuindo não apenas para a remoção do manganês residual, mas também para a melhoria global da qualidade do efluente.

A partir da análise do estudo de caso e da literatura consultada, observa-se que a integração da ozonização com processos físico-químicos tradicionais, como coagulação, floculação e o sistema de Lodo de Alta Densidade (HDS), pode proporcionar vantagens operacionais relevantes. Nesse contexto, a ozonização atua como etapa complementar de oxidação, promovendo a conversão de espécies metálicas dissolvidas e a degradação de compostos orgânicos remanescentes, o que tende a reduzir a demanda por coagulantes e polímeros e a diminuir o volume de lodo gerado. Estudos como o de Jalili et al. (2022) indicam que a aplicação de ozônio em sistemas de tratamento pode contribuir para a otimização operacional e redução de subprodutos sólidos. De forma semelhante, Staszak e Wieszczycka (2023) destacam que a utilização de processos oxidativos avançados pode melhorar a qualidade final do efluente e aumentar a estabilidade do sistema de tratamento.

Além da remoção de manganês, o estudo de caso avaliou o impacto da ozonização sobre outros parâmetros de qualidade da água. Observou-se uma redução notável na Demanda Química de Oxigênio (DQO), que caiu de aproximadamente 10,23 mg/L para níveis indetectáveis (próximos a 0 mg/L) em apenas 10 minutos de tratamento. Embora a carga orgânica inicial já fosse moderada devido ao pré-tratamento por HDS, o resultado confirma o

potencial da ozonização como etapa de polimento final, promovendo a oxidação de compostos orgânicos remanescentes e aumentando a qualidade global do efluente tratado.

Quanto aos outros metais pesados monitorados, como cobre (Cu), zinco (Zn) e cádmio (Cd), as concentrações mantiveram-se estáveis ou sofreram reduções marginais, uma vez que o pré-tratamento HDS já havia removido a maior parte desses elementos. O flúor apresentou um comportamento oscilatório, com aumento inicial seguido de queda, sugerindo processos complexos de liberação e readsorção durante a formação dos precipitados de óxidos metálicos. Contudo, o foco principal, o manganês, foi consistentemente removido com eficiências superiores a 98%, validando a robustez da tecnologia para o alvo proposto.

A análise de viabilidade econômica apresentada no estudo é um dos pontos mais fortes para a justificativa da implementação dessa tecnologia. Tradicionalmente, a oxidação de manganês recalcitrante é feita com ferrato de potássio, um reagente químico de alto custo de aquisição e instabilidade química. Ao comparar os custos operacionais (OPEX) do sistema de ozonização proposto com o método tradicional de ferrato, os autores encontraram uma vantagem competitiva significativa para o ozônio.

A Tabela 5 apresenta uma síntese comparativa dos custos operacionais associados ao processo de ozonização e ao método convencional baseado no uso de ferrato de potássio para remoção de manganês. Os valores de referência foram extraídos do estudo de Hao et al. (2025); entretanto, a organização dos dados e a análise comparativa apresentada foram elaboradas neste trabalho com o objetivo de evidenciar as diferenças de custo entre as tecnologias. Para isso, foram considerados parâmetros como consumo energético do gerador de ozônio, custos operacionais estimados e custo unitário de tratamento por tonelada de efluente. Essa sistematização permitiu destacar de forma mais clara o impacto econômico da aplicação da ozonização como etapa complementar ao sistema HDS, evidenciando sua melhoria potencial em relação ao método químico tradicional.

Tabela 5 - Comparativo de custos operacionais entre Ozonização e Oxidação por Ferrato.

Item de Custo	Processo de Ozonização	Processo de Ferrato de
	Avançada	Potássio
Custo do Reagente/Energia (\$/g Mn)	0,0415	Alto (variável com fornecedor)
Custo Anual Total (Milhões de USD)	2,458	3,620

Custo Unitário de Tratamento (\$/ton)	Menor	Maior
Redução de Custo (%)	32,1% - 37,88%	-

Fonte: Adaptado de Hao *et al.* (2025).

A diferença de custo operacional decorre principalmente da substituição do consumo contínuo de reagentes químicos pelo uso de energia elétrica para geração *in situ* do oxidante. Tal característica reduz a vulnerabilidade do processo a oscilações de mercado, custos logísticos e armazenamento de substâncias instáveis, aumentando a previsibilidade financeira da operação.

Os dados indicam que o processo de ozonização apresenta um custo anual total de aproximadamente 2,458 milhões de dólares para a capacidade de tratamento estipulada, enquanto a tecnologia baseada em ferrato custaria cerca de 3,62 milhões de dólares anuais. Isso representa uma economia direta da ordem de 32% a 37%. A principal fonte de custo na ozonização é a energia elétrica (cerca de 0,016 \$/g Mn removido), o que torna a tecnologia sensível à tarifa de energia local, mas elimina a dependência logística e de preços de reagentes químicos externos. Considerando uma economia operacional anual aproximada de 1,162 milhões de dólares, o investimento inicial de 2,08 milhões de dólares apresenta tempo estimado de retorno (payback simples) inferior a dois anos, sendo altamente atrativo para projetos industriais de médio porte no setor mineral.

Nesse sentido, os resultados obtidos estão em consonância com a literatura, que aponta a geração de ozônio como o principal fator determinante do custo operacional do processo. Estudos indicam que o custo de produção do ozônio varia tipicamente entre 1,5 e 5 USD/kg, estando diretamente relacionado ao consumo energético, que pode alcançar valores entre 6 e 30 kWh por kg de O₃ gerado, dependendo da tecnologia empregada e da fonte de alimentação (ar ou oxigênio puro) (INCHAURRONDO *et al.*, 2022; CONCAWE, 2025).

Para melhor compreender o impacto desses parâmetros no cenário avaliado, pode-se estimar o consumo de ozônio a partir da estequiometria da reação. Considerando uma planta com capacidade de tratamento de 10.000 toneladas por dia (aproximadamente 10.000 m³/dia) e uma concentração de manganês de 108 mg/L, a oxidação do Mn²⁺ ocorre na proporção molar de 1:1 com o ozônio. Em termos de massa, isso corresponde a aproximadamente 0,87 mg de O₃ por mg de Mn²⁺, resultando em uma demanda teórica de cerca de 94 mg/L de ozônio. No entanto, devido a limitações operacionais, como transferência de massa e reações paralelas, a dosagem real pode ser significativamente superior, sendo comum a aplicação de fatores de

correção entre 1,5 e 3 vezes. Assim, considera-se uma dosagem aproximada de 188 mg/L, equivalente a 0,188 kg de O₃ por metro cúbico de efluente tratado.

Com base nessa estimativa, o custo operacional da ozonização pode variar entre aproximadamente 3.760 e 9.400 USD por dia, correspondendo a uma faixa de 0,38 a 0,94 USD/m³. Esses valores estão em concordância com os dados reportados na literatura para aplicações industriais de ozonização.

Os valores de custo estimados no presente estudo, situados entre 0,38 e 0,94 USD/m³, estão em consonância com dados reportados na literatura para processos de ozonização aplicados a diferentes tipos de efluentes. Em sistemas com baixa carga contaminante, como efluentes urbanos e estudos voltados à remoção de micropoluentes emergentes, os custos tendem a ser mais baixos. Por exemplo, trabalhos que avaliaram a remoção de microplásticos e compostos orgânicos residuais por ozonização reportaram custos na faixa de 0,079 a 0,25 €/m³, refletindo condições operacionais mais favoráveis e menor demanda oxidante (TOPKAYA et al., 2025)

Por outro lado, em efluentes industriais mais complexos, os custos aumentam significativamente devido à maior presença de compostos recalcitrantes e espécies reativas. Estudos que investigaram a aplicação de ozonização combinada com processos oxidativos avançados (AOPs), como O₃/H₂O₂, para tratamento de efluentes com alta carga orgânica reportaram custos da ordem de 1,4 USD/m³, evidenciando o impacto da complexidade da matriz no consumo de ozônio (MONTERO-GUADARRAMA et al., 2025). Em cenários ainda mais desafiadores, como no tratamento de efluentes farmacêuticos, caracterizados pela presença de compostos altamente persistentes, os custos podem atingir valores de até 6,38 USD/m³, devido à necessidade de maiores dosagens de ozônio e tempos de contato mais elevados (PATEL et al., 2020).

Outrossim, a viabilidade final do sistema de ozonização depende de fatores locais, como a tarifa energética, a escala da planta, os custos de manutenção dos geradores de ozônio e as exigências regulatórias aplicáveis. Em regiões onde a energia elétrica apresenta elevado custo, a atratividade econômica do processo pode ser reduzida, tornando necessária uma análise técnico-financeira individualizada. No contexto brasileiro, esse cenário é relativamente favorável, em função da elevada participação de fontes renováveis na matriz elétrica, o que contribui para a redução do custo energético e da pegada ambiental associada ao processo. Em contrapartida, regiões que não dispõem dessa mesma disponibilidade energética podem enfrentar maiores desafios econômicos e operacionais na implementação da tecnologia.

4.4 Análise Crítica do Estudo de Caso

Embora o estudo de Hao et al. (2025) apresente resultados tecnicamente promissores quanto à aplicação da ozonização na remoção de manganês residual em efluente de mineração, alguns aspectos metodológicos e operacionais merecem destaque e são apresentados na Tabela 6 a seguir como forma de auxiliar possíveis futuros trabalhos em escala real e contribuir para melhor caracterização do processo como um todo.

Tabela 6 - Limitações do Estudo de Caso Analisado

Categoria	Limitação Identificada	Proposta de Investigação Futura
Escala Experimental	Estudo conduzido em escala piloto	Pode não representar totalmente variações hidráulicas e operacionais de plantas industriais de grande porte
Variabilidade do Efluente	Composição do efluente relativamente estável durante os testes	Em operação real, oscilações de vazão e concentração de Mn podem exigir ajustes constantes na dosagem de ozônio
Consumo Energético	Estimativas econômicas baseadas em condições específicas de energia	Custos podem aumentar significativamente em regiões com energia elétrica mais cara ou instável
Controle de Dosagem de O ₃	Faixa ótima de ozônio determinada experimentalmente, mas sem modelagem de controle em tempo real	Risco de subdosagem (remoção incompleta) ou superdosagem (formação de permanganato e aumento de custo)
Formação de Subprodutos	Avaliação limitada da possível formação de subprodutos oxidativos intermediários	Pode haver geração de compostos orgânicos parcialmente oxidados com toxicidade residual não investigada
Gestão do Lodo Gerado	Não há detalhamento sobre volume, características ou destino do MnO ₂ precipitado	Pode gerar necessidade de tratamento ou disposição adequada do resíduo sólido
Interferentes Inorgânicos	Pouca discussão sobre competição de outros íons (Fe ²⁺ , Al ³⁺ , sulfatos)	Pode reduzir a eficiência do ozônio e aumentar o consumo energético em efluentes com matriz mais complexa
Cinética em Condições Reais	Cinética avaliada em condições controladas de mistura e transferência de massa	Em escala industrial, limitações hidrodinâmicas podem reduzir a taxa de oxidação observada

Avaliação Ecotoxicológica	Foco principal na remoção química de Mn e DQO	Não há testes de toxicidade aguda/crônica do efluente tratado
Generalização Geográfica	Dados obtidos para efluente de mina de cobre na China	Pode não refletir composição típica de efluentes de mineração brasileiros (ferro, alumínio, sulfatos elevados)

Fonte: Elaboração Própria

Apesar das limitações identificadas, é importante destacar que o estudo de Hao et al. (2025) representa um avanço relevante ao avaliar a ozonização em escala piloto, condição que aproxima os resultados de cenários operacionais reais e supera a limitação comum de pesquisas restritas a ensaios laboratoriais. A condução do processo em regime contínuo e integrado a um sistema convencional de tratamento fornece dados valiosos sobre desempenho, parâmetros operacionais e viabilidade técnica, contribuindo de forma significativa para o desenvolvimento e a consolidação dos Processos Oxidativos Avançados aplicados à mineração. Assim, as restrições apontadas não diminuem a importância do trabalho, mas evidenciam oportunidades para investigações futuras, especialmente voltadas à adaptação da tecnologia a diferentes matrizes de efluentes, ao aprimoramento do controle operacional e à avaliação ambiental integrada. Dessa maneira, o estudo analisado cumpre papel fundamental ao ampliar o conhecimento científico e servir como base para a evolução de soluções mais eficientes e sustentáveis no tratamento de efluentes mineradores.

4.5 Conclusão do Estudo de Caso

A partir da análise do estudo de caso, verifica-se que a aplicação da ozonização como etapa complementar ao sistema convencional de Lodo de Alta Densidade (HDS) apresenta alta eficiência na remoção de manganês residual em efluentes de mineração. Os resultados indicam que, sob condições adequadas de pH e dosagem de ozônio, ocorre a oxidação do Mn^{2+} para formas insolúveis, possibilitando sua remoção e contribuindo para o atendimento a padrões ambientais mais restritivos.

Do ponto de vista químico, o processo demonstra eficácia por envolver tanto a ação direta do ozônio quanto a formação de radicais hidroxila, caracterizando-se como um Processo Oxidativo Avançado. Observa-se ainda que a ozonização promove redução da matéria orgânica residual, atuando como etapa de polimento do efluente previamente tratado.

Entretanto, a aplicação em escala real requer atenção a fatores como o controle da dosagem de ozônio, o consumo energético do sistema e possíveis variações na composição do

efluente. Destaca-se também que o processo gera precipitados sólidos que necessitam de manejo adequado, além de não terem sido amplamente investigados possíveis subprodutos oxidativos formados durante o tratamento.

Dessa forma, conclui-se que a ozonização não substitui os tratamentos convencionais, mas se apresenta como alternativa complementar eficiente para a remoção de manganês residual, especialmente quando há necessidade de atender limites ambientais mais rigorosos. Sua viabilidade está diretamente relacionada a condições operacionais adequadas e à análise integrada dos aspectos técnicos, ambientais e econômicos.

Em síntese, o estudo de caso da mina de Yinshan indica que a integração entre o sistema HDS e a ozonização possui potencial técnico e econômico para o polimento de efluentes de mineração.

Assim, o estudo reforça a relevância da ozonização como alternativa complementar aos tratamentos convencionais, podendo contribuir para a mitigação dos impactos ambientais associados à mineração, desde que acompanhada de avaliação técnica, operacional e econômica em escala real.

5 CONCLUSÕES GERAIS DO TRABALHO

As seguintes conclusões gerais do trabalho foram:

- Quanto à descrição dos mecanismos de oxidação do manganês por ozônio, verificou-se que tanto as rotas direta quanto indireta são relevantes, com predominância dependente das condições de pH e do potencial redox do meio, influenciando diretamente a eficiência do processo.
- No que se refere à sistematização dos dados da literatura, constatou-se que parâmetros operacionais como pH, dosagem de ozônio, tempo de contato e características do efluente exercem influência significativa na remoção de manganês, sendo determinantes para a otimização do processo.
- Em relação à comparação entre a ozonização e o tratamento convencional por precipitação química, evidenciou-se que a ozonização apresenta maior potencial para atendimento aos limites da legislação ambiental brasileira, especialmente como etapa complementar de tratamento.
- Quanto à análise do estudo de caso, verificou-se que a aplicação da ozonização como etapa complementar ao processo HDS contribui para o aumento da eficiência de remoção de manganês e apresenta desempenho operacional consistente em escala piloto.

- Por fim, conclui-se que a ozonização representa alternativa tecnológica promissora para o aprimoramento do tratamento de efluentes minerários, podendo contribuir para a mitigação de impactos ambientais e para o fortalecimento da sustentabilidade hídrica no setor mineral, desde que aplicada de forma integrada, criteriosa e fundamentada em avaliação sistêmica.

Como contribuição acadêmica, este trabalho integra fundamentos de química oxidativa com a problemática ambiental da remoção de metais em efluentes minerários, destacando a relação entre mecanismos reacionais, desempenho operacional e exigências legais, oferecendo base teórica para futuras investigações experimentais e aplicações em escala real.

6 REFERÊNCIAS

- [1] ABFERTIAWAN, M. S. et al. Batch electrocoagulation process for the removal of high colloidal clay from open-cast coal mine water using Al and Fe electrodes. *Mine Water and the Environment*, v. 43, n. 3–4, p. 516–528, 2024. DOI: 10.1007/s10230-024-01004-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-024-01004-1>. Acesso em: 16 nov. 2025.
- [2] ADEWUYY, S. O.; AHMED, H. A. M.; AHMED, H. M. A. Methods of ore pretreatment for comminution energy reduction. *Minerals*, v. 10, n. 5, p. 423, 2020. DOI: 10.3390/min10050423. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/5/423>. Acesso em: 17 out. 2025.
- [3] AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). *Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. Brasília: ANA*, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/gestao-das-aguas/usos-da-agua>. Acesso em: 15 out. 2025.
- [4] ALAZAIZA, M. et al. Advanced oxidation processes in water treatment: mapping 15 years of scientific progress and collaboration. *Environments*, v. 13, n. 2, p. 103, 2026. DOI: <https://doi.org/10.3390/environments13020103>. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/400740547_Advanced_Oxidation_Processes_in_Water_Treatment_Mapping_15_Years_of_Scientific_Progress_and_Collaboration. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [5] ARAUJO, Cecília Bhering de. Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <https://coc.ufrj.br/wp-content/uploads/tainacan-items/6908/20305/Cecilia-Bhering-de-Araujo.pdf>. Acesso em: 15 out. 2025.
- [6] ARAÚJO, Karla Santos de; et al. Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. *Revista Ambiente & Água*, 2016.

- [7] ARENAS-COLLAO, K.; VALDÉS-GONZÁLEZ, H.; REYES-BOZO, L.; SALAZAR, J. L. The water management impacts of large-scale mining operations: A social and environmental perspective. *Water*, v. 16, n. 12, p. 1745, 2024. DOI: 10.3390/w16121745. Disponível em: <https://sl1nk.com/Qo20f>. Acesso em: 14 set. 2025.
- [8] ATAKHANOVA, Z. Water impacts and effluent quality regulations of Canadian mining. *Sustainability*, v. 15, n. 22, p. 16086, 18 nov. 2023. DOI: 10.3390/su152216086. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/22/16086>. Acesso em: 16 set. 2025.
- [9] ATAKHANOVA, Z.; MEIRAMBAYEVA, M.; BAIGALIYEVA, M. Mine water use in Kazakhstan: data issues, risks, and regulations. *Sustainability*, v. 16, n. 6, p. 2456, 2024. DOI: 10.3390/su16062456. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/6/2456>. Acesso em: 16 set. 2025.
- [10] AZIZ, K. H. H.; MUSTAFA, F. S. Advanced oxidation processes for the decontamination of heavy metal complexes in aquatic systems: a review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, v. 9, p. 100567, 2024. DOI: 10.1016/j.cscee.2023.100567. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666016423002724>. Acesso em: 22 nov. 2025.
- [11] BAROLLI, J. P. *et al.* Aplicação de ozônio para remoção de manganês em águas de drenagem ácida de mina na INB/Caldas. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 13, n. 2, p. 136-140, 2016. DOI: 10.4322/2176-1523.0968. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/95159380/fulltext.pdf>. Acesso em: 05 out. 2025.
- [12] BADAQHSAN, N. *et al.* Determining the environmental costs of mining projects: a comprehensive quantitative assessment. *Resources Policy*, v. 82, p. 103561, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103561>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420723002726>. Acesso em: 05 fev. 2026.
- [13] BAO, H., *et al.*, A review of technologies and mechanisms for the removal and recovery of manganese from mining and metallurgical wastewater, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 75, 2025, 107894, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107894>.

Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714425009663?utm_source=

Acesso em: 02 mar. 2026.

[14] BELTRÁN, F. J. Ozone Reaction Kinetics in Water and Wastewater Systems. **Boca Raton, FL: CRC Press**, 2004. DOI: 10.1201/9780203509173. Disponível em: <https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9780203509173/ozone-reaction-kinetics-water-wastewater-systems-fernando-beltran?utm=>. Acesso em: 07 out. 2025.

[15] BRASIL. Agência Nacional de Mineração (ANM). **Sumário mineral brasileiro 2023: manganês (ano-base 2022)**. Brasília, DF: ANM, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral/sumario-mineral-brasileiro-2023-/manganes-2023-ano-base-2022.pdf>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[16] BRASIL. Atividades potencialmente poluidoras e utilizadoras de recursos ambientais. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis – IBAMA**, Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=139397>. Acesso em: 19 out. 2025.

[17] BRASIL. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. Política Nacional do Meio Ambiente. **Diário Oficial da União: Brasília**, 1981. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1980-1987/lei-6938-31-agosto-1981-366135-publicacaooriginal-1-pl.html>. Acesso em: 20 out. 2025.

[18] BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União: Brasília**, 2005. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=102255>. Acesso em: 20 out. 2025.

[19] BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União: Brasília**, 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em: 20 out. 2025.

- [20] CONCAWE. Innovative techniques for effluent treatment for specific pollutants. *Report n. 6/25. Bruxelas: Concawe*, 2025. Disponível em: https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/Rpt_25-6.pdf. Acesso em: 5 mar. 2026
- [21] CONSELHO REGIONAL DE QUÍMICA – IV REGIÃO (CRQ-SP). **Elemento químico: manganês**. São Paulo: CRQ-IV, 2023. Disponível em: <https://crqsp.org.br/elemento-quimico-manganes/>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [22] COSTA, Letícia. Integração da ozonização no tratamento de água e efluentes: uma abordagem para a remoção e mineralização de fármacos e inativação de patógenos. 2024. *Tese (Doutorado em Engenharia Química) — Escola de Engenharia*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/277051>. Acesso em: 15 set. 2025.
- [23] CRUTCHIK, D. et al. Techno-economic evaluation of ozone application to reduce sludge production in small urban WWTPs. *Sustainability*, v. 14, n. 5, p. 2480, 22 fev. 2022. DOI: 10.3390/su14052480. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/5/2480>. Acesso em: 20 out. 2025.
- [24] DA SILVA, T. R. G. et al. An ecotoxicological approach for criteria and standards of sanitary effluent control in Brazil. *Ciência e Natura*, v. 46, p. e86291, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/view/8629>. Acesso em: 2 dez. 2025.
- [25] DE CAMPOS, R. F. F., et al. Tratamento biológico de efluentes: mecanismos de remoção dos compostos emergentes. *ARACÊ*, [S. l.], v. 7, n. 11, p. e9988, 2025. DOI: <https://doi.org/10.56238/arev7n11-159>. Disponível em: <https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/9988>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [26] DI FEO, A. et al. The effects of water recycling on nickel-copper ore at a North American concentrator. In: *Proceedings of the IMPC 2020 Congress*, SAIMM, [S.l.], 2020. Disponível em: <https://11nq.com/X2FHO>. Acesso em: 5 out. 2025..

[27] DNPM-PE – DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL DE PERNAMBUCO. Geologia – Mineração. Disponível em: <https://www.dnpm-pe.gov.br/Geologia/Mineracao.php>. Acesso em: 17 out. 2025.

[28] DONZELLI, G.; SUAREZ-VARELA, M. M. Air pollution and health effects: current perspectives on ozone exposure. *Atmosphere*, v. 15, n. 7, p. 779, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4433/15/7/779>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[29] ESPÓSITO, Terezinha de Jesus. Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Distrito Federal, 2000.

[30] FALCONI, I. B. A. et al. An overview of treatment techniques to remove ore flotation reagents from mining wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 6, p. 1-21, 2023. DOI: 10.1016/j.jece.2023.111270. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343723020092>. Acesso em: 2 dez. 2025.

[31] FARHAN, A. et al. Removal of toxic metals from water by nanocomposites through advanced remediation processes and photocatalytic oxidation. *Current Pollution Reports*, v. 9, n. 3, p. 338–358, 2023. DOI: 10.1007/s40726-023-00253-y. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40726-023-00253-y>. Acesso em: 14 nov. 2025.

[32] FERREIRA, A. C. et al. Circularidade no uso da água na mineração: indicadores e propostas metodológicas. *Journal of Sustainable Mining*, v. 14, n. 1, p. 1–15, 2025.

[33] FRASER, J; KUNZ, N. Water stewardship: Attributes of collaborative partnerships between mining companies and communities. *Water*, v. 10, n. 8, p. 1081, 14 ago. 2018. DOI: 10.3390/w10081081. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/10/8/1081>. Acesso em: 7 out. 2025.

[34] FU, F.; WANG, Q. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review. *Journal of Environmental Management*, v. 92, n. 3, p. 407–418, 2011. DOI:

10.1016/j.jenvman.2010.11.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479710004147>. Acesso em: 10 nov. 2025.

[35] GARLETT, E.; HOLCOMBE, S. Sustainable water in mining? The importance of Traditional Owner involvement in commercial water use and management in the Pilbara Region of Western Australia. *Oceania*, v. 93, n. 3, p. 282-301, 2023. DOI: 10.1002/ocea.5390. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ocea.5390>. Acesso em: 7 out. 2025.

[36] GOTTSCHALK, C.; LIBRA, J. A.; SAUPE, A. Ozonation of water and wastewater: a practical guide to understanding ozone and its applications. 2. ed. *Weinheim: Wiley-VCH*, 2010.

[37] GUZMÁN, A. *et al.* Hydrogeochemical characterization of mining-impacted waters: implications for environmental management. *Applied Geochemistry*, v. 144, p. 105–258, 2022.

[38] HAMRAOUI, L. *et al.* Towards a circular economy in the mining industry: possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, v. 14, n. 3, p. 319, 2024. DOI: 10.3390/min14030319. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/3/319>. Acesso em: 28 nov. 2025.

[39] HAO, R. *et al.* Pilot study of advanced ozone oxidation treatment of mine wastewater for manganese degradation. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 198, p. 107081, 2025. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107081. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582025003489>. Acesso em: 5 set. 2025.

[40] HOLM, S. M.; BALMES, J. R. Systematic review of ozone effects on human lung function, 2013–2020. *Chest*, v. 160, n. 5, p. 1874–1887, 2021. Disponível em: [https://journal.chestnet.org/article/S0012-3692\(21\)03626-6/fulltext](https://journal.chestnet.org/article/S0012-3692(21)03626-6/fulltext). Acesso em: 23 mar. 2026.

[41] HÜBNER, U.; *et al.* Advanced oxidation processes for water and wastewater treatment: guidance for systematic future research. *Heliyon*, v. 10, n. 9, e30402, 2024. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30402>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11079112/>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[42] IBRAM – INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Relatório de Sustentabilidade da Mineração Brasileira 2021**. Brasília: IBRAM, 2022. Disponível em: <https://slink.com/BRykw>. Acesso em: 20 set. 2025.

[43] ILAVSKÝ, J. et al. The use of membrane processes in manganese removal from drinking water. *Water*, v. 17, n. 8, art. 1226, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/w17081226>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/8/1226>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[44] INCHAURRONDO, N. S.; FONT, J. Clay, zeolite and oxide minerals: natural catalytic materials for the ozonation of organic pollutants. *Molecules*, v. 27, n. 7, p. 2151, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/molecules27072151>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1420-3049/27/7/2151>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[45] JADAA, W.; MOHAMMED, H. K. Toxic heavy metals elimination from contaminated effluents utilizing various adsorbents: critical mini-review. *Journal of Environmental & Life Sciences*, v. 4, n. 2, p. 281–296, fev. 2023. DOI: 10.37871/jbres1673. Disponível em: <https://11nq.com/myTXI>. Acesso em: 20 nov. 2025.

[46] JALILI, M. et al. The ozonation effect on flocculation and polymer consumption reduction in the hybrid treatment of Iran Central iron ore companies' effluent: a cost–benefit study. *Applied Water Science*, Heidelberg, v. 13, p. 51, 2022. DOI: 10.1007/s13201-022-01853-7. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-022-01853-7>. Acesso em: 20 nov. 2025.

[47] JERRETT, M. et al. Long-term ozone exposure and mortality. *New England Journal of Medicine*, v. 360, p. 1085–1095, 2009. Disponível em: <https://www.nejm.org/doi/10.1056/NEJMoa0803894>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[48] JING, G. et al. Recent advances in the treatment and recycling of mineral processing wastewater. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 9, p. 1290–1304, 2023. Disponível em:

<https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2009/kn/d2ew00944g/unauth>. Acesso em: 20 out. 2025.

[49] JUNG-HYUN SON, et al. The combination of ozone and Mn(II) for efficient removal of ozone-resistant N, N-diethyl-3-toluamide, *Water Research*, Volume 283, 2025,123883, <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123883>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135425007912?via%3Dihub>. Acesso em: 03 mar. 2026.

[50] KANAKARAJU, D. et al. Advanced oxidation process-mediated removal of pharmaceuticals from water: a review of recent advances. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 32, n. 24, p. 14316–14350, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36547-5>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40434594/>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[51] KANG, X. et al. Comparative study on the performance of typical coagulation-sedimentation and contact flocculation technology in treating high turbidity mine water. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 201, Part B, p. 107648, 2025. DOI: 10.1016/j.psep.2025.107648. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582025009152>. Acesso em: 10 out. 2025.

[52] LIU, W.; MORAN, C. J.; VINK, S. Quantitative risk-based approach for improving water quality management in mining. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 17, p. 7459–7464, 2011. DOI: 10.1021/es201876c. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es201876c>. Acesso em: 7 out. 2025.

[53] LIU, Y.; LAN, X.; WANG, L.; JIN, Q. A comparative analysis of ozone disinfection mainstream processes in wastewater treatment plants: Exergy and exergoeconomic viewpoints. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 114991, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114991>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343724031233>. Acesso em: 15 fev. 2026.

- [54] LOZANO, Fernando Arturo Erazo. Seleção de locais para barragens de rejeitos usando o método de análise hierárquica. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3145/tde-14122006-123702/en.php>. Acesso em: 15 set. 2025.
- [55] LU, J., YAO, L. Observational evidence for detrimental impact of inhaled ozone on human respiratory system. *BMC Public Health* **23**, 929, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s12889-023-15902-6>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- [56] MAHMOODI, M.; et al. Ozone-based advanced oxidation processes in water and wastewater treatment: recent advances and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36255-0>. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39827442/>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [57] MARTINI, R. Aplicação do ground penetrating radar em estudos para disposição de rejeitos de minério de ferro. 2014. Dissertação Mestrado em Engenharia – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte. Disponível em: <https://s11nk.com/QghJC>. Acesso em: 22 out. 2025.
- [58] MATEBESE, F. et al. Mining wastewater treatment technologies and resource recovery: a comprehensive review towards Zero Liquid Discharge. *Heliyon*, v. 10, p. e24730, 2024. DOI: 10.1016/j.heliyon.2024.e24730. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(24\)00761-8](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(24)00761-8). Acesso em: 11 out. 2025.
- [59] MOHAPATRA, D. P.; KIRPALANI, D. M. Process effluents and mine tailings: sources, effects and management and role of nanotechnology. *Nanotechnology for Environmental Engineering*, v. 2, n. 1, 2016. DOI: 10.1007/s41204-016-0011-6. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41204-016-0011-6>. Acesso em: 18 out. 2025.
- [60] MONTERO-GUADARRAMA, I. et al. Reverse osmosis coupled with ozonation for clean water recovery from an industrial effluent: technical and economic analyses. *Membranes*, v. 15, n. 1, p. 33, 2025. DOI: 10.3390/membranes15010033. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/15/1/33>. Acesso em: 5 nov. 2025.

- [61] NDLOVU, S. & ADEWUYI, S. O. *Towards sustainable metal extraction: Navigating energy and water challenges in the South African mining industry*. **The Extractive Industries and Society**, **24**, 101760, 2025. DOI: 10.1016/j.exis.2025.101760. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214790X25001492?via%3Dihub>. Acesso em: 11 out. 2025.
- [62] NORDSTROM, D. K. Mine waters: acidic to circumneutral. **Elements**, v. 7, n. 6, p. 393–398, 2011. DOI: 10.2113/gselements.7.6.393. Disponível em: <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/elements/article-abstract/7/6/393/137913/Mine-Waters-Acidic-to-Circumneutral>. Acesso em: 19 fev. 2026
- [63] OLADIMEJI, T. E. *et al.* Review on the impact of heavy metals from industrial activities on wastewater and their removal techniques. **Heliyon**, v. 10, 2024. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11625160/>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [64] OLIN, A.-C. *et al.* Respiratory health among bleachery workers exposed to ozone and chlorine dioxide. **Scandinavian Journal of Work, Environment & Health**, v. 28, n. 2, p. 117–123, 2002. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/12019588/>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- [65] Patel, S., Mondal, S., Majumder, S. K., Das, P., & Ghosh, P. Treatment of a Pharmaceutical Industrial Effluent by a Hybrid Process of Advanced Oxidation and Adsorption. **ACS omega**, 5(50), 32305–32317, 2020. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acsomega.0c04139>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- [66] PAN, S. *et al.* Enhanced water treatment via combined oxidation and adsorption: a synergistic approach. **Frontiers in Chemistry**, v. 13, p. 1747407, 05 jan. 2026. DOI: 10.3389/fchem.2025.1747407.
- [67] PASSOS, A. do N; SOARES, C. J. F. A (des)regulamentação estatal e a busca pela segurança das barragens de rejeitos da mineração. **Revista Desenvolvimento Social**, Montes Claros, v. 29, n. 1, p. 219-245, 2023. DOI: 10.46551/issn2179-6807v29n1p219-245. Disponível

em: <https://www.periodicos.unimontes.br/index.php/rds/article/view/6841>. Acesso em: 10 out. 2025.

[68] PUREVJAV, B. et al. Pathways to water stewardship in mining regions: promoting processes for integrated water resources management in the Gobi Desert. *Preprint*, SEF Canada, 2024. Disponível em: <https://11nq.com/te0yi>. Acesso em: 16 nov. 2025.

[69] RADBEL, J. et al. Ozone exposure and respiratory health outcomes: recent advances in understanding mechanisms and risks. *Environmental Research*, v. 240, 2024. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38749002/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[70] RAN, Maoxi; GONG, Tingqi; TANG, Zhenwu. Removal of new contaminants from wastewater through advanced oxidation processes – a perspective. *New Contaminants*, v. 1, art. e020, 2025. DOI: <https://doi.org/10.48130/newcontam-0025-0020>. Disponível em: <https://www.maxapress.com/article/id/6954e055fa6c5806a63d7d2e>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[71] RIAD, Mehedi Hashan; et al. From Tradition to Innovation: An In-Depth Review of Manganese Removal Techniques in Water Treatment. Preprint. *Preprints.org*, 13 mar. 2025. DOI: 10.20944/preprints202503.1066.v1. Disponível em: <https://www.preprints.org/manuscript/202503.1066>. Acesso em: 2 mar. 2026.

[72] RUDI N.N., et al. Evolution of adsorption process for manganese removal in water via agricultural waste adsorbents. *Heliyon*, v. 6, n. 10, e05346, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05346>. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7536304/>. Acesso em: 5 mar. 2026.

[73] RYSKIE, S. et al. Influence of ozone microbubble enhanced oxidation on mine effluent mixes and *Daphnia magna* toxicity. *Chemosphere*, v. 329, p. 138559, 2023. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2023.138559. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0045653523008263>. Acesso em: 15 set. 2025.

[74] SEO, S. H. et al. Removal of heavy metals in an abandoned mine drainage via ozone oxidation: a pilot-scale operation. *Water Science and Technology*, v. 62, n. 9, p. 2115–2120,

2010. DOI: 10.2166/wst.2010.406. Disponível em: <https://11nq.com/jbUQ4>. Acesso em: 22 out. 2025.

[75] SHANNON, M. A. et al. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature*, v. 452, n. 7185, p. 301–310, 2008. DOI: 10.1038/nature06599. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/nature06599>. Acesso em: 19 fev. 2026.

[76] SHEKARIAN, Y., et al. Development of a chemical-free process utilizing ozone oxidative precipitation for the recovery of cobalt and manganese from acid mine drainage. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 10, p. 108533, 2022. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108533. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343722014063>. Acesso em: 9 set. 2025.

[77] SHEKARIAN, Y.; REZAEI, M.; PISUPATI, S. Green chemical precipitation of manganese, cobalt, and nickel from acid mine drainage using ozone: mechanism and chemical kinetics. *Reaction Chemistry & Engineering*, v. 10, p. 2398–2411, 2025. DOI: 10.1039/D5RE00222B. Disponível em: <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2025/re/d5re00222b>. Acesso em: 14 out. 2025.

[78] SHI, Y. et al. Revisiting the mineralization of organic contaminants in advanced oxidation processes. *ACS ES&T Water*, v. 3, n. 11, p. 3449–3451, 2023. DOI: 10.1021/acsestwater.3c00523. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/full/10.1021/acsestwater.3c00523>. Acesso em: 9 out. 2025.

[79] SKOUSEN, J. et al. Review of passive systems for acid mine drainage treatment. *Mine Water and the Environment*, v. 36, n. 1, p. 133–153, 2017. DOI: 10.1007/s10230-016-0417-1. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-016-0417-1>. Acesso em: 19 dez. 2025.

[80] SPARROW, L. A.; UREN, N. C. Manganese oxidation and reduction in soils: effects of temperature, water potential, pH and their interactions. *Soil Research*, v. 52, n. 5, p. 483–494, 2014. DOI: 10.1071/SR13159. Disponível em: <https://connectsci.au/sr/article-abstract/52/5/483/Manganese-oxidation-and-reduction-in-soils-effects>. Acesso em: 20 fev. 2026

- [81] STASZAK, K.; WIESZCZYCKA, K. Recovery of metals from wastewater—state-of-the-art solutions with the support of membrane technology. *Membranes*, v. 13, n. 1, p. 114, 2023. DOI: 10.3390/membranes13010114. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2077-0375/13/1/114>. Acesso em: 11 nov. 2025.
- [82] TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F. L.; STENSEL, H. D. Wastewater engineering: treatment and resource recovery. **5. ed. New York: McGraw-Hill**, 2014.
- [83] TOBIASON, John E.; et al. Manganese removal from drinking water sources. *Current Pollution Reports*, v. 2, n. 3, p. 168–177, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40726-016-0036-2>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40726-016-0036-2>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [84] TONG, L.; FAN, R.; YANG, S.; LI, C. Development and status of the treatment technology for acid mine drainage. *Mining, Metallurgy & Exploration*, v. 38, p. 315–327, 2021. DOI: 10.1007/S42461-020-00298-3. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/S42461-020-00298-3>. Acesso em: 2 nov. 2025.
- [85] TOPKAYA, Eylem; et al.,. Removal of microplastics by ozone oxidation from urban wastewater using Taguchi experimental design. *Water, Air, & Soil Pollution*, v. 236, art. 606, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-025-08249-8>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-025-08249-8>. Acesso em: 23 mar. 2026.
- [86] UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). Technical support document for the manganese rule. **Washington, DC: USEPA**, 2014.
- [87] VILLA GOMEZ, D. *et al.* Review on developments in technologies for critical metal recovery from mining and processing wastes. *Minerals Engineering*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/08827508.2024.2408015>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/08827508.2024.2408015>. Acesso em: 5 mar. 2026.
- [88] VINK, S. *et al.* Understanding mine site water and salt dynamics to support integrated water quality and quantity management. *Mining Technology*, v. 118, n. 3, p. 185-192, 2009. DOI: 10.1179/174328610X12682159815226. Disponível em:

<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1179/174328610X12682159815226>. Acesso em: 14 out. 2025.

[89] VON GUNTEN, U. Ozonation of drinking water: Part I. Oxidation kinetics and product formation. *Water Research*, v. 37, n. 7, p. 1443–1467, 2003. DOI: 10.1016/S0043-1354(02)00457-8. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135402004578>. Acesso em: 14 out. 2025.

[90] VOUDOURIS, K; VOUTSA, D. Mining and water pollution. *Water quality: monitoring and assessment*. Rijeka: InTech, 2012. cap. 15, p. 347–400. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=z-uZDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA347&dq=Mining+and+water+pollution:+sources,+types+and+management.+Journal+of+Geochemical+Exploration.&ots=pcXtR-3SaB&sig=yVBPnoMHfEPfpR6RK5d0I1IFbkc&redir_esc=y#v=onepage&q=Mining%20and%20water%20pollution%3A%20sources%2C%20types%20and%20management.%20Journal%20of%20Geochemical%20Exploration%2C&f=false. Acesso em: 20 set. 2025.

[91] WANG, L. K.; HUNG, Y.; SHAMMAS, N. K. (eds.). Advanced Physicochemical Treatment Technologies. Totowa, NJ: Humana Press, 2007. v. 5, *Handbook of Environmental Engineering*. DOI: 10.1007/978-1-59745-173-4. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-59745-173-4>. Acesso em: 10 jan. 2026.

[92] WESCHLER, C. J. Ozone's impact on public health: contributions from indoor exposures to ozone and products of ozone-initiated chemistry. *Environmental Health Perspectives*, v. 114, n. 10, p. 1489–1496, 2006. Disponível em: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC1626413/>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[93] WU, R. et al. Manganese pollution and its remediation: a review of biological removal and promising combination strategies. *Microorganisms*, v. 10, n. 12, art. 2411, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/microorganisms10122411>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-2607/10/12/2411>. Acesso em: 5 mar. 2026

[94] XIAO Y, et al. Research progress of micro-nano bubbles in environmental remediation: Mechanisms, preparation methods, and applications. *J Environ Manage*. 2025. DOI:

[10.1016/j.jenvman.2025.124387](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.124387). Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/39904246/>.

Acesso em: 16 fev. 2026.

[95] XU, Q. *et al.* Evolution of mineral phase in the chemical neutralization process of Mn dominated acid mine drainage under different aeration conditions. *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 7, p. 100090, 2022. DOI: 10.1016/j.hazadv.2022.100090. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772416622000468>. Acesso em: 19 fev. 2026.

[96] YODA, Y. *et al.* Long-term ozone exposure and neurological health effects: emerging evidence and perspectives. *Toxics*, v. 13, n. 3, p. 196, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2305-6304/13/3/196>. Acesso em: 23 mar. 2026.

[97] ZHENG, T. H. *et al.* Recent Progress in Catalytically Driven Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment. *Catalysts*, v. 15, n. 8, p. 761, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/catal15080761>. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4344/15/8/761>. Acesso em: 5 mar. 2026

[98] ZULU, E. *et al.* A comprehensive review of recent advances in membrane innovations for efficient heavy metal removal from mine effluents. *Scientific African*, v. 27, p. e02510, 2025. DOI: 10.1016/j.sciaf.2024.e02510. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2468227624004526>. Acesso em: 23 set. 2025.