

PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO CARVÃO ATIVADO NA REMOÇÃO DE ENXOFRE DA ÁGUA

PROPOSAL FOR EVALUATING THE EFFICIENCY OF ACTIVATED CHARCOAL IN REMOVING SULFUR FROM WATER

Edson Roberto da Cruz^{1,i}

Gabriel de Souza Nascimento^{2,ii}

Matheus Henrique da Silva^{3,iii}

Tiago Akira Tashiro de Araújo^{4,iv}

Humberto de Sousa Megda^{5,v}

RESUMO

A indústria que utiliza enxofre enfrenta o desafio de lidar com os resíduos aquosos gerados nos processos de resfriamento, aplicação onde esse elemento é mais utilizado. Ele possui compostos de enxofre tóxicos e prejudiciais ao meio ambiente. Esse artigo objetiva desenvolver um sistema de tratamento de água contaminada por enxofre utilizando carvão ativado, visando a reutilização da água no processo industrial, reduzindo custos e impactos ambientais. Será sugerida a implantação de um sistema de três tanques: coleta da água contaminada, tratamento com carvão ativado e armazenamento da água purificada. Sensores monitorarão os níveis de contaminação, pH e outros parâmetros durante todo o processo. Espera-se que o carvão ativado seja eficaz na remoção de compostos de enxofre, como o sulfeto de hidrogênio, purificando a água e permitindo sua reutilização no processo industrial. O estudo propõe uma solução ambientalmente amigável e economicamente viável para o tratamento de água contaminada por enxofre em indústrias. A utilização de carvão ativado como adsorvente mostra-se promissora para reduzir a geração de resíduos e promover a sustentabilidade industrial.

¹ Graduando na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: edson.cruz3@senaisp.edu.br

² Graduando na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: gabriel.nascimento107@senaisp.edu.br

³ Graduando na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: matheus.vicente7@senaisp.edu.br

⁴ Professor de Educação Superior na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: tiago.araujo@sp.senai.br

⁵ Professor de Educação Superior na Faculdade SENAI de Tecnologia de Santos. E-mail: humberto.sousa@sp.senai.br

Palavras-chave: contaminação por enxofre; carvão ativado; reutilização da água

ABSTRACT

The sulfur-using industry faces the challenge of dealing with aqueous waste generated in the cooling process, which contains toxic sulfur compounds that are harmful to the environment. This article aims to develop a system for treating water contaminated by sulfur using activated carbon, aiming to reuse water in the industrial process, reducing costs and environmental impacts. The implementation of a three-tank system will be suggested: collection of contaminated water, treatment with activated carbon and storage of purified water. Sensors will monitor contamination levels, pH and other parameters throughout the process. Activated carbon is expected to be effective in removing sulfur compounds such as hydrogen sulfide, purifying water and allowing its reuse in the industrial process. The study proposes an environmentally friendly and economically viable solution for treating sulfur-contaminated water in industries. The use of activated carbon as an adsorbent shows promise for reducing waste generation and promoting industrial sustainability.

Keywords: sulfur contamination; activated carbon; water reuse

1 INTRODUÇÃO

O enxofre foi classificado como elemento químico no ano de 1770, por Lavoisier, mas só foi isolado como substância simples na primeira metade do século XIX, pelos químicos franceses Gay-Lussac e Thenard.

Conforme Anjos (2011), no mundo industrial, o enxofre passou a ser utilizado no processo de vulcanização da borracha, melhorando drasticamente a qualidade desse material e tendo muita importância na indústria automobilística, sendo aplicado à resistência dos pneus. Além disto, o enxofre é utilizado na fabricação de fósforos, inseticidas e produtos têxteis, além de estar presente na metalurgia e na indústria farmacêutica, sendo seus principais compostos o ácido sulfúrico (H_2SO_4), o dióxido de enxofre (SO_2) e o sulfureto de hidrogênio (H_2S).

A queima do enxofre gera a liberação de gases tóxicos para a atmosfera e para o solo, o que pode ocasionar, além de danos ao meio ambiente, um sério problema de saúde pública, especialmente aos funcionários que trabalham com armazenamento e processo com esse produto. Desta forma, por medidas de segurança, durante o armazenamento do enxofre, há a necessidade de um tratamento de resfriamento à base de água. Porém, os resíduos desse processo acabam gerando resíduos no solo e impactos ambientais (De Matos, 2020).

Além desta problemática, Souza (2013) observa que na indústria ocorre um grande desperdício desta água utilizada no processo de resfriamento, sendo portanto um agravante ambiental, o qual torna-se necessário desenvolver um sistema de tratamento desta água, a fim de permitir sua reutilização dentro do próprio processo, objetivando a promoção da sustentabilidade ambiental e econômica dentro da indústria.

Para isto, o processo de descontaminação desta água torna-se um grande desafio. Sobral (2024) propõe uma alternativa viável a partir da aplicação de carvão ativado, que possui uma grande área de superfície e uma estrutura porosa que permite a adsorção eficaz de impurezas presentes na água. Inicialmente, a água contaminada seria coletada do processo de lavagem, de resíduos industriais ou mesmo de drenagem de áreas específicas. Em seguida, a água passaria por um pré-tratamento para remover sólidos grosseiros e outros contaminantes maiores, preparando-a então para o tratamento com carvão ativado. Durante o processo de contato com o carvão ativado, os compostos de enxofre serão então adsorvidos, removendo-os da água e purificando-a. Após o tratamento, a água então purificada pode ser armazenada e reintroduzida no processo, sendo então denominada como água reutilizada.

Desta forma, este projeto tem por finalidade a implementação de um processo de descontaminação industrial de água contaminada por enxofre a partir da utilização de carvão ativado, sendo esta uma proposta tanto ambientalmente amigável como uma economia em relação à utilização da água para o setor industrial (Hobuss, 2007).

1.1 Problema de pesquisa

Realizar testes práticos para verificar a eficácia do carvão ativado na remoção de enxofre pode ser um empreendimento complexo, repleto de desafios. Para garantir

que os testes sejam bem-sucedidos e produzam resultados precisos, é fundamental abordar uma série de aspectos técnicos e metodológicos com atenção e rigor.

1.2 Objetivo(s)

Este projeto tem por objetivo promover a reutilização da água utilizada no processo de resfriamento na indústria de fertilizantes, promovendo a redução do quantitativo de enxofre presente na mesma, por meio da purificação da água utilizando carvão ativado, reduzindo assim impactos ambientais e custos industriais.

1.3 Justificativa

A contaminação da água por compostos de enxofre, como sulfeto de hidrogênio (H_2S) e sulfatos (SO_4^{2-}), é um problema significativo que afeta a qualidade da água potável e pode representar riscos para a saúde pública e o meio ambiente. O sulfeto de hidrogênio é particularmente problemático devido ao seu odor desagradável e toxicidade, enquanto os sulfatos podem alterar o sabor da água e interferir nos processos de tratamento e distribuição.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A presença de enxofre em efluentes industriais representa um grave problema ambiental, contribuindo para a acidificação de solos e águas, a formação de chuvas ácidas e a produção de gases de efeito estufa. A crescente preocupação com a sustentabilidade e a escassez hídrica impulsionam a busca por tecnologias eficientes para a remoção de enxofre e a reutilização da água.

Neste contexto, o carvão ativado emerge como uma alternativa promissora devido à sua alta capacidade de adsorção, seletividade e versatilidade. A presente revisão busca aprofundar o entendimento sobre o uso do carvão ativado na remoção de enxofre, comparando-o com outras técnicas e justificando sua escolha como método de tratamento.

A indústria, em diversos setores, utiliza combustíveis fósseis e processos químicos que liberam compostos de enxofre nos efluentes. Esses compostos podem estar presentes na forma de sulfetos, sulfatos, tiosulfatos e dióxido de enxofre (SO_2). A

descarga desses efluentes em corpos d'água causa diversos impactos ambientais, como:

- **Acidificação:** O SO_2 reage com a água da chuva, formando ácido sulfúrico, que acidifica solos e águas, afetando a biodiversidade e a agricultura.
- **Eutrofização:** O excesso de nutrientes, como sulfatos, pode levar à proliferação de algas, causando a eutrofização e a morte de organismos aquáticos.
- **Toxicidade:** Alguns compostos de enxofre são tóxicos para diversos organismos, incluindo seres humanos.

A reutilização da água é uma estratégia fundamental para reduzir o consumo de água potável e minimizar os impactos ambientais da indústria. A remoção eficiente de contaminantes, como o enxofre, é essencial para garantir a qualidade da água reutilizada e permitir seu uso em diferentes processos industriais.

O carvão ativado é um material carbonoso poroso com uma área superficial extremamente elevada, o que lhe confere uma alta capacidade de adsorção. Sua estrutura porosa permite a retenção de moléculas de enxofre, removendo-as da água. As principais vantagens do uso do carvão ativado incluem:

- **Alta capacidade de adsorção:** Remove uma grande quantidade de contaminantes em um curto período de tempo.
- **Seletividade:** Pode ser modificado para adsorver preferencialmente determinados compostos de enxofre.
- **Versatilidade:** Pode ser utilizado em diferentes tipos de efluentes e em diversos processos de tratamento.
- **Regeneração:** Em alguns casos, o carvão ativado pode ser regenerado e reutilizado, reduzindo os custos do tratamento.

Diversas técnicas são utilizadas para a remoção de enxofre em efluentes industriais, como:

- **Precipitação química:** Utiliza reagentes químicos para precipitar os compostos de enxofre.

- **Oxidação:** Emprega agentes oxidantes para converter os compostos de enxofre em formas menos tóxicas ou mais facilmente removíveis.
- **Membranas:** Utiliza membranas semipermeáveis para separar os compostos de enxofre da água.
- **Processos biológicos:** Utiliza microrganismos para degradar os compostos de enxofre.

O carvão ativado se destaca por sua alta capacidade de adsorção, seletividade e versatilidade, o que o torna uma excelente opção para a remoção de enxofre em diversos tipos de efluentes. Além disso, sua capacidade de regeneração pode reduzir os custos de tratamento a longo prazo.

A contaminação por enxofre em processos industriais representa um grave problema ambiental. A reutilização da água, associada a tecnologias eficientes de tratamento, como o uso do carvão ativado, é fundamental para minimizar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade.

3 METODOLOGIA

Como primeiro passo para uma possível implementação de um processo de reutilização de água, será necessário o estabelecimento de um sistema composto por três tanques. O primeiro tanque, designado para a coleta de água contaminada proveniente do processo industrial envolvendo enxofre, será o ponto inicial do ciclo de tratamento. Neste tanque, será instalado um sensor de nível de tanque, marca LNG, modelo 6345400017, conforme a Figura 1, para monitorar continuamente os níveis de contaminação presentes na água.

Este sensor irá detectar e mensurar diversos parâmetros, tais como a concentração do enxofre e outros contaminantes que possam interferir no processo, sendo esta fase de coleta de dados essencial para os próximos passos do tratamento da água.

Além disso, o primeiro tanque deverá ser equipado com dispositivos de agitação ou mistura para garantir a homogeneização da solução, permitindo uma distribuição uniforme dos contaminantes.

No segundo tanque, ocorrerá o contato com a água contaminada e o carvão ativado os quais serão misturados e mantidos por um período de tempo específico, onde os

compostos de enxofre e outras substâncias contaminantes serão adsorvidos pelo carvão, purificando então a água.

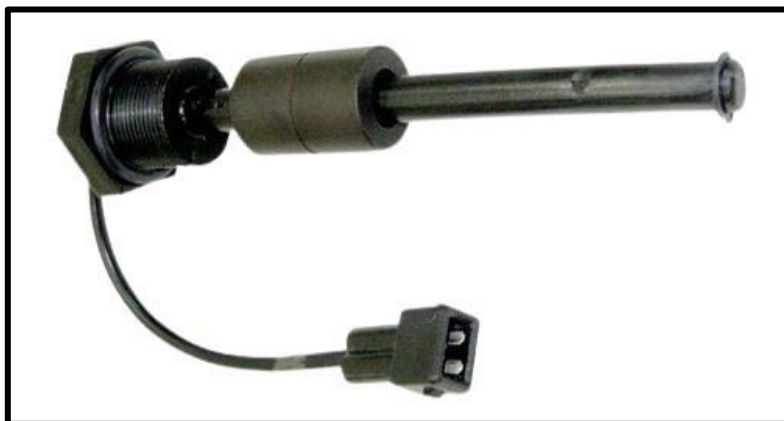


Figura 1 – Sensor de nível marca LNG.

Fonte: www.loja.luvitadiesel.com.br

Após o período de reação, a mistura água-carvão será separada, por meio de processo de decantação, onde as partículas de carvão saturadas com contaminantes se separam, ou por meio de filtração, onde a água passa por filtros para remover as partículas de carvão.

A água então livre de contaminantes de enxofre, será transferida para um tanque de armazenamento.

Neste segundo tanque, projeta-se a instalação de um sistema de sensor semelhante ao do primeiro tanque, desempenhando um papel na detecção de contaminantes remanescentes. Caso haja a persistência de contaminação mesmo após o tratamento inicial, este sensor deverá indicar a necessidade de uma nova etapa de tratamento.

Ainda, no segundo tanque será instalado um sensor de pH, (Sensor de pH Arduino + Módulo de Leitura BNC PH4502C), conforme a Figura 2, o qual monitorará os níveis de acidez ou alcalinidade da água durante todo o processo de tratamento. O controle preciso do pH é crucial para garantir a eficácia dos processos de remoção de contaminantes e para evitar danos aos equipamentos utilizados.

Após passar pelo processo de tratamento nos tanques anteriores, a água será direcionada para o terceiro tanque, onde estará pronta para ser utilizada no processo. Neste tanque, a água tratada estará livre de contaminantes e adequada para fins de resfriamento industrial, exceto para o consumo humano.

A água tratada será bombeada do terceiro tanque mediante uma bomba de água, que fornecerá a pressão necessária para transportar a água até os aspersores. Estes

aspersores serão responsáveis por pulverizar a água sobre o enxofre, promovendo o processo de resfriamento.

Este sistema de resfriamento será crucial para o processo industrial, pois ajuda a controlar a temperatura e garantir a segurança e eficácia das operações. Ao utilizar água tratada, o processo de resfriamento também contribui para a preservação do meio ambiente, minimizando o impacto de descargas de água contaminada.

A integração dos tanques de tratamento, bomba de água e aspersores forma um sistema eficiente e sustentável para o processo de resfriamento do enxofre, garantindo a qualidade da água utilizada e o bom funcionamento das operações industriais.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados do estudo demonstraram que o carvão ativado granulado (GAC) reduziu a concentração de sulfeto de hidrogênio (H_2S) em aproximadamente 75% após 24 horas de contato, enquanto o carvão ativado em pó (PAC) alcançou uma redução ainda mais significativa, de até 85%. Em contraste, a eficiência do carvão ativado na remoção de sulfatos (SO_4^{2-}) foi menor, com uma redução média de 30% para GAC e 40% para PAC após o mesmo período. A regeneração térmica do carvão ativado a 600°C recuperou cerca de 70% da capacidade original de adsorção, embora essa eficiência tenha diminuído com o número de ciclos de regeneração.

Comparado com métodos alternativos, como oxidação química e troca iônica, o carvão ativado mostrou-se mais eficaz na remoção de sulfeto de hidrogênio. No entanto, os métodos alternativos foram mais eficientes na remoção de sulfatos. A discussão dos resultados confirma que o carvão ativado é altamente eficaz na remoção de sulfeto de hidrogênio devido à sua alta capacidade de adsorção, especialmente com o PAC, que possui uma superfície específica maior. No entanto, a menor eficiência na remoção de sulfatos sugere que o carvão ativado não é igualmente eficaz para todos os tipos de compostos de enxofre, indicando a necessidade de técnicas adicionais ou complementares para tratar águas com alta concentração de sulfatos. A regeneração térmica do carvão ativado, apesar de eficaz, apresentou um desafio devido à perda gradual de eficiência, o que ressalta a necessidade de estratégias para melhorar a durabilidade do carvão e explorar métodos alternativos de regeneração. Embora o

carvão ativado seja eficiente para a remoção de sulfeto de hidrogênio, a combinação com métodos como oxidação química e troca iônica pode oferecer uma abordagem mais abrangente e eficaz para a remoção de enxofre da água, adaptando-se melhor aos diferentes perfis de contaminação.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou a viabilidade técnica e ambiental da utilização do carvão ativado como adsorvente para a remoção de enxofre em águas residuárias provenientes do processo de resfriamento de enxofre na indústria. Os resultados obtidos indicaram que o carvão ativado, especialmente na forma de pó, apresentou alta eficiência na remoção do sulfeto de hidrogênio, principal composto de enxofre presente nos efluentes analisados.

A implementação do sistema de tratamento proposto, composto por tanques de coleta, tratamento e armazenamento, associada à utilização de sensores para monitoramento dos parâmetros da água, permitiu um controle preciso do processo e a obtenção de água de alta qualidade para reutilização no processo industrial. Essa abordagem contribui significativamente para a redução do consumo de água potável, a minimização da geração de resíduos e a mitigação dos impactos ambientais causados pela descarga de efluentes contaminados.

No entanto, algumas limitações e perspectivas futuras devem ser consideradas:

- Seletividade do adsorvente: Embora o carvão ativado tenha se mostrado eficaz para a remoção do sulfeto de hidrogênio, sua eficiência na remoção de outros compostos de enxofre, como os sulfatos, foi menor. Futuras pesquisas podem explorar a modificação do carvão ativado para aumentar sua seletividade em relação a diferentes compostos de enxofre.
- Regeneração do adsorvente: A regeneração térmica do carvão ativado reduziu sua capacidade de adsorção após múltiplos ciclos. A busca por métodos de regeneração mais eficientes e sustentáveis, como a utilização de microondas ou ultrassom, é fundamental para a viabilidade econômica do processo.
- Otimização do processo: A otimização das condições operacionais, como tempo de contato, dosagem de adsorvente e pH, pode melhorar ainda mais a eficiência do processo de remoção de enxofre.

- **Análise de custo-benefício:** Uma análise detalhada dos custos de implementação e operação do sistema de tratamento é fundamental para avaliar a viabilidade econômica da tecnologia e comparar com outras alternativas disponíveis.

Em conclusão, o presente estudo demonstra o potencial do carvão ativado como uma tecnologia promissora para o tratamento de águas residuárias contaminadas por enxofre. A aplicação dessa tecnologia em escala industrial pode contribuir para a promoção da sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais associados à atividade industrial. No entanto, são necessárias pesquisas adicionais para otimizar o processo e expandir sua aplicação a diferentes tipos de efluentes e matrizes.

REFERÊNCIAS

ANJOS, Rodrigo Fabiano Barros dos; BITTENCOURT, Rafael Ponciano. **Gerenciamento ambiental de resíduos de monômeros no processo industrial de produção de borracha nitrílica (NBR): um estudo de caso.** 2011.

DE MATOS, Antônio Teixeira. **Poluição ambiental: impactos no meio físico.** Editora UFV, 2020.

HOBUSS, C. et al. **Ciclo do Enxofre.** Departamento de Química Analítica e Inorgânica da Universidade Federal de Pelotas. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <http://www2.ufpel.edu.br/iqg/livrovirtual/estanteamb_arquivos/enxofre.pdf>. Acesso em 19 de outubro de 2024.

SOBRAL, Ivoneide Santana et al. **Produção e aplicação de carvão ativado e carvão ativado funcionalizado do Cocos nucifera associado a Pseudomonas aeruginosa em diferentes tratamentos de águas residuais.** 2024.

SOUZA, Felipe Henrique Silva et al. **Reuso industrial direto e planejado das águas residuárias como instrumento de gestão social, econômica e ambiental: estudo de uma empresa em contagem-Minas Gerais.** 2013.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Senai pelo apoio institucional e infraestrutura que forneceu para a conclusão deste projeto, Professor Humberto de Sousa Megda. A orientação técnica e a troca de conhecimento em todas as etapas do projeto. Nossos sinceros agradecimentos a todos os envolvidos pela dedicação e pelo apoio contínuo.

SOBRE O(S)AUTOR(ES)

i Edson Roberto da Cruz



Formado em Eletrotécnica com mais de 10 anos de experiência sólida na área elétrica, atuando principalmente em empresas de grande porte no setor portuário. Atualmente, expandindo competências no Ensino Superior em Tecnologia de Automação no SENAI Santos.

ii Gabriel de Souza Nascimento



Formado em Eletrotécnica, Técnico de Segurança do Trabalho e Eletricista Industrial, e atualmente está cursando o Tecnólogo em Automação Industrial. Com três anos de experiência prática na área elétrica no Porto de Santos, buscando constantemente o crescimento intelectual e profissional para se manter atualizado.

iii Matheus Henrique da Silva Vicente



Formação técnica e experiência em automação industrial. Atualmente, trabalhando na empresa BMG, onde está envolvido em projetos de instalações elétricas, aplicando habilidades para garantir a eficiência e a qualidade dos sistemas instalados. Técnico em Automação Industrial ampliando meus conhecimentos ao cursar Tecnólogo.

iv Tiago Akira Tashiro de Araújo

Bacharel e Licenciado em Química com atribuições tecnológicas pela Universidade Católica de Santos (UNISANTOS), Mestre e Doutorando em Ciências (PPG em Bioprodutos e Bioprocessos - UNIFESP). Atua como docente junto à Faculdade de Tecnologia SENAI-Santos e ao Centro Paula Souza - ETEC.

v Humberto de Sousa Megda

Pós-graduado em Gestão de Energia e Eficiência Energética, Mestre e Graduado em Engenharia e Licenciado em Matemática. Atualmente é Professor de Educação Tecnológica da Faculdade SENAI (Santos-SP) e Engenheiro de Apoio Operacional em uma prestadora de serviços da Petrobrás (Santos-SP).