VIABILIDADE DA GERAÇÃO DE HIPOCLORITO DE SÓDIO EM ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA NO VALE DO PARAÍBA.

Guilherme Maurício Lacerda, Ana Paula Nola Denski Bif, Fátima Maria Broca

Universidade do Vale do Paraíba/Instituto de Pesquisa e Desenvolvimento, Avenida Shishima Hifumi, 2911, Urbanova - 12244-000 - São José dos Campos-SP, Brasil, guilhermelacerda00@gmail.com, anadenski@gmail.com, fbroca@univap.br.

Resumo

O presente projeto analisou a viabilidade técnica e econômica da implementação de um gerador de hipoclorito de sódio *in loco* na Estação de Tratamento de Água Central em um município do Vale do Paraíba. O objetivo do projeto é mitigar os riscos associados ao transporte, armazenamento e operação do gás cloro. Com um planejamento adequado, que considere todas as variáveis associadas ao desenvolvimento de projetos no setor público, a autarquia pode se beneficiar significativamente da modernização do seu sistema de desinfecção, promovendo um ambiente mais seguro. Estima-se redução de custos de 20,65%, para modelo de contrato por aluguel, com base nos parâmetros de 2023. No entanto, esse modelo de desinfecção traz desafios associados à logística de armazenamento e manuseio de matéria-prima. Com a abordagem certa, a modernização proposta não só trará benefícios econômicos e operacionais, mas também contribuirá para a melhoria contínua da qualidade da água tratada e para o cumprimento das normas ambientais.

Palavras-chave: Gerador de Hipoclorito. Viabilidade econômica. Estação de tratamento de água.

Área do Conhecimento: Engenharia Química.

Introdução

As técnicas de tratamento de águas destinadas a atenderem aos padrões ambientais e sanitários podem parecer, a princípio, simples e isentas de surpresas. No entanto, este é um campo repleto de desafios, por exemplo: problemas como variações na qualidade da água bruta, mudanças nas condições climáticas, falhas nos equipamentos e constante aumento na demanda de água são apenas alguns dos vários fatores que afetam a operação de uma estação (Richter, 2009).

O tratamento de água visa reduzir ou limitar determinados constituintes presentes na água, tornando-a segura para o consumo humano e em conformidade com os padrões de qualidade estabelecidos por agências reguladoras, isso inclui microrganismos patogênicos, substâncias químicas, sólidos em suspensão e entre outros contaminantes que possam afetar a qualidade da água (Bernardo; Dantas, 2005, Libânio, 2005). A escolha do processo de tratamento deve considerar diversos fatores, como a confiabilidade e a facilidade de construção e operação do sistema, a qualidade final da água, as características da água bruta, e os custos envolvidos na construção e operação (Richter, 2009).

Tradicionalmente, o gás cloro é o desinfetante mais utilizado em estações de tratamento de água devido à sua facilidade de aplicação, baixo custo, e eficiência na desativação de microrganismos. É importante destacar que o cloro é um gás tóxico e corrosivo, seu uso na indústria requer um cuidado amplo no seu planejamento para evitar contaminação do ar e colocar e risco a integridade dos operadores e da população vizinha (Bernardo; Dantas, 2005, Garcia, 2018). No entanto, devido as suas características de toxicidade e corrosividade, requer muito cuidado em sua utilização , podendo ocorrer acidentes decorrentes de mau funcionamento de válvulas ou armazenamento inadequado, expondo ao risco os operadores da estação e a população residente nas proximidades (Bernardo; Dantas, 2005).

Também, é comum que as estações de tratamento de água sejam construídas próximas a centros urbanos, o que reduz os custos associados ao transporte da água e facilita a integração com outras infraestruturas, como a rede de esgoto (Bernardo; Dantas, 2005). Este é o caso da Estação de Tratamento de Água Central de um município do Vale do Paraíba, localizada na região central do

município, que utiliza gás cloro como agente desinfetante. Devido a as características deste agente de desinfecção, é lógico o interesse por parte das estações de tratamento de água na busca de tecnologias de desinfecção que integrem segurança e eficácia, refletindo a preocupação dos gestores com a segurança dos funcionários e da população vizinha a estação (Moreira, Bernardes, 2018).

Nesse contexto, o gerador *in loco* de hipoclorito tem se mostrado uma opção alternativa ao gás cloro. Conforme descrito por Seckler (2021), o gerador é uma opção mais segura quando comparado ao cloro gasoso, uma vez que o sistema é fechado e não há contato dos operadores com os produtos gerados, ademais usa o cloreto de sódio como matéria-prima, o que minimiza os riscos com transporte e armazenamento de matéria-prima.

Garcia (2018) descreveu o processo de instalação de um sistema de produção *in loco* de hipoclorito de sódio, feito a partir da hidrólise do cloreto de sódio, na estação de tratamento em Bom Jardim, Uberlândia. Essa estação possui condições operacionais muito semelhantes às da estação de estudo. Nessa instalação, o hipoclorito de sódio se mostrou eficiente na eliminação de microrganismos patogênicos e no fornecimento de cloro residual livre, conforme estabelecido pela Portaria GM/MS 888 de 4 de maio de 2021, ademais também observou redução nos custos operacionais de 32,22% em média por mês.

Conforme estudos realizados por Younkyu Choi (2022), ambos os desinfetantes, o cloro gasoso e o hipoclorito gerado *in loco*, tiveram efeitos semelhantes na desinfecção. No entanto, o hipoclorito apresenta vantagens adicionais, como uma maior persistência na água e a capacidade de ajudar na alcalinização, o que favorece a eficiência do sistema de tratamento. Na “Figura 1”, encontra-se o gerador *in loco* de hipoclorito junto com o controlador.

Figura 1- Gerador *in loco* de hipoclorito a partir da eletrólise da salmoura.

Fonte: Hidrogeron.

De forma simplificada, o processo começa com a preparação de uma solução de salmoura concentrada a 30% nos tanques de saturação. Em seguida, essa salmoura é diluída para 3% e enviada para uma célula eletrolítica, onde a passagem de corrente elétrica converte o cloreto de sódio em hipoclorito de sódio. Durante essa conversão, também são gerados alguns subprodutos, como hidróxido de sódio e peróxido de hidrogênio. A solução resultante, contendo o hipoclorito de sódio, é então armazenada e utilizada para desinfecção na pré e pós-cloração (Garcia, 2018).

As reações que ocorrem no interior da célula eletrolítica foram descritas por Garcia (2018) estão disponíveis abaixo:

Dissociação do cloreto de sódio:

$$NaCl \rightarrow Na+ + Cl^{-} \quad (01)$$

Reação global no interior da célula eletrolítica

$$\text{Cátodo (redução): } 2\ Cl- \rightarrow Cl_2\ (g) + 2e^{-} \quad (02)$$

$$\text{Anodo (oxidação): } 2\ H_2O + 2\ e- \rightarrow H_2+ 2\ OH^{-} \quad (03)$$

$$\text{Equação Global: } 2\ H_2O + 2\ Cl- \rightarrow H_2 + Cl_2 + 2\ OH^{-} \quad (04)$$

Como não há uma membrana que separa o cátodo e o anodo, as espécies reagem:

$$2\ NaCl + 2\ H_2O \rightarrow 2\ NaOH + Cl_2 + H_2 \quad (05)$$
$$2\ NaOH + Cl_2 \rightarrow NaCl + NaOCl + H_2O \quad (06)$$
$$H_2O + ½\ O_2 \rightarrow H_2O_2 \quad (07)$$

O presente trabalho tem como objetivo realizar uma análise da viabilidade técnica e econômica para a implementação de um sistema de geração *in loco* de hipoclorito de sódio na Estação de Tratamento de Água Central, em um município do Vale do Paraíba. O projeto visa mitigar os riscos associados ao transporte, armazenamento e operação do gás cloro, protegendo tanto os operadores quanto a população vizinha à estação. Além disso, busca-se avaliar os benefícios econômicos e de segurança do trabalho, considerando também os desafios logísticos e operacionais, para promover um ambiente de trabalho mais seguro e sustentável.

Metodologia

A Estação de Tratamento de Água Central é a maior unidade de tratamento de água do município, responsável por atender 94% da demanda de água urbana do município. Esta estação é composta por duas unidades de tratamento em paralelo, denominadas ETA 1 e ETA 2, que juntas possuem capacidade máxima de tratamento nominal de 1.000 L/s de água. O sistema de tratamento utilizado é o de ciclo completo, incluindo as etapas de pré-cloração, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, fluoretação e correção do pH. Foto aérea da ETA Central está encontra-se em “Figura 2”.

Figura 2- Estação de Tratamento de Água Central – Foto Aérea.

Fonte: dados internos – Estação de Tratamento de Água.

Com base nos dados de tratamento da ETA Central, foi registrado um consumo médio de cloro em 2023 de 149,62 kg por dia, com o maior valor observado em 8 de dezembro de 2023. Ao longo desse ano, o total de cloro dosado foi de 40.124,60 kg, resultando em uma média de 107,86 kg/dia. No primeiro semestre de 2024, a média de consumo aumentou para 121,88 kg/dia, com o maior valor registrado de 142,78 kg/dia em 29 de julho de 2024. Esses valores foram obtidos a partir de análises da concentração de cloro residual livre na água bruta, a autarquia, usualmente, não faz ensaios de cloro total.

O orçamento foi fornecido por uma empresa do segmento de soluções em cloração de alta performance, para a implementação de um gerador de hipoclorito in loco. O orçamento contempla duas modalidades de contrato: a aquisição do equipamento e a opção de aluguel. Além disso, o orçamento inclui os custos associados às adequações civis necessárias, como a construção de paredes de contenção para o tanque de hipoclorito e a instalação de azulejos no armazém destinado à matéria-prima.

O dimensionamento adequado do equipamento é crucial para a viabilidade de longo prazo do projeto. Considerou-se que a instalação de dois geradores operando em paralelo, com uma capacidade total de produção de 400 kg/dia, atende tanto às necessidades atuais da ETA quanto às futuras. Esse

dimensionamento é especialmente relevante, dado que está prevista uma expansão da capacidade de tratamento da ETA Central para 1.700L/s no futuro.

Resultados

Em 2023, a autarquia adquiriu 57.975 kg de gás cloro por meio da ATA 200/2022 para 75% e 25%, a um custo de R$ 1.130.512,50.

O custo do gerador de hipoclorito de sódio foi dividido em duas partes: custos fixos, que incluem o preço do equipamento, e custos variáveis, que abrangem energia e cloreto de sódio. O preço de compra do equipamento foi orçado em R$ 1.342.515,91, com um custo adicional de R$ 200.107,00 para adequações civis, totalizando R$ 1.542.622,91 para equipamentos, serviços e mão de obra. Alternativamente, o equipamento pode ser alugado por R$ 53.991,77 mensais, resultando em um custo anual de R$ 647.901,24, nesse modelo de contratação, a empresa responsável pela instalação do equipamento também é integralmente responsável pela manutenção.

O modelo de gerador previsto no contrato é o Hg PLUS 200 que produz um quilo de cloro ativo a partir de 4,5 kg de sal e 4,5kWh. Com base nesses valores, é possível estimar os custos variáveis do gerador, considerando cloro efetivamente dosado no ano de 2023 na ETA Central, que corresponde a 40.124,60 kg. O orçamento do cloreto de sódio foi fornecido junto a empresa do ramo salineiro, a um custo de R$0,6868 por quilo, enquanto a energia fora de ponta é de R$ 0,38 por kWh. Com base nesses valores, a estimativa do custo de matéria-prima para produção de cloro que atenderia a demanda da ETA de R$ 192.622,15, considerando consumo anual de 180.560,7kg de sal.

Se a opção for pela compra do equipamento, o período de *payback* estimado é de 1 ano e sete meses, sem incluir os custos com peças de reposição e mão de obra. Os custos de matéria-prima para a produção de hipoclorito a partir do gerador correspondem a 26% dos custos de matéria-prima do modelo atual de desinfecção com gás cloro.

Caso opte-se pelo aluguel do equipamento, juntamente com o custo da matéria-prima, estima-se um custo anual de R$ 840.523,39, o que representa uma redução de 20,65% em comparação ao modelo atual. Nesse modelo de contração, a empresa que fornece o equipamento é integralmente responsável por sua manutenção.

Um ponto que merece destaque é que, a longo prazo, a compra do equipamento, embora não ofereça as mesmas vantagens imediatas do aluguel, apresenta um custo significativamente menor. Em um período de dez anos, o custo total do aluguel seria de aproximadamente R$ 9,6 milhões, enquanto a compra do equipamento se limitaria a R$ 4,5 milhões. Essa estimativa foi feita com base na suposição de que os valores do aluguel, da matéria-prima, e a demanda da cidade se manterão constantes. Portanto, essa diferença de custo deve ser cuidadosamente considerada na decisão final, especialmente em termos de sustentabilidade financeira a longo prazo para a autarquia.

Após a expansão da ETA, está previsto um aumento de 70% na capacidade de produção. Com base nessa informação, estima-se que o custo anual com gás cloro, considerando um aumento proporcional no preço, seria de R$ 1.921.971,25. Em comparação, o custo anual para o gerador de hipoclorito por locação seria de R$ 1.167.981,06. Isso representaria uma economia de 39,22% em relação ao modelo atual de desinfecção com gás cloro.

Discussão

A supervisão da Estação, a princípio, tem preferência pelo modelo de aquisição por aluguel, pois a empresa fornecedora do equipamento também se responsabiliza pela manutenção. Isso garante que as manutenções preventivas, preditivas e corretivas sejam realizadas de forma adequada e em tempo hábil. E em se tratando de uma nova tecnologia, a modalidade aluguel permite período de validação da tecnologia, sem que haja necessidade de investimento vultoso na aquisição do equipamento. O sistema de desinfecção por gás cloro permaneceria como redundância do sistema de desinfecção. Vale destacar que a desinfecção é uma etapa essencial para a distribuição de água, e qualquer atraso pode impactar diretamente o abastecimento. Por isso, a escolha pelo aluguel oferece maior segurança operacional, assegurando a continuidade do processo de desinfecção e, consequentemente, do abastecimento de água.

Além do hipoclorito de sódio, o gerador também produz hidróxido de sódio e peróxido de hidrogênio, conforme reações 05 e 07. O peróxido de hidrogênio, sendo também um desinfetante, possui o

potencial de reduzir a demanda de cloro da ETA. Além disso, o hidróxido de sódio pode contribuir para a alcalinização da água, reduzindo a necessidade de correções no final do tratamento. Até o presente momento, o impacto desses subprodutos na demanda de reagentes da ETA é desconhecido, podendo gerar redução de custos em outras áreas.

A implementação de um gerador também apresenta desafios logísticos, especialmente relacionados ao transporte e manuseio da matéria-prima. Estima-se que serão necessários aproximadamente 180.560,7 kg de sal por ano, o que equivale a cerca de 494,68 kg de sal por dia, a serem carregados manualmente para o interior do saturador. Esse processo pode acarretar riscos ergonômicos e operacionais. Para mitigar esses riscos, algumas medidas podem ser adotadas, como a instalação de saturadores em uma altura mais baixa e a distribuição da tarefa de carregamento de sal entre os operadores ao longo dos turnos.

Considerando que o sal é fornecido em sacos de 25 kg, será necessário que aproximadamente 20 sacos sejam colocados no saturador diariamente. Com três turnos de operadores, cada turno será responsável por carregar cerca de 7 sacos, o que ajudará a distribuir o esforço e reduzir a sobrecarga em qualquer turno específico.

Outro ponto a ser considerado é a produção de hidrogênio pelo gerador, que pode se acumular no reator e gerar risco de explosão. No entanto, os equipamentos das empresas do segmento contam com dispositivos para eliminação deste risco e a autarquia deverá prever a aplicação destes dispositivos quando da elaboração dos documentos técnicos que precedem os processos licitatórios.

Conclusão

Este artigo destaca a importância da modernização do sistema de desinfecção na ETA Central, enfatizando tanto a redução dos custos operacionais, essencial para a sustentabilidade a longo prazo do projeto, quanto a melhoria na segurança dos servidores e da população vizinha. A previsão de expansão da ETA e o consequente aumento na demanda de cloro reforçam ainda mais a necessidade de adotar um sistema de desinfecção que seja seguro e economicamente vantajoso.

Considerando os riscos associados ao uso de cloro, é lógico o interesse da organização em substituir o atual sistema. A implementação de um gerador de hipoclorito in loco surge como uma solução viável e potencialmente mais econômica, com um retorno sobre o investimento estimado em curto prazo e uma redução significativa nos custos operacionais. A escolha entre as opções disponíveis requer uma análise cuidadosa e planejamento estratégico.

Embora a instalação desse sistema possa trazer alguns desafios, como a logística de armazenamento de hipoclorito e os cuidados necessários para evitar riscos ergonômicos aos operadores, esses problemas são gerenciáveis com um planejamento adequado. Com uma estratégia bem definida, é possível organizar o armazenamento de forma segura, garantindo que os operadores tenham as ferramentas e o treinamento necessário para manusear as sacarias com segurança.

Adoção de novas tecnologias e soluções como o gerador de hipoclorito, deve ser acompanhada de um plano de manutenção rigoroso e da capacitação contínua dos operadores, garantindo assim que a transição para o novo sistema seja feita de maneira eficiente e segura. Independentemente da escolha entre compra ou aluguel, é fundamental que a decisão seja baseada em uma análise detalhada dos impactos financeiros, operacionais e de segurança.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216:** Projeto de Estações de Tratamento de Água para Consumo Público. Rio de Janeiro. 1992.

BERNARDO, L.; DANTAS, A. D. B. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água.** 2. Ed. São Paulo: Editora RIMA, 2005.

CHOI, Y. Et. Al. **Comparison of Desinfection for Drinking Water Chlorine gas vs on site generated Chlorine**. 2022. 10 f. Seoul Water Institute, Korea, 2024.

FILHO S. S. F. **Tratamento de Água – Concepção, Projeto e Operação da Estações de Tratamento.** 1. Ed. São Paulo: GEN LTC, 2017.

GARCIA, R. C. D. **Avaliação as Substituição do Cloro Gás pela Produção Eletrolítica de Hipoclorito de Sódio *in loco* em Estações de Tratamento de Água de Grande Porte**. 2018. 86 f. Dissertação (Qualidade Ambiental) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlandia, 2024.

HIDROGERON. **Grupo HIDROGERON** Soluções para Saneamento. 2024. Disponível em: https://hidrogeron.com/saneamento. Acesso em: 11 de jul de 2024.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de Qualidade e Tratamento de Água**. 1. Ed. Campinas: Editora Átomo, 2005.

MOREIRA N. M.; BERNARDES A.. **Desinfecção das Águas por Eletrólise de Salmoura e Gás Cloro em ETAs de Cuibá – MT: Aspectos e Custeio.** 15° Congresso Nacional de Meio Ambiente. Poços de Caudas. 2018. Disponível em: https://www.meioambientepocos.com.br/Anais2018/Sa%C3%BAde,%20Seguran%C3%A7a%20e%20Meio%20Ambiente/495.%20DESINFEC%C3%87%C3%83O%20DAS%20%C3%81GUAS%20POR%20ELETR%C3%93LISE%20DE%20SALMOURA%20E%20G%C3%81S%20CLORO%20EM%20ETAs%20DE%20CUIAB%C3%81%20%E2%80%93%20MT%20ASPECTOS%20E%20CUSTEIO.pdf. Acesso em 19 de agosto de 2024.

RICHTER, A. A. **ÁGUA: Métodos e Tecnologia de Tratamento**. 1. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA, 2009.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha sincera gratidão à professora Fátima Broca e à engenheira Ana Paula Denski pela orientação e apoio fundamentais ao longo do desenvolvimento deste projeto. Agradeço por terem compartilhado seu conhecimento e por me guiarem com tanto zelo e atenção durante essa jornada.