TESTE PILOTO PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE ÍONS E SUBSTÂNCIAS PRECURSORAS DE THM E HAA NA ÁGUA BRUTA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA DE ELETRODIÁLISE REVERSA.

Ana Lúcia Silva[(1)]
Engenheira Química pela Faculdade Osvaldo Cruz, Mestra em Recursos Hídricos e Doutora em Saúde Pública pela USP. Engenheira no Departamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da SABESP.
Bruno Sidnei da Silva[(2)]
Engenheiro Sanitarista e ambiental pela UFSC, Mestre em Ciências pela USP. Gerente do Departamento de projetos de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da SABESP.

Endereço[(1)]**:** Rua Raul Pompéia, 303, Vila Pompéia – São Paulo, SP. CEP: 05025-010. Telefone: +55 (11) 3388-8223 - e-mail: eng.anasilva@sabesp.com.br

RESUMO

A aplicabilidade da tecnologia eletrodiálise reversa na remoção de substâncias precursoras de THM e HAA é pouca explorada, ou praticamente nula. Este projeto de pesquisa realizou testes em escala piloto afim de verificar essa hipótese, e também para determinar a eficiência de remoção dos íons cromo e flúor. Os testes foram realizados para três diferentes recursos hídricos, com diferentes tipos de membrana e correntes elétricas, visando obter a melhor equação de custo e benefício. Os resultados foram considerados promissores, e indicaram eficiência de remoção de 79% para o flúor (concentração inicial de 1,1 mg/L); 94% para o cromo total (concentração inicial de 0,0657 mg/L); e de 28% para o HAA. O THM apresentou menor concentração no produto concentrado do que no produto final (38%), o que indica o potencial dessa tecnologia para a captação e separação desses compostos durante o processo de tratamento.

PALAVRAS-CHAVE: eletrodiálise reversa, Trihalometanos, remoção de íons

INTRODUÇÃO

Neste projeto foram realizados testes com recursos hídricos que apresentam de forma natural flúor, cromo e matéria orgânica formadora de subprodutos de cloro, sendo este último teste considerado inovador em relação a tecnologia de eletrodiálise reversa (EDR).

Para contextualizar, é importante que se comente que qualquer tipo de recurso hídrico, superficial ou subterrâneo, possui em sua composição substância químicas dissolvidas e de origem natural que exigem processos de tratamento avançados para remoção em caso de uso para consumo humano. Essas características estão associadas aos contextos hidrogeológicos, ou seja, às bacias hidrográficas às quais pertencem. Algumas águas subterrâneas oriundas de camadas profundas da Terra retornam para a superfície ricas em certos elementos que foram sendo dissolvidos a partir do contato rocha – água, podendo ser altamente atrativa para o contato com a pele humana, de forma controlada, com comprovados benefícios à saúde. NUNES e TAMURA (2012) informam que a indústria francesa comercializa águas minerais termais com presença de elementos oligominerais que apresentam propriedades hidratantes, antioxidades e anti-inflamatórias. Estudos clínicos evidenciam os efeitos dessas águas ricas em sais minerais na pele, sendo um importante recurso de tratamento dermatológico. Entretanto, para a área de saneamento e abastecimento público, essas águas podem apresentar características indesejáveis para o consumo humano, como excesso de cor, sabor, ou até mesmo concentrações que podem colocar em risco a saúde humana, se ingeridos – conforme definições da Portaria do Ministério da Saúde 888 (2021).

As características das águas são agrupadas em atributos de qualidade física, química e biológica, que permitem a definição da classe e diretrizes ambientais para diferentes tipos de uso. Para as águas superficiais temos a Resolução CONAMA 357 (2005), e para as águas subterrâneas, a Resolução CONAMA 396 (2008). Em ambas as resoluções os tipos de usos preponderantes são o consumo humano, a dessedentação de animais, a irrigação e a recreação. A concentração de determinadas substâncias pode dificultar ou até mesmo inviabilizar

certos tipos de uso. A dificuldade consistiria em, por exemplo, requerer a aplicação de tecnologias sofisticadas para a remoção dessas substâncias até que estas atinjam concentrações compatíveis com o tipo de uso desejado. Entretanto, essa compatibilização de qualidade pela via tecnológica pode ser considerada inviável, tanto do ponto de vista de engenharia quanto do ponto de vista econômico-financeiro.

Algumas tecnologias que podem ser consideradas para remoção de flúor e cromo, para fins de abastecimento público são:
- Processo de adsorção, por alumina ativada, carvão ativado, nanopartículas ou resinas sintéticas;
- Tratamento químico por coagulação e/ou precipitação;
- Membranas de osmose reversa;
- Eletroquímico + microfiltração – também envolve os processos de (eletro)coagulação e (eletro)sorção, mas sem adição de nenhum agente químico.
- Eletrodiálise - aplicação de um potencial elétrico de corrente contínua, que permite a separação de íons de uma solução em cátions e ânions através de membranas seletivas, retendo-os em compartimentos específicos, originando uma solução concentrada e outra diluída.

O flúor pode ser encontrado no solo, ar, rochas, alimentos e na água sob a forma de fluoretos e em diversos tipos de complexos, orgânicos e inorgânicos. Seu comprovado benefício na prevenção da cárie dentária levou as autoridades sanitárias a promulgarem no Brasil a Lei N.º 6.050, de 24 de maio de 1974, a qual dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento de água, onde existir estação de tratamento (ETA). Entretanto, posteriormente verificou-se a necessidade de limitar a faixa de concentração, ou a dose aplicada. A definição de uma faixa com níveis máximo e mínimo dá-se pelos seguintes motivos:

- Em concentrações menores do 0,6 mg/L não se atinge o objetivo da fluoretação, que é a prevenção da cárie dentária;
- Em concentrações superiores a 0,8 mg/L podem ocorrer efeitos tóxicos para o ser humano. A depender da idade, tempo de ingestão e quantidade ingerida, esses efeitos podem se dar através da ocorrência da fluorose dental, até a geração de impactos nocivos para o sistema cardiovascular ou renal, alterações genéticas, esqueléticas, défictes cognitivos, citotoxidade, hipotireoidismo, dislipidemias, alterações enzimáticas e eletrolíticas e câncer (MAGALHÃES, 2018).

O limite que a OMS considera tóxico na água potável consta na Portaria GSM/MS 888/21 como sendo de 1,5 mg/L de fluoreto. De acordo com o Relatório de Qualidade das Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo 2001-2003 (CETESB, 2004), 3% de todos os poços monitorados pela CETESB no Estado de São Paulo apresentam ocorrência de flúor natural acima do limite de 1,5 mg/L. A exemplo do que ocorre com o íon fluoreto, outras substâncias como o cromo, ferro, manganês e a salinidade podem ocorrer naturalmente na água subterrânea. Para viabilização do uso para fins de potabilidade, geralmente é necessário o investimento em tecnologias de alto custo, tanto de implantação quanto de operação; pouco eficientes do ponto de vista econômico e ambiental devido principalmente aos grandes desperdícios de água e geração de resíduos de complexa destinação final.

No caso do parâmetro cromo total, o limite da Portaria GSM/MS 888/21 é de 0,005 mg/L. De acordo com MATAVELI et al (2018), não é comum a presença de cromo em níveis elevados em águas naturais, embora venham sendo encontrados em vários aquíferos, como o Aquífero Bauru, SP. Essa ocorrência pode se dar pelo contato do corpo d'água com rochas máficas/ultramáficas, e às condições alcalinas e oxidantes. Se a origem for antrópica, esta pode decorrer por descargas de efluentes em bacias de drenagem que podem atingir de diversas formas os corpos hídricos subterrâneos.

Por fim, temos dois grupos de compostos orgânicos formados durante o processo de tratamento de água a partir da reação da matéria orgânica (MO) presente na água com o agente oxidante cloro. Essa MO é chamada também de precursora de subprodutos de desinfecção, capazes de gerar dois tipos de subprodutos: os grupos dos trihalometanos (THM) e dos ácidos haloacéticos (HAA). A Portaria GSM/MS n° 888/21 define que o grupo THM agrega os compostos triclorometano ou clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano e o tribromometano ou bromofórmio; e o grupo HAA agrega o ácido monocloroacético, ácido dicloroacético, ácido tricloroacético, ácido monobromacético, ácido dibromoacético, ácido bromocloroacético, ácido bromodicloroacético, ácido dibromocloroacético e o ácido tribromoacético. Ambos apresentam potencial perigo para a saúde humana, e são associados a alguns tipos de câncer, mutação genética, má formação e

anomalias congênitas (SCHUCK, 2004 e CARNEIRO, 2012). O limite da Portaria GSM/MS 888/21 para THM e HAA é o mesmo, de 100 µg/L. Sua ocorrência se dá em geral em águas superficiais, tanto por processos naturais quanto por poluição antrópica, e estão associados em ambos os casos a mananciais de superfície. Em locais onde o recurso hídrico é altamente protegido e dentro de locais com abundância vegetal, parte expressiva da MON decorre da degradação dessa vegetação, com a dissolução de substâncias conhecidas como ácidos fúlvicos e húmicos. Em reservatórios é comum que a concentração de MON seja significativa uma vez que se tratam de recursos hídricos criados a partir de inundação, que permanece no fundo e vai se decompondo aos poucos e liberando essas substâncias na água. Em outros mananciais se observa alta concentração de matéria orgânica "não natural", ou seja, cujas características de poluição são antrópicas, se originando principalmente da presença de esgotos domésticos, efluentes indústrias com alta concentração de material orgânico e também de resíduos de criação de animais, agropastoril. LAGANARO et al (2017) define que essa matéria orgânica precursora de formação de THM e HAA é composta por "misturas heterogêneas complexas, incluindo diversas substâncias como ácidos húmicos e fúlvicos, aminoácidos, ácidos graxos, fenóis, esteróis, hidrocarbonetos, ureia, polímeros, lipídios e polissacarídeos (THURMAN, 1985; BOLTO et al., 2002 apud LAGANARO et al 2018). Dada a variedade de MO possível de reagir com o cloro, torna-se impossível a medição direta dessas substâncias na água e a previsão de quanto THM ou HAA se formará ao longo do processo de tratamento e durante a distribuição da água. Portanto, o que se faz é a medição indireta do PFTHM (Potencial de Formação de THM), a partir de uma metodologia que será detalhada neste artigo em item específico. Atualmente os responsáveis pelo tratamento e distribuição da água atuam na minimização do PFTHM, através da melhora nos processos químicos de tratamento, na forma de aplicação e/ou substituição do agente químico aplicado na pré-oxidação.

Sobre a tecnologia testada, é comum a busca por uma única solução tecnológica que consiga agregar a funcionalidade de remoção de diversos e diferentes tipos de substâncias, com vantagem econômico-financeira e baixa pegada ecológica. A tecnologia testada apresenta potencial para usos múltiplos, dada a flexibilidade de manipulação eletroquímica dos compostos dissolvidos na água. A eletrodiálise convencional é uma técnica eletroquímica tradicionalmente utilizada para dessalinização da água e remoção de íons, como cádmio, cromo, nitrato, etc. Nessa tecnologia as espécies iônicas passam por compartimentos com membranas seletivas, aniônicas e catiônicas, e através da aplicação direta de corrente elétrica, são atraídas e retidas em uma solução concentrada que será descartada posteriormente. A EDR utiliza as técnicas de membrana, e possui como vantagem que o seu processo remove os íons, enquanto na Osmose Reversa, que também faz uso de membranas, a água é que é recuperada através da membrana. Por isso a taxa de recuperação de água é maior em uma EDR do que em um sistema de Osmose Reversa (REAHL, 2010 apud FUNASA, 2012; GOMES, 2020). O Relatório Final da FUNASA (2012) nos apresenta de forma sucinta detalhes do funcionamento da eletrodiálise:

> Na eletrodiálise as membranas íon-seletivas são dispostas alternadamente em uma montagem tipo filtro-prensa, de maneira a formar canais entre as membranas por onde circula a solução a ser tratada (RAUTENBACH, 1994). No interior destes canais são colocados espaçadores, os quais têm a função de provocar um fluxo turbulento. Os eletrodos são posicionados nas extremidades da célula e estão em contato com uma solução de enxágüe. A esta montagem denomina-se stack. Quando um campo elétrico é aplicado nos eletrodos, o ânodo fica com carga positiva e o cátodo fica com carga negativa. O campo elétrico aplicado origina a migração dos íons positivos (cátions) para o cátodo e dos íons negativos (ânions) para o ânodo. Durante o processo de migração os ânions passam pela membrana aniônica, mas são barrados pela membrana catiônica, comportamento semelhante acontece com os cátions. Este fenômeno origina a formação de um compartimento mais concentrado e outro mais diluído. (...) Na teoria, um Faraday passando através de um par de membranas é capaz de transportar um equivalente grama de eletrólito de um compartimento diluído para um concentrado. Assim sendo, a inserção de n pares de membranas irá aumentar o rendimento do processo n vezes. Do ponto de vista elétrico, tal sistema assemelha-se a um conjunto de resistores em série. A resistência elétrica total resultante compreende as contribuições dos eletrodos, das membranas e das soluções que fluem entre elas. A limitação quanto ao número máximo de pares de membranas possíveis de serem montados em um stack está relacionada com o aumento da resistência elétrica total entre os dois eletrodos. Idealmente a resistência das membranas deve ser extremamente baixa, de modo que a principal contribuição para a resistência total seja da solução diluída produzida entre as membranas (AUDINOS, 1983). A energia consumida é função da quantidade de sais removidos no processo. (páginas 16 a 18, FUNASA 2012)

Já a Eletrodiálise Reversa (EDR) é uma inovação da tecnologia convencional, em que é realizada a inversão de polaridade dos eletrodos, alterando o fluxo dos íons. A vantagem dessa inversão é que esta atua como uma autolimpeza dessas membranas, minimizando os riscos de incrustração por íons e com isso prolongando o tempo de vida útil das membranas. Das vantagens dessa tecnologia, apontadas pela literatura técnica, temos:

- A não adição de produtos químicos, com consequente minimização de geração de resíduos e eliminação de toda a logística e complexidades envolvidas no processo de transporte, armazenamento e adição de produtos químicos na água;
- Recuperação de 95% do permeado;
- Remoção entre 60% a 97,5% dos sais;
- Possibilidade de automação da planta e maior controle operacional – retrolavagens automáticas, com duração de 3 a 5 minutos;
- Possibilidade de reutilização dos resíduos gerados – por exemplo, resíduo de flúor;
- Viabilidade de modulação da corrente para ajustes das concentrações e espécies a serem removidas;
- Não requer processo de filtração ou outros tipos de operação unitária associados a processos que envolvem coagulação, precipitação, etc.;
- Duração de 7 a 15 anos das membranas;
- Processo de limpeza química para regeneração das membranas ocorre a cada 1 a 3 meses;
- Baixo consumo de energia elétrica – 0,07 Kwh/kg de sais removidos;
- Baixa pressão – até 2 bar;
- Processo escalonável.

OBJETIVOS

Nesta primeira etapa de testes, em escala piloto, a SABESP teve como objetivo avaliar o emprego da EDR quanto ao seu potencial de remoção dos íons cromo e flúor e de matéria orgânica natural de amostras de três recursos hídricos diferentes. A meta foi a de redução das concentrações iniciais para, no mínimo, os limites aceitáveis para consumo humano, de acordo com as diretrizes da Portaria do Ministério da Saúde 888 (2021).

METODOLOGIA

Conforme já comentado, foram realizadas amostragens de três tipos diferentes de recursos hídricos, sendo dois de águas subterrâneas que apresentavam em sua composição natural os íons fluoreto e cromo; e o terceiro do tipo superficial, protegido de poluição antrópica, com presença de MON de origem vegetal. No caso do flúor e do cromo, o teste visou a redução direta desses dois íons. Para a diminuição do PFTHM, o foco da remoção e deu em relação a MON.

O equipamento EDR utilizado é da empresa ENGEPER Ambiental e Perfuração, localizada em Garça, SP.

Os ensaios de laboratório foram realizados pelos Controles Sanitários da SABESP – Departamento de controle de qualidade água e esgoto (EOQ).

A seguir detalharemos cada um dos testes em escala piloto realizados entre os dias 16 e 17/04/24.

Detalhes dos testes realizados

A planta piloto de EDR utilizado nos testes possui capacidade de tratamento para vazões de até 3 m^3/h. As amostras foram recebidas na fábrica da ENGEPER em contêineres tipo IBC de 1.000 L de capacidade. Cada amostra foi bombeada para o tanque de alimentação da planta piloto, e a partir dele para o equipamento EDR através do bombeamento realizado por duas bombas. Da EDR temos dois fluxos de produto, um de efluente tratado e outro de efluente de rejeito, concentrado, que são formados e separados por um sistema de válvulas. Durante o processo ocorre monitoramento contínuo a partir de analisadores on-line de condutividade. Os fluxos gerados são recompostos e tratados novamente, até atingir os melhores ajustes de vazão e corrente elétrica aplicada ao sistema.

O equipamento piloto de EDR utilizado neste teste possui as seguintes características:

- Estrutura de Skid Hidráulico em PVC-U SCH80;
- Bombas de baixa pressão para tratamento e retrolavagem 15 mca Grundfos;
- Estrutura com 1 Stack, compostos por conjunto de membranas e espaçadores empilhados;
- Tanque de alimentação;
- Tanque de produto;
- Tanque de concentrado;
- Fonte retificadora e painel de comando e operação do equipamento;

As amostras do efluente tratado e do concentrado foram coletadas e analisadas conforme apresentado em item específico a seguir. Após o término dos testes, o sistema de eletrodiálise é lavado com água potável para evitar a contaminação cruzada entre as amostras.

A Figura 1 apresenta a de testes em fluxo contínuo realizados com a amostra. E é possível verificar o equipamento utilizado nos testes por meio da Figura 2.

Figura 1. Fluxograma de tratamento com corrente limite para retirada de amostras para análise do 1° Estágio, Separação do Produto e Concentrado para definição de corrente limite e retirada de amostras do 2° Estágio

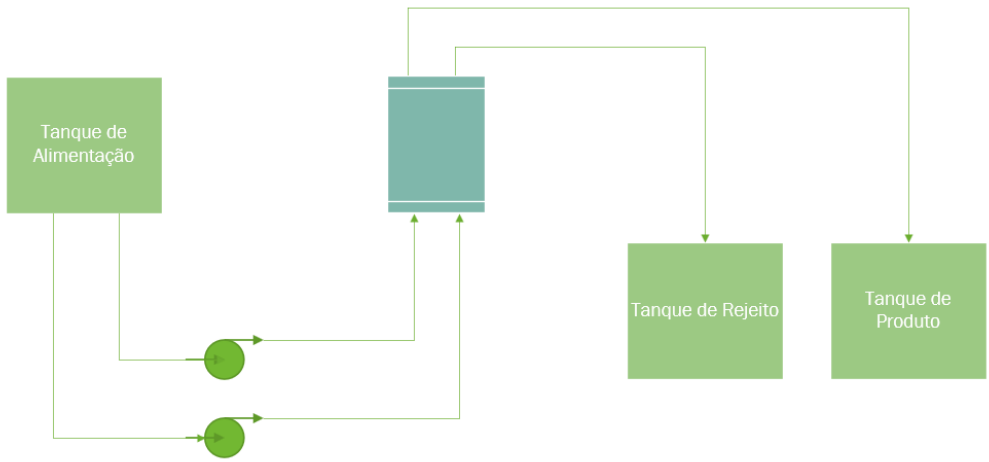
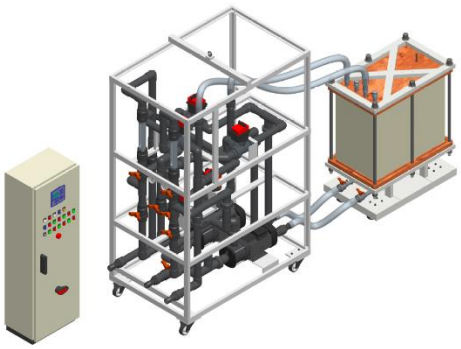


Figura 2. EDR com capacidade de até 3m³/h com 1 estágio de tratamento e dimensões 4x6m de área necessária.



A seguir é apresentado de forma concisa o procedimento de teste a ser utilizado para a amostra de efluente enviada pela SABESP:

Características das amostras e ensaios realizados

Foram realizadas amostragens em 3 diferentes sites. Em cada site coletou-se 1.000 litros de amostra em IBCs, que foram imediatamente encaminhados para a planta da ENGEPER, no município de Garça (Figura 3). As características de cada site são descritas a seguir, na Tabela 1.

Tabela 1 – Características das amostras ensaiadas.

Amostra	Tipo de recurso hídrico	Parâmetro alvo	Concentração na água bruta
Site 1	Subterrâneo	Flúor	1,1 mg/L
Site 2	Subterrâneo	Cromo total	0,0657
Site 3	Superficial	PFTHM e HAA	164,2 µg/L e 468,5 µg/L

Cada IBC contendo 1.000 litros de amostra de cada site foi processada pela EDR, em pelo menos dois tipos de membranas e por pelo menos dois tipos diferentes de corrente cada um. Para cada site foram obtidos, em geral, duas amostras para realização de ensaios: uma amostra do produto, que em tese representa a água tratada para o parâmetro alvo; e uma amostra do concentrado. Para cada amostra também foi verificada a condutividade antes e após a passagem pela EDR.

As amostras de flúor exigiram apenas preservação em gelo, mantendo a temperatura de até 4 °C. As amostras de cromo precisaram ser preservadas com ácido nítrico 50% até pH 2, além de manutenção da refrigeração, também até 4 °C. Já as amostras para PFTHM receberam solução de hipoclorito de sódio, conforme procedimento descrito a seguir, e foram mantidas refrigeradas por 7 dias, até a realização dos ensaios em laboratório.

Figura 3. Fotos com detalhes das amostras em IBCs, unidade de EDR piloto e sistema de monitoramento automático – condutividade da água bruta, produto e concentrado.





O ensaio de cromo foi realizado por ICP OES, método SMEWW - 3120 RM-ICP B. O ensaio para flúor foi realizado método potenciométrico, SMEWW 4500-F C. Os ensaios de THM e HAA foram realizados, respectivamente, por GC-MS/Headspace e cromatografia.

Preparo das amostras para determinação do PFTHM

Cada uma das amostras obtidas (tratada e concentrada pela EDR), e uma amostra bruta sem ter passado pelo processo EDR foram preparadas para determinação do PFTHM. Para tanto, foi determinada a dose de cloro que garantisse um residual de cloro livre entre 3 e 5 mg/L após sete dias de reação. Essa concentração foi definida a partir das doses aplicadas na amostra bruta, com uso de hipoclorito de sódio a 10%. Ao final do tempo de reação (7 dias) as amostras foram transferidas para frascos de ensaio com volumes de 60 mL, respeitando as respectivas preservações conforme o método analítico utilizado pelo EOQ, sendo o THM realizado em duplicata. As amostras foram conferidas quanto as características exigidas pelos métodos e os frascos foram fechados e armazenados a uma temperatura de 4 ± 2 °C, até o momento de realização do ensaio.

RESULTADOS

Neste artigo serão apresentados os melhores resultados para cada site e parâmetro – Tabela 2. Como o THM e o HAA representam grupos de substâncias, serão também apresentadas as remoções para os parâmetros Dibromoclorometano (DCAA) e ácido monocloroacético (MCAA).

Tabela 2 – Resultados de remoção

Parâmetro	Eficiência de remoção	Concentração inicial	Concentração final – melhor remoção
Cromo	92% a 94% de remoção em 3 diferentes tipos de corrente elétrica aplicada	0,0657 mg/L	<0,04 mg/L
Flúor	5% a 79% de remoção	1,1 mg/L	0,23 mg/L
HAA	0 a 28% de remoção	469 µg/L	335 µg/L
THM	O concentrado apresentou 0 a 38% menos MON que o produto	164 µg/L	104 µg/L (concentrado)
DCAA	0 a 41% de remoção	145 µg/L	85 µg/L
MCAA	0 a 100% de remoção	11 µg/L	0 µg/L

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste teste estão sendo agora analisados do ponto de vista de custo para implantação e operação da solução em escala real em cada um dos sites. A partir dessas informações, e considerando a viabilidade econômico-financeira, serão realizados novos testes, novamente em escala piloto, mas diretamente nos locais de instalação, para confirmação dos resultados e aferição de algumas variáveis de projeto.

Estudo de alternativas para a solução para o parâmetro flúor

Como o flúor requer um residual dentro da faixa de 0,6 a 0,8 mg/L, e a concentração inicial nessa amostra está em 1,1 mg/L, não seria necessário atingir a remoção de 79% - bastaria 27% de eficiência. Entretanto, todos os testes com diferentes tensões e voltagens apresentaram remoção superior a 52%. Este resultado foi encaminhado para a empresa ENGEPER para apresentação de estudo considerando pelo menos 3 diferentes propostas, do ponto de vista econômico-financeiro, área necessária para implantação, além da eventual necessidade de soluções acessórias:

Alternativa 1: tratar 100% do volume, para atingimento de 27% de remoção – concentração de F^- = 0,8 mg/L;
Alternativa 2: tratar apenas 30% do volume, com eficiência de 79% de remoção, para atingir concentração de F^- = 0,8 mg/L.
Alternativa 3: como ocorreram 4 testes com diferentes aplicações de corrente elétrica, a empresa avaliará a melhor combinação que gere menor custo energético.

No caso da alternativa 2, por exemplo, será necessária a previsão de solução de engenharia para que seja possível misturar a água tratada com flúor = 0,23 mg/L à água não tratada e com flúor = 1,1 mg/L, de modo que a mistura atinja os 0,8 mg/L. Essa solução considerada acessória dependerá, também, de área disponível no local, para implantação.

Estudo de alternativas para a solução para o parâmetro cromo

Como o cromo apresentou no mínimo 92% de remoção, este resultado já seria o suficiente para atendimento da concentração que atenda a legislação. Portanto, a solução em EDR seria uma planta para tratamento de 100% do volume.

Estudo de alternativas para a solução para os parâmetros THM e HAA

Conforme comentando, a amostra utilizada para o teste de remoção de precursores de subprodutos de cloração, para avaliação do PFTHM pós tratamento, apresenta apenas alguns dos possíveis tipos de MO – de modo geral, de origem não antrópica, basicamente composta de ácidos húmicos e fúlvicos. Embora os resultados de remoção não tenham sido totalmente satisfatórios, há que se considerar que o teste para determinação do PFTHM abrange uma condição extrema, em que a reação ocorre por 7 dias. Nas redes de distribuição é comum que a água permaneça em contato com o cloro por não mais do que 48 horas. Outro ponto importante a ser observado é que o EDR realmente conseguiu separar parte dos compostos formadores de THM, embora estes tenham ficado no produto concentrado. Esse resultado, que indicou 38% a menos de MON no produto concentrado, indica o potencial dessa tecnologia para remoção. Em nosso entendimento, justifica estudos mais detalhados, inclusive em outros tipos de recursos hídricos.

Outro ponto importante a ser considerado foram as altas remoções observadas para alguns compostos, como o DCAA e o MCAA. Conforme comentado, há diversos tipos de substâncias reativas ao cloro e precursoras de THM e HAA. Águas que possuam esses compostos em maior quantidade podem obter melhores resultados finais quanto a remoção do PFTHM do que a observada neste teste.

CONCLUSÕES

Desconhece-se algum estudo que tenha sido realizado para avaliação do PFTHM a partir da aplicação da tecnologia EDR. Embora os resultados de eficiência de remoção não tenham atendido a meta esperada para os

parâmetros THM e HAA, verifica-se que há um potencial promissor para essa tecnologia, considerando que de fato ocorreram remoções. Ou, como foi o caso do THM, a possibilidade de criação de algum tipo de barreira eletroquímica que separou o THM em relação ao concentrado e efluente final. Além disso, as remoções de 100% observadas em dois compostos, DCAA e MCAA, podem ser consideradas importantes indicações que a tecnologia possui propriedades em sua aplicação que podem ser ajustadas para obtenção de melhores resultados, sendo necessário investir em mais pesquisas a respeito. A

lém disso, dada a abrangência de tipos diferentes de compostos que se apresentam nas águas superficiais, e que são precursoras da formação dos grupos THM e HAA, pretende-se realizar novos testes com águas cujas fontes de MO possuam diferentes origens.

Em relação aos outros dois parâmetros, considera-se que os testes realizados foram bem-sucedidos para a remoção de flúor e cromo total. A próxima etapa, que se encontra em andamento para estes dois testes, é a seleção da condição mais otimizada da unidade piloto, com menor consumo energético e área ocupada. A seguir, pretende-se instalar uma unidade por alguns dias no local de aplicação, para acompanhamento e obtenção de mais dados de tratamento. Após aferida a tratabilidade, incluindo-se aí ensaios que abranjam todos os parâmetros da Portaria GSM/MS 888 (2021), será avaliada a real viabilidade técnica-econômica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRASIL. Lei nº. 6.050, de 24 de maio de 1974. Dispõe sobre a fluoretação da água em sistemas de abastecimento quando existir estação de tratamento. Lex: Coletânea de legislação e jurisprudência, São Paulo. Legislação Federal e Marginalia. 1974; 38:760.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria, GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 09 de jul. 2021.

BRASIL, Resolução CONAMA n°357, de 17 de março de 2005. Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional.

BRASIL, Resolução CONAMA n°396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas. Além disso, essa resolução também estabelece diretrizes para a prevenção e o controle da poluição das águas subterrâneas.

CARNEIRO, C. G. *Estudo do potencial de formação de trihalometanos da Lagoa do Peri, Florianópolis – SC*. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2012.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – *Relatório de qualidade das águas subterrâneas no Estado de São Paulo 2001 – 2003* – São Paulo: CETESB, 2004.

FUNASA, Brasília, 2012. Fundação Nacional de Saúde. *Aplicação da eletrodiálise para remoção de compostos nitrogenados em águas para abastecimento público.* Relatório final. 2012.

GOMES, B.C.C. *Avaliação teórica do processo de eletrodiálise*. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG. 2020.

LAGANARO, R. A.; ARNESEN, A. S.; PERRUCCI, E. C.; CAMERA, S. G. *Matriz de emissão e excitação de fluorescência para caracterização da matéria orgânica na água de sistemas de abastecimento público*. 29º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, da ABES, 2017. Anais.

MAGALHÃES, H I C. *Efeitos do Flúor na Saúde Humana*. Universidade Fernando Pessoa Faculdade de Ciências da Saúde Porto, 2018. Dissertação de Mestrado.

NUNES, S. TAMURA, B M. *Revisão histórica das águas termais*. Surg Cosmet Dermatol 2012;4(3):00-00.

SCHUCK, C. A. *Ocorrência de trihalometanos e ácidos haloacéticos na desinfecção de efluentes tratados biologicamente*. Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, SP. 2004.