

VIABILIDADE ECONÔMICA DA ULTRAFILTRAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA POTÁVEL – ESTUDO DE CASO NO BRASIL.

Claudia Patricia Pereira Simões(1)

Engenheira Química pela Universidade Federal de Uberlândia, Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília e Analista Operacional da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Fabio Pereira de Carvalho

Química Ambiental pela Universidade de São Paulo, Mestrado em Profissional Ambiente, Saúde e Sustentabilidade pela Universidade de São Paulo e Lead Technical Specialist - DuPont

Cristina Celia Silveira Brandão

Doutora em Engenharia Ambiental pelo Imperial da Universidade de Londres. Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNB.

Claudia Morato Alvares

Engenheira Química pela Universidade Federal de Uberlândia, Mestre em Engenharia Mecânica, pela Universidade Federal de Uberlândia e Analista Operacional da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Endereço⁽¹⁾: Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), SAIN, Área Especial Caesb, ETA-Brasília, CEP 70.620-000, Brasília, DF, Brasil – Tel: (61)996541685 - e-mail: claudiasimoes@caesb.df.gov.br

RESUMO

O aumento da escassez hídrica e da poluição dos mananciais disponíveis para o abastecimento humano, associado aos padrões de qualidade cada vez mais rigorosos das legislações e à intensificação da atividade regulatória tem se tornado um desafio constante para o saneamento. Para superar esses desafios são necessários investimentos em tecnologias capazes de fornecer água em qualidade e quantidade satisfatória para o consumidor. Porém, dentro de um cenário acelerado de dinamismo econômico a tomada de decisão deve ser embasada a fim de garantir a alocação ótima de recursos. Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a viabilidade econômica da ultrafiltração para produção de água potável. Os resultados mostraram que a ultrafiltração é uma opção tecnológica interessante para complementar ou substituir sistemas de tratamento de água existentes, tanto do ponto de vista econômico como de qualidade da água produzida. Os custos com energia elétrica, produtos químicos e mão de obra foram os mais significativos, porém são passíveis de otimização, considerando operação remota da planta de ultrafiltração, que é totalmente automatizada. Os custos operacionais da ultrafiltração foi o menor quando comparado a outros dois sistemas tradicionais de tratamento de água, mesmo quando o custo de substituição da membrana foi incluído.

PALAVRAS-CHAVE: Membranas de ultrafiltração, Viabilidade econômica, Tratamento de água

CONTEÚDO DO TRABALHO

Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar os custos operacionais de uma estação de tratamento de água potável, que possui tecnologia avançada de tratamento por membrana de ultrafiltração. Para uma melhor avaliação, foi feita uma comparação com os custos operacionais de dois sistemas de tratamento tradicionais diferentes: uma estação que adota tecnologia de tratamento de dupla filtração e outra de filtração direta.

Introdução

O saneamento ambiental tem enfrentado enormes desafios nas últimas décadas, entre eles destacam-se: a eutrofização proveniente do aporte de nutrientes às águas superficiais, oriundos das atividades agrícolas nas zonas rurais, e do esgoto domiciliar e industrial nas zonas urbanas; eventos de cheias e estiagem associados às mudanças climáticas e o aumento da contaminação dos mananciais. Para vencer esses desafios são necessários cada vez mais investimentos em tecnologias de tratamento de água para o abastecimento humano, de modo a

assegurar que ela não represente risco à saúde do usuário. A definição do processo de tratamento mais adequado para cada tipo de água passa por uma avaliação criteriosa onde devem ser observados resultados de ensaios de tratabilidade, disponibilidade de matéria prima, existência de tecnologia e mão de obra especializada, área disponível para construção do sistema de tratamento, entre muitos outros. Os custos operacionais e de implantação também devem ser considerados na tomada de decisão. Sampaio (2014) complementa ainda que além da tecnologia apropriada, uma Estação de tratamento de água deve ser projetada, construída e, principalmente, operada corretamente.

A crise no abastecimento de água de grandes cidades metropolitanas tem ganhado as manchetes dos principais meios de comunicação. Em 2014, várias cidades do Estado de São Paulo vivenciaram o racionamento, inclusive a capital São Paulo. Dois anos depois o Distrito Federal viveu a mesma experiência, com seus dois principais reservatórios em níveis críticos. O racionamento foi iniciado em janeiro de 2017 nas cidades abastecidas pelo reservatório do Descoberto e em março do mesmo ano iniciou-se também o racionamento nas áreas abastecidas pelo reservatório de Santa Maria. Esses reservatórios apresentaram os piores níveis já registrados.

Para evitar o colapso no abastecimento de água do DF, a CAESB (Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal) ampliou sua capacidade de produção de água, e entre os novos sistemas implantados, destaca-se o Sistema Produtor de Água do Lago Paranoá. Em apenas 7 meses foram elaborados termo de referência, realizada contratação, obras e iniciada a operação de uma nova Estação de Tratamento de Água (ETA), denominada ETA Lago Norte, equipada com membranas de ultrafiltração. A unidade foi inaugurada em outubro de 2017 e tem capacidade de produção de até 700 litros por segundo de água potável.

Os bons resultados obtidos com a implantação da ETA Lago Norte, seja em termos de qualidade da água produzida, ou em relação ao baixíssimo prazo de implementação do empreendimento, confirmaram as vantagens dos Processos de Separação por Membranas (PSM) apresentados na literatura (Simões, 2016; Braga et al, 2016; Mondal e Wickramasinghe, 2008; entre outros), resumidos a seguir: 1) sistema mais compacto e modulares de rápida implantação e ampliação; 2) baixa demanda de área construída; 3) qualidade da água tratada, por meio da remoção de turbidez, bactérias e vírus, micro-organismos resistentes a desinfecção (*Giardia*, *Cryptosporidium*); 4) redução da geração de lodo e custos de tratamento e disposição; 5) facilidade de automação e conseqüente monitoramento dos parâmetros de qualidade e de processo; entre outros.

Assim, os PSM tem se tornado uma opção tecnológica interessante para complementar ou substituir sistemas de tratamento de água existentes. Isso tem ocorrido, principalmente, pelas vantagens já mencionadas, e por garantir elevados níveis de remoção de contaminantes, permitindo o atendimento aos padrões de qualidade cada vez mais rigorosos das legislações. Outro fator que tem colaborado para a disseminação dos PSM, em vários países, é o desenvolvimento de membranas mais eficientes e seletivas, com custos de aquisição e operação cada vez menores, tornando essa tecnologia mais atraente do ponto de vista econômico (Van der Bruggen *et al.*, 2001; Mierzwa *et al.*, 2008).

Metodologia

O estudo foi realizado na ETA Lago Norte, equipada com membranas de ultrafiltração no processo de tratamento, composta pelas seguintes etapas de tratamento: (1) Captação água bruta; (2) A água bruta passa pelo pré-tratamento, que ocorre em sistema de filtro a disco; (3) A água pré-filtrada alimenta os módulos de ultrafiltração; (4) a água ultrafiltrada é conduzida para o reservatório de equalização e na adutora é realizada a desinfecção com hipoclorito de sódio, fluoretação e correção de pH; e (5) Estação elevatória de água tratada.

Para uma melhor avaliação os custos operacionais foram comparados com outra estação de tratamento de porte semelhante, capacidade de 640 litros por segundo, o processo de tratamento é dupla filtração, que neste trabalho será denominada de ETA 01. Seguem as etapas de tratamento da Estação 01: 1) A água bruta recebe o coagulante diretamente na adutora por meio do uso de injetor e a mistura rápida ocorre na tubulação por meio de uma malha instalada na tubulação; 2) A água coagulada é enviada para a câmara de carga; 3) A água desta câmara entra no fundo dos filtros de fluxo ascendente para executar o primeiro estágio de filtração; 4) A água filtrada do primeiro estágio é coletada e enviada aos filtros descendentes (segundo estágio de filtração); e finalmente, 5) a água filtrada é conduzida para o tanque de contato onde é realizada a desinfecção (gás de cloro), fluoretação e correção de pH.

Foi feita também uma comparação com outra estação de tratamento, com capacidade nominal de 190 litros por segundo, sendo que essa unidade foi incluída no estudo porque possui o mesmo desinfetante usado no ETA Lago Norte, o hipoclorito de sódio. Essa estação tem como principal processo de tratamento a filtração direta, que neste trabalho será denominada de ETA 02. Seguem as etapas de tratamento: 1) O coagulante é adicionado a água bruta na calha parshall, onde ocorre a mistura rápida; 2) A água coagulada é enviada aos filtros de fluxo rápido descendentes e 3) a água filtrada é conduzida para desinfecção (hipoclorito de sódio), fluoretação e correção do pH.

Para composição dos custos de operação, foram considerados os seguintes itens: produtos químicos utilizados no tratamento e limpeza de membranas, serviço de limpeza e conservação, serviço de vigilância, mão de obra e custos de energia elétrica.

Os custos referentes à manutenção não foram considerados no estudo em questão. Já os custos de tratamento e disposição dos resíduos gerados foram considerados apenas na ETA 01, no caso da ETA Lago Norte os resíduos são encaminhados para uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), onde passam pelo processo de tratamento.

Em relação ao custo da eletricidade:

- ETA Lago Norte – O sistema conta com dois medidores de energia elétrica horo sazonal, sendo um deles na captação e Elevatória de Água Bruta (EAB) e outro na ETA utilizado para quantificar a energia utilizada na ETA e na elevatória de água tratada (EAT). A EAB é responsável pelo recalque da água bruta até a ETA Lago Norte e também para manter a pressão de operação nos módulos de membrana. A partir dos dados de perda de carga e altura manométrica entre a captação e ETA foi calculado o percentual de energia gasto em cada processo, sendo obtido o seguinte resultado: 36% da energia é utilizada no recalque da água bruta e 64% como força motriz para o Processo de Separação por Membranas (PSM). Os mesmos cálculos foram realizados para separar a energia gasta no recalque da água tratada e nos demais processos da ETA (dosagem de produtos químicos, compressores, sopradores, entre outros), neste caso o resultado obtido foi: 81% para o recalque e 19% para o tratamento da água.
- ETA 01 – O custo total de eletricidade da unidade, que já está separada das unidades de bombeamento de água bruta e tratada.
- ETA 02 – Assim como no caso da ETA Lago Norte o custo energético de tratamento foi dissociado do custo de bombeamento, uma vez que a unidade tem apenas uma medição de energia para recalque de água bruta e tratada e para o tratamento. O resultado obtido foi: 95% para o bombeamento e 5% para o tratamento.

Em relação aos custos de mão-de-obra:

- ETA Lago Norte e ETA 02 – Foram considerados 6 operadores e 1 supervisor, sendo utilizado como referência os valores médios dos salários do Técnico em Sistemas de Saneamento (supervisores) e Agente de Operação de Sistemas de Saneamento (operadores), praticados pela empresa.
- ETA 01 – Foram considerados 12 operadores e 1 supervisor, e os valores foram os mesmos utilizados no item anterior.

Foi avaliado o período de janeiro a dezembro de 2019, e as comparações ocorreram quanto ao custo por metro cúbico de água tratada por cada ETA avaliada. A Tabela 1 apresenta as vazões médias de cada unidade durante o ano de 2019.

Tabela 1 - Vazão média referente à 2019

Unidades Estudadas	Vazões de janeiro a dezembro 2019
ETA Lago Norte	505
ETA 01	416
ETA 02	120

O custo envolvido com o tratamento de resíduos foi considerado apenas para a ETA 01, uma vez que a ETA 02 não conta com esse sistema, e no caso da ETA Lago Norte, a água de limpeza química das membranas passa por um processo de neutralização, e esse resíduo juntamente com a água de *backwash* (retrolavagem, sem adição de químicos) é direcionado para a rede coletora de esgoto e tratada em uma Estação de Tratamento de Esgoto (nível terciário), já existente.

Vale destacar ainda que as 3 estações de tratamento de água apresentam procedimentos de operacionais bem definidos, executados em um regime de normalidade. O processo de tratamento, no tocante à qualidade da água produzida é satisfatório e atende ao preconizado na legislação vigente.

Resultados Obtidos

Os percentuais referentes aos principais custos operacionais mensais de operação da ETA Lago Norte são apresentados na Figura 01, e as Figuras 02 e 03 apresentam a composição dos principais custos operacionais das ETA 01 e ETA 02, respectivamente.

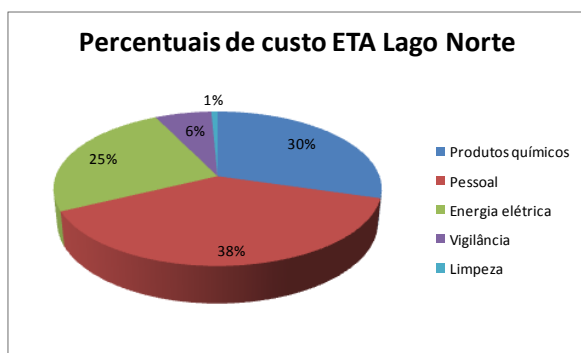


Figura 01 – Composição dos principais custos operacionais da ETA Lago Norte

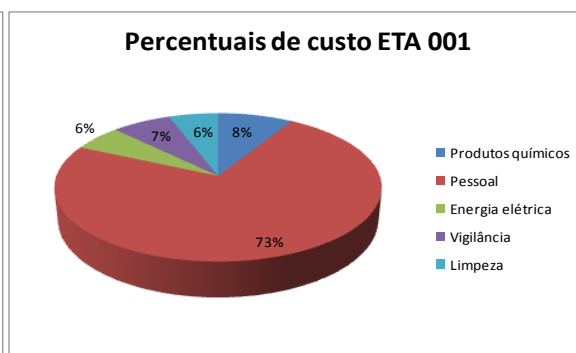


Figura 02 – Composição dos principais custos operacionais da ETA 01

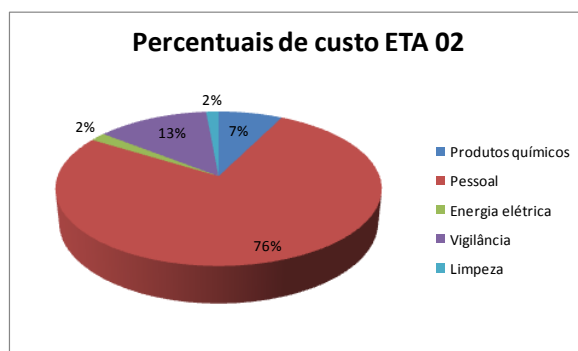


Figura 03 – Composição dos principais custos operacionais da ETA 02

Os resultados mostram que o custo mais representativo em todas as unidades é o custo da mão-de-obra. No entanto, quando comparado às outras duas estações, o impacto desse custo é menos significativo para a ETA Lago Norte. Considerando a possibilidade de operação autônoma desta unidade com monitoramento remoto, o percentual de custos de mão de obra pode ser reduzido ainda mais em relação a outros custos.

Em relação ao custo da eletricidade, verifica-se que no caso ETA Lago Norte esse custo é mais representativo, o que já era esperado, uma vez que o processo de separação por membrana utiliza a pressão como força motriz.

Como mencionado anteriormente a ETA Lago Norte e ETA 02, utilizam o hipoclorito de sódio para desinfecção, enquanto a ETA 01 utiliza o cloro gasoso. Ao analisar o peso de cada produto químico na composição dos custos, foi observado que o custo do hipoclorito representou 82 % dos custos com produtos químicos no caso da ETA Lago Norte e 70,6% da ETA 02, enquanto o cloro gasoso da ETA 01 foi apenas

37,3%. A operação com hipoclorito de sódio é mais cara quando comparada ao gás cloro, devido à diferença de concentração entre os produtos, mas seu uso permite uma operação automatizada e minimiza os riscos para trabalhadores e ambientais.

A Tabela 02 apresenta a comparação custo operacional por metro cúbico de água produzida em cada empreendimento analisado. No caso da ETA Lago Norte, foi avaliado também o custo de substituição de todos os módulos de membranas a cada 7 anos (garantia mínima). Para esse cálculo, foi utilizado o preço comercial dos módulos e o câmbio do dólar de R\$4,70 (cotação na data do estudo), totalizando o valor de R\$7.402.500,00, referentes à substituição de todos os módulos de membranas de ultrafiltração instalados na ETA Lago Norte.

É importante destacar que a Literatura adota como tempo de vida útil das membranas o período de 5 anos (Pickerin e Wiesner, 1993; Mierzwa *et al.*, 2008; Liikanen *et al.* 2002, entre outros). Porém no caso da ETA Lago Norte foram previstos 7 anos de vida útil, principalmente em função das características da água bruta do lago Paranoá, manancial que abastece a estação. O lago Paranoá apresenta baixíssimos valores de turbidez variando entre 16,5 e 1,1 UT, e turbidez média de 3,0 UT. Para condições mais extremas de operação com turbidez elevada, espera-se maior frequência de limpezas e conseqüentemente maior desgaste das membranas e menor vida útil. Assim, esses dois períodos de vida útil foram avaliados no estudo.

Tabela 2 - Comparação do custo/m³ - 2019

2019	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
ETA 01	0,55	0,59	0,56	0,58	0,54	0,53	0,51	0,49	0,51	0,54	0,55	0,56	0,54
ETA 02	0,75	0,93	0,78	0,89	0,92	0,89	0,85	0,83	0,88	0,89	1,22	0,91	0,90
ETA Lago Norte	0,40	0,54	0,43	0,44	0,43	0,42	0,48	0,40	0,44	0,45	0,42	0,44	0,44
ETA Lago Norte (incluído custo reposição das membrana em 7 anos)	0,47	0,61	0,50	0,51	0,50	0,49	0,55	0,47	0,51	0,52	0,49	0,51	0,51
ETA Lago Norte (incluído custo reposição das membrana em 5 anos)	0,49	0,64	0,53	0,54	0,53	0,51	0,58	0,50	0,53	0,55	0,51	0,54	0,54

O custo operacional do ETA Lago Norte foi o menor entre as unidades avaliadas, mesmo quando foi incluído o custo de substituição da membrana, diluído no tempo de vida estimado para o empreendimento. É importante mencionar as diferenças entre a capacidade de produção das estações avaliadas. As unidades de menor vazão tendem a ter custos operacionais mais altos, o que pode ser constatado com os valores da ETA 02, que produziu em 2019 uma vazão média 4,2 vezes menor do que a ETA Lago Norte. Enquanto a ETA 01 e a ETA Lago Norte com vazões mais próximas tiveram custos operacionais similares ao considerar o tempo de vida útil da literatura e pouca diferença quando o tempo de reposição de membranas estimado para a unidade foi avaliado.

Mierzwa *et al.* (2008) compararam os custos de investimento e operação, entre os sistemas de ultrafiltração, convencional e convencional com carvão ativado, os Autores utilizaram a equação de Hirschfeld (1982) e os resultados para ultrafiltração são apresentados na Tabela 3, apresentada abaixo.

Tabela 3 - Comparação de custo de tratamento em função do período de retorno de investimento. (Modificada (Fonte: Mierzwa *et al.*, 2008))

Custo de tratamento (R\$/m ³)	
Período de retorno (anos)	Sistema de Ultrafiltração
1	1,15
5	0,51
10	0,44
15	0,42
20	0,41
25	0,40
30	0,40

O presente estudo foi desenvolvido considerando os dados do segundo ano de operação da ETA Lago Norte. Realizando-se uma interpolação nos valores apresentados na Tabela 3, o custo correspondente ao segundo ano seria de R\$0,99/m³, bem superior ao obtido neste trabalho, porém vale destacar que os Autores utilizaram vários componentes do sistema de tratamento para definir o custo de investimento (membranas e vazão de pressão, bombas, pré-filtração, estrutura metálica, instrumentação e controle, sistemas de dosagem e limpeza química, custo de construção e terreno), enquanto neste trabalho foi considerado apenas o custo das membranas.

Conclusão

O custo com pessoal foi o maior para as três unidades avaliadas, porém no caso da ETA Lago Norte esse custo pode ser reduzindo, considerando que a unidade é automatizada e os PSM possibilitam a operação remota.

Entre as unidades avaliadas o custo com produtos químicos foi mais representativo na ETA Lago Norte, e o hipoclorito de sódio utilizado na desinfecção foi responsável por 82% dos custos totais com químicos.

Como já era esperado, a energia elétrica também teve maior peso na ETA Lago Norte, uma vez que os PSM utilizam a pressão como força motriz.

O custo operacional da ETA Lago Norte foi o menor entre as unidades avaliadas, mesmo quando o custo de substituição da membrana, diluído no tempo de vida estimado para a unidade, foi incluído. Porém, quando considerado 5 anos de vida útil, valor recomendado pela literatura, obteve-se o mesmo valor do custo operacional da ETA 01.

Com base no estudo, com dados em escala real, podemos dizer que o custo mensal de operação (R\$) da ultrafiltração é aproximadamente 5,6% menor que a dupla filtração, para o caso avaliado. Apesar da diferença não ser tão expressiva é importante levar em consideração a estabilidade da qualidade da água produzida. No caso dos PSM não são verificadas variações significativas, enquanto nos processos convencionais de tratamento podem ocorrer alterações a depender da variação da qualidade da água bruta.

A partir dos resultados apresentados, pode-se concluir que as membranas de ultrafiltração devem ser levadas em consideração durante a elaboração de projetos de estações de tratamento de água para abastecimento público. Essa alternativa tem se mostrado atraente tanto do ponto de vista econômico quanto em relação à qualidade da água produzida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BRAGA, F. M. G.; SIMÕES C. P. P., BRANDÃO, C. C. S. (2016). *Avaliação em escala piloto da aplicação de ultrafiltração no tratamento da água do lago Paranoá para consumo humano*. 35º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental – Associação Interamericana de Engenharia Sanitária e Ambiental.
2. HIRSCHFELD, H. *Engenharia Econômica*. 2ª edição, Editora Atlas S/A. São Paulo, 334 p. 1982.
3. Liikanen, R.; Yli-Kuivila, J. e Laukkanen, R. (2002) — *Efficiency of various chemical cleanings for nanofiltration membrane fouled by conventionally-treated surface water*. Journal of Membrane Science 195, 265-276.
4. Mierzwa, J.C.; Silva, M.C.C. ; Rodrigues, L.D.B.; Hespanhol. I. (2008). *Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado*. *Engenharia Sanitária Ambiental*, v. 13, n. 1, p.78-87.
5. Mondal, S. e Wickramasinghe, R. (2008). *Produced water treatment by nanofiltration and reverse osmosis membranes*. *Journal of Membrane Science* 322,162–170.
6. Pickerin e Wiesner, (1993) *Modelo de custo para filtração por membrana de baixa pressão*. *Journal of Environmental Engineering*, setembro de 1993, Volume 119, Edição 5 (772 - 797).
7. SAMPAIO, A. E. (2014). *Avaliação econômica comparativa da estação de tratamento de água de Maranguape tratando água de dois distintos mananciais: Açudes Acarape do Meio e Gavião*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Fortaleza- CE, Brasil.

8. SIMÕES, C. P. P. (2016) *Avaliação operacional e remoção de bisfenol-A no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto*. Dissertação mestrado, UnB, Brasília, DF, 183p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/20900>
9. Van Der Bruggen, B; Everaert, K.; Wilms, D.; Vandecasteele, C. (2001). Application of nanofiltration for removal of pesticides, nitrate and hardness from ground water: rejection properties and economic evaluation. *Journal of Membrane Science*, 193, 239-248.