

II-1361 - AVALIAÇÃO DE UM TESTE PILOTO COM TECNOLOGIA DE ULTRAFILTRAÇÃO PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REUSO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM TRATAMENTO TERCIÁRIO

Waldyr Ramos Junior⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Mestrando em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Especialista em Engenharia na AST Ambiente.

Marcos Flavio dos Santos Chataque

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Especialista de Pesquisa & Tecnologia do Grupo Águas do Brasil.

Marcelo Lippi

Engenheiro Ambiental pela Universidade Federal Fluminense (UFF). Gerente de Engenharia na AST Ambiente.

Rui Sampaio

Engenheiro de Energias Renováveis pelo Instituto Politécnico de Bragança (IPB). Pós-Graduação Gestão de Projetos pela Porto Business School (PBS). Gestor de Projetos na AST-Ambiente

Andre Lermontov

Engenheiro Químico pela Escola de Química da UFRJ. Mestre em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da UFRJ. Superintendente de Tecnologia do Grupo Águas do Brasil S/A com mais de 25 anos de experiência em saneamento ambiental, tratamento de água e efluentes.

Endereço⁽¹⁾: Avenida Athos da Silveira Ramos, 149, CT – Bloco A, 2º andar – sala DAPG - Cidade Universitária – Rio de Janeiro/RJ – CEP:21941-909 - e-mail: waldyrjunior@id.uff.br

RESUMO

Os recursos hídricos sofrem com o aumento de sua demanda resultado do crescimento populacional somado ao desenvolvimento do setor industrial. Este último tem se esforçado em buscar soluções e medidas que auxiliem na atenuação das demandas hídricas dos seus processos produtivos. Diante dessa questão, o reuso de efluentes é uma alternativa capaz de dirimir essa problemática e está demonstrando excelentes resultados na redução da demanda hídrica. Neste contexto, os processos de separação por membranas vêm sendo muito aplicados, especialmente, em sistemas de tratamento de efluentes já existentes como etapa de pós-tratamento. Portanto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a instalação de uma unidade piloto de ultrafiltração (UF) como tratamento quaternário em uma Estação de Tratamento de Efluente localizada em Niterói, no estado do Rio de Janeiro. Foi empregado no piloto um cartucho de membrana de fibra-oca de UF modelo AQUA-MEM, fornecido pela AQUASMART, o piloto foi operado por 10 dias úteis onde foram feitas coletas da entrada e saída do processo e levadas para análise laboratoriais. Analisou-se, então, alguns parâmetros e comparou-se os resultados com os padrões mínimos requisitados na legislação estadunidense, europeia e do estado de São Paulo, a fim de avaliar em qual classe o efluente tratado pelo piloto melhor se enquadrava. O permeado apresentou resultados médios que melhor enquadrava na Classe B para legislação paulista e europeia e uso urbano restrito, segundo a legislação do EUA, destaca-se apenas que houve um desvio no atendimento ao valor máximo de *E. coli* permitido nas legislações. O piloto performou com resultados satisfatórios na produção de água de reuso para fins urbanos com restrições.

PALAVRAS-CHAVE: Água de reuso, Ultrafiltração, Membrana, Estação de Tratamento de Esgoto, Pós-tratamento de efluentes.

INTRODUÇÃO

A preocupação com a escassez hídrica e a preservação da qualidade dos corpos hídricos é crescente. Isto, somado à elevada demanda de água para os diversos processos industriais, agrícolas e ao crescimento populacional, torna-se um assunto de alta relevância para a sociedade atual (YANG *et al.*, 2021). Urge, então, a necessidade de otimizar e melhorar os atuais sistemas de tratamento de água e esgoto existentes. Nesse sentido, surgem os processos de separação por membranas (PSM).

Dentre os PSM, podem-se destacar as membranas de ultrafiltração (UF), as quais, nos últimos anos e devido à sua capacidade de remoção de compostos de alto peso molecular, sólidos suspensos, vírus e bactéria, têm sido amplamente aplicadas em projetos de *Membrane Bioreactor* (MBR) (BRANCH *et al.*, 2021). Além desta aplicação, as membranas de ultrafiltração têm sido empregadas como pós-tratamento de águas e efluentes a fim de produzir uma água de melhor qualidade e capaz de ser aplicada para o reuso (CLEM e MENDONÇA, 2022; AL AANI *et al.*, 2020).

Diversos países têm elaborado legislações e normativas a fim de orientar a prática de reuso quanto à sua finalidade de aplicação, bem como a estabelecer os requisitos mínimos para reuso, destacando-se as “*Guidelines for Water Reuse*” da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, as “*Guidelines for the Non-potable Uses of Recycled Water in Western Australia*” do Departamento de Saúde da Austrália Ocidental e, mais recentemente, a “*Water Reuse Regulation*” do Parlamento Europeu. De acordo com Obraczka *et al.* (2019), no Brasil o reuso não tem regulamentação específica, sendo a NBR 13.969/1997 um importante marco rumo à regulamentação do reuso no país. No entanto, o Estado de São Paulo publicou a Resolução Conjunta SES/SIMA N.º 01/2020, a qual dispõe sobre o reuso direto não potável de água para fins urbanos, e o município de Niterói estabeleceu, através da Lei n.º 2856/2011, a regulamentação aplicável ao reuso de águas cinzas em instalações públicas e privadas.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade do efluente tratado pela unidade de UF após a etapa terciária da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), a fim de determinar os seus potenciais usos e aplicações visando o reuso urbano indireto, comparando com as normativas nacionais e internacionais para reuso.

MATERIAIS E MÉTODOS

O piloto (Figura 1) foi instalado em uma ETE localizada no bairro de Cambinhas, município de Niterói, no estado do Rio de Janeiro, e destinada ao tratamento do esgoto doméstico da região.



Figura 1 - Piloto de Ultrafiltração com membrana modelo: AQUA-MEM

A alimentação da unidade de UF foi realizada com o efluente tratado em um flotor, órgão integrante da etapa terciária da ETE e destinado à remoção das cargas de fósforo no efluente oriundo da etapa secundária. Uma parte do efluente tratado no flotor foi encaminhada para o tanque de entrada do piloto integrando 1 (um), cartucho de membranas da UF, do tipo fibra oca de polietileno (PE) e modelo AQUA-MEM, fornecido pela AQUASMART. As membranas possuem poros de 410-440 μm e totalizam 5,6 m^2 de área superficial, o cartucho da membrana possui duas entradas, sendo a superior para saída do permeado e a inferior para injeção de ar durante as retrolavagens, e o sistema funciona com a filtração de fora para dentro (*out – in*). Utilizou-se uma bomba de rotor flexível modelo EPm 220/25 da ZUWA-Zumpe GmbH, soprador de ar com vazão de 60 l/min, manômetro para acompanhamento da pressão de operação e retrolavagem e hidrômetros para registros do volume de permeado (efluente tratado) produzido e volume de permeado utilizado nas retrolavagens.

O sistema contemplou dois tanques, sendo um tanque de entrada onde a membrana ficou submersa no efluente oriundo do flotor e outro o tanque para armazenamento do permeado (Figura 2). O piloto foi operado com 300s de filtração, onde o ar era injetado através de um difusor tubular no fundo do tanque de entrada e seguido de 20s de retrolavagem. Durante a retrolavagem o volume do tanque de permeado era utilizado para injetar a água tratada no interior da fibra das membranas, enquanto o ar era injetado na parte inferior do cartucho das membranas.

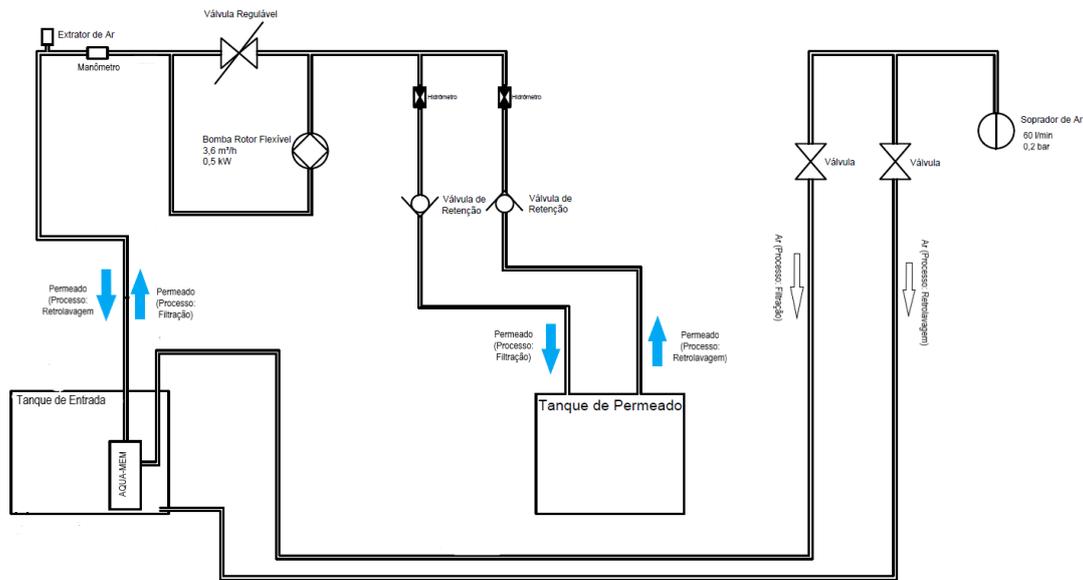


Figura 2 - Fluxograma de processo do piloto de UF

O teste do piloto ocorreu ao longo de 8 dias úteis e operando 8h/dia, sendo que todos os dias foram realizadas coletas do efluente de entrada e do permeado. As amostras foram caracterizadas em laboratório externo, tendo sido quantificados os seguintes parâmetros: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Suspensos Totais (SST), *Escherichia coli*, Turbidez, seguindo as metodologias estabelecidas em *Standard Methods* (APHA), e Fósforo Total, por ICP-MS: EPA 6020 B/200.8. A condutividade e o pH foram medidos com medidor portátil multiparâmetro, marca Hanna e modelo HI98195.

RESULTADOS

Os resultados das análises laboratoriais das coletas realizadas ao longo do teste estão compilados na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados das análises laboratoriais

Parâmetros	04/01/2023		05/01/2023		06/01/2023		09/01/2023		10/01/2023		11/01/2023		12/01/2023		13/01/2023	
	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída	Entrada	Saída
DBO ₅ (mg/l)	9	6	22	16	17	14	7	15	12	7	10	7	14	6	15	8
DQO (mg/l)	< 10	< 10	25	24	21	22	14	24	21	18	23	13	26	20	30	16
SST (mg/l)	24	< 0,8	32,9	< 0,8	24,1	< 0,8	16,2	1,5	15	2	8,5	< 0,8	11	1	22	< 0,8
Fósforo Total (mg/l)	0,15	< 0,01	0,58	0,02	0,94	< 0,01	0,5	0,09	0,42	0,04	0,18	0,05	0,16	< 0,01	0,57	0,07
E. coli (NMP/100ml)	92.000	230	24.000	230	28.000	230	49.000	230	24.000	230	14.000	230	92.000	230	>160.000	49
Turbidez (UNT)	2,5	< 0,1	6,6	< 0,1	8,3	< 0,1	5,8	0,4	6,2	0,3	1,5	< 0,1	1,4	< 0,1	6,8	< 0,1
pH	6,62	6,68	7,08	7,11	7,13	7,23	6,85	6,97	6,81	7,12	6,48	6,75	6,78	6,95	7,04	7,26
Condutividade Elétrica (µS/cm)	674	689	672	681	640	684	539	547	589	589	739	679	904	865	853	869

A Tabela 2 apresenta a média e o desvio padrão dos resultados parciais e a comparação com os padrões estabelecidos para reuso pelo Governo do Estado de São Paulo através Resolução Conjunta SES/SIMA N.º 01/2020, pelo Parlamento Europeu e pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).

Tabela 2 - Comparação com critérios nacionais e internacionais para reúso

Parâmetros	Permeado		SP		UE				USEPA	
	Média	DP	Classe A	Classe B	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D	Urb. Irrestrito	Urb. Restrito
DBO ₅ (mg/l)	10	4,3	≤ 10	≤ 30	≤ 10	25	25	25	≤ 10	≤ 30
DQO (mg/l)	18	5,1	-	-	-	-	-	-	-	-
SST (mg/l)	1,1	0,5	≤ 0,5	≤ 30	≤ 10	35	35	35	-	≤ 30
Fósforo Total (mg/l)	0,04	0,03	-	-	-	-	-	-	-	-
E. coli (NMP/100ml)	207	64,0	ND*	≤ 120	≤ 10	≤ 100	≤ 1.000	≤ 10.000	ND*	≤ 200
Turbidez (UNT)	0,2	0,1	≤ 2	-	≤ 5	-	-	-	≤ 2	-
pH	7	0,2	6-9	6-9	-	-	-	-	6-9	6-9
Condutividade Elétrica (µS/cm)	700	115,1	≤ 700	≤ 3000	-	-	-	-	-	-

*ND: Não detectado

As legislações utilizadas para comparar os resultados encontrados, classificam quanto ao uso da água, da seguinte forma: a Resolução Conjunta SES/SIMA N.º 01/2020 estabelece Classe A para reúso irrestrito não potável e Classe B para reúso restrito não potável. A União Europeia estabelece quatro classes para usos agrícolas e de irrigação da água de reúso, sendo Classe A para todas as culturas alimentares, incluindo raízes consumidas cruas e a Classe B são para culturas alimentares cruas, onde a parte comestível é produzida acima do solo e não está em contato direto com a água de reúso. Enquanto a USEPA se divide em duas categorias em: uso urbano irrestrito e uso urbano restrito.

A partir dos registros de volumes dos hidrômetros de permeado e de retrolavagem, e do controle do tempo de operação foi possível calcular algumas características médias da membrana nas condições empregada no teste. A vazão média de permeado e retrolavagem foi de 216,7 l/h e 3,0 l/h, respectivamente, o fluxo médio de permeado foi de 38,2 l/m²h e a recuperação foi de 97,3%.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A partir dos resultados da Tabela 1, é possível notar que apesar da baixa concentração de Sólidos em Suspensão Totais (SST) e Fósforo Total no efluente de entrada, foi possível identificar uma redução média acima de 90% e 80%, respectivamente. Simultaneamente, os resultados de Turbidez e *E. coli* apontaram para uma remoção média de 95% e 98%, respectivamente. Cabe ressaltar que nos parâmetros SST e Turbidez o resultado do permeado ficou abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado em diversas amostragens. Em relação aos valores de entrada, apesar de representarem efluente do sistema de tratamento terciário, é válido destacar que são referentes a coleta feita no tanque de entrada do sistema onde, em decorrência do processo de retrolavagem, ocorre uma maior concentração no meio dos compostos do efluente que ficam retidos na membrana, não representando assim a saída da ETE, propriamente dita.

Em relação aos valores de carga orgânica (DBO₅ e DQO) nota-se pouca variação entre a entrada e saída, o que corresponde ao esperado dado que as membranas de UF não têm capacidade para a remoção de compostos dissolvidos (SILVA, 2008). Por outro lado, houve uma redução média de 89% de fósforo; isto se deve, possivelmente, a retenção de deste em estado particulado, dado que as membranas de UF não tem capacidade de remoção de fósforo dissolvido.

Em relação ao potencial de reúso do efluente tratado, observa-se na Tabela 2 que para os parâmetros analisados e na maioria dos resultados médios obtidos, o efluente se enquadrou na Classe B, pela Resolução Conjunta SES/SIMA N.º 01/2020 e pelos critérios da União Europeia. Enquanto pelos critérios da USEPA, o permeado enquadra-se no uso urbano restrito. Destaca-se o fato de em todos os comparativos o valor de *E. coli* terem ficado acima do estabelecido, todavia considerando que a maioria dos resultados ficaram em 230 NMP/100ml, o que contrasta com os resultados encontrados em outras pesquisas (FALSANISI; LIBERTI; NOTARNICOLA, 2010; ARÉVALO, J. et al., 2012; YANG et al., 2021) onde o valor ficou abaixo de 10 NMP/100ml, na maioria. Neste contexto, levantou-se, então, um questionamento quanto à eventual possibilidade de se ter ocorrido uma alguma forma de contaminação durante a coleta. Ressalta-se, ainda, que as legislações preveem sistemas de reúso com etapas de desinfecção. Assim, para um melhor enquadramento e aproveitamento da água tratada é oportuno a implementação de uma etapa seguinte de desinfecção.

De acordo com estudo realizado pela Secretaria de Estado do Ambiente e Sustentabilidade (SEAS) do Estado do Rio de Janeiro sobre as oportunidades de reúso para fins industriais no estado a partir dos efluentes de

ETEs (SEAS, 2022), Niterói é um município promissor do ponto de vista de oportunidades de reúso. Pois o município possui sete ETEs com vazões suficientes para suprir a demanda hídrica industrial em um raio de 20 km, incluindo a ETE Camboinhas, onde este estudo foi realizado.

Assim sendo, devem ser elaboradas legislações e normativas que discorram sobre o reúso de efluentes para os mais diversos fins, tais como, urbano, industrial, agrícola, bem como, o potável. Haja vista, o atual cenário de risco de escassez hídrica, especialmente, no sudeste brasileiro. Nesse sentido, vem sendo publicadas legislações como as de São Paulo sobre o reúso de água para diversos fins através da Resolução Conjunta SES/SIMA Nº 01/2020 e para reúso potável indireto através da Decisão de Diretoria Nº 134/2022/P/C/E/I da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). No âmbito nacional está sendo elaborada uma Resolução pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH) que visa dispor sobre critérios para reúso direto não potável de água, assim como no estado do Rio Janeiro está em elaboração uma norma que verse sobre o mesmo tema a fim de estimular o reúso. No entanto, até o presente momento é muito incipiente as legislações que versam sobre o tema de reúso nas mais diversas aplicações no Brasil (SANTOS et al., 2020), especialmente o reúso potável direto, mesmo já sendo uma realidade em diversos países (HESPANHOL, 2015; SANTOS, 2020 e MUKHERJEE e JENSEN, 2020).

O presente trabalho é a primeira parte de um estudo onde pretende-se aprofundar ainda mais na análise, avaliando-se diferentes cenários e condições, com o intuito de avaliar o potencial da membrana AQUA-MEM para o pós-tratamento de efluentes sanitários visando o seu reúso. No próximo estágio serão avaliados outros fatores de significativa relevância para OPEX de uma unidade de UF como tratamento terciário após um Reator anaeróbico de fluxo ascendente (RAFA), sistema lodos ativados e decantador, assim como, consumo energético, avaliação do fluxo de permeado e incrustação na membrana, entre outros.

CONCLUSÕES

A implementação do piloto foi bem-sucedida e o estudo da aplicação de uma unidade de UF como tratamento avançado de efluentes apresentou resultados preliminares promissores. A membrana apresentou uma boa performance com uma vazão média de permeado de 216,7 l/h, um fluxo médio de 38,2 l/m²h e uma recuperação de 97,3%. Houve uma significativa melhora na qualidade efluente tratado, com uma remoção média acima de 90% na maioria dos parâmetros analisados.

Quanto à classificação e destinação do permeado produzido para reúso, diante dos resultados encontrados e nas legislações analisadas, aquele enquadra-se nas classes de uso restrito, tanto para uso urbano (Governo de São Paulo e USEPA) quanto para fins de irrigação agrícola (Parlamento Europeu). Como uma primeira etapa do estudo completo, o trabalho apresentou resultados satisfatórios e promissores para a continuidade do estudo completo, no qual serão avaliadas as demais variáveis de qualidade do permeado e de custos de operação.

Importante ressaltar a necessidade de legislações que tratem a respeito do reúso de efluentes nas suas mais diversas formas, incluindo o reúso potável direto, a fim de diminuir as pressões existente sobre os recursos hídricos, em especial nas grandes regiões metropolitanas brasileiras. Considerando o exemplo de outros países como Estados Unidos, na África do Sul, Austrália, Bélgica, Namíbia e Singapura e diante de um cenário global cada vez mais crítico de escassez hídrica decorrente do adensamento populacional e industrial somado às mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AL AANI, S., MUSTAFA, T. N., HILAL, N. "Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering: A comprehensive statistical review over the past decade", *Journal of Water Process Engineering*, v. 35, p. 101241, jun. 2020. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101241.
2. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA): *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22st edition. Washington DC, 2012.
3. ARÉVALO, J. et al. Wastewater reuse after treatment by MBR. Microfiltration or ultrafiltration? *Desalination*, v. 299, p. 22–27, ago. 2012.
4. BRANCH, Amos; TRINH, Trang; TA, Truong Minh; et al. Log removal values in membrane bioreactors: Correlation of surrogate monitoring and operational parameters. *Journal of Water Process Engineering*, v. 41, p. 102032, 2021.

5. CLEM, V., MENDONÇA, H. V. de. "Ozone reactor combined with ultrafiltration membrane: A new tertiary wastewater treatment system for reuse purpose", *Journal of Environmental Management*, v. 315, p. 115166, ago. 2022. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115166.
6. DEPARTMENT OF HEALTH. *Guidelines for the Non-potable Uses of Recycled Water in Western Australia*. Perth, 2011
7. FALSANISI, D.; LIBERTI, L.; NOTARNICOLA, M. Ultrafiltration (UF) Pilot Plant for Municipal Wastewater Reuse in Agriculture: Impact of the Operation Mode on Process Performance. *Water*, v. 2, n. 4, p. 872–885, 22 nov. 2010.
8. MUKHERJEE, M.; JENSEN, O. A comparative analysis of the development of regulation and technology uptake in the US and Australia. *Safety Science*, v. 121, p. 5-14, 2020.
9. NITERÓI. *Lei n° 2856*, 26 de julho de 2011. Instituinto mecanismos de estímulo à instalação de sistema de coleta e reutilização de águas servidas em edificações públicas e privadas. Disponível em: <http://pgm.niteroi.rj.gov.br/legislacao_pmn/2011/LEIS/2856_Disposicao_sobre_o_Sistema_de_Coleta_e_Reutilizacao_de_Aguas_Servidas_Publicas_e_Privadas.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2023.
10. OBRACZKA, M.; SILVA, D. do R.; CAMPOS, A. de S.; MURICY, B. Reuso de efluentes de tratamento secundário como alternativa de fonte de abastecimento de água no município do Rio de Janeiro. *Sistemas & Gestão, [S. l.]*, v. 14, n. 3, p. 291–309, 2019. DOI: 10.20985/1980-5160.2019.v14n3.1392. Disponível em: <https://www.revistasg.uff.br/sg/article/view/1392>. Acesso em: 31 jan. 2023.
11. SANTOS, A. et al. Uma análise crítica sobre os padrões de qualidade de água de uso e de reuso no Brasil. *Revista Sustinere*, v. 8, n. 2, p. 437–462, 2016.
12. SANTOS, A. S. P., Vieira J. M. P. Water reuse for sustainable development: Regulatory aspects in Brazil and Portugal, *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*, Vol. 8, Issue 1, pp. 50-68, doi:10.9771/gesta.v8i1.36462, 2020
13. SILVA, A. B. *Avaliação do emprego da UF em membrana na remoção de células de cianobactérias e microcistina para águas de abastecimento*. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008
14. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Guidelines for water reuse*. U. S. Washington, DC: EPA, 2012.
15. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. "Method 6020B (SW-846): Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry," Revision 2. Washington, DC: EPA, 2014.
16. YANG, J.; MONNOT, M.; ELJADDI, T.; ERCOLEI, L.; SIMONIAN, L.; MOULIN, P. Ultrafiltration as tertiary treatment for municipal wastewater reuse. *Separation and Purification Technology*, v. 272, p. 118921, 2021. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1383586621006328>>. Acesso em: 26 jan. 2023.