

I-376 – DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DA BAÍA DE GUANABARA POR DESTILAÇÃO COM MEMBRANAS

Amanda Loreti Hupsel⁽¹⁾

Química Industrial pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Mestranda em Engenharia Química pelo Programa de Engenharia Química da COPPE. Pesquisadora na Fundação Coppetec.

Cristiano Piacsek Borges⁽²⁾

Engenheiro Químico pela Escola de Química/UFRJ, M.Sc. e D.Sc. em Engenharia Química pela COPPE/UFRJ. Professor do Programa de Engenharia Química da COPPE/UFRJ.

Gisele Mattedi Barbosa⁽³⁾

Engenheira Química pela Escola de Química/UFRJ, M.Sc. em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela EQ/UFRJ. Pesquisadora na Fundação Coppetec.

Rodrigo Suhett de Souza⁽⁴⁾

Engenheiro Químico pela UERJ. Pesquisador na PETROBRAS/CENPES.

Ricardo de Araujo Cid da Silva⁽⁵⁾

Engenheiro de Meio Ambiente pela UFRJ. Pesquisador na PETROBRAS/CENPES.

Endereço⁽¹⁾: Av. Horácio Macedo, 2030 – Bloco G – Ilha do Fundão – Cidade Universitária – Rio de Janeiro - RJ - CEP: 21941-914 - Brasil - Tel: (21) 3938-8185 - e-mail: ahupsel@peq.coppe.ufrj.br

RESUMO

A inevitável escassez de água doce no mundo tem se tornado cada vez mais uma grande preocupação entre governos e empresas. São importantes fatores de desenvolvimento industrial a minimização dos impactos ambientais e o crescimento sustentável, com o uso racional de recursos hídricos e a redução dos custos associados à captação de água. Assim, torna-se premente o desenvolvimento de meios de utilização alternativa de fontes de água, tal como o emprego da tecnologia de dessalinização, que permite a utilização de fontes salinas em processos industriais. A destilação por membrana (DM) é um processo não-isotérmico de separação conhecido há cerca de 50 anos, que, apesar de apresentar-se ainda em processo de desenvolvimento, é citado como um dos processos emergentes de separação por membranas. A DM consiste em um processo de transferência de massa e calor simultâneas, cuja força motriz para o transporte é dada pela diferença de pressão parcial de vapor entre duas correntes aquosas com diferentes temperaturas. Pode apresentar elevados fatores de rejeição de solutos não voláteis, próximos de 100%, o que resulta na produção de permeado com grande pureza. No Rio de Janeiro, diversas empresas situam-se próximas à Baía de Guanabara, que poderia ser utilizada como fonte de água de processo através da dessalinização, impedindo assim o uso de água doce que pode ser distribuída à população. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo o estudo do processo de destilação por membrana para dessalinização de água da Baía de Guanabara, com o intuito de produzir água para utilização em processos industriais. Para tal, foi desenvolvido um sistema em escala piloto, alimentado com água microfiltrada da Baía de Guanabara como corrente quente do processo, e água da rede pública como corrente fria. Os resultados preliminares do desempenho do sistema indicaram uma remoção de sais superior a 99%.

PALAVRAS-CHAVE: Dessalinização, destilação por membranas, produção de água, Baía de Guanabara, processos de separação com membranas.

INTRODUÇÃO

A destilação por membranas é uma tecnologia promissora, que possui diversos benefícios em relação à processos convencionais e grande eficiência de remoção. No processo de destilação por membranas, uma solução salina aquecida é mantida em contato com um lado de uma membrana microporosa hidrofóbica, e uma solução destilada pura e fria é mantida do outro lado. A hidrofobicidade da membrana impede que a mesma seja molhada pelas soluções. Por causa da diferença de temperatura entre os dois lados da membrana, há uma diferença de pressão de vapor, como demonstrado na Figura 1, que induz a difusão de vapor de água através

dos poros da membrana e retém com elevadas eficiências contaminantes não voláteis (BAKER, 2012; KHAYET; MATSUURA, 2011).

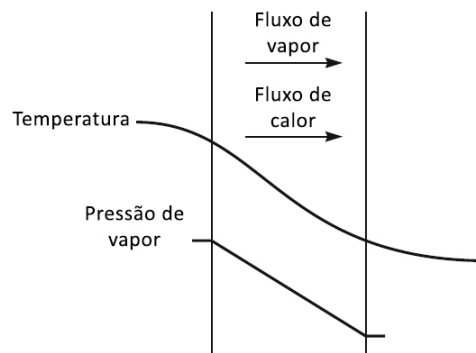


Figura 1: Ilustração esquemática do processo de destilação por membrana. (Adaptado de Baker, 2012)

É possível gerar a diferença de pressão de vapor responsável pela força motriz do processo com diferentes configurações de DM. A destilação com membrana por contato direto, demonstrada na Figura 2, é a configuração mais simples. Uma solução aquosa mais fria do que a solução de alimentação é mantida em contato direto com o lado do permeado da membrana. Ambas as soluções aquosas de alimentação e de permeado são circuladas tangencialmente às superfícies da membrana, promovendo a formação do gradiente de temperatura, que induz a diferença de pressão de vapor. Conseqüentemente, as moléculas dos componentes mais voláteis evaporam-se na interface líquido aquecido/vapor, atravessam os poros da membrana em fase de vapor e condensam-se na interface líquido frio/vapor, dentro do módulo da membrana. Esta configuração reduz a resistência à transferência de massa do lado do permeado quando comparada com outras configurações de DM. Em compensação, como a membrana é a única barreira para separação entre a alimentação quente e o permeado frio, esta configuração é a que apresenta a maior perda de calor por condução (KHAYET; MATSUURA, 2011; PANGARKAR et al., 2016; WANG; CHUNG, 2015).

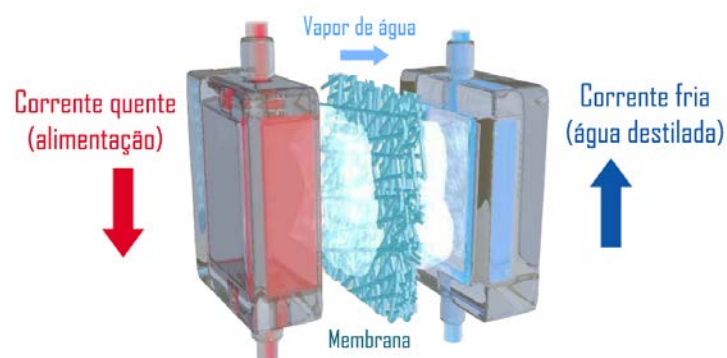


Figura 2: Ilustração demonstrando o processo de destilação por membrana com contato direto. (Adaptado de LI et al., 2016)

Além dos elevados fatores de rejeição dos solutos não voláteis, o processo de destilação por membrana possui diversos benefícios. Como não é um processo orientado à pressão, requer pressões hidrostáticas de operação muito mais baixas do que em processos que utilizam pressão como força motriz, resultando em um menor custo capital em comparação com estes processos (BAKER, 2012; KHAYET; MATSUURA, 2011). O processo geralmente ocorre em temperaturas de operação de 60 a 80°C, mais baixas do que na destilação convencional. Por isso, requer baixo suprimento de calor, conseqüentemente resultando em baixo requisito energético. A possibilidade de utilização de calor residual e fontes de energia renováveis permite que a DM seja utilizada em conjunto com outros processos industriais, como, por exemplo, a partir da energia cedida por coletores solares térmicos, que possuem bom desempenho na faixa de operação de temperatura utilizada (KOSCHIKOWSKI; WIEGHAUS; ROMMEL, 2003).

O processo de destilação por membranas tem sido aplicado principalmente em escala de laboratório. Devido ao produto de alta pureza produzido, o processo é bastante aplicável nas indústrias ambientais, químicas, petroquímicas, alimentícias, farmacêuticas e biotecnológicas. Recentemente, algumas plantas piloto tem sido propostas para dessalinização e dessalinização nuclear, mas ainda estão sob testes experimentais e não estão com uso completamente consolidado (KHAYET; MENGUAL; ZAKRZEWSKA-TRZNADEL, 2006).

A utilização de processos de dessalinização tal como a destilação por membranas representa um passo importante e estratégico em relação ao gerenciamento de recursos hídricos. Neste contexto, foi desenvolvido um projeto para estudar diversos processos de separação com membranas para dessalinização de água da Baía de Guanabara, a fim de prover água para utilização em processos industriais. O projeto é desenvolvido em uma planta piloto, cujo permeado de uma unidade de microfiltração alimenta três diferentes unidades de dessalinização, contendo os processos de osmose inversa, eletrodialise e destilação com membranas. A unidade de destilação com membranas foi construída inteiramente pela equipe, com projeto próprio, tendo iniciado suas operações em outubro de 2018 e apresentando-se então como o objeto de estudo deste trabalho.

MATERIAIS E MÉTODOS

O processo de destilação com membranas é conduzido em um sistema piloto, presente na planta de tratamento, cujo fluxograma está apresentado na Figura 3. Uma bomba de captação transfere água diretamente da Baía de Guanabara para armazenamento em um tanque pulmão (TP), após pré-tratamento em filtro de areia. O tanque pulmão alimenta uma unidade de microfiltração, cujo permeado segue para as plantas de osmose inversa (OI) e eletrodialise reversa (EDR) e para o tanque quente do sistema de destilação com membranas (DM). A água captada segue também como fluido de refrigeração para o trocador de calor da unidade de DM, e retorna ao tanque pulmão. O tanque frio é alimentado com água captada da rede pública. O tanque quente é alimentado com água captada da rede pública.

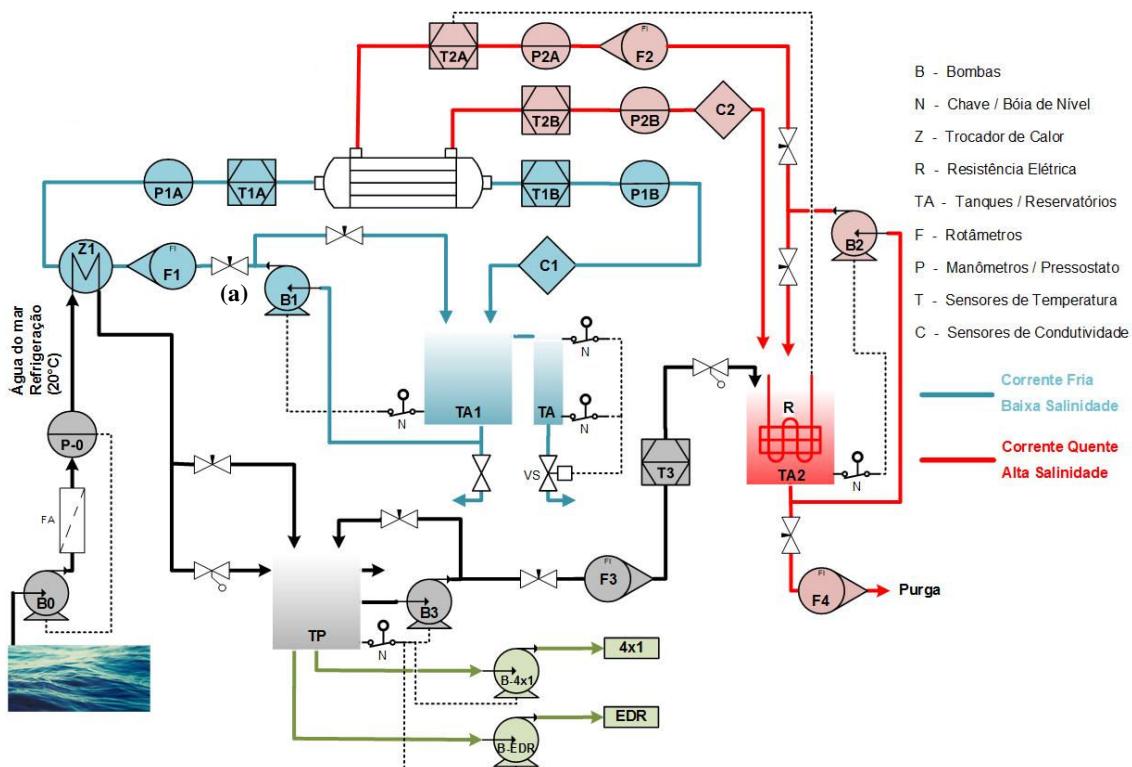


Figura 3: Fluxograma do sistema piloto de destilação com membranas por contato direto.

No processo da DM, a corrente de alta salinidade é aquecida por meio de uma resistência, mergulhada no tanque quente, e circula por dentro do módulo, na parte de fora das fibras. A água fria, contendo baixa salinidade, é recirculada na parte de dentro (lúmen) das fibras e passa pelo trocador de calor, que evita o aquecimento da corrente. A diferença de pressão de vapor provoca a evaporação da água presente na corrente

quente para dentro dos poros das fibras; devido à diferença de temperatura, o vapor condensa na corrente fria. Assim, ao longo do processo, há um aumento do volume de água no tanque frio. O processo inicia-se com o tanque frio cheio; desta forma, o volume extra gerado pela destilação faz com que a água transborde através de um ladrão para um tanque de permeado. Este tanque possui sensores de nível e uma válvula solenoide próxima à base, que é atuada para esvaziamento do tanque sempre que é atingido um volume conhecido de permeado.

A atuação da válvula é registrada em um controlador lógico-programável (CLP); desta forma, pode-se calcular a vazão de permeado ao longo do tempo. Sensores de temperatura estão presentes na entrada e saída das correntes fria e quente, bem como na corrente de alimentação do tanque quente. A condutividade também é medida por sensores presentes no retorno da corrente fria e na saída da corrente quente. Todos os dados são registrados no CLP, e sempre que o volume no tanque quente diminui, a bomba 3 é acionada para que o volume seja mantido constante. Desta maneira, a unidade funciona de forma autossuficiente.

A operação inicial foi realizada com o aquecimento da corrente quente até 90°C, sendo esta mantida entre 85 e 90°C, e a temperatura da corrente fria variando de acordo com a temperatura da água da Baía de Guanabara. A vazão de recirculação da corrente quente foi mantida em 1 m³.h⁻¹ e variou-se a vazão de recirculação da corrente fria entre 0,5 e 1 m³.h⁻¹. O desempenho do sistema foi acompanhado através da rejeição salina e a permeância para cada caso. A rejeição salina foi calculada a partir da condutividade das correntes pela Equação 1:

$$R(\%) = 1 - C_p/C_c \quad \text{equação (1)}$$

Onde C_p e C_c são as condutividades do permeado e do concentrado (us.cm⁻¹), respectivamente. A condutividade do permeado foi calculada através de balanço de massa das correntes. A permeância é definida como a razão entre a vazão de permeado e a diferença de pressão de vapor entre as correntes quente e fria multiplicada pela área da membrana (Equação 2). A pressão de vapor de cada corrente é calculada a partir da equação de Antoine corrigida para o caso de soluções salinas (KHAYET, 2011).

$$L_p = Q/[(\rho_{vq}-\rho_{vf})\cdot A] \quad \text{equação (2)}$$

Onde L_p é a permeância (L.h⁻¹.m².bar⁻¹), Q é a vazão de permeado (L.h⁻¹), ρ_{vq} e ρ_{vf} as pressões de vapor das correntes quente e fria (bar), respectivamente, e A é a área da membrana (m²).

RESULTADOS

A unidade foi operada com as vazões de recirculação de 0,5 e 1 m³.h⁻¹ para a corrente fria e vazão de recirculação de 1 m³.h⁻¹ na corrente quente. As condutividades de ambas as correntes foram medidas ao longo do tempo para as duas condições estudadas, e os resultados estão demonstrados nas Figuras 4 (a) e (b). A condutividade inicial das correntes depende sempre das condições atuais da água da Baía de Guanabara e da água da rede pública, variando, portanto, entre cada experimento.

Ao longo do tempo, a condutividade varia de acordo com o comportamento do processo. Observa-se que o comportamento foi diferente entre os experimentos. Para a vazão de 0,5 m³.h⁻¹ (Figura 4.b), houve um aumento gradual da condutividade da corrente quente, e um decaimento para a corrente fria. Este comportamento indica que está havendo a concentração da corrente quente devido à remoção de água, transferida na fase vapor para a corrente fria. A água transferida possui condutividade inferior à da água captada, visto que ocorre uma diluição da mesma ao longo do tempo de experimento, o que causa o decaimento.

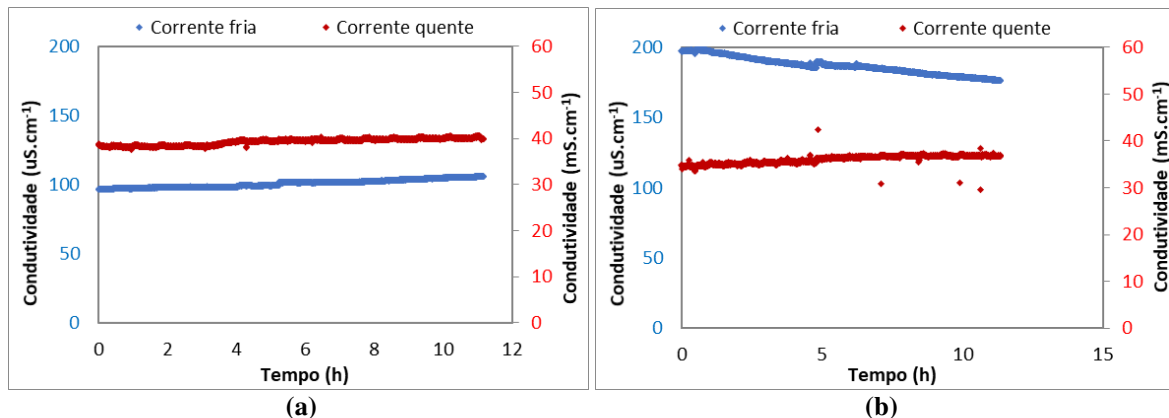


Figura 4: Condutividade ao longo do tempo das correntes quente e fria para os processos com vazão de recirculação de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente quente e 1 (a) e $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (b) na corrente fria.

Para a vazão de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, houve um leve aumento gradual da condutividade na corrente fria. Este aumento indica que está havendo transferência de sais, provavelmente devido ao molhamento de poros da membrana. Porém, a rejeição salina global dos processos foi de 99,3% para a vazão da corrente fria de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e de 99,9% para a vazão de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, o que mostra que houve pouca variação entre a salinidade da corrente de permeado para os dois processos. Estes resultados demonstram a efetividade da DM para remover quase que completamente a salinidade da água da Baía de Guanabara. A permeância ao longo do tempo está apresentada na Figura 5.

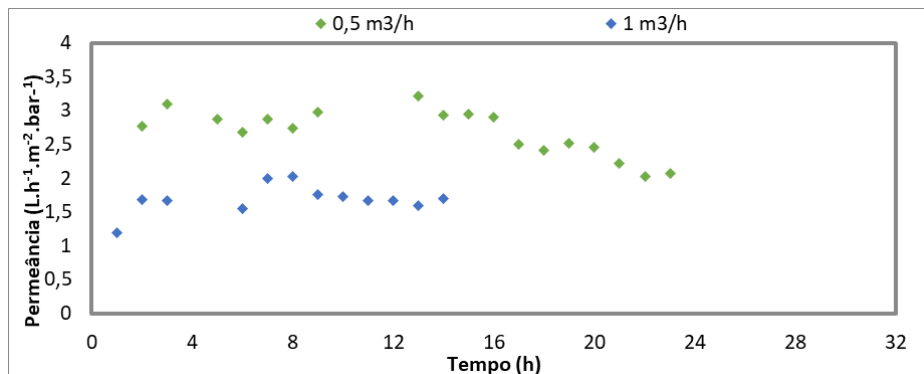


Figura 5: Permeância ao longo do tempo para os processos de DM com vazão de recirculação de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente quente e 1 e $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente fria.

O experimento realizado com vazão de recirculação da corrente fria de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ apresentou a melhor performance, com permeância praticamente constante em torno de $3 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$ durante as 16 primeiras horas do processo. A permeância manteve-se praticamente constante também para a vazão de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, mas em torno de $1,7 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$. Este resultado demonstra que a vazão de recirculação possui grande influência no desempenho do processo, requerendo a realização de mais estudos para que seja definido o modo de operação ideal.

Houve queda da permeabilidade das membranas ao longo do tempo de operação para o experimento de maior duração, que pode ter sido causada por evaporação da corrente de alta salinidade, gerando entupimento dos poros ao longo do processo, bem como o surgimento de outros tipos de incrustação, tal como incrustações orgânicas, conforme relatado por HSU *et al.* (2002) durante a destilação de água do mar. Porém, observa-se que foi possível operar com a permeância praticamente constante por pelo menos 16 horas de operação. Além disso, os resultados obtidos foram promissores se comparados à valores de permeância de processos consolidados como a osmose inversa, onde, para a mesma água em experimentos realizados na planta, foram obtidos valores entre $0,8$ e $1,5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$.



CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os resultados preliminares indicaram que o sistema de destilação com membranas foi capaz de remover mais de 99% da salinidade presente na água da Baía de Guanabara em ambos os casos estudados. O processo utilizando vazão de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente fria e $1,0 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente quente apresentou ainda rejeição de 99,9%, demonstrando a capacidade de produção de permeado com alta pureza.

Observou-se queda da permeância ao longo do tempo de operação, porém, foi possível operar com permeância praticamente constante por pelo menos 16 horas de operação. Os melhores valores foram obtidos novamente para a condição com vazão de $0,5 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ na corrente fria. A diferença entre os resultados demonstra que definir corretamente a vazão de recirculação das correntes pode causar grande impacto no desempenho do processo.

As próximas etapas do projeto compreendem a avaliação de diferentes condições de operação para obtenção de melhor performance, e a realização de análises físico-químicas das amostras coletadas e das amostras futuramente geradas, a fim de avaliar a qualidade da corrente fria ao longo do tempo e o seu enquadramento para uso como água de processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. BAKER, R. W. *Membrane Technology and Applications*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
2. GUILLÉN-BURRIEZA, E. et al. *Experimental analysis of an air gap membrane distillation solar desalination pilot system*. *Journal of Membrane Science*, v. 379, n. 1–2, p. 386–396, 1 set. 2011.
3. HSU, S. T.; CHENG, K. T.; CHIOU, J. S. *Seawater desalination by direct contact membrane distillation*. *Desalination*, v. 143, n. 3, p. 279–287, 10 jun. 2002.
4. KHAYET, M.; MENGUAL, J. I.; ZAKRZEWSKA-TRZNADEL, G. *Direct contact membrane distillation for nuclear desalination, Part II: experiments with radioactive solutions*. *International Journal of Nuclear Desalination*, v. 2, n. 1, p. 56, 2006.
5. KHAYET, M. *Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: A review*. *Advances in Colloid and Interface Science*, [s. l.], v. 164, n. 1–2, p. 56–88, 2011.
6. KOSCHIKOWSKI, J.; WIEGHAUS, M.; ROMMEL, M. *Solar thermal-driven desalination plants based on membrane distillation*. *Desalination*, v. 156, p. 295–304, 2003.
7. LI, X. et al. *A novel profiled core-shell nanofibrous membrane for wastewater treatment by direct contact membrane distillation*. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 4, n. 37, p. 14453–14463, 2016.
8. PANGARKAR, B. L. et al. *Review of membrane distillation process for water purification*. *Desalination and Water Treatment*, v. 57, n. 7, p. 2959–2981, 7 fev. 2016.
9. WANG, P.; CHUNG, T.-S. *Recent advances in membrane distillation processes: Membrane development, configuration design and application exploring*. *Journal of Membrane Science*, v. 474, p. 39–56, 15 jan. 2015.