

Artigo de Revisão


e-ISSN 2177-4560

DOI: 10.19180/2177-4560.v13n22019p246-260


Submetido em: 11 abr. 2019

Aceito em: 31 jan. 2020

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero  <https://orcid.org/0000-0001-5747-6200>


Doutor em Engenharia Mecânica – Universidade de São Paulo. Professor Substituto no Instituto Politécnico do Rio de Janeiro, IPRJ- Rio de Janeiro/RJ-Brasil. E-mail: leandroratamero@gmail.com

Antônio José da Silva Neto  <https://orcid.org/0000-0002-9616-6093>


Ph.D. pela North Carolina State University, EUA. Professor Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - Rio de Janeiro/RJ-Brasil. E-mail: ajs_netto@uol.com.br

Vicente de Paulo Santos de Oliveira  <https://orcid.org/0000-0002-5981-0345>

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa (UFV). Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) – Campos dos Goytacazes/RJ – Brasil. E-mail: vsantos@iff.edu.br

David de Andrade Costa  <https://orcid.org/0000-0003-1814-5892>

Mestre em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Professor do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) – São João da Barra/RJ – Brasil. E-mail: david.costa@iff.edu.br

Angélica de Souza Ferreira  <https://orcid.org/0000-0002-8514-1122>

Mestre em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) – Campus Macaé/RJ – Brasil. E-mail: angelfers@yahoo.com.br

Reduções de vazões médias de rios têm provocado a crescente salinização de rios e lençóis freáticos na região de São João da Barra, RJ. Este trabalho apresenta um levantamento bibliográfico e de patentes sobre as tecnologias de dessalinização de águas salobras e salinas, com osmose reversa, visando ao estabelecimento dos parâmetros de projeto para um dessalinizador. Com base neste levantamento, pôde-se concluir que as configurações dessas plantas são muito variadas e constituem arranjos específicos para aplicações específicas. Tais tecnologias são descritas.

Palavras-chave: Salinização. Osmose reversa. Dessalinização. Tratamento de água. Filtração.

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

.....
Water desalination technologies by reverse osmosis: bibliographic and patent research

Reductions in average river flows have led to increasing salinization of rivers and groundwater in the region of São João da Barra (Brazil). This paper presents a bibliographic and patent survey on brackish and saltwater desalination technologies, with reverse osmosis, aiming to establish design parameters for a desalination plant. Based on this survey, it can be concluded that the configurations of these plants are very varied and constitute specific arrangements for specific applications. Such technologies are described.

Keywords: Salinization. Reverse osmosis. Desalination. Water treatment. Filtration.

Tecnologías de desalinización de agua por ósmosis inversa: investigación bibliográfica y de patentes

Las reducciones en los promedios de los caudales de los ríos han llevado a una mayor salinización de los ríos y las aguas subterráneas en la región de São João da Barra (Brasil). Este artículo presenta una investigación bibliográfica y de patentes sobre tecnologías de desalinización de agua salobre y salada, con ósmosis inversa, con el objetivo de establecer parámetros de diseño para una planta de desalinización. Con base en esta investigación, se puede concluir que las configuraciones de estas plantas son muy variadas y constituyen disposiciones específicas para aplicaciones específicas. Se describen dichas tecnologías.

Palabras clave: Salinización. Ósmosis inversa. Desalinización. Tratamiento de agua. Filtración.





Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

1 Introdução

O teor de salinidade da água define se esta é doce, salobra, ou salina, sendo o limite máximo de 0,5‰ (partes por mil, em razão de massa) o aceitável para a definição de “água doce”. Entre 0,5‰ e 30‰, a água é considerada “salobra”. Com mais de 30 ‰, a água é considerada “salina” (BRASIL, 2015; CAETANO, 2017).

O planeta Terra possui 2/3 de sua superfície cobertos por oceanos de água salina. Dessa forma, cerca de 97,24% da água, no planeta, é salina, ao passo que cerca de 2,75% é doce. Entretanto, a distribuição superficial de água doce no planeta, sobre as terras, é extremamente desigual (MAYS, 2010; SUASSUNA, 1999).

O uso inadequado da água, somado ao rápido crescimento da população, tem contribuído para a sua crescente escassez. Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos, dois terços da população mundial, atualmente, convivem com a escassez de água. Além disso, as reservas hídricas do mundo podem encolher 40% até 2030, ano em que a população pode chegar a 8,5 bilhões de pessoas. De acordo com o Relatório da Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura, há água o suficiente no mundo para suprir a demanda do crescimento populacional, desde que haja uma mudança dramática no seu uso, gerenciamento e compartilhamento. Um exemplo disso é o Estado de Israel, onde, anualmente, o consumo populacional de água é quase o dobro da quantidade de chuva na região, e, ainda assim, toda a população recebe água nas 24 horas do dia, devido às técnicas de dessalinização amplamente utilizadas na região, responsável por 70% da água doméstica consumida no Estado (CANTÍDIO *et al.*, 2018).

No Brasil, problemas com o suprimento de água doce estão relacionados com as reduções de vazões médias de rios, e conseqüente salinização destes e de lençóis freáticos, na região de São João da Barra - RJ (CAETANO, 2017), e também estão relacionados com as altas temperaturas e baixos índices pluviométricos no semiárido nordestino, como em Macau - RN (CANTÍDIO *et al.*, 2018).

Dentre as técnicas de dessalinização de água salina ou salobra, o emprego da Osmose Reversa (OR) tem sido a melhor opção em termos de eficiência e custos. Com águas salobras, o uso da OR é acentuadamente favorável. Entretanto, uma considerável parcela de custos de operação de uma planta de dessalinização por OR é atribuída aos gastos energéticos dos sistemas. Estima-se que o processo de OR requeira 6kWh de energia elétrica por metro cúbico de água doce produzida, variando esse valor em função dos teores salinos (CHEN; YIP, 2018; DAVENPORT *et al.*, 2018; BADRUZZAMAN *et al.*, 2019).

Em geral, uma redução nos custos da água produzida pode ser fomentada pelo uso de plantas de produção em larga escala, com elevada capacidade de produção, e também pelo emprego de tecnologias avançadas, através do uso de melhores materiais, por técnicas de diminuição do consumo de energia, assim como pela engenharia para a simplicidade e flexibilidade das plantas (QUEIROZ, 2017; BADRUZZAMAN *et al.*, 2019).

O objetivo deste trabalho é apresentar um panorama sobre algumas tecnologias empregadas atualmente em sistemas de recuperação hídrica por OR, assim como apontamentos de tecnologias em desenvolvimento.



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

2 Material e Método

Este trabalho foi desenvolvido com base, fundamentalmente, em pesquisa bibliográfica, utilizando-se estratégia de busca a partir de palavras-chave, em português e inglês. O foco foi maior em “plantas de OR” e menor em “membranas de OR”. As tecnologias de membranas de OR são relevantes por afetarem significativamente as tecnologias de plantas.

Periódicos foram consultados, de diversas fontes, tais como Portal de Periódicos CAPES/MEC, sistema de busca da Revista Águas Subterrâneas (RAS), “google acadêmico”, entre outras.

A base de dados *on-line* do Escritório do Instituto Nacional de Propriedade Intelectual, INPI, foi amplamente utilizada, por ser uma rica fonte de pesquisa para o mapeamento tecnológico. As informações contidas nos documentos de patentes auxiliam na identificação de soluções tecnológicas capazes de contribuir para a solução da escassez hídrica, sendo elas inovações radicais e/ou incrementais, assim como pesquisa realizada por Galdino *et al.* (2018).

Manuais e instruções de fabricantes de plantas de OR também foram considerados.

Após ampla pesquisa bibliográfica, foram selecionados os artigos, patentes e demais documentos mais relevantes no contexto de tecnologias consagradas e/ou inovadoras de dessalinização de águas salinas e salobras. Tendências tecnológicas, ainda sob pesquisa científica, também foram identificadas e estão aqui apresentadas.

3 Resultados

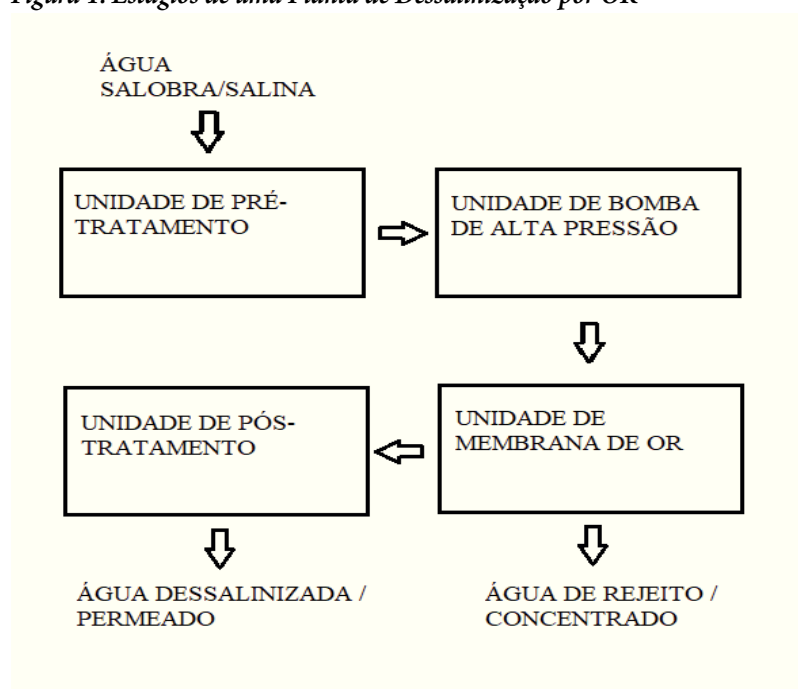
Os conteúdos apresentados neste tópico são estritos às tecnologias de sistemas de recuperação hídrica por osmose reversa, com finalidade de dessalinização de águas salinas e salobras. São exibidos alguns procedimentos e cuidados na fase de filtração prévia à OR, assim como tecnologias para a minimização de danos.

Uma planta de OR é, basicamente, constituída por quatro estágios: uma unidade de pré-tratamento, uma unidade de bomba de alta pressão, uma unidade de membrana de OR e uma unidade de pós-tratamento (Figura 1).

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

Figura 1. Estágios de uma Planta de Dessalinização por OR



Fonte: Os autores (2019)

A Unidade de Pré-Tratamento, geralmente, consiste em um tanque que armazena água salina ou salobra coletada, no qual pode-se adicionar aditivos químicos para correção de pH e outros parâmetros. Nessa unidade também se encontra, em geral, uma bomba de baixa pressão, que introduz a água do tanque num sistema de filtros, que podem ser de microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração, por exemplo, podendo essa pressão chegar a 25atm (GAMBIER; BADREDDIN, 2009). Os processos de filtração visam eliminar, ou reter, materiais em suspensão, bactérias, coloides, macromoléculas etc. (GAMBIER; BADREDDIN, 2009; GERVASONI; KRIGUEL; SOUZA, 2017).

A Unidade de Bomba de Alta Pressão recebe a água tratada da Unidade de Pré-Tratamento, e sua pressão é elevada a níveis suficientes para vencer a pressão osmótica da membrana de OR, podendo essa pressão atingir 80atm (GAMBIER; BADREDDIN, 2009; GERVASONI; KRIGUEL; SOUZA, 2017).

A Unidade de Membrana de OR tem a função de gerar dois fluxos de água, na saída, a partir do fluxo único de entrada, proveniente da Unidade de Bomba de Alta Pressão. Dessa forma, é gerado um fluxo de “permeado”, que seria a água dessalinizada, ou doce, e também é gerado um fluxo de “concentrado”, que seria água com alta salinidade (em relação à água de alimentação do sistema), a ser tratada ou descartada (GAMBIER; BADREDDIN, 2009; GERVASONI; KRIGUEL; SOUZA, 2017).

A Unidade de Pós-Tratamento, geralmente, consiste num tanque de armazenamento para a água permeada, no qual podem ser realizados procedimentos de correção química de pH e de adição de flúor, hipoclorito de sódio etc. Essa unidade armazena água pronta para o consumo, em níveis de água doce.



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

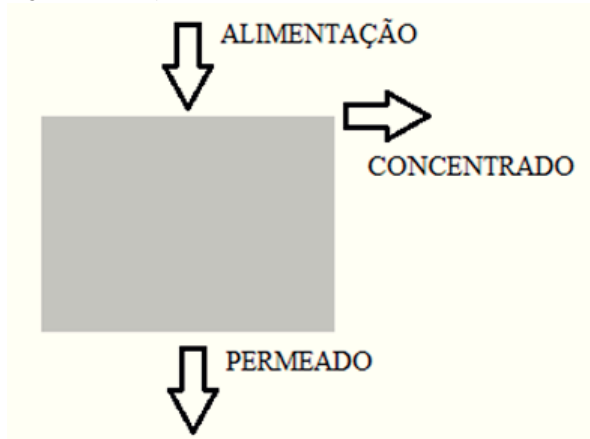
Leandro Amorim Ratamero et al.

A unidade pré-tratamento visa, em geral, adequar a água salina/salobra a níveis adequados de parâmetros como condutividade, sólidos dissolvidos, turbidez e outros, a níveis aceitáveis para o adequado funcionamento da membrana de OR (GERVASONI; KRIGUEL; SOUZA, 2017).

As membranas de OR podem ser, fundamentalmente, de três tipos: simétricas, assimétricas e compostas.

Membranas simétricas são constituídas por um bloco único de material poroso. Numa configuração cilíndrica, elas podem apresentar-se como aspecto exibido na Figura 2. O fluxo de permeado pode dar-se de forma radial, de dentro para fora.

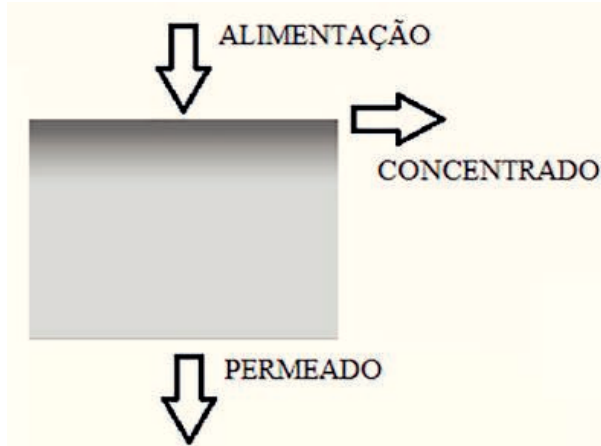
Figura 2. Composição de uma membrana de OR Simétrica



Fonte: Os autores (2019)

Membranas assimétricas diferem das membranas simétricas por possuírem um gradiente de porosidade, que vai de baixa porosidade na região de alimentação e evolui para uma alta porosidade na região de concentrado, conforme exibe a Figura 3.

Figura 3. Composição de uma membrana de OR Assimétrica



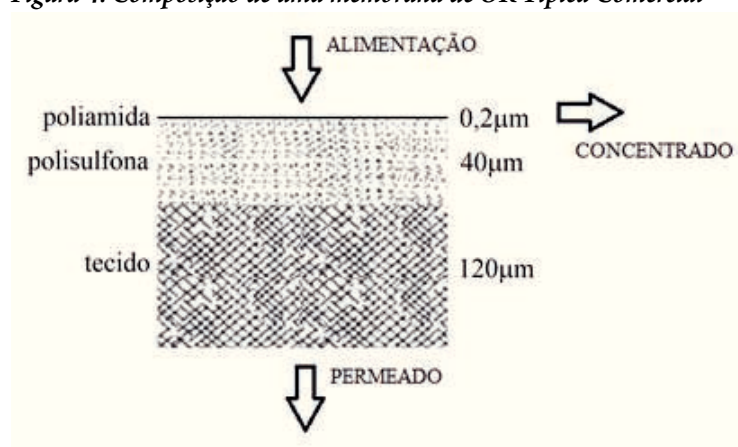
Fonte: Os autores (2019)

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

As membranas mais empregadas nas plantas de dessalinização atuais são do tipo compostas, que são constituídas pela união de três camadas: uma camada de tecido de reforço com cerca de 120µm de espessura, uma camada de polisulfona microporosa de 40µm de espessura e uma camada de poliamida de cerca de 0,2µm de espessura. A Figura 4 exibe a disposição dessas camadas (MOURA *et al.*, 2008a).

Figura 4. Composição de uma membrana de OR Típica Comercial



Fonte: Os autores (2019)

A membrana de OR opera, na prática, dobrada, enrolada e acondicionada entre um tubo cilíndrico, interno, com perfurações, e um tubo cilíndrico externo, sem perfurações. Este é o arranjo mais comumente encontrado em unidades de OR comerciais. A água de alimentação entra por uma extremidade, entre esses cilindros, a água permeada sai pela outra extremidade, pelo cilindro interno, e a água concentrada sai por essa mesma extremidade, entre os cilindros interno e externo (MOURA *et al.*, 2008a).

A unidade de bomba de alta pressão precisa operar, no mínimo, com pressões iguais às pressões osmóticas da água a ser tratada, que depende, por sua vez, da concentração da água salina ou salobra de alimentação do sistema, segundo a Lei de Van't Hoff (VIANA; FRAIDENRAICH; VILELAM, 2018).

Entretanto, as membranas de OR necessitam de um pré-tratamento da água a ser dessalinizada. Voutchkov (2013) ressalta a importância desse pré-tratamento para OR, utilizando microfiltração, por exemplo, lembrando que as membranas de OR podem rejeitar sólidos maiores que 1Å. A etapa de microfiltração é capaz de reter partículas suspensas, bactérias, cistos, emulsões de óleos, macromoléculas dissolvidas, coloides, vírus e proteínas. As membranas de OR, por sua vez, somente retêm íons dissolvidos, moléculas orgânicas pequenas, metais, dureza e sais.

Moura *et al.* (2008b) apontam que:

o pré-tratamento é uma das etapas mais importantes para o sucesso do processo de dessalinização. O pré-tratamento convencional utilizado consiste de uma filtração simples, utilizando filtros de acetato, membranas de microfiltração e adição de ácidos e outros componentes que controlem a precipitação de sais parcialmente insolúveis, como

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

carbonato de cálcio, sulfato de cálcio, sílica e sulfato de bário e adição de reagentes que reduzem o crescimento microbiano. Além disso, o pH e o teor de agentes redutores devem ser controlados antes da água de alimentação ser introduzida no módulo de permeação.

Do ponto de vista químico, também são necessários cuidados com as águas de alimentação das membranas de OR. A Tabela 1 exibe parâmetros exigidos pelo fabricante *Pentair Aquaflux*, modelo LP21-4040 (GERVASONI; KRIGUEL; SOUZA, 2017).

Tabela 1. Parâmetros Exigidos para Membrana OR Pentair

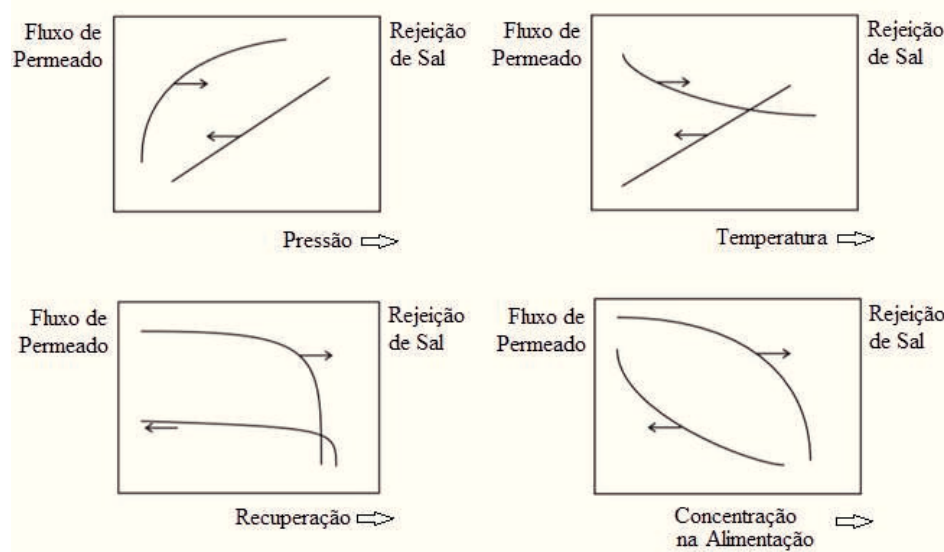
Capacidade de Produção (m ³ /h)	1,5
Pré-tratamento Cloreto de Polialumínio	12%
Condutividade para OR (µS/cm)	<2000
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/l)	<1600
Turbidez (NTU)	<0,5

Fonte: Os autores (2019)

Entretanto, o fluxo de permeado que advém de uma planta de OR depende de fatores tais como pressão aplicada, temperatura de água, recuperação e concentração de sal na água de alimentação.

A empresa Dow disponibiliza informações a respeito do comportamento das membranas de OR em função desses parâmetros. A Figura 5 exibe tais relações, de forma qualitativa (DOW, 2019).

Figura 5. Comportamentos de Membranas OR em Função de Parâmetros de Pressão, Temperatura, Recuperação e Concentração de Sal na Entrada



Fonte: Dow (2019)

Em relação às plantas de OR, há uma grande variedade de sistemas, adaptados às mais diversas condições de uso e aplicação.

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

Para águas de fontes com altas taxas de material particulado e impurezas, a empresa KAWASAKI recomenda a implementação de um *settler module*, que consiste numa unidade de pré-tratamento de água, antes mesmo dos processos de filtração. Nesse módulo, adiciona-se coagulante e separam-se os sedimentos da água purificada. A empresa afirma que, com esse sistema, pode-se reduzir em 1/3 a 1/2 a sedimentação de impurezas da água, reduzindo a necessidade de limpeza de filtros (KAWASAKI, 2019).

Petraglia (2018) depositou uma patente de Modelo de Utilidade (MU) na qual descreve um inovador conjunto dessalinizador composto de caminhão, baú, gerador e dessalinizador, de forma que possa ser levado aos locais mais longínquos e abastecido apenas com água salobra. O invento é composto, basicamente, de um caminhão com um baú, dotado em seu interior de um gerador e de um dessalinizador por osmose reversa.

Campos *et al.* (2013) depositaram patente que se refere a um dessalinizador movido a energia solar. O dessalinizador é suprido e alimentado por meio de energia solar e utiliza a técnica de osmose reversa para dessalinizar a água do mar ou água salobra, imprópria para consumo e proveniente de rios, lagoas, represas etc. A invenção compreende um dessalinizador, preferencialmente utilizado em aplicações náuticas, alimentado por uma bateria, que armazena a energia do sistema e que é alimentada, por sua vez, por placas de energia solar, responsáveis pela captação da luz solar e sua conversão em energia elétrica.

Efrati (2007) depositou uma patente de um aparelho para a dessalinização sequencial consecutiva. Trata-se de um aparelho para a dessalinização sequencial consecutiva de circuito fechado contínua de uma solução de água salgada, através da osmose reversa. Compreende um ou mais módulos de dessalinização, que têm as suas respectivas entradas e saídas conectadas em paralelo por linhas condutoras, um dispositivo de pressurização para criar uma contrapressão, para permitir a dessalinização de osmose reversa e a substituição do material permeado liberado fresco por um sistema de circulação para reciclar a solução dessalinizada.

Volker (2013) depositou uma patente que apresenta um dispositivo de osmose reversa, em que, numa membrana de OR, uma concentração alta de Ca e Mg pode atingir limites críticos e formar depósitos, inutilizando-a. Trocadores dispendiosos de íons, sais de Ca e Mg por Na, são substituídos por um outro sistema, objeto dessa invenção. A água que não permeia pela membrana de OR, enriquecida com químicos e bactérias, forma biofilme, cujos rejeitos contaminam a água potável produzida. Uma desinfecção térmica ou química deve ser periodicamente realizada. A invenção permite não trocar os cátions na solução pré-membrana, reduzindo ou eliminando a necessidade de desinfecção térmica ou química.

Bird (2000) depositou uma patente que apresenta um *water desalination system*, que consiste num parafuso de Arquimedes, que capta água do mar e a eleva até um ponto de grande altura. A água é então filtrada, utilizando-se a pressão oriunda da elevação, para permeá-la pelos filtros. Em sequência, a água é dessalinizada. As fontes propostas de energia para essa planta são totalmente renováveis, tais como: placas solares fotovoltaicas, energia eólica e energia mecânica do fluxo de água filtrada e dessalinizada, na saída da planta, capturada através de uma turbina.

Elyanow *et al.* depositaram uma patente que apresenta uma planta de dessalinização associada a um sistema para a produção de água pura e sal. A invenção descreve uma instalação



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

.....
de dessalinização que opera com uma alimentação de água salina, produzindo uma corrente de rejeição de sal concentrado e uma corrente de permeado de água pura, a partir de uma primeira seção de tratamento, utilizando-se membranas de OR.

Wobben (2005) depositou uma patente que descreve um processo e um dispositivo para a dessalinização contínua de água por OR. Um fluxo contínuo, introduzido no módulo de membrana, é mantido sobre a superfície da membrana por meio de água descarregada de um reservatório. Invenção: a interrupção na operação em plantas de OR ordinárias, em virtude de contaminação e incrustação da superfície de membrana ou dano da membrana, pode ser evitada por meio do fluxo sobre a membrana, continuamente mantido por meios adequados.

Mazzoni Campos (2018) depositou uma patente que descreve um equipamento individual para OR. O equipamento é de pequeno porte e permite transformar a água não potável em água própria para o consumo humano. Ele compreende um recipiente cilíndrico, uma bomba de pressão manual, uma tampa superior rosqueada, um tubo de entrada de água a ser tratada e um filtro formado por pedra porosa em seu interior, envolvido por uma película membrana poliamídica tipo TFC, em que é promovida a osmose reversa.

Affeld *et al.* (2003) depositaram uma patente que descreve um *downhole desalination of aquifer water*. O equipamento proposto consiste numa planta compacta de dessalinização de água, apropriada para ser introduzida dentro de um poço ou cavidade subterrânea. O dispositivo compreende um conjunto de membranas de dessalinização e/ou purificação de água, com uma bomba elétrica submersa, montada dentro de um tubo, de onde um tubo de *bypass* se estende. Um dispositivo de monitoração de fluxo e/ou composição de fundo de poço é conectado por um cabo elétrico ou de fibra ótica ao equipamento de monitoramento de produção, na superfície terrestre. O fluxo da água do aquífero salino, a partir de uma camada de aquífero, será levado para dentro da tubulação através de uma porta lateral deslizante. A água rejeitada com solução salina é eliminada diretamente de volta ao aquífero.

Graham (2000) depositou uma patente que apresenta um dispositivo compacto de dessalinização por OR, que pode ser acionado manualmente ou eletricamente. A instalação de dessalinização inclui uma bomba para bombear água, a uma pressão entre 50 e 65 Bar, para um elemento de filtro, geralmente cilíndrico, que inclui uma pluralidade de membranas de osmose inversa, que restringem passagens de sal. Imediatamente a montante do elemento de filtro, existe um disco com uma pluralidade de orifícios, cuja função é permitir a saída do permeado.

Vieira (2018) propôs um sistema de energia renovável para dessalinização de água, capaz de utilizar fontes múltiplas de energia, com gerenciamento inteligente, para produções de 50m³/dia, ao máximo, por OR.

Moura *et al.* (2008) desenvolveram um sistema combinado OR x energia fotovoltaica, coletando dados a respeito da funcionalidade da instalação, visando otimizar e dimensionar corretamente os componentes.

Gambier *et al.* (2019) apresentaram um sistema para o ajuste da condutividade da água, sem o uso de aditivos químicos. Ele propôs um *bypass* da membrana de OR, que permite que uma pequena fração do fluxo de concentrado, antes da membrana de OR, seja introduzido no permeado.

Caetano (2017) desenvolveu uma planta compacta de dessalinização de águas salobras, com salinidades de até 3,0‰. A planta, simplificada, consiste num reservatório elevado, onde se deposita



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

.....
a água a ser tratada. A água desce, por gravidade, por um filtro de múltiplas camadas, que finaliza numa membrana filtrante de 15µm. A água filtrada é depositada em um segundo reservatório, de onde é bombeada, até uma pressão de cerca de 4,5bar, alimentando uma unidade de OR. Dois reservatórios captam, separadamente, o concentrado e o permeado.

A engenharia das plantas de OR depende, fundamentalmente, da engenharia das membranas de OR.

Os métodos atuais, utilizados no processo de dessalinização, forçam a água salina ou salobra a passar através de um filtro usando uma quantidade de energia quatro vezes maior do que a necessária. A literatura mostra que, utilizando-se nanotubos de carbono, ou de nitreto de boro, e a mesma pressão operacional dos métodos atuais de dessalinização, pode-se atingir 100% de eliminação do sal para concentrações duas vezes maiores do que a da água salina, fluindo quatro vezes mais rápido, o que significa um processo de dessalinização muito rápido e muito mais eficiente (SILVA, 2017).

As membranas poliméricas atuais, correntemente usadas nas plantas de OR, são suscetíveis à degradação, promovendo declínio de fluxos sob alta pressão. Além disso, elas possuem baixa resistência às altas temperaturas, à acidez/alcalinidade, ao cloro e aos solventes orgânicos. O grafeno nanoescala possui propriedades químicas e físicas ideais ao processo de dessalinização. Apesar de sua extrema fineza, membranas de grafeno exibem adequada resistência mecânica e capacidade de funcionar sob altas pressões, características superiores às das membranas poliméricas (MAHMOUD *et al.*, 2014).

As folhas de grafeno podem ser imobilizadas em nanoescala, em diversos materiais, e gerar nanocompósitos muito mais eficientes, como os grafeno/hidrotalcita, capazes de dessalinizar água salina em uma única etapa (FISCHER *et al.*, 2018).

As dopagens de grafeno ofereceram uma nova classe de membranas de separação mecanicamente robustas, ultrafinas, de alto fluxo, de alta seletividade e de baixa incrustação, que oferecem oportunidades para avançar as tecnologias de dessalinização da água. A síntese fácil das membranas nanométricas de grafeno e óxido de grafeno abre a porta para membranas de próxima geração, ideais como alternativa econômica e sustentável às membranas de poliamida, compostas de película fina de longo prazo, para aplicações de purificação de água (GONÇALVES JÚNIOR; GONÇALVES, 2018).

De uma forma mais abrangente, em termos de tecnologias potenciais para a solução da crise hídrica no Brasil, Galdino *et al.* (2018) pesquisaram patentes relacionadas ao assunto. Eles afirmam:

O maior número de patentes está depositado na classificação IPC - C02F, com 82 patentes, que corresponde ao tratamento de água, de água residuais, de esgotos ou de lamas e lodos. Destaca-se também B01D, com 14 registros encontrados, referente a processo de filtração, E03C, com 09, que trata de encanamentos domésticos para água potável ou água servida.

Peig e Ramos (2010) caracterizaram as correntes de concentrado usualmente geradas em processos de separação por membranas, apresentando alternativas de uso direto, tratamento e disposição, de acordo com os requisitos da legislação ambiental vigentes. As possibilidades de aproveitamento foram levantadas em casos disponíveis na literatura técnica e publicações no Brasil

Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

.....

e no exterior. Para sistemas de dessalinização de água do mar, eles apontam o descarte direto como nocivo à vida marinha, devido às concentrações tóxicas, sendo alternativas: aplicação de sistemas de difusores, injeção em poços submarinos e disposição submarina por tubulação. Para sistemas de dessalinização de águas salobras eles apontam que há restrições legais para o descarte em superfície, havendo como alternativas: injeção do rejeito em poços profundos, disposição direta na superfície do solo, que ocorre na forma de percolação em lagoas, irrigação e lixiviação em campos de pastagem, evaporação solar para cristalização dos sólidos dissolvidos, descarte em redes de esgotos, utilização do rejeito líquido para criação de Tilápia koina (*Oreochromis sp.*), criação de camarão, cultivo de erva-sal (*Atriplex Mummularia*), cultivo de mudas cítricas e porta-enxertos e o retorno do concentrado ao poço de abastecimento.

4 Considerações finais

Com a crescente demanda por água doce e com a evidente vantagem do uso dos sistemas de OR, em termos de eficiência e praticidade, muitas tecnologias vêm sendo desenvolvidas para esses sistemas.

As configurações de plantas de OR são as mais variadas, e constituem arranjos específicos para aplicações específicas. Como exemplo, planta “em caminhão”, para tratamento itinerante, planta que capta água do mar por parafuso de Arquimedes e realiza filtragem prévia por gravidade, planta de OR associada a planta de geração de sal, planta compacta para uso residencial, planta montada em interior de poços e plantas compactas de acionamento manual.

Existem tecnologias desenvolvidas para a manutenção e prevenção de danos às plantas e unidades de OR e para o aumento da segurança do sistema.

Em plantas que operam com águas com altas taxas de material particulado e impurezas, recomenda-se um pré-tratamento em *settler module*, no qual se adiciona coagulante para a separação e colhimento das impurezas.

A dessalinização contínua visa reduzir as paradas necessárias às unidades de OR para lavagem de membranas.

A substituição de íons Ca e Mg, por Na, é utilizada para a prevenção de formação de depósitos nas membranas de OR.

O *bypass* de água filtrada, para o reservatório de água permeada, pode ser utilizado para correção de pH, sem adição de químicos.

Quanto ao descarte de águas concentradas, ou rejeitadas, há estudos que indicam as limitações legais e alternativas para a minimização dos impactos ambientais.

Ademais, o uso de fontes de energia alternativa é importante. Fontes de energia tais como solar fotovoltaica, eólica e manual já são apontadas como soluções. O gerenciamento inteligente da energia proveniente dessas fontes, associadas ao uso da energia elétrica convencional, também é objeto de estudo e aplicação.

A simplificação das plantas de OR é a chave para a sua maior eficiência. Essa simplificação só é possível por meio do preciso conhecimento sobre os parâmetros físico-químicos das águas a serem tratadas e do pleno conhecimento das características das unidades que irão compor a planta de OR.



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

Novas tecnologias de membranas, tais como as baseadas em nanotubos de carbono e de grafeno, prometem revolucionar o setor, simplificando os sistemas de plantas de OR. Essas membranas oferecerão pressões de trabalho menores e uma taxa de rejeição de sal maior do que as oferecidas pelas atuais membranas TFC.

Referências

AFFELD, C. *et al.* Downhole Desalination of Aquifer Water. US n. 2003/0230535A1, 2 jun. 2003, 18 dez. 2003.

BIRD, M. *Water Desalination System.* Bird. US n. 006083382A, 14 jan.1998, 4 jul. 2000.

CAETANO, E. *Desenvolvimento de um protótipo de baixo custo para dessalinização de água salobra por osmose reversa.* 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Instituto Federal Fluminense, Campos dos Goytacazes, RJ, 2017.

CAMPOS, A. *et al.* Dessalinizador Movido a Energia Solar. BR n.1O2013001233-5 A2, 17 jan. 2013, 22 out. 2013.

CANTÍDIO, M. C. M. *et al.* Estudo da viabilidade de implantação da dessalinização de água em município do semiárido nordestino. *In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA*, 28., 2018, Buenos Aires. Buenos Aires: INA, 2018. p. 1-2.

CHEN, X.; YIP, N. Y. Supporting Information: Unlocking High-Salinity Desalination with Cascading Osmotically Mediated Reverse Osmosis: Energy and Operating Pressure Analysis. *Environmental Science and Technology*, California, v.4, n. 52, p. 2242–2250, 2018.

CONAMA. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

DAVENPORT, D. M. *et al.* High-Pressure Reverse Osmosis for Energy-Efficient Hypersaline Brine Desalination: Current Status, Design Considerations, and Research Needs. *Environmental Science and Technology Letters*, California, v. 5, n. 8, p. 467-475, 2018.

DOW. *Basics of RO and NF: Principle of Reverse Osmosis and Nanofiltration.* Form n. 609-02003-1004. 2019. Disponível em: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_003b/0901b8038003b454.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-02003.pdf%26fromPage=GetDoc. Acesso em: 15 jan. 2019.

EFRATI, A. *Aparelho para a Dessalinização Sequencial Consecutiva de Circuito Fechado Contínua de uma Solução de Água Salgada pela Osmose Reversa e Método para a Dessalinização Sequencial Consecutiva de Circuito Fechado Contínua de uma Solução de Água Salgada pela Osmose Reversa Utilizando um ou Mais Módulos de Dessalinização.* BR n.Pl 0511405-5 A, 23 jun. 2005, 4 dez. 2007.

ELYANOW, I. *et al.* Water Desalination Plant and System for the Production of Pure water and Salt. US n. 2010/0163471 A1, 30 dez. 2008, 1 jul. 2010.



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

.....
FISCHER, E. K. *et al.* Estudo morfológico e estrutural do nanocompósito grafeno/hidrotalcita. *In: SIMPÓSIO CIENTÍFICO SOBRE RECURSOS NATURAIS*, 2., 2018, Dourados, MS. Mato Grosso do Sul: UEGS, 2018. p. 1-1.

GALDINO, S. M. *et al.* Estudo prospectivo de tecnologias potenciais para a solução da crise hídrica no Brasil. *Cadernos de Prospecção*, Salvador, v. 11, Edição Especial, p.198-210, 2018.

GAMBIER, A.; BADREDDIN, E. Control of small reverse osmosis desalination plants with feed water bypass. *In: 2009 IEEE CONTROL APPLICATIONS (CCA); INTELLIGENT CONTROL (ISIC)*, 2009, St. Petersburg, Russia. DOI: 10.1109/CCA.2009.5281041. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5281041/authors#authors>. Acesso em: 15 jan. 2019.

GERVASONI, R.; KRIGUEL, K.; SOUZA, M. E. Performance de um sistema piloto de ultrafiltração para pré-tratamento de osmose reversa para água salobra, Litoral do Paraná. *In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL*, 27., 2017, São Paulo. Rio de Janeiro: ABES, 2017. p. 1-6.

GONÇAVES JÚNIOR, E. R.; GONÇALVES, V. S. Grafeno e suas aplicações no desenvolvimento de inovações tecnológicas: uma análise bibliométrica. *Perspectivas da Ciência e Tecnologia*, Rio de Janeiro, v.10, p. 81-97, 2018.

GRAHAM, W. *Water Desalination*. US n. OO6139750A, 13 dez. 1996, 31 out. 2000.

KAWASAKI. *Water Purification System: Membrane Filtration, reverse Osmosis Seawater Desalination System*. Disponível em: http://global.kawasaki.com/en/industrial_equipment/environment_recycling/water/clean.html. Acesso em: 15 jan. 2019.

MAHMOUD, K. A. *et al.* Functional graphene nanosheets: The next generation membranes for water desalination. *Desalination*, v. 356, p. 209-217, 2014.

MAYS, L. W. *Water Resources Engineering*. 2. ed. Nova Jersey: Wiley, 2010. 928 p.

MAZZONI CAMPOS, D. *Equipamento Individual para Osmose Reversa*. BR n. 202014014017-0 U2, 5 jun. 2014, 27 fev. 2018.

MOURA, J. P. *et al.* Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semi-árido nordestino. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15., 2008, Natal, RN. São Paulo: ABAS, 2008a. p. 1-25.

MOURA, J. P. *et al.* Estudo de caso do pré-tratamento físico-químico utilizando membrana de microfiltração e ácido clorídrico em sistemas de dessalinização via osmose reversa. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15., 2008, Natal, RN. São Paulo: ABAS, 2008b. p. 1-4.

MOURA, J. P.; FRANÇA, K. B.; SILVA, J. N. Estudo de dessalinizadores por osmose reversa acionados por painéis fotovoltaicos como forma de contribuição para o semi-árido nordestino. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS*, 15., 2008, Natal, RN. São Paulo: ABAS, 2008c. p. 1-10.



Tecnologias de dessalinização de águas por osmose reversa: pesquisa bibliográfica e de patentes

Leandro Amorim Ratamero et al.

PEIG, D. B.; RAMOS, M. P. Aproveitamento e destino do concentrado de processos de separação por membranas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16., 2008, São Luis, MA. São Paulo: ABAS, 2010. p. 1-11.

PETRAGLIA, H. *Conjunto Dessalinizador Móvel*. BR n. 202018002446-4 U2, 5 fev. 2018, 21 ago. 2018.

QUEIROZ, F. R. M. *Sistemas de membranas de microfiltração/nanofiltração e ultrafiltração/osmose inversa: uma alternativa para a redução do nitrato em águas doces e salobras*. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2017.

SILVA, P. F. B. S. *Confecção e caracterização de membrana para dessalinização de água a partir de rede de nanotubos de carbono*. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 2017.

SUASSUNA, J. *Contribuição ao estudo hidrológico do semiárido nordestino*. Recife: FUNDAJ, 1999.

VIANA, M. S.; FRAIDENRAICH, N.; VILELA, O. C. Modelagem analítica para sistemas de dessalinização por osmose reversa acionados por energia solar fotovoltaica: análise de sensibilidade. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 7., 2018, Gramado. Porto Alegre: UFRGS, 2018. p. 133-142.

VIEIRA, R. R. *Sistema de energia renovável para dessalinização de água*. 2018. Dissertação (Mestrado em Controle e Automação) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

VOLKER, M. *Dispositivo de Osmose Reversa*. BR n. PI1104058-0 A2, 22 ago. 2011, 22 jan. 2013.

VOUTCHKOV, N. *Desalination engineering planning and design*. New York: McGraw-Hill, 2013.

WOBEN, A. *Processo e Dispositivo para a Dessalinização Contínua de Água por Meio de osmose Reversa*. BR n. PI 0315852-7 A, 21 jul. 2003, 20 set. 2005.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Os autores também agradecem o apoio financeiro da FAPERJ, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro e do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.