

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
INSTITUTO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

CAROLINA NEVES RICALDONE BARBOSA

DESSALINIZAÇÃO POR MEMBRANAS
Tecnologias consagradas e emergentes

Belo Horizonte

2018

CAROLINA NEVES RICALDONE BARBOSA

DESSALINIZAÇÃO POR MEMBRANAS
Tecnologias consagradas e emergentes

Dissertação apresentada ao Instituto de Ciências Biológicas da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do título de especialista em Gerenciamento de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Francisco Antônio Rodrigues Barbosa

Co-orientador: Prof. Eduardo Coutinho de Paula

Belo Horizonte
Instituto de Ciências Biológicas - UFMG
2018

FOLHA DE APROVAÇÃO ?

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, agradeço aos meus pais Elizete e João Carlos e minha irmã Mariana que me deram apoio e incentivo nas horas difíceis.

Aos professores Francisco Antônio Rodrigues Barbosa e Eduardo Coutinho de Paula, responsáveis pela orientação deste trabalho, pela orientação, suporte e incentivo.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

RESUMO

A obtenção de água potável por meio da dessalinização da água salina ou salobra se faz cada dia mais necessária diante da escassez hídrica que muitos países estão passando. Este trabalho apresenta uma revisão de literatura nacional e internacional acerca das tecnologias de dessalinização por membranas. Foram pesquisadas tecnologias convencionais, sendo algumas delas amplamente aplicadas em grande escala (Osmose Direta, Osmose Indireta, Eletrodíálise e Destilação por Membranas) assim como tecnologias emergentes de membranas (Nanotubos de Carbono, Grafeno, Aquaporina e Nanocompósitos). Dessa forma, foram apresentados os avanços dessas tecnologia, assim como suas vantagens e desvantagens, sua utilização no Brasil e mundialmente, bem como os pilares do processo de dessalinização. Concluiu-se que apesar de algumas desvantagens da dessalinização, este processo é uma boa alternativa para superar a escassez hídrica mundial e que os avanços das tecnologias convencionais, como a Osmose Inversa, tem contribuído na eficiência dos processos e na expressiva redução custos. Quanto às tecnologias emergentes, são promissoras para um futuro próximo requerendo aprofundamento nas pesquisas.

Palavras-chave: Dessalinização; Processos de Dessalinização; Escassez Hídrica; Membranas; Tecnologias Emergentes em Dessalinização.

ABSTRACT

Obtaining potable water through the desalination of saline or brackish water is becoming more and more necessary in the face of the water shortage that many countries are experiencing. This paper presents a review of national and international literature on membrane desalination technologies. Conventional technologies were researched and some of them are widely applied in large scale (Direct Osmosis, Indirect Osmosis, Electrodialysis and Membrane Distillation) as well as emerging membrane technologies (Carbon Nanotubes, Graphene, Aquaporin and Nanocomposites). Thus, the advances of these technologies, as well as their advantages and disadvantages, their use in Brazil and worldwide, as well as the pillars of the desalination process were presented. It is concluded that despite the disadvantages of desalination, this process is a good alternative for the global water shortage and that the advances of conventional technologies, such as Reverse Osmosis, have contributed to process efficiency and cost reduction. As for emerging technologies, they are promising for the near future.

Key-words: Desalination; Desalination processes; Water shortage; Membranes; Emerging Technologies in Desalination.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 1: Disponibilidade de água doce no mundo | 13 |
| FIGURA 2: Escassez hídrica em 2010 e abaixo a mudança projetada da escassez hídrica até 2050 | 14 |
| FIGURA 3: Processo de Osmose Direta | 19 |
| FIGURA 4: Sistema de Osmose Direta para dessalinização | 20 |
| FIGURA 5: Diagrama simplificado de uma instalação de dessalinização por Osmose Inversa | 23 |
| FIGURA 6: Princípio da Eletrodialise | 25 |
| FIGURA 7: Processo de Dessalinização Usando Destilação por Membranas | 30 |
| FIGURA 8: Estrutura de um Nanotubo de Carbono | 31 |
| FIGURA 9: Processo de dessalinização através de membrana constituída de nanotubos de carbono | 32 |
| FIGURA 10: Representação do processo de Osmose Inversa por meio de pressões realísticas em nanoporos em grafeno | 34 |
| FIGURA 11: Passagem de moléculas de água através da aquaporina AQP1 | 36 |
| FIGURA 12: Dessalinização sustentável | 39 |
| FIGURA 13: Gráfico da divisão de custos da dessalinização | 44 |
| FIGURA 14: Proporção de tecnologias por membranas e térmicas do ano de 1980 - 2014 | 45 |
| FIGURA 15: Distribuição de diferentes tecnologias no grupo GCC | 47 |
| FIGURA 16: Região do Semiárido brasileiro | 49 |
| FIGURA 17: Sistema de dessalinização do Programa Água Doce | 50 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 1: O sabor da água de acordo com a concentração de sólidos totais dissolvidos | 15 |
| TABELA 2: Vantagens e desvantagens da OD | 21 |
| TABELA 3: Vantagens e desvantagens da OI | 24 |
| TABELA 4: Vantagens e desvantagens da ED | 27 |
| TABELA 5: Vantagens e desvantagens da DM | 29 |
| TABELA 6: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Nanotubos de Carbono | 33 |
| TABELA 7: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Grafeno | 35 |
| TABELA 8: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Aquaporina | 37 |
| TABELA 9: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Nanocompósitos | 39 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Å - ångström

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CTN - Nanotubos de Carbono

DM - Destilação por Membranas

ED - Eletrodialise

EDI - Eletrodialise Inversa

GO - Óxido de Grafeno

m - metros

OD - Osmose Direta

OI - Osmose Inversa

ONU - Organização das Nações Unidas

SEC - Specific Energy Consumption

STD - Sólidos Totais Dissolvidos

TFC - Thin Film Composite

TFN - Thin Film Nanotechnology

UN - Nações Unidas

SUMÁRIO

| | |
|-------------------------------------------------------------|----|
| 1. INTRODUÇÃO | 10 |
| 2. JUSTIFICATIVA | 11 |
| 3. OBJETIVOS | 12 |
| 3.1 Objetivos Gerais | 12 |
| 3.2 Objetivos Específicos | 12 |
| 4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 13 |
| 4.1 Escassez hídrica mundial | 13 |
| 4.2 Dessalinização da água | 14 |
| 4.2.1 Processos de dessalinização | 16 |
| 5. METODOLOGIA | 18 |
| 6. TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS DE DESSALINIZAÇÃO | 19 |
| 6.1 Osmose Direta | 19 |
| 6.2 Osmose Inversa | 22 |
| 6.3 Eletrodialise e Eletrodialise Reversível | 25 |
| 6.4 Destilação por Membranas | 28 |
| 7. TECNOLOGIAS EMERGENTES DE MEMBRANAS | 30 |
| 7.1 Membranas de Nanotubos de Carbono | 31 |
| 7.1 Membranas de Grafeno | 33 |
| 7.3 Membranas de Aquaporina | 35 |
| 7.4 Membranas de Nanocompósitos | 37 |
| 8. PILARES DAS TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO | 39 |
| 8.1 Impactos Ambientais | 40 |
| 8.2 Impactos Sociais | 42 |
| 8.3 Custo da Dessalinização | 43 |
| 9. DESSALINIZAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO | 44 |
| 10. CONCLUSÃO | 51 |
| REFERÊNCIAS | 54 |

1. INTRODUÇÃO

A maior parte do abastecimento de água das comunidades costeiras em todo o mundo vem tradicionalmente de fontes de água doce do interior ou perto da costa - aquíferos subterrâneos, rios e lagos. No entanto, a demanda mundial por água, em função do crescimento populacional, desenvolvimento econômico, mudanças nos padrões de consumo, entre outros, aumenta a cada dia. Diante disso, diversos países já estão passando por situações de escassez hídrica (UNESCO, 2018). 5,7 bilhões de pessoas podem viver em áreas afetadas pela escassez hídrica até o ano de 2050 (BUREK et al., 2016).

Dessa forma, o uso de águas salinas e salobras para conversão em água potável é racional e lógico. Além do abastecimento humano, a dessalinização pode ser utilizada para benefícios na agricultura e indústria. Mas é importante se levar em conta os problemas ambientais e impactos ecológicos que este processo pode acarretar além dos custos deste processo.

Até recentemente, a dessalinização da água do mar se limitava às regiões dominadas pelo clima desértico do mundo. Grandes melhorias na tecnologia de membranas e equipamentos de recuperação de energia nos últimos 30 anos permitiram uma redução em duas vezes da energia necessária para dessalinizar a água do mar. Tais avanços tornaram a dessalinização uma alternativa mais acessível e atraente para o abastecimento sustentável de água (VOUTCHKOV, 2016).

As tecnologias de dessalinização podem ser divididas em dois tipos: térmicas e por membranas. A dessalinização por membranas de osmose inversa tem se aprimorado ao longo dos últimos anos e ultrapassou os processos térmicos (GREENLEE et al., 2009). Além disso, novas tecnologias de dessalinização por membranas podem ser citadas como: Membranas de Grafeno, Membranas de Nanocompósitos, Membranas de Nanotubos de Carbono e Membranas de Aquaporina.

2. JUSTIFICATIVA

Diante da escassez hídrica que diversos países estão enfrentando, se faz necessário a procura e desenvolvimento de novas fontes de água potável. A dessalinização é um assunto está cada vez mais freqüente na mídia mundial e seu conhecimento é de extrema importância por ser tratar de uma possível solução para a crise hídrica. Este é um processo de produção de água adequada para consumo humano, indústria e agricultura. A obtenção de água potável a partir de água salobra também é importante em algumas regiões. O aprimoramento de novas tecnologias de dessalinização por membranas tem tornado o processo economicamente viável e mais eficiente. Desta forma, a dessalinização se tornou uma boa opção para combater a crise da água, pois a fonte de água para o processo é inesgotável além de que grande parte das cidades por todo o mundo encontram-se perto de oceanos e através da constante procura pelo desenvolvimento do processo, a dessalinização pode ser o futuro de muitos países.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivos Gerais

O estudo apresentado nesta monografia teve como principal objetivo comparar diferentes processos de dessalinização de águas salinas e salobras, mediante uso de membranas, a fim de se produzir água potável.

3.2 Objetivos Específicos

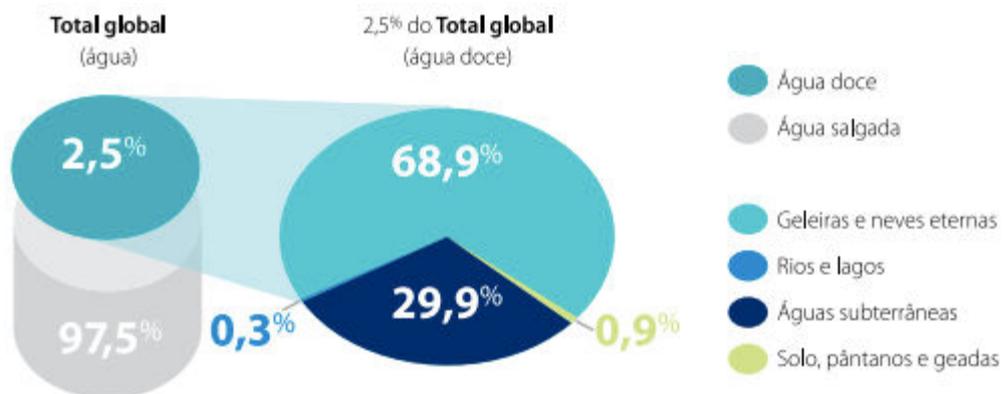
- Investigar as principais características dos processos de dessalinização por membranas, contemplando tecnologias convencionais e emergentes;
- Comparar as principais vantagens e desvantagens entre as diversas tecnologias;
- Apresentar as principais aplicações das tecnologias de dessalinização mundialmente.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Escassez hídrica mundial

A água é um elemento essencial para todos os seres vivos, sendo indispensável a manutenção da vida compondo cerca de 70% da crosta terrestre. Além de sua função na natureza, a água exerce fundamental papel na saúde, economia e qualidade de vida humana. O volume total de água da Terra contém menos de 3% de água doce (MMA, 2018). A Figura 1 mostra a disponibilidade de água no mundo.

FIGURA 1: Disponibilidade de água doce no mundo

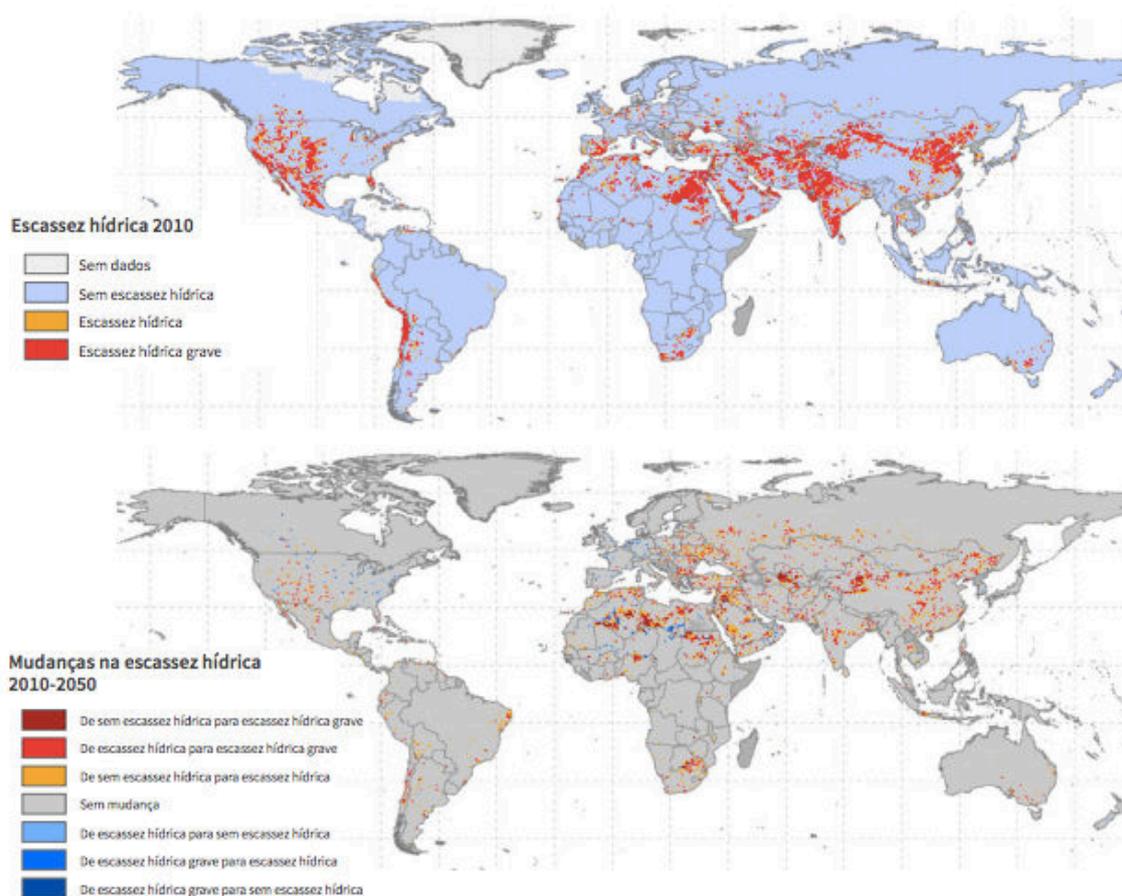


FONTE: MMA, 2018

O mundo oferece uma quantidade finita de recursos naturais. Com uma população humana de aproximadamente 7,5 bilhões de pessoas e projeções de incremento de crescimento, isso requer recursos contínuos a uma taxa que excede as capacidades da Terra em 60%. Algumas das regiões do mundo, tais como: Austrália, Kuwait, Israel e Norte da África, sofrem de estresse hídrico, tendo carência de suprimentos de água para sustentar suas populações. As usinas de dessalinização de água do mar já estão presentes em grande parte destas regiões (LIOR, 2017). A Figura 2

apresenta a escassez hídrica em 2010 e a mudança projetada da escassez hídrica até 2050.

FIGURA 2: Escassez hídrica em 2010 e abaixo a mudança projetada da escassez hídrica até 2050



FONTE: BUREK et al., 2016

4.2 Dessalinização da água

Em resposta aos problemas de escassez hídrica, nos últimos 30 anos, a dessalinização tem se desenvolvido para se tornar uma possível alternativa para fornecimento de água. Isso permite que uma fonte não tradicional de água, a água salina, providencie de forma sustentável água potável. Atualmente, a dessalinização

dispõe de apenas 1% da água potável do mundo mas esse número está aumentando ano após ano (VOUTCHKOV, 2016).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA em sua resolução número 357 de 2005 determina os padrões de qualidade das águas no Brasil, classificando a água como doce, salobra ou salina de acordo com seus limites de salinidade:

- Águas Doces: águas com salinidade igual ou inferior a 0,5%
- Águas Salobras: águas com salinidade entre 0,5% e 30%
- Águas Salinas: águas com salinidade igual ou superior a 30%

Quanto maior a salinidade da água, maior será a quantidade de STD (Sólidos Totais Dissolvidos) nesta. De acordo com a Foundation for Water Research (FWR, 2011), há uma palatabilidade de água para diferentes concentrações de sólidos dissolvidos na água. A Tabela 1 mostra essa relação:

TABELA 1: O sabor da água de acordo com a concentração de sólidos totais dissolvidos

| Palatabilidade | Sólidos Dissolvidos (mg/l) |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Excelente | menos que 300 |
| Boa | entre 300 e 600 |
| Razoável | entre 600 e 900 |
| Pobre | entre 900 e 1.200 |
| Inaceitável | maior que 1.200 |

FONTE: FWR, 2011

A dessalinização está crescendo tão rapidamente de modo global que é certo de que ela vai desempenhar um papel significativo no suprimento de água nos próximos anos. A dessalinização está crescendo particularmente em partes do mundo onde a disponibilidade de água é baixa. A capacidade anual de dessalinização parece aumentar rapidamente com o passar dos anos.

4.2.1 Processos de dessalinização

As tecnologias de dessalinização podem ser divididas em dois tipos de processos:

- 1- Térmica (ou por meio de mudança de fase)
- 2- Membranas (ou sem mudança de fase)

No ano de 2005, a maior parte dos processos de dessalinização eram térmicos (60%) enquanto os processos por membranas representavam 40%. Mas estes dados mudaram com os anos e a tecnologia de membranas representam hoje mais de 60% do mercado da dessalinização, sendo que cerca de 70% das usinas de dessalinização instaladas após o ano de 2000 foram de tecnologias de membranas (NATIONAL WATER COMMISSION, 2008).

De acordo com Younos e Tolou (2005) os seguintes processos térmicos para dessalinização podem ser citados:

- SD (Solar Distillation) – Destilação Solar
- MED (Multi-effect Evaporation/Distillation) - Destilação de Múltiplo Efeito
- MSF (Multi-stage Flash Distillation) - Flash de Múltiplo Estágio
- TVC (Thermal Vapor Compression) - Compressão de Vapor Térmico
- MVC (Mechanical Vapor Compression) - Compressão de Vapor Mecânico

Os processos térmicos consistem na evaporação seguida de condensação da água de uma fonte de abastecimento de água salobra ou salgada mediante operação de temperaturas e pressão, enquanto que as membranas são uma espécie de barreira física para separar sais dissolvidos na água. Os processos térmicos envolvem maior gasto de energia, sendo assim mais caros que por membranas. Deve ser levado em conta, também, os avanços das tecnologias com as membranas, que resultaram na diminuição do preço desses processos.

Quanto às tecnologias de membranas, segundo Younos e Tolou (2005), os seguintes métodos podem ser listados:

- ED/EDR (Electrodialysis/Electrodialysis Reversal) - Eletrodialise / Eletrodialise Reversível
- RO (Reverse Osmosis) - Osmose Inversa
- FO (Forward Osmosis) - Osmose Direta
- NF (Nanofiltration) - Nanofiltração
- MF (Microfiltration) - Microfiltração
- UF (Ultrafiltration) - Ultrafiltração

É importante ressaltar que apenas a Osmose Inversa, Eletrodialise, Eletrodialise Reversível e Osmose Direta são processos por membranas especificamente voltados à dessalinização. Outra técnica amplamente difundida para desmineralização de água, que não se enquadra em nenhum dos grupos citados, é o IE - Ion Exchange (Troca Iônica), que emprega resinas trocadoras, portanto não é um processo de separação por membranas.

Existem também os sistemas de dessalinização híbridos:

- MD (Membrane Distillation) - Destilação por membrana
- Reverse Osmosis Combined with MSF or MED Process - Osmose Inversa combinada ao Flash de Múltiplo Estágio ou Destilação de Múltiplo Efeito

A pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias de separação por membranas para dessalinização tem avançado nos últimos anos. Podem ser citadas algumas dessas tecnologias emergentes:

- Membranas de Nanocompósitos
- Membranas de Aquaporina
- Membranas de Nanotubos
- Membranas de Grafeno

5. METODOLOGIA

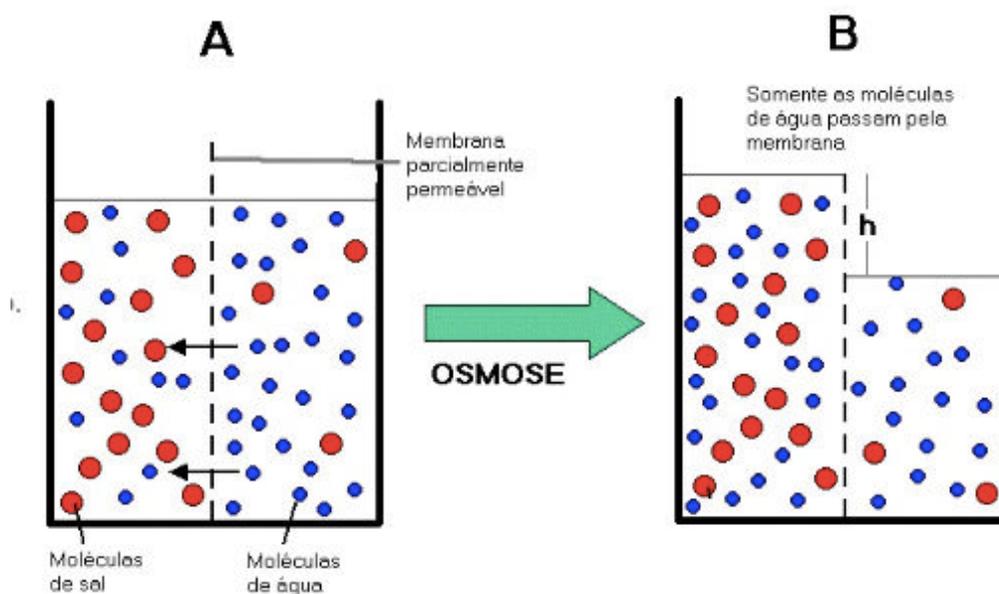
A presente monografia se trata de uma revisão de literatura nacional e internacional direcionada para publicações dos últimos cinco anos sobre as tecnologias emergentes de dessalinização por membranas e revisão e revisão acerca das tecnologias consagradas no mercado de dessalinização por membranas dos últimos 10 anos, a partir da base de dados no Google acadêmico, CAPES, Scielo, Researchgate e Sciencedirect. Foram usados os seguintes descritores para a pesquisa: água potável, dessalinização, membranas, osmose inversa, osmose direta, destilação por membranas, eletrodialise, novas tecnologias de membranas. Por meio da elaboração tabelas de vantagens e desvantagens de cada tecnologia, foi realizada uma comparação entre estas, assim como a atual situação das tecnologias emergentes.

6. TECNOLOGIAS CONVENCIONAIS DE DESSALINIZAÇÃO POR MEMBRANAS

6.1 Osmose Direta

A Osmose Direta (OD) é um processo reconhecido como um sistema comercial prático desde 1930 (SEMIAT, 2008) e tem sido investigada para aplicação em sistemas de dessalinização. A tecnologia de OD é baseada no processo de osmose natural em que a água permeia do lado menos concentrado para o lado de maior concentração através de uma membrana semipermeável (ORTEGA-BRAVO et. al., 2016). A Figura 3 mostra uma representação esquemática do processo de Osmose Direta.

FIGURA 3: Processo de Osmose Direta



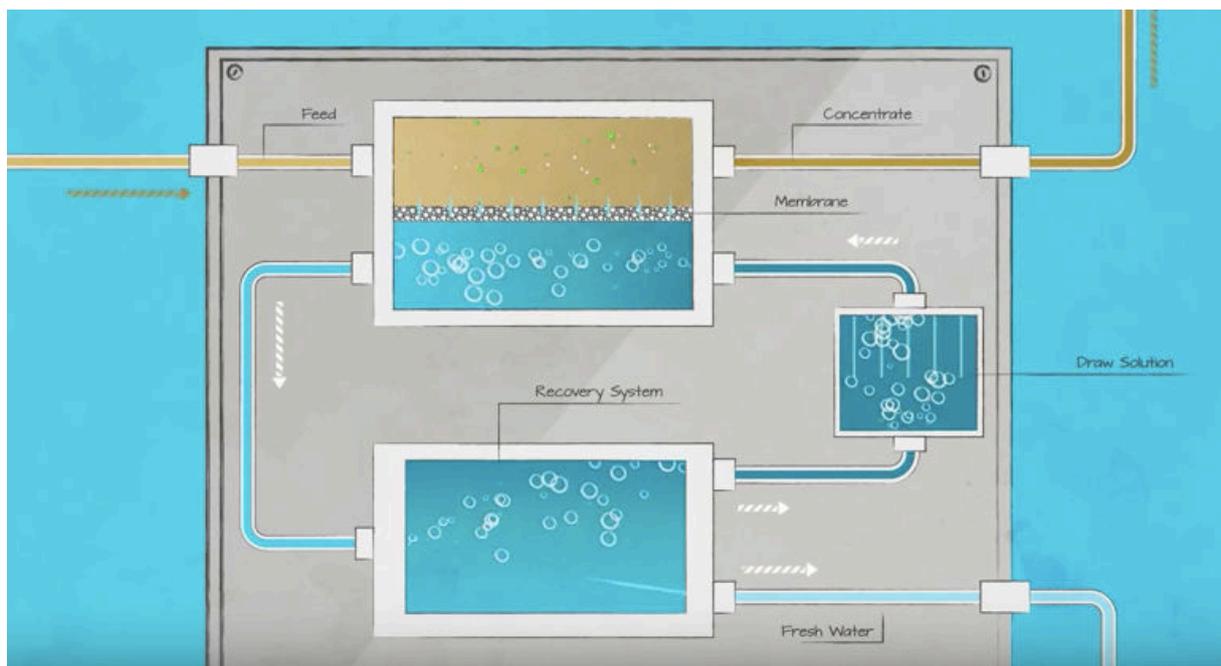
FONTE: FERRAN, 2018

A água se movimenta entre meios com concentrações diferentes de solutos, separados por uma membrana semipermeável que tenha uma porosidade suficiente para que somente a água se desloque e nada a mais. A água passa do meio mais diluído (meio hipotônico) para o meio mais concentrado (meio hipertônico), a fim de equilibrar as concentrações. A água tende a se deslocar da condição de maior

potencial para a condição de menor potencial, buscando o estado de equilíbrio (LIBARDI, 2005).

Neste processo, em vez de se utilizar uma pressão hidráulica, como em sistemas de Osmose Inversa, uma solução osmótica concentrada é utilizada para gerar uma alta pressão osmótica, que impulsiona a água de alimentação do sistema por uma membrana semipermeável (MCCUTCHEON, 2005). Esta pressão osmótica deve ser maior que a pressão gerada pela água de alimentação do sistema que já que tem altas concentrações de sal. A Figura 4 mostra um esquema de um sistema de Osmose Direta de dessalinização.

FIGURA 4: Sistema de Osmose Direta para dessalinização



FONTE: OASYS, 2014

Assim, os solutos são separados da solução diluída para serem tratados e, desde modo, adquirir o produto final. Misturas gasosas de amônia e dióxido de carbono têm sido utilizadas como a solução e quando estes componentes são misturados na proporção correta, uma solução com alta pressão osmótico é produzida (MCCUTCHEON, 2006). Uma vantagem do uso desta mistura é que ela possui a capacidade de se regenerar quando aquecida e pode ser reutilizada no processo.

Uma grande variedade de agentes osmóticos pode ser utilizada, mas a solução osmótica deve ser não-tóxica, estável, com pH próximo ao neutro e ser removida da água por meio de tecnologias disponíveis a baixo custo (CATCH et. al, 2006). Além disso, o uso de agentes osmóticos reduz gastos já que podem ser reutilizados mas continuam sendo os principais consumidores de energia no processo de OD (ZHAO et. al., 2012).

Um dos principais desafios chave é o desenvolvimento de uma solução osmótica adequado que possa gerar uma alta pressão osmótica, produzindo um alto fluxo de água, sendo fácil de se recuperar a um custo de energia menor (CHEKLI et al., 2012). Estas soluções osmóticas podem ser classificadas como: sais inorgânicos (NaCl, MgCl₂), sais orgânicos (glicina), outros compostos orgânicos (sacarose e frutose), componentes voláteis (NH₄HCO₃ → CO₂ + NH₃ + H₂O) e outras soluções (nanopartículas, polímeros, éter glicol) (SIEW, 2018).

A Tabela 2 mostra algumas vantagens e desvantagens da OD:

TABELA 2: Vantagens e desvantagens da OD

| VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Reutilização da solução osmótica | Dificuldade para se decidir a solução osmótica adequada |
| Baixo consumo energético se comparado a OI | Instalações limitadas |
| Menos susceptível a incrustações se comparado a OI | Ausência de uma membrana otimizada para a OD afim de se produzir alto fluxo de água |
| Não emissão de gases poluentes | |
| Não há necessidade de aplicação de pressão | |

FONTE: Adaptado de MEHTA, 2014; SUBRAMANI, JACANGELO, 2015

6.2 Osmose Inversa

Nos últimos anos, houve um considerável crescimento na utilização do processo de Osmose Inversa (OI) em grande parte das usinas de dessalinização em diversas regiões do mundo (MITRA et. al., 2014; PEÑATE, GARCÍA-RODRÍGUEZ, 2012). Este processo é capaz de remover íons, proteínas e outros compostos orgânicos da água por meio de um sistema de tratamento que utiliza uma membrana semipermeável (SACHIT, VEENSTRA, 2014).

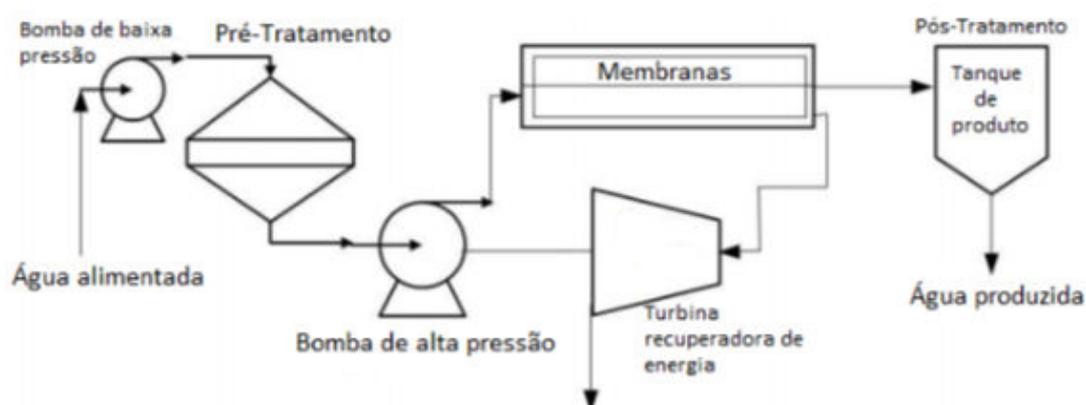
Na OI, a água escoar no sentido contrário ao da Osmose Direta, passando do meio menos diluído (alta concentração) para o meio mais diluído (baixa concentração), atravessando uma membrana semipermeável, devido à aplicação de pressão à solução mais concentrada. A pressão osmótica é a pressão necessária para evitar que ocorra a Osmose. Assim, a pressão aplicada no processo de dessalinização deve ser maior do que a pressão osmótica e pode ser quantificada como a diferença entre níveis das duas soluções após atingirem o equilíbrio (JUAN, 2000).

A OI ocorre em temperatura ambiente, sem haver necessidade de aquecimento do sistema e mudança de fase da água. Energia elétrica é utilizada para ativar os dispositivos do sistema (bombas de alta pressão) e a água salina é bombeada para abastecer o sistema a uma pressão necessária para atravessar a membrana. Assim, a solução salina concentrada fica retida pela membrana ao lado da alimentação enquanto a água doce se encontra ao lado de menos pressão (KALOGIROU, 2005). O fluxo em que a água atravessa a membrana é diretamente proporcional à diferença de pressão que excede a pressão osmótica (CHARCOSSET, 2009). Para que ocorra a dessalinização da água salobra, pressões entre 15 e 30 bar são necessárias enquanto para dessalinizar a água do mar, a pressão aplicada está na faixa de 55 e 70 bar (ABDALLAH, 2005).

Os principais componentes de uma instalação de OI para dessalinização são: pré-tratamento da água de alimentação do sistema, a bomba de pressão, a membrana

e, dependendo do uso, o pós-tratamento da água tratada, chamada permeado (GUERREIRO, 2009). A Figura 5 apresenta um diagrama simplificado de uma instalação de dessalinização por Osmose Inversa.

FIGURA 5: Diagrama simplificado de uma instalação de dessalinização por Osmose Inversa



FONTE: GUERREIRO, 2009

O pré-tratamento da água de alimentação do sistema é necessário para eliminar constituintes indesejáveis, visando proteção à membrana e minimizar incrustações, as quais oferecem uma resistência adicional ao processo, resultando em diminuição do fluxo do permeado e podem causar comprometimento das propriedades seletivas da membrana e descarte precoce (CHARCOSSET, 2009). Nos processos de pré-tratamento, podem ser utilizadas diversas tecnologias como um tratamento convencional ou tecnologias avançadas como a ultrafiltração. Diversos parâmetros podem influenciar a escolha do pré-tratamento, tais como: tipo de membrana e sua configuração, qualidade da água de alimentação (turbidez, quantidade de algas, temperatura, carbono orgânico dissolvido, entre outros), porcentagem de recuperação da água e qualidade da água permeada requerida (ZANATI et al., 2007).

A membrana é o elemento principal de um sistema de Oi. Atualmente, as membranas comercialmente mais utilizadas para a dessalinização são compostas

de materiais poliméricos (poliamida) na configuração enrolada em espiral, com revestimento de fibra de vidro (ANTONY et al., 2016).

O pós-tratamento é a estabilização e preparação da água para distribuição. Geralmente, este processo inclui o ajuste de pH, remoção de gases dissolvidos e desinfecção (GUERREIRO, 2009).

A OI apresenta diversas vantagens comparadas a outros processos de dessalinização, tais como: baixo consumo energético, baixo custo de investimento inicial e de operação, pode operar em pequenos espaços, equipamentos modulares e simples. Os avanços nas tecnologias de membranas fazem com que seus custos estejam diminuindo, bem como aumentando sua eficiência e seu ciclo de vida. (SOARES, 2016). A tabela 3 mostra algumas vantagens e desvantagens da OI:

TABELA 3: Vantagens e desvantagens da OI

| VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| Custo de instalação são baixos | Alto custo de manutenção |
| Não há mudança de fase da água no processo. Assim, a necessidade energética é menor do que a necessária em processos térmicos apesar de necessitar de muita energia | Processo lento |
| Sistema de operação compacto e simples | Muito susceptível a incrustações |
| Sistemas são automatizados e programados para começa e encerrar | O Sistema deve ser compatível com a membrana e outros materiais constituintes |
| Sistema de dessalinização da água marinha e salobra | Necessidade de pré-tratamento da água de alimentação do sistema |
| Corrosão do material é menor se comparado a processos térmicos | |
| Desenvolvimento de membranas operacionais com alta durabilidade e preços mais baixos | |

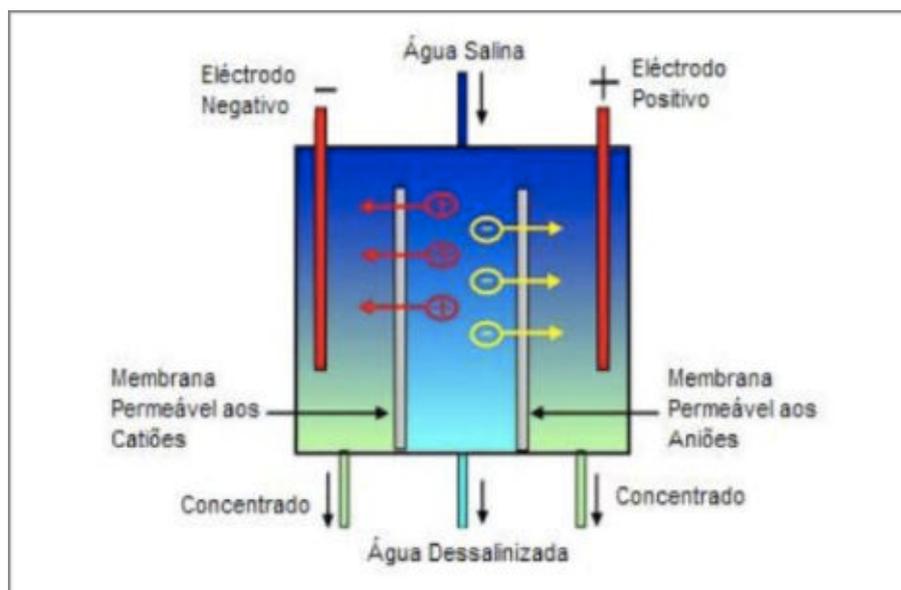
FONTE: Adaptado de DASH, 2009; MEHTA, 2014; MAHMOUD et al., 2012

6.3 Eletrodiálise e Eletrodiálise Inversa

A Eletrodiálise (ED) é uma operação unitária que consiste fundamentalmente em um processo de separação eletroquímica em que, membranas semipermeáveis e uma diferença de potencial são usadas para separar espécies ionizadas de uma solução aquosa. Uma força eletromotriz é aplicada nos eletrodos que se encontram de ambos os lados de uma membrana com o objetivo de separar os sais que se encontram dissolvidos na água. Este processo é muito utilizado na dessalinização de águas salobras, sendo campo de interesse mundial diante do desenvolvimento de novas tecnologias de membranas (YOUNOS, TULOU, 2005).

No processo de ED sais dissolvidos na água são movimentados sob o efeito de uma corrente elétrica através de uma membrana semipermeável. São dispostas uma série de membranas aniônicas e catiônicas alternadamente entre dois eletrodos na qual a água a ser tratada circula. Com a aplicação da corrente elétrica, cátions (Na^+ , K^+ , NH_4^+) tendem a ser movimentar no sentido do cátodo, enquanto os ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-}) se deslocam no sentido do ânodo, obtendo-se uma corrente de água desmineralizada e outra enriquecida em íons (STRATHMANN, 1992).

FIGURA 6: Princípio da Eletrodiálise



FONTE: CLAYTON, 2006

É importante considerar que é necessário um pré-tratamento da água de alimentação do processo de ED. Sólidos em suspensão maiores que 10 μm devem ser removidos para evitar incrustação na membrana (fenômeno que consiste na deposição e acumulação de sólidos na superfície das membranas e pode ser causado por sólidos orgânicos ou inorgânicos, bem como por micro-organismos). O pré-tratamento é necessário para a remoção de substâncias orgânicas, coloides e alguns óxidos, pois eles podem causar a neutralização da membrana, afetando, assim, seu efeito seletivo. É usual utilizar a técnica de adsorção por carvão ativado, floculação e filtração. A ED requer um custo inicial elevado, tanto em relação à instalação, quanto aos custos energéticos para manter o processo (GUERREIRO, 2009).

Em escalas industriais, o processo de ED possui centenas de pares de membranas catiônicas e aniônicas dispostas alternadamente entre eletrodos (BURN, 2015). Normalmente, o processo de ED tem uma alta porcentagem de recuperação e consegue alcançar uma remoção de 75% a 98% dos sólidos totais dissolvidos na água salobra, a uma pressão de 5 a 7 bar (YOUNOS, TULOU, 2005).

Para prevenção de incrustação, existe um processo similar à ED, chamado de Eletrodialise Inversa (EDI). Neste processo, a polaridade do sistema é invertida a cada 20 min, podendo chegar a ser invertida a polaridade quatro vezes por hora, assim criando um mecanismo de limpeza e diminuindo as incrustações. A corrente entre o cátion e o ânion é invertida, evitando a deposição do material e a acumulação de resíduos sobre as membranas. De acordo com Charcosset (2009), a porcentagem de recuperação da EDI é ainda maior que da ED, podendo atingir até 94% de remoção de sólidos totais dissolvidos (STD).

Se comparados ao processo de Osmose Inversa, os processos de ED e EDI utilizam menos produtos químicos para limpeza das membranas, além de ter custos menores de operação e manutenção, com parâmetros operacionais mais adaptáveis. Mas estes processos são menos flexíveis em relação à salinidade inicial da água e não retêm os agentes patogênicos (vírus, bactérias e fungos) (YOUNOS, TULOU, 2005).

Os preços operacionais dos processos da ED e da EDI podem variar bastante. O pré-tratamento é uma parte importante do processo e, assim, caso sejam complexos, irão aumentar os custos da ED e EDI. Desta forma, o preço das instalações está diretamente relacionado à qualidade da água que entra no sistema e do STD. Em águas salobras com até 4000 mg/L essas tecnologias são mais utilizadas e econômicas. Segundo Younos e Tulou (2005), com valores de TDS acima desta faixa, o processo deixa de ser econômico. A tabela 4 mostra algumas vantagens e desvantagens da ED:

TABELA 4: Vantagens e desvantagens da ED

| VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta recuperação de água doce | É viável para água salobra (<6g/L) mas não é adequada para sólidos dissolvidos < 0,4 g/L |
| O principal requisito para ocorrer o processo é a corrente contínua | A dessalinização da água do mar com concentrações de sólidos dissolvidos superiores a 30 g/L é possível mas não é economicamente viável |
| Pode tratar água de alimentação do sistema com um nível mais alto de sólidos suspensos do que a OI | A necessidade energética é proporcional aos sais a serem removidos |
| Uso de produtos químicos para o pré-tratamento é baixo | Vírus e bactérias não são removidos no processo. Assim, um pós-tratamento é necessário |
| Menos susceptível a incrustações comparado a OI | |

FONTE: Adaptado de STRATHMANN, 2004; MAHMOUD et al., 2012

6.4 Destilação por Membranas

O processo de Destilação por Membranas (DM) foi introduzido no final dos anos 60 mas não era comercializado na época com o propósito de dessalinização (CAMACHO et al., 2013). Dois fatores impediam o desenvolvimento desse processo para a dessalinização: membranas com características necessárias e preços razoáveis não estavam disponíveis no mercado e, quando comparado à Osmose Inversa, a DM era economicamente desfavorável. (ALKLAIBI, LIOR, 2005).

A DM é um processo híbrido de dessalinização - térmico e por membranas (LAWSON, 1996). Este tem sido investigado como uma alternativa aos processos térmicos tradicionais e de membranas (Osmose Inversa e Eletrodialise) para a corrente concentrada, de alta salinidade (CURCIO, DRIOLI, 2005).

Configurações diferentes podem ser utilizadas na DM para separar a água de abastecimento do sistema: DCMD (Destilação por membrana por contato direto), AGMD (Destilação por membrana por abertura de ar), SGMD (Destilação por membrana por gás variável) e VMD (Destilação por membrana a vácuo) (CAMACHO et al., 2013).

No processo da DM, uma membrana microporosa, hidrófoba (permite apenas a passagem de vapor de água e não de líquido) e normalmente constituída por material polimérico é utilizada. Uma solução salina é pré-aquecida, evapora e passa pela membrana. Ao encontrar uma superfície mais fria, ela condensa. Sendo hidrofóbica, a membrana não permite que o líquido flua de uma interface da membrana para a outra através dos poros. A diferença de temperaturas entre os fluidos em contato com as interfaces da membrana cria um gradiente da pressão de vapor, provocando a evaporação e difusão de moléculas de vapor de água através dos poros cheios de ar. Dessa forma, o vapor de água entra em contato com a interface oposta que está fria e condensa e assim são incorporados ao solvente puro que é chamado de destilado ou permeado. (CURCIO, DRIOLI, 2005). A tabela 5 mostra algumas vantagens e desvantagens da DM:

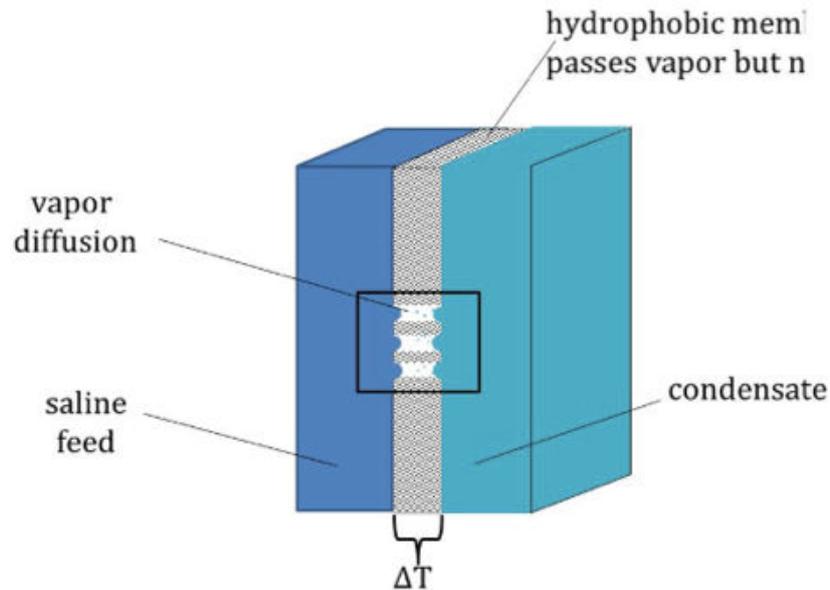
TABELA 5: Vantagens e desvantagens da DM

| VANTAGENS | DESVANTAGENS |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Baixas temperaturas de operação (a solução não precisa ser aquecida até seu ponto de ebulição) | Alto fator de rejeição |
| Menor pressão hidrostática necessária (se comparado a outros processos como a OI) | Membrana requer poros mais largos |
| Pode-se utilizar membranas menos específicas (materiais menos caros podem ser utilizados) | Baixa permeabilidade |
| Possibilidade de se utilizar materiais plásticos para evitar corrosão | Altas perdas de calor durante o processo |
| Possibilidade de se utilizar fontes alternativas de energia como energia solar | |

FONTE: Adaptado de SUBRAMANI, JACANGELO, 2015; GRYTA, KARAKULSKI, MORAWSKI, 2001

A DM pode ser implantada especialmente em indústrias por ser um processo simples, apesar de ser necessário um grande espaço para o seu funcionamento. É também utilizado para remoção de metais pesados e organismos de soluções aquosas, podendo tratar materiais radioativos (GARCIA-PAYO, IZQUIERDO-GIL, FERNANDEZ-PINEDA, 2000).

FIGURA 7: Processo de Dessalinização Destilação por Membranas



FONTE: WARSINGER, 2017

7 TECNOLOGIAS EMERGENTES DE MEMBRANAS

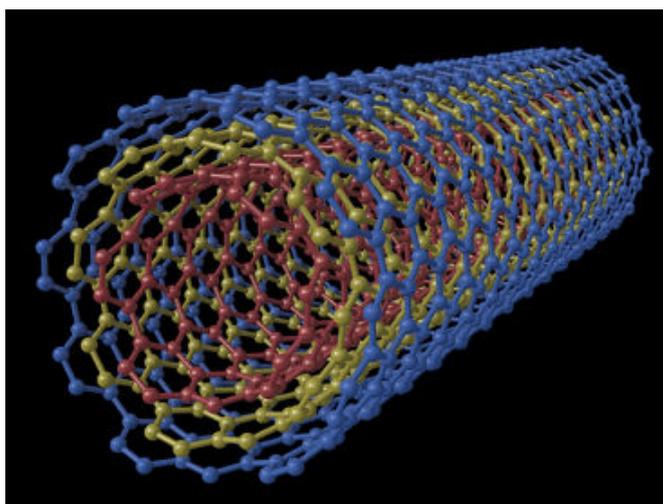
A dessalinização por membranas é uma tecnologia eficiente em termos energéticos, que ocupa menos espaço e pode ser operada em modo contínuo. Uma membrana ideal proporciona maior fluxo permeável, maior seletividade e melhor estabilidade por meio controlado de tamanho e forma de poros. Além disso, a redução da espessura da membrana é essencial para maximizar a permeabilidade, alcançar maior rendimento e aumentar o desempenho da membrana (LIU et al., 2015). A chave para novas tecnologias é ter a “mente aberta” para realizar uma metodologia melhor para um propósito simples: a produção de água pura a partir do mar. Nesta seção são apresentadas tecnologias emergentes de membranas de dessalinização.

7.1 Membranas de Nanotubos de Carbono

Nanotubos de carbono (CTNs) têm sido considerados como um dos candidatos mais promissores para o avanço das membranas convencionais devido a sua propriedade de rápido transporte de água, larga área de contato e sua facilidade de funcionamento (HUMPLIK et al., 2011). O consumo de energia para dessalinização através de membranas de nanotubos é significativamente menor quando comparado a membranas comercialmente utilizadas em Osmose Inversa pois os nanotubos são capazes de transportar maiores massas de água (SUBRAMANI, JACANGELO, 2015). O setor da tecnologia de dessalinização pode ser revolucionado por nanotubos de carbono por proporcionar maior rendimento e características mais eficazes de separação sem a introdução de custos significativos no sistema (GOH et al., 2013).

CNTs são compostos de folhas de grafite cilíndricas (forma alotrópica de carbono) enroladas em uma estrutura semelhante a um tubo com a aparência da cerca de treliça (DAS et al., 2014). A Figura 10 mostra a estrutura de um nanotubo de carbono.

FIGURA 8: Estrutura de um Nanotubo de Carbono



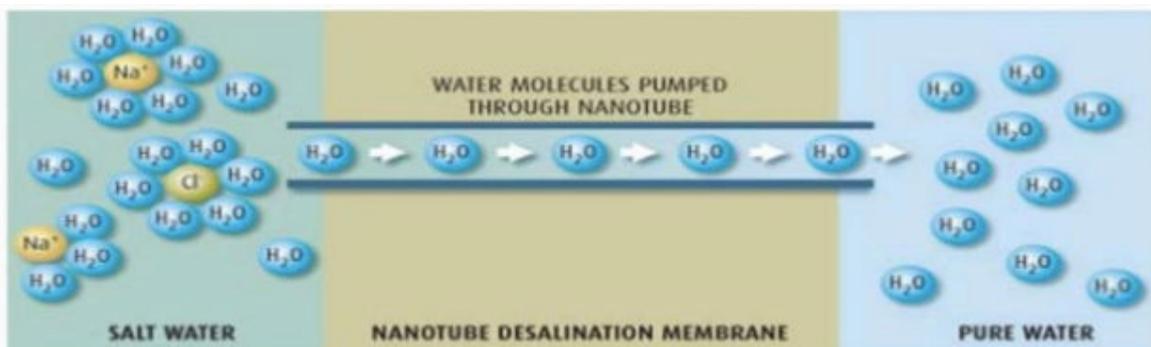
FONTE: FOGAÇA, 2018

Água e íons são transportados através da membrana formada por nanotubos de até 6 a 11 Å. O desafio no uso de membranas de nanotubos de carbono para a

dessalinização se deve ao complexo processo de sua fabricação (SUBRAMANI, JACANGELO, 2015). A estrutura CNT oca proporciona o transporte sem fricção de moléculas de água, e isso as torna adequadas para o desenvolvimento de técnicas de separação de alto fluxo. Diâmetros de poros apropriados podem constituir barreiras de energia nas entradas do canal, rejeitando os íons salinos e permitindo a passagem de água pelos buracos do nanotubo (DAS et al., 2014).

No entanto, as membranas à base de CNT são basicamente limitadas a estudos teóricos devido a vários desafios técnicos, como custo relativamente alto deste tipo de membrana, processo complexo de obtenção de CNTs de alta densidade alinhados verticalmente e dificuldades na obtenção de produção em larga escala (LIU et al., 2015). O processo de dessalinização através de membrana constituída de nanotubos de carbono é mostrado na Figura 11.

FIGURA 9: Processo de dessalinização através de membrana constituída de nanotubos de carbono



FONTE: RAO, 2014

A tabela 6 representa algumas das características das membranas de CTN para a dessalinização:

TABELA 6: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Nanotubos de Carbono

| VANTAGENS | DESvantagens | TAXA DE RECUPERAÇÃO | QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO | CONSUMO DE ENERGIA |
|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Boas propriedades mecânicas | Requer aplicação de pressão no sistema | Não conhecida até o momento | Não conhecida até o momento | Não conhecida até o momento. É esperado que seja similar as membranas de RO |
| Rápido transporte da água e alta capacidade de rejeição de sais | Apenas modelos de estudos foram realizados | | | |

FONTE: Adaptado de SUBRAMANI, JACANGELO, 2015

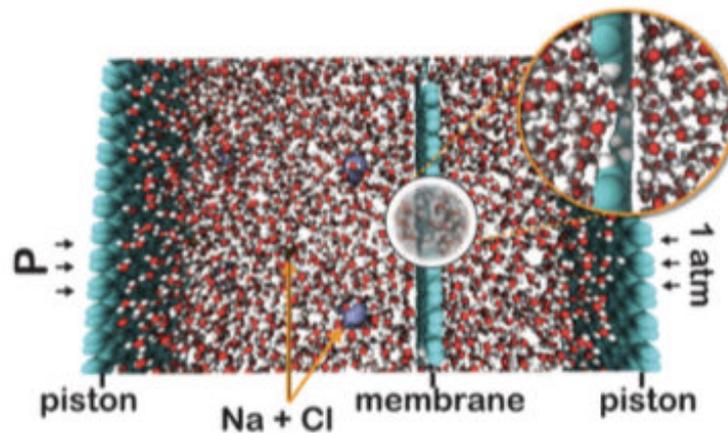
7.2 Membranas de Grafeno

Membranas feitas do material grafeno estão sendo desenvolvidas para dessalinização visto que estas membranas possuem propriedades de transporte de água mais rápido além de boas propriedades mecânicas (SUBRAMANIL, JACANGELO, 2015). Materiais baseados em grafeno referem-se a grafeno, óxido de grafeno e grafeno quimicamente convertido (LIU et al., 2015). A água permeia nas membranas de grafeno por um mecanismo similar aos processos de nanotubos de carbono, permitindo uma baixa fricção (NAIR et al., 2012).

Apesar de o grafeno ser impermeável a gases tão pequenos quanto o hélio, o transporte ocorre através dos capilares e pode ser tão rápido quanto o transporte das moléculas atreves de uma abertura. Estes capilares são formados por lâminas de grafeno e podem ser distribuídos em dois grupos: hidroxila e epóxi, que são responsáveis pela criação de nanocapilares (NAIR et al., 2012). Além disso, a

excelente resistência mecânica e a estabilidade química, juntamente com à produção econômica, permitem que membranas baseadas em grafeno sejam usadas para aplicações práticas (LIU et al., 2015). A Figura 9 mostra uma representação do processo de Osmose Inversa por meio de pressões realísticas em nanoporos de grafeno.

FIGURA 10: Representação do processo de Osmose Inversa por meio de pressões realísticas em nanoporos em grafeno.



FONTE: COHEN-TANUGI, GROSSMAN, 2014

Alternativamente, grafenos, especialmente óxidos de grafeno (GO), podem ser montados em estruturas laminares via abordagens de filtração ou revestimento, fornecendo nano-canais 2D rápidos e seletivos para o transporte de pequenas moléculas. Membranas baseadas em grafeno construídas por diferentes abordagens possuíam microestruturas e trajetórias de transporte distintas, permitindo que elas fossem aplicadas a vários processos de membrana como por exemplo: ultrafiltração, nanofiltração, osmose inversa e osmose direta. (LIU et al., 2015).

O grafeno pode ser produzido em massa, com uma boa resistência mecânica e flexibilidade (NAIR et al., 2012). A comercialização de membranas de grafeno para aplicações na dessalinização vai depender da habilidade de se sintetizar grandes quantidades de grafeno com resistência mecânica em monocamada quando aplicada uma pressão hidrostática (SUBRAMANI, JACANGELO, 2015). A tabela 7 representa algumas das características das membranas de grafeno para a dessalinização:

TABELA 7: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de grafeno

| VANTAGENS | DESvantagens | TAXA DE RECUPERAÇÃO | QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO | CONSUMO DE ENERGIA |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Alta permeabilidade (até 10 vezes maior comparada com membranas de RO comercializadas) | A densidade de empacotamento de nanotubos em substrato ainda não é conhecido para aplicações práticas | Não conhecida até o momento | Não conhecida até o momento | Não conhecida até o momento. É esperado que seja similar as membranas de RO |
| Alta rejeição de sais | Dados experimentais limitados com fontes reais de água de alimentação | | | |
| | Rejeição de contaminantes específicos não é conhecido assim como a funcionalidade dos nanotubos | | | |
| | Riscos à saúdes associados ao lançamento de nano-materiais no sistema de água tratada | | | |
| | Estabilidade do material em camada ainda não é conhecido | | | |

FONTE: Adaptado de SUBRAMANI, JACANGELO, 2015

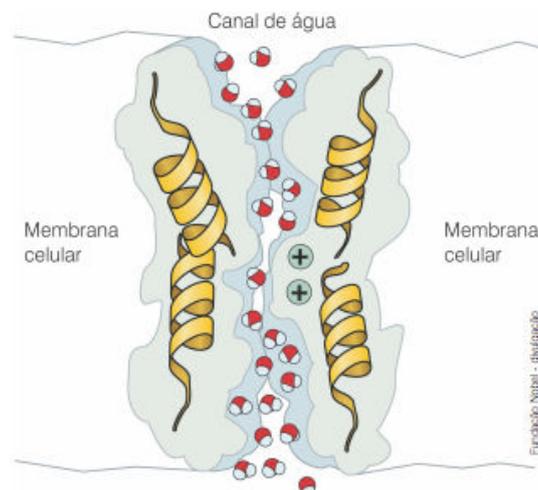
7.3 Membranas de Aquaporina

O desenvolvimento de membranas com estrutura e função similares a membranas de organismos vivos podem ser uma solução para desenvolvimento de sistemas que

utilizem menos energia para a dessalinização. Aquaporinas são canais formados por proteínas que controlam o fluxo de água através de membranas biológicas. Estas podem ser encontradas amplamente em tecidos humanos e têm o propósito de transportar passiva e rapidamente moléculas de água através das membranas das células (PENDERGAST, HOEK, 2011).

Estes canais possuem uma excelente permeabilidade à água e grande rejeição de soluto (ZHAO, 2012). A água se movimenta por uma rápida difusão e seletiva causada por pressão osmótica (AGRE, 2003). Um exemplo de Aquaporina é a Aquaporina-1 (AQP1). Esta possui vestíbulos intracelulares e extracelulares seletivos em cada final de canal. Isto permite que moléculas de água passem rapidamente em um único canal enquanto não deixa proteínas e íons passarem (AGRE, 2004; SUI et. al., 2001). A Figura 8 ilustra a passagem de moléculas de água através da Aquaporina AQP1.

FIGURA 11: Passagem de moléculas de água através da aquaporina AQP1



FONTE: ROCHA-FILHO, 2003

Membranas de Aquaporina são consideradas 100 vezes mais permeáveis que membranas comerciais de Osmose Inversa (KAUFMAN et. al., 2010). A Tabela 8 mostra alguns dados sobre a dessalinização através de membranas de Aquaporina:

TABELA 8: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Aquaporina

| VANTAGENS | DESvantagens | TAXA DE RECUPERAÇÃO | QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO | CONSUMO DE ENERGIA |
|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta permeabilidade (comparadas as membranas de RO comercializadas) | Uma abordagem sintética da produção e purificação da Aquaporina em largas escalas ainda é necessária | Não conhecida até o momento | Não há limitações no total de sólidos dissolvidos para o processo | Ainda não conhecida, mas espera-se que seja baixa por não ter necessidade de aplicação de pressão para que o processo ocorra |
| 100% de rejeição de moléculas no soluto | Fontes experimentais limitadas com fontes reais de água | | | |
| Não é necessário a aplicação de pressão no processo | Resistência química e estrutural da Aquaporina ainda são desconhecidas | | | |

FONTE: Adaptado de SUBRAMANI, JACANGELO, 2015

7.4 Membranas com Nanocompósitos

A tecnologia utilizando membranas com nanocompósitos tem chamado a atenção de pesquisadores que buscam membranas com alta permeabilidade à água durante o processo de dessalinização por possuir um maior desempenho em relação a permeabilidade e rejeição de sal, ao mesmo tempo que necessitando de menor consumo de energia (SUBRAMANI, JACANGELO, 2015).

Os nanocompósitos são formados por dois ou mais materiais sendo que os mais utilizados para a dessalinização são aqueles formados por nanotubos de carbono, zeólitas e grafeno (DAER et al., 2015). A permeabilidade da membrana usando

nanocompósitos de filme fino e zeólitas é maior quando comparada a nanotubos de carbono. Por outro lado, membranas de nanotubos de carbonos associadas a aquaporinas tem a vantagem de serem facilmente adaptáveis para o uso comercial por apresentarem características semelhantes às membranas de osmose inversa convencionais. Ainda são necessários estudos técnicos envolvendo a otimização do tamanho das nanopartículas e da dosagem, assim como a eliminação de defeitos cristalinos e simplificação dos procedimentos de síntese de nanopartículas para se concretizar a eficácia desse tipo de membrana tanto em termos de custo quanto processo. (LEE et al., 2011).

Este tipo A é um composto de sílica, zeólita e silicato que possui uma estrutura tridimensional com poros perpendiculares uns aos outros. Essa tecnologia é chamada de TFN (Nanotecnologia de camadas finas). Este composto aumenta a permeabilidade das partículas, criando túneis hidrofóbicos se comparados a membranas compostas por TFC (Compósitas de Filme Fino) (SUBRAMANI, JACANGELO, 2015).

Testes de curto prazo foram realizados a fim de se medir o fluxo da água e eficiência das membranas de nanocompósitos na rejeição salina. Enquanto isso, testes de longo prazo a respeito do consumo específico de energia e estabilidade do módulo também foram realizadas (AHN et. al, 2012).

Pesquisas comprovaram que a utilização do nanocompósito grafeno/SnO₂ como um material para eletrodo foi eficaz para a dessalinização de água salina utilizando a técnica de deionização capacitiva. Os pesquisadores observaram que a incorporação de SnO₂ em grafeno teve um grande impacto para o reforço da capacidade de eletrossorção (EL-DEEN et al., 2014).

A tabela 9 mostra alguns índices da tecnologia de dessalinização por membranas de nanocompósitos:

TABELA 9: Características do processo de dessalinização utilizando membranas de Nanocompósitos

| VANTAGENS | DESvantagens | TAXA DE RECUPERAÇÃO | QUALIDADE DA ÁGUA DE ABASTECIMENTO | CONSUMO DE ENERGIA |
|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Alta permeabilidade enquanto mantém rejeição de sais | Elementos constituintes da membrana são mais caros | Variável, entre 40 a 50% | Entre 32,000 a 34,000 mg/L | 1,73 - 2.49 kWh/m ³ para dessalinização de águas salinas com até 32,000 mg/L de sólidos totais dissolvidos |
| Requer menor pressão | Requer um controle sobre a velocidade nas bombas | | | |
| Grande fluxo de operação | | | | |

FONTE: Adaptado de SUBRAMANI, JACANGELO, 2015

8. PILARES DAS TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO

Os pilares das tecnologias de dessalinização podem ser considerados como quatro componentes: áreas ambientais, econômicas, sociais e tecnológicas. Estes são fortemente interligados e servem como uma medida quantitativa para a avaliação de processos de dessalinização de água. O pilar econômico tem, historicamente, dominado a tomada de decisões, e ainda se deve à inércia e à natureza humana, mas as últimas décadas produziram uma preocupação de vital e crescente importância para aumentar o peso e a influência dos pilares ambiental e social. Isso é impulsionado pela crescente preocupação do público com a sustentabilidade local e global, bem como por regulamentações ambientais e de saúde pública cada vez mais rigorosas (LIOR, 2017). As novas tecnologias em membranas foram apresentadas nos tópicos anteriores. Neste capítulo, são apresentados os outros

três componentes da sustentabilidade da dessalinização. A Figura 12 apresenta o conceito de dessalinização sustentável.

FIGURA 12: Dessalinização sustentável



FONTE: GUDE, 2015

8.1 Impactos Ambientais

Os impactos ambientais gerados pela dessalinização podem ser classificados em três categorias: consumo de energia, impactos de entrada do processo e impactos de saída. Os principais impactos ambientais de entrada do processo são: implementação e arrastamento de organismos marinhos, construção (temporária ou permanente) e operação da instalação. Cada um desses sistemas tem um conjunto diferente de impactos ambientais potenciais, impactos específicos de preocupação ou grau de impacto.

Talvez o impacto ambiental de maior preocupação em relação a todos os sistemas de entrada no sistema seja o impacto e o arrastamento de organismos marinhos. Ao projetar qualquer sistema de entrada, um critério crítico é a localização proposta do sistema de dessalinização e sistema de admissão associado, que pode afetar a qualidade da água do mar local. Em áreas de maior atividade biológica, os processos de pré-tratamento devem ser intensificados, o que causa maior uso de produtos químicos e potenciais impactos associados ao meio ambiente no final da descarga do sistema (MISSIMER, MALIVA, 2018).

Ao longo da última década, tem havido muita pesquisa sobre os impactos ambientais associados ao descarte de concentrado. De acordo com Missimer e Maliva (2018), os principais impactos ambientais associados à descarga de concentrado resultantes da dessalinização são:

- Aumento da salinidade nos corpos receptores;
- Impactos locais das salmouras hipersalinas sobre as comunidades bentônicas marinhas no ponto de descarga e próximo dele;
- Descarga de produtos químicos usados para pré-tratamento e limpeza de membranas;
- Descarga de metais decorrentes da corrosão (Cu, Fe, Ni, Mo, Cr);
- Impactos visuais;
- Impactos nos aquíferos devido a vazamentos de tubulações;
- Danos temporários durante a construção,
- Danos temporários durante a manutenção,
- Danos permanentes por colocação de infraestruturas.

Alguns estudos mais recentes também têm reportado os impactos causados pelo descarte anual de milhares de toneladas de módulos de membranas de osmose inversa em diversas regiões do mundo. São considerados resíduos inertes, que comumente são direcionados para aterros, cada vez mais sobrecarregados (LAWLER et al. 2015; LANDABURU-AGUIRRE et al., 2016; COUTINHO DE PAULA, AMARAL, 2017).

A maioria dos estudos sobre os impactos ambientais da dessalinização afirma que a energia usada para o processo é um dos mais importantes contribuintes para o seu impacto ambiental, incluindo o aquecimento global, se derivado do uso de combustíveis fósseis para seu aquecimento (no caso dos processos térmicos) ou energia elétrica. A energia é de fato um contribuinte importante, e estudos de instalações de dessalinização usando energia renovável mostram que seu impacto ambiental é muito menor. Deve-se ter em mente que o uso de energia renovável aumenta o custo da água, especialmente quando a energia convencional é relativamente barata (como atualmente), incluindo a necessidade de investimentos adicionais para lidar com as consequências de sua intermitência (LIOR, 2017).

Os impactos ambientais que podem ser gerados pela dessalinização limitam a utilização deste processo mundialmente. São necessários estudos acerca da minimização ou mitigação destes impactos a fim de tornar o processo mais sustentável. Por outro lado, é importante ressaltar que estas consequências ambientais do processo de dessalinização, tirando a questão de destino incorreto das membranas e impactos causados pela salinidade da água descartada, são consequências também da captação de águas superficiais como rios e lagos. Desta forma, estes impactos já estão sendo causados por outras formas de obtenção de água doce, não alterando em grandes escalas os impactos já existentes. Assim, a dessalinização é uma boa escolha do ponto de vista ambiental.

8.2 Impactos sociais

De acordo com Lior (2017), o pilar social pode acarretar nos seguintes impactos sociais:

- Saúde;
- Emprego (que inclui segurança e tratamento dos empregados);
- Crescimento local (comunidade, por exemplo, novas construções sem investimento em infraestrutura podem causar, por exemplo, escolas superlotadas e tráfego);

- Uso da terra;
- Aumento dos fluxos de águas residuais (o aumento do escoamento urbano e agrícola, pode amplificar os fluxos de águas residuais, criando problemas de qualidade da água nos rios, riachos e / ou mares locais);
- Aceitação social;
- Confiança na quantidade e qualidade das fontes de água e suas demandas;
- Aceitação de tecnologias de dessalinização e confiança nos fornecedores de água;
- Estética da paisagem e estrutura;
- Satisfação geral com a qualidade de vida.

Estes impactos sociais podem ser positivos e negativos para as comunidades em que as usinas são inseridas. Estudos sobre os resultados destes impactos ainda são necessários pois os impactos sociais podem variar entre diferentes locais. A mobilização destas comunidades são necessárias afim de se ter uma aceitação social acerca da água produzida também é necessária, assim como a confiança da população acerca das tecnologias utilizadas. Por outro lado, assim como os impactos ambientais, os impactos sociais causados pela dessalinização não são tão diferentes dos impactos causados obtenção de água doce por métodos convencionais, como a captação de rios e lagos.

8.3 Custo da Dessalinização

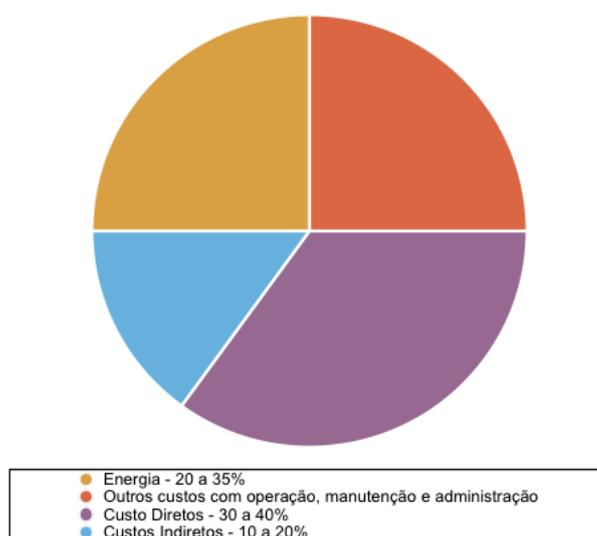
Custo é um dos principais fatores para a implementação de tecnologias para dessalinização e, geralmente, é específico para cada região ou país. Este custo pode ser influenciado por diversas variáveis, tais como: tipo de tecnologia utilizada, qualidade da água de alimentação, capacidade da estrutura, características da área, localização geográfica, disponibilidade energética, exigências regulamentares e custos para transporte da água dessalinizada (YOUNOS, 2005).

A qualidade da água de abastecimento da estrutura é um fator determinante para se determinar este custo. Concentração baixa de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água requer menos energia para seu tratamento, além de permitir altas

porcentagens de recuperação. A capacidade da estrutura influencia no tamanho das unidades de tratamento, de bombeamento, do tanque de armazenamento de água e do sistema de distribuição. Para estruturas com grande capacidade, são necessários altos investimentos iniciais. Mas, devido à economia de escala implantada, o custo de produção por unidade, em estruturas de grande porte, pode ser menor. As características da área em que a estrutura será implantada também influenciam no custo da produção. As condições do terreno e a viabilidade deste também são fatores importantes. A proximidade da estrutura à fonte de água e o local de descarga são outros índices. O custo para bombeamento e tubulação são muito reduzidos, caso a estrutura esteja localizada perto da fonte de água (YOUNOS, TOLOU, 2005). Avanços nas tecnologias e equipamentos para a dessalinização resultaram na redução de aproximadamente 80% da energia utilizadas para a produção de água potável nos últimos 20 anos (VOUTCHKOV, 2016).

Existem alguns modelos de estimativa de custo da dessalinização. Estes modelos podem ser utilizados para indicar os custos potenciais para o planejamento de uma instalação de dessalinização. Atualmente, os principais três modelos são: WTCost Model, DEEP (Desalination Economic Evaluation Program) e WRA RO Desalination Cost Planning Model (YOUNOS, TOLOU, 2005). A divisão de custo da dessalinização é representada na Figura 13.

FIGURA 13: Gráfico da divisão de custos da dessalinização



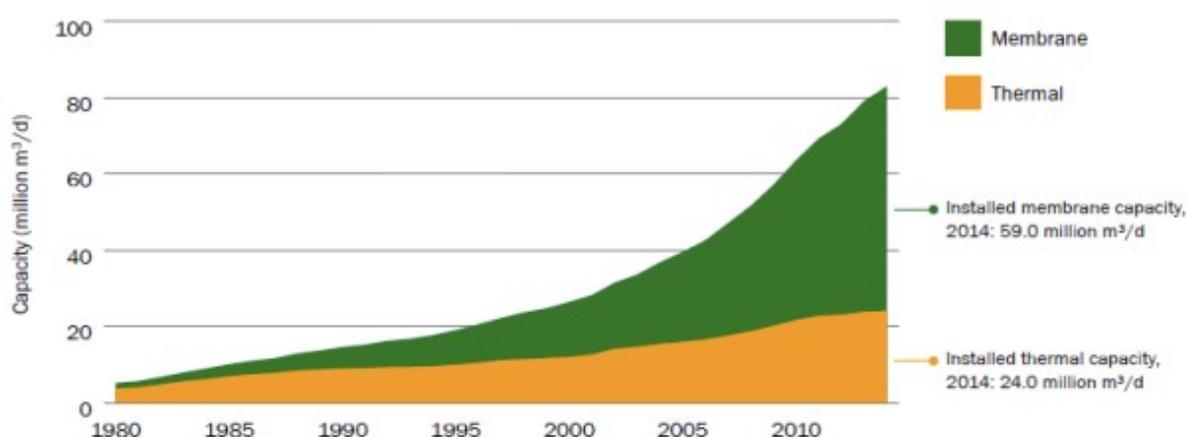
FONTE: Adaptado de VOUTCHKOV, 2016

O custo da dessalinização é o principal fator de influência sobre o processo. Este fator delimita o uso da dessalinização pois o processo de obtenção de água doce a partir de águas salinas e salobras é um processo muito caro atualmente apesar da constante redução devido ao desenvolvimento de novas tecnologias. Alguns países já dependem da dessalinização para abastecimento, por não possuírem água superficial, mas aqueles que possuem a opção de captação destas águas a utilizam pois se trata de um processo mais barato.

9 DESSALINIZAÇÃO NO BRASIL E NO MUNDO

A capacidade de dessalinização no mundo teve um grande crescimento nas últimas décadas. Este crescimento foi observado em ambos os setores de serviços - principalmente devido a novas tecnologias na região do Golfo Pérsico e no setor industrial, onde a estabilização dos preços do petróleo e do gás acarretou em novos projetos. A capacidade cumulativa global instalada é agora de 92,5 milhões de metros cúbicos/dia, enquanto em 2016 foi de 88,6 milhões de metros cúbicos/dia. O número total de usinas de dessalinização no mundo todo é de 19.372 unidades (IDA, 2017).

FIGURA 14: Proporção de tecnologias por membranas e térmicas no período de 1980 - 2014

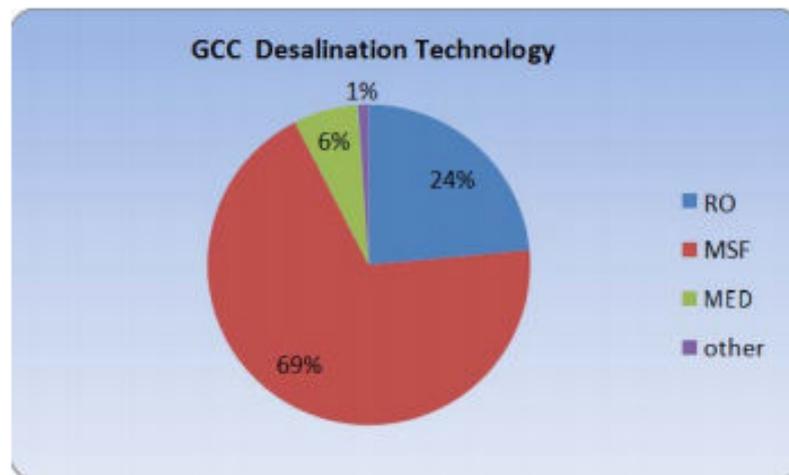


FONTE: GWI, 2015

Muitos países instalaram grandes usinas de dessalinização nos últimos 70 anos: as maiores fontes de produção foram instalados na Arábia Saudita (capaz de produzir mais de 10 milhões de m³/dia), os Estados Unidos da América (mais de 8 milhões de m³/dia, os Emirados Árabes Unidos (cerca de 7 milhões de m³/dia) e Espanha (cerca de 5 milhões de m³/dia). Países como Austrália e Espanha também têm se destacado com grandes investimentos em dessalinização (GWI, 2014). A Figura 14 apresenta a proporção de tecnologias por membranas e térmicas no período entre 1980 e 2014.

A região do Golfo Pérsico tem a maior concentração de capacidade de dessalinização instalada do mundo. No total, a capacidade de dessalinização da área é de cerca de 9,2 milhões de megalitros por ano. Noventa e seis por cento dessa capacidade está localizada nos seis países que formam o Conselho de Cooperação do Golfo (GCC - Bahrein, Kuwait, Omã, Catar, Arábia Saudita e Emirados Árabes Unidos). A população total do GCC em 2012 foi de 44.643.654, dos quais a Arábia Saudita constituiu 62%. Esta população está aumentando a uma taxa média de 14% anualmente. A descoberta de petróleo e gás natural resultou nos países do GCC os maiores exportadores de combustíveis fósseis do mundo, com a maior renda per capita e o crescimento econômico mais rápido do mundo, subjacentes ao crescimento populacional. Para suprir a necessidade de água doce, a dessalinização da água do mar tem sido uma das principais alternativas de abastecimento de água que os países do GCC adotaram. A capacidade total de dessalinização instalada nos países do GCC em 2012, para a produção de água foi de 8,9 milhões de megalitros por ano. Esta produção está dividida entre os seguintes países: Arábia Saudita (KSA), 39%, Emirados Árabes Unidos (EAU) 18%, Kuwait 18%, Qatar 15%, Bahrein 6% e Omã 4% (UN, 2016). A Figura 15 apresenta a distribuição de diferentes tecnologias no grupo GCC.

FIGURA 15: Distribuição de diferentes tecnologias no grupo GCC



FONTE: GCC, 2012

Além da área do Golfo Pérsico, os Estados Unidos têm a maior dessalinização instalada capacidade no mundo. Isto está concentrado na Califórnia, Flórida e Texas. Contudo, a dessalinização da água do mar é apenas uma pequena parte da dessalinização realizada nos Estados Unidos. Em 2010, a dessalinização da água do mar representou apenas 10% da capacidade de dessalinização – 82% foram para dessalinização de água salobra (em grande parte de águas subterrâneas, mas também de rios) e 8% para a reutilização de águas residuais. Na Califórnia, no entanto, a situação está mudando. Estatísticas sobre a dessalinização na Califórnia mostram que há 10 usinas de dessalinização da água do mar na Califórnia, com uma capacidade diária de cerca de 23 megalitros. Nem todas estas usinas estão em operação regular, mas são usadas somente quando outros suprimentos de água precisam ser suplementados. Atualmente, existem propostas para mais 15 usinas de dessalinização de água do mar. Se todas essas usinas forem construídas, elas teriam capacidade para fornecer cerca de 946 - 1400 megalitros por dia (UN, 2016).

A Espanha tem tido dificuldades em fornecer suprimentos de água adequados em algumas regiões do país. Este é particularmente o caso ao longo da costa do Mediterrâneo, que sofreu desenvolvimento maciço para o turismo. Em 2001, as autoridades espanholas adotaram legislação para um Plano Hidrológico Nacional. Entre outros, esta legislação declarou como interesse público um grande número de usinas de dessalinização. Em 2013, 27 dos 51 plantas aprovadas foram construídas

a um custo de cerca de 2.200 milhões de dólares. No entanto, a recessão econômica a partir de 2008 reduziu a demanda por água, de modo que muitas das instalações estão paradas, ociosas ou trabalhando bem abaixo de sua capacidade planejada (UN, 2016).

A Austrália é o continente mais seco do planeta. Nas últimas décadas, a Austrália atendeu suas demandas de abastecimento de água mediante o uso de captações de água e represas. No entanto, considerando a significativa falta de chuvas em 2000-2010 que drenou a maior parte dos reservatórios de água da Austrália e o fato de que a água doce é escassa na Austrália, as tecnologias de dessalinização capturaram muita atenção como fontes alternativas de água. Perth foi a primeira grande cidade a usar água dessalinizada para o abastecimento de água potável (2006) e produz cerca de 45 milhões de metros cúbicos de água doce por ano. No estado de Victoria (Wonthaggi) se encontra a maior usina de dessalinização do país com capacidade de 150 milhões de metros cúbicos de água doce por ano, seguido pelas cidades de Adelaide, Binningup, Sydney e Gols Coast (AUSTRALIAN WATER, 2014).

No Brasil, destaca-se o Programa Água Doce. A região do semiárido brasileiro apresenta um histórico de secas relatados desde 1587. Este é um fenômeno natural e recorrente (MARENGO, 2006). O governo brasileiro vem buscando ao longo dos últimos anos ampliar a convivência com o Semiárido. Estas condições determinam a sobrevivência das famílias e o desenvolvimento da agropecuária (PAD, 2012).

A região, que abrange quatro Regiões Hidrográficas - São Francisco, Parnaíba, Atlântico Nordeste Oriental e Atlântico Leste - possui características fisiográficas naturais que favorecem a escassez hídrica: pouca chuva, evapotranspiração potencial elevada, vegetação rala, baixa disponibilidade hídrica superficial e baixa vocação hidrogeológica. Esta região possui um milhão de quilômetros quadrados e é habitada por 22 milhões de pessoas, sendo que 9 milhões em comunidades rurais (MMA, 2018). A Figura 16 apresenta a região do Semiárido brasileiro.

FIGURA 16: Região do Semiárido brasileiro



FONTE: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018

Desde forma, no ano de 2004, foi lançado o Programa Água Doce (PAD), promovido pelo Governo Federal Brasileiro e coordenado pelo Ministério do Meio Ambiente, em parceria com instituições federais, estaduais, municipais e sociedade civil. O PAD busca o uso sustentável de águas subterrâneas salinas ou salobras e dispor água potável para consumo humano em áreas com crítica escassez hídrica em regiões do Semiárido brasileiro por meio do uso da técnica de Osmose Inversa. O PAD conta com cerca de 200 instituições envolvidas no processo e 10 estados do Semiárido e parceiros federais. A Figura 17 mostra o sistema de dessalinização do Programa Água Doce.

FIGURA 17: Sistema de dessalinização do Programa Água Doce



FONTE: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2018

O programa é guiado por uma série de princípios: mobilização social, desenvolvimento sustentável, capacitação técnica e diagnóstico técnico e ambiental. De acordo com Saraiva (2018), 3.378 comunidades em 298 municípios foram diagnosticadas como críticas quanto ao acesso à água no semiárido brasileiro. 508 sistemas de dessalinização foram concluídas da meta de 1.200, operando em 170 municípios e abastecendo cerca de 200 mil pessoas com água de qualidade.

10. CONCLUSÃO

A dessalinização da água do mar experimentou um crescimento acelerado na última década, impulsionado pelos avanços na tecnologia de membranas. Nos últimos 10 anos, houve um grande crescimento tecnológico e investimentos, sendo estes feitos no sistema de membranas que visam aliviar o suprimento de água, assim como minimizar o consumo geral de produtos químicos, o uso de energia e os custos, associados à produção e reuso de água.

Os processos consagrados de dessalinização já são utilizados no mercado em diversos países. A Osmose Indireta é a tecnologia de dessalinização por membranas mais utilizada atualmente em diversas regiões do mundo e possui vantagens, como: custos de instalações baixos, sistema de operação compacto e simples, sistemas automatizados, sistema de dessalinização da água marinha e salobra, pequena corrosão dos materiais e grande desenvolvimento de membranas operacionais com alta durabilidade e preços mais baixos como foram citados nas tecnologias emergente. Como desvantagens, este processo tem um alto custo de manutenção, muito susceptível a incrustações, necessidade de um pré tratamento da água de alimentação.

A Osmose Direta, se comparada a OI, consome menos energia, é menos susceptível a incrustações e não há necessidade de aplicação de pressão ao sistema mas possui desvantagens como a dificuldade de decisão da solução osmótico adequada, instalações limitadas e ausência de uma membrana otimizada para o processo. A Eletrodialise e Eletrodialise Inversa possui vantagens e desvantagens em relação a OI. Como vantagens podem ser citadas: principal requisito para o processo é a corrente contínua, nível mais alto de sólidos suspensos, baixo uso de produtos químicos, menos susceptível a incrustações e como desvantagens: necessidade energética proporcional ao total de sólidos dissolvidos (dessa forma, dessalinização da água do mar não é um processo economicamente viável) e bactérias e vírus não são removidos do processo (assim, um pós-tratamento é necessário). A Destilação por membranas tem como

vantagens, se comparadas a Osmose Inversa, a possibilidade de se utilizar fontes alternativas de energia, pode-se utilizar membranas menos específicas e de materiais plásticos para se evitar a corrosão e uma menor pressão hidrostática é necessária. Como desvantagens, a DM possui o alto fator de rejeição, baixa permeabilidade, alto fator de rejeição e altas perdas de calor durante o processo.

Dessa forma, não é possível se determinar qual destas tecnologias seria a melhor pois é importante se considerar cada caso, se a água de alimentação seria adequada ao processo e qual o custo de cada processo. Assim, de-se avaliar diversos fatores a fim de se determinar qual processo é o mais adequado para determinado local ou situação.

A dessalinização baseada em tecnologias de membrana pode ser uma resposta a questão da escassez hídrica. Certos produtos emergentes baseados em tecnologias de membranas, tais como membranas nanocompósitas, mostram substancial redução energética e foram recentemente comercializadas. Apesar disso, todos os processos de dessalinização de membranas emergentes podem ser afetados pelos desafios potenciais associados à experiência limitada, projeto reais e modo de operação, assim como alguns problemas de pré-tratamento em fontes de água do mar ou salobra. Para avançar o conhecimento técnico nessas tecnologias, estudos de campo devem ser implantados para avaliar sua viabilidade em largas escalas. Algumas dúvidas em relação à durabilidade e ao desempenho de longo prazo da tecnologia em uma operação em plena escala ou escala industrial permanecem atualmente. Embora tecnologias baseadas em aquaporinas e nanotubos prometam alta permeabilidade e consumo mínimo de energia, essas tecnologias não são desenvolvidas para o ponto de comercialização e mais estudos são necessários em uma escala maior para determinar sua operação sustentável.

As tecnologias emergentes tem como vantagem uma maior permeabilidade em relação as membranas disponíveis no mercado. Os Nanotubos de Carbono possuem boas propriedades mecânicas mas requerem aplicação de pressão no sistema para a dessalinização. O Grafeno possui como vantagem a alta rejeição salina mas a densidade de empacotamento de nanotubos em substratos, rejeição de

contaminantes e riscos a saúde ainda são desconhecidos. A Aquaporina rejeita 100% as moléculas de soluto e não há necessidade de aplicação de pressão no processo. Por outro lado, sua resistência química e estritas ainda são desconhecidas e dados de uma abordagem dinâmica da produção e purificação da Aquaporina em largas escalas ainda é necessária. As Membranas de Nanocompósitos requerem uma menor pressão de funcionamento e grandes fluxos de operação mas tem como desvantagem o alto custo dos elementos constituintes da membrana.

A maioria das tecnologias emergentes investidas ainda não apresentam algumas características estipuladas como: a taxa de recuperação da água, a qualidade da água de abastecimento do sistema necessária e o consumo de energia específico de cada um dos processos. Cada uma delas possui vantagens e desvantagens e, diante da ausência de experiências reais para a viabilidade de cada uma delas, são necessárias pesquisas e mais estudos acerca do tema. Desta forma, não é possível, atualmente, estabelecer qual tecnologia emergente é a mais adequada ou promissora.

Comparando a dessalinização aos métodos convencionais, deve-se considerar que a captação de água doce por processos como captação de rios e lagos continua sendo a opção mais barata para países que contam com a disponibilidade de água superficial. Também são necessárias pesquisas aprofundadas sobre os impactos ambientais e sociais da dessalinização. Se comparados a outros métodos de captação de água doce, estes impactos não se tornam tão relevantes. Como estas águas estão se esgotando mundialmente, a dessalinização da água do mar é hoje uma alternativa segura/viável diante da escassez dos recursos hídricos de água potável mundialmente. A tendência da constante redução de energia e custos de produção de água dessalinizada torna este processo mais atrativo.

REFERÊNCIAS

ABDALLAH, S. M. **Performance of a photovoltaic powered reverse osmosis system under local climatic conditions**. *Desalination*, 183, 95–104, 2005.

AGRE, P. **Aquaporin water channels**. *Bioscience Reports* 24(3), 127-163, 2004.

AHN, C. H. et al. **Carbon nanotube-based membranes: Fabrication and application to desalination**. *Journal Of Industrial And Engineering Chemistry*, [s.l.], v. 18, n. 5, p.1551-1559, 2012.

ALKLAIBI, A. M., LIOR, N. **Membrane-distillation desalination: status and potential**. *Desalination* 171. 111–131, 2005.

ANTONY, A.; BRANCH, A.; LESLIE, G.; LE-CLECH, P. **Impact of Membrane Ageing on Reverse Osmosis Performance – Implications on Validation Protocol**. *Journal of Membrane Science*, v. 520, p. 37-44, 2016.

AUSTRALIAN WATER. **Desalination: Fact Sheet**. Disponível em:< http://www.awa.asn.au/Documents/Desalination_Fact_Sheet.pdf>. 2014

BURN, S. et al. **Desalination techniques – A review of the opportunities for desalination in agriculture**. *Desalination*, 2015.

BUREK, P. et al. **Water Futures and Solution**. *Water Future and Solutions - Final Report*. Disponível em:<<http://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/13008/1/WP-16-006.pdf>>. 2016.

CAMACHO, L. M., DUMÉE, L., ZHANG, J., LI, J. D., DUKE, M., GOMEZ, J., GRAY, S. **Advances in membrane distillation for water desalination and purification applications**. *Water*, 94 - 196, 2013.

CATH, T.Y; CHILDRESS, A. E; ELIMELECH, M. **Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments.** Journal of Membrane Science, v. 281, p. 70-87, 2006.

CHARCOSSET, C. **A review of membrane processes and renewable energies for desalination.** Desalination, 245, 214-231, 2009.

CHEKLI, L. et al. **A review of draw solutes in forward osmosis process and their use in modern applications.** Desalination and water treatment 43 : 167-184, 2012.

CLAYTON, R. **Desalination for Water Supply FR/R0013 (35p), Review of Current Knowledge,** Foundation for Water Research, U.K, 2006.

COHEN-TANUGI, D.; GROSSMAN, J. C. **Water permeability of nanoporous graphene at realistic pressures for reverse osmosis desalination.** The Journal of Chemical Physics, 2014.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução n. 357.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?coFdasdlegi=459>>. 2005.

COUTINHO DE PAULA, E., AMARAL, M.C.S. **Extending the life-cycle of reverse osmosis membranes: a review.** Waste Management & Research, v.35, n.5, p. 456–470, 2017.

CURCIO, E.; DRIOLI, E. **Energetic and exergetic analysis of an integrated membrane desalination system.** Desalination 124, 243–249, 1999.

CURCIO, E.; DRIOLI, E. **Membrane distillation and related operations – A review.** Sep. & Purif. Review, v. 34, p. 35-86, 2005.

DAER, S. et al. **Recent applications of nanomaterials in water desalination: A critical review and future opportunities.** Desalination, [s.l.], v. 367, p.37-48, 2015.

DAS, C. et al. **Carbon nanotube membranes for water purification: A bright future in water desalination**. Desalination - Volume 336, Pages 97-109, 2014.

DASH, H. **Comparison of nanofiltration and reverse osmosis processes for a selective desalination of brackish water feeds**. Engineering Sciences [physics]. Université d'Angers, Disponível em: < <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00433513/document> >. 2009.

EL-DEEN, A. G. et al. **Graphene/SnO₂ nanocomposite as an effective electrode material for saline water desalination using capacitive deionization**. Ceramics International, [s.l.], v. 40, n. 9, p.14627-14634, 2014.

FERRAN: TRATAMENTO DE ÁGUA. **O que é Osmose**. Sistema de Água Potável. Disponível em: <<http://www.ferran.com.br/o-que-e-osmose/>>. 2018.

FOGAÇA, J. **Nanotubos de carbono**. Brasil Escola - Química. 2018

FWR - FOUNDATION FOR WATER RESEARCH. **Desalination for Water Supply**. Bucks, UK, 35 p, 2011.

GARCIA-PAYO, M.C., IZQUIERDO-GIL, M.A., FERNÁNDEZ-PINEDA, C. **Air gap membrane distillation of aqueous alcohol solutions**, J. Membr. Sci. 169, 61–80, 2000.

GCC - Gulf Cooperation Council . **Water Statistical Report**. Riyadh. 2012.

GOH, P. S., ISMAIL, A. F., NG, B. C. **Carbon Nanotubes for Desalination: Performance Evaluation and Current Hurdles**. Desalination , 308, pp. 2-14, 2013

GREENLEE, L.; Lawlor, D.; FREEMAN, B.; Marrot, B.; MOULIN, P. **Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges**. Water Res. 43 (9) 2317–2348, 2009.

GRYTA, M. KARAKULSKI, K., MORAWSKI, A.W. **Purification of oily wastewater by hybrid UF/MD.** *Water Res.* 35, 3665–3669, 2001.

GUDE, V. G. **Desalination and Sustainability – An Appraisal and Current Perspective.** *Water Research*, 2015.

GUERREIRO, B. F. M. **Dessalinização para produção de água potável: Perspectivas para Portugal.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 62 f., 2009.

GWJ - Global Water Intelligence. **Section 1: Market profile.** *IDA Desalination Yearbook 2015-2016.* 2015.

HUMPLIK, J. L. et al. **Nanostructured materials for water desalination.** *Nanotechnology* 22, 292001, 2011.

IDA - International Desalination Association. **IDA Desalination Yearbook 2017 - 2018.** *Water Desalination Report.* 2017.

JUAN, J. A. M. S. **Desalación de aguas salobres y de mar.** *Osмосe inversa.* Madrid: Mundi-Prensa. 395p., 2000.

KALOGIROU, S.A. **“Seawater desalination using renewable energy sources”**, *Progress in Energy and Combustion Science.* n.31, pp. 242-81, 2005.

KAUFMAN, Y.; BERMAN, A.; FREGER, V. **Supported lipid bilayer membranes for water purification by reverse osmosis.** *Langmuir* 26:7388–7395, 2010.

LANDABURU-AGUIRRE, J., GARCÍA-PACHECO, R., MOLINA, S., RODRÍGUEZ-SÁEZ, L., RABADÁN, J., GARCÍA-CALVO, E. ***Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination.*** *Desalination*, v.393, p. 16-30, 2016.

LAWLER, W., ALVAREZ-GAITAN, J., LESLIE, G., LE-CLECH, P. **Comparative life cycle assessment of end-of-life options for reverse osmosis membranes.** *Desalination*, v.357, p. 45-54, 2015.

LAWSON, K.W.; LLOYD, D.R. **Membrane distillation. I. Module design and performance evaluation using vacuum membrane distillation.** *J. Membrane. Sci.*, v. 120, p. 111-121, 1996.

LEE, K. P. et al. **A review of reverse osmosis membrane materials for desalination - Development to date and future potential.** *Journal Of Membrane Science*, [s.l.], v. 370, n. 1-2, p.1-22, 2011.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo.** Piracicaba: EDUSP. 344p., 2005.

LIOR, N. **Sustainability as the quantitative norm for water desalination impacts.** *Desalination* 401. 99–111, 2017.

SON, M.; PARK, H.; LIU, L.; CHOI, H.; KIM, J.H.; CHOI, H. **Thin-film nanocomposite membrane with CNT positioning in support layer for energy harvesting from saline water.** *Chem. Eng. J.* 284, 68–77, 2016

MAHMOUD, S.; RIFFAT, S. B. **Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources.** *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Volume 9, Issue 1, Pages 1–19, 2012

MARENGO, J.A. **Mudanças Climáticas Globais e seus efeitos sobre a biodiversidade: caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XXI.** Brasília, DF: MMA. 2006.

MCCUTCHEON, J., MCGINNIS, R.L., ELIMELECH, M. **A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process.** Desalination 174, pp. 1-11, 2005.

MCCUTCHEON, J., MCGINNIS, R.L., ELIMELECH, M. **Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: influence of draw and feed solution concentrations on performance on process performance.** J. Memb. Sci., 278, pp. 114-123, 2006.

MEHTA, D., GUPTA, L., CHINGRA, R. **Forward Osmosis in India: Status and Comparison with Other Desalination Technologies.** India. 2014. Disponível em: <<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4897452/>>.

MISSIMER, T. M.; MALIVA, R. G. **Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls.** Desalination 434, 198–215. 2018.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Água: Um recurso cada vez mais ameaçado.** 2018.

MMA - MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Programa Água Doce.** Ministério do Meio Ambiente. 2018

MITRA, S. et al., **Simulation study of a two-stage adsorber system.** Appl. Therm. Eng. 2014.

NAIR, R.R.; WU, H.A.; JAYARAM, P.N.; GRIGORIEVA, I.V.; GEIM, A.K. **Unimpeded permeation of water through helium-leak-tight graphese-based membranes.** Science 27. 442–444, 2012.

NWC - NATIONAL WATER COMMISSION. **Emerging trends in Desalination: A review.** Waterlines Report Series NO. 9. Caberra. Autralia: National Water Commission. 2008.

OASYS. **Oasys Water Forward Osmosis**. 2014. Disponível em:<Oasys Water Forward Osmosis>. Acesso em: 08 jun. 2018

ORTEGA-BRAVO, J. C. et al. **Forward osmosis: Evaluation thin-film-composite membrane for municipal sewage concentration**. Chemical Engineering Journal, v. 306, p. 531-537. 2016.

PEÑATE, B. GARCÍA-RODRÍGUEZB,L. **Current trends and future prospects in the design of seawater reverse osmosis desalination technology**. Desalination 284. 2012.

PENDERGAST, M. M.; HOEK, E. M. **A review of water treatment membrane nanotechnologies**. Energy Environ. Sci, 4, 1946–1971, 2011.

PAD - PROGRAMA ÁGUA DOCE. **Documento Base**. MMA - Ministério do Meio Ambiente. 2012

RAO, H. **Desalination of underground water**. Disponível em:<<https://www.slideshare.net/HimanshuRao2/desalination-hr>>. 2014.

ROCHA-FILHO, R. C. **Nobel 2003: Canais de Água e de Íons: Processos da Vida na Escala Molecular**. Disponível em:< <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc18/A02.PDF> >. 2003.

SACHIT, D.E. VEENSTRA, J.N. **Analysis of reverse osmosis membrane performance during desalination of simulated brackish surface waters**. J. Membr. Sci. 453. 136–154. 2014.

SARAIVA. R. **Empowering brazilian northeast rural communities to desalinated drinking water access: Programa Água Doce**. 2018

SEMIAT, R. **Energy issues in desalination processes**. Environ. Sci. Technol., 42. pp. 8193-8201. 2008.

SIEW, Y. **Forward osmosis draw solutions and draw solution recovery methods**. ForwardOsmosisTech. Disponível em:<<http://www.forwardosmosistech.com/forward-osmosis-draw-solutions-and-draw-solution-recovery-methods/>>. 2018.

SOARES, T. M.; SILVA, I. J. O.; DUARTE, S. N.; SILVA, E. F. F. **Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa**. Revista Brasileira Engenharia Agrícola. Ambiental, v.10, n.3, p. 730 – 737. 2006.

SUBRAMANI,A.; JACANGELO, J. **Emerging desalination technologies for water treatment: A critical review**. Water Research Volume 75. Pages 164-187, 2015.

SUI, H. et al. **Structural basis of water-specific transport through the AQP1 water channel**. Nature 414:872–878. 2001.

STRATHMANN, H. Assessment of Electrodialysis Water Desalination Process Costs. Disponível em:<https://www.researchgate.net/publication/267765712_Assessment_of_Electrodialysis_Water_Desalination_Process_Costs>. 2004.

STRATHMANN, H. **Electrodialysis and Related Processes**. In: Workshop CEE-Brazil on Membrane Separation Processes. Rio de Janeiro, 1992. p. 334-437.

UN - United Nations. **World Ocean Assessment**. Chapter 28: Desalination. 2016

UNESCO. **Soluções baseadas na natureza para a gestão da água**. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos. Disponível em:<<http://unesdoc.unesco.org/images/0026/002615/261579por.pdf>>. 2018.

VOUTCHKOV, N. **Desalination - Past, Present and Future**. IWA - International Water Association. 2016. Disponível em: <<http://www.iwa-network.org/desalination-past-present-future/>>.

WARSINGER, D. **Nanoengineering and Thermofluids for the Water-Food-Energy Nexus**. 2017. Disponível em: <<https://nanohub.org/resources/26190/watch?resid=26191> >. Acesso em: 01 jul. 2018.

WHO. **Desalination for Safe Water Supply**. Public Health and the Environment World Health Organization Geneva. Disponível em: <http://www.who.int/water_sanitation_health/gdwqrevision/desalination.pdf>. 2009. 2009.

YOUNOS, T. TULOOU, K. E. **Overview of Desalination Techniques**. Journal of Contemporary Water Research & Education Issue. 2005. p. 3-10, Universities Council on Water Resources. Disponível em: <<http://www.ucowr.siu.edu/updates/132/2.pdf>>.

ZANATI, E.; KHATIB, K.M. **Integrated Membrane - Based Desalination System**. Desalination 205. 15–25, 2007.

ZHAO, S.; ZOU, L.; TANG, C. Y.; MULCAHY, D. **Recent developments in forward osmosis: opportunities and challenges**, J. Membr. Sci. 396. 2012. 1–21.