

A QUESTÃO DO REJEITO DA DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA

João Gabriel Pereira Mendonça – johnegabriel100@gmail.com

Luiz Gustavo Accacio Guedes - Gustavo_accacio@hotmail.com

Liliane Frosini Armelin (Orientador) – liliane.armelin@mackenzie.br

RESUMO / ABSTRACT (NO IDIOMA DO DOCUMENTO – PORTUGUÊS OU INGLÊS)

A dessalinização de água do mar ou água salobra gera um rejeito, que possui alto impacto negativo sobre um ambiente, por possuir alto teor de sal. Diante disso, locais de destinação e sistemas de tratamento são estudados e desenvolvidos, com o intuito de maximizar a recuperação de água potável e minimizar os impactos adversos no ambiente de destinação desse rejeito. Este trabalho apresenta as destinações utilizadas, atualmente, em todo o mundo, suas vantagens e desvantagens, os aspectos considerados na escolha da destinação com melhor custo-benefício e as utilizações do rejeito salino no cultivo de verduras e na criação de tilápias, que geram retorno social e econômico. Em seguida, apresenta-se as tecnologias de dessalinização, que servem como sistemas de tratamento dessa água salina, suas vantagens e desvantagens, suas performances na recuperação de água potável, conforme teor salino da água e seus respectivos custos. Finalmente, o artigo analisa os impactos das tecnologias apresentadas, faz um comparativo de custos de fornecimento de água potável e traz uma perspectiva de avanço nos estudos e desenvolvimento de novos sistemas e destinações para os próximos anos.

Palavras-chave: Rejeitos. Dessalinização. Custos.

THE QUESTION OF DESALINATION TAILINGS OF WATER

ABSTRACT / RESUMO (EM OUTRO IDIOMA - INGLÊS OU PORTUGUÊS)

The desalination of seawater or brackish water generates tailings, which has a high negative impact on an environment, due to its high salt content. Therefore, disposal sites and treatment systems are studied and developed, with the aim of maximizing the recovery of drinking water and minimizing the adverse impacts on the waste disposal environment. This paper presents the destinations currently used throughout the world, their advantages and disadvantages, the aspects considered in choosing the most cost-effective destination and the uses of saline waste in the cultivation of vegetables and in the rearing of tilapia, which generate returns social and economic. Then, the desalination technologies, which serve as treatment systems for this saline water, are presented, their advantages and disadvantages, their performance in the recovery of drinking water, according to the saline content of the water and their respective costs. Finally, the article analyzes the impacts of the

technologies presented, makes a comparison of drinking water supply costs and brings a perspective of progress in the studies and development of new systems and destinations for the coming years.

Keywords: Tailings. Desalination. Costs.

1 INTRODUÇÃO

No século 21, a escassez de água potável é uma realidade. Do total de 1,384 sextilhão de litros de água no mundo, apenas 1%, aproximadamente, é considerado próprio para consumo humano e desse percentual, distribui-se 0,60% em águas subterrâneas, 0,015% lago e rios, 0,005% umidade do solo, 0,0009% vapor na atmosfera e 0,00004% em matéria viva. Diante dessa situação atual, o ser humano busca constantemente novas formas de obtenção de recursos e meios de preservação da natureza, mesmo com a acelerada empreitada na evolução da tecnologia e da produção de contaminantes por fábricas e indústrias, que por sua vez utilizam água para produção de seus produtos e em sua maioria contaminam o meio ambiente de alguma forma.

Devido a este cenário, a utilização da dessalinização por meios alternativos conta com a possibilidade, que hoje é viável e prática, de utilizar a água do mar e salobra, com alto teor de sais minerais como o sódio, imprópria para consumo, e transformá-la em um elemento incolor, inodoro e insípido para consumo dos seres vivos ou qualquer outra utilidade.

O histórico da dessalinização inicialmente se deu pelo processo de destilação artificial, apenas em 1950 iniciou-se o desenvolvimento da dessalinização por meio da osmose reversa com os cientistas Reid e Breton. Próximo ao ano de 1960, os pesquisadores S. Loeb e S. Sourirajan projetaram o que seria o início dos processos de dessalinização, foi a primeira membrana utilizada na osmose reversa, chamada como membrana de acetato de celulose assimétrica.

No Brasil, assim como em outros países existem muitos métodos para a dessalinização da água, e os mais utilizados atualmente, são aqueles que retiram os sais dissolvidos por tecnologias de membranas e processos térmicos, ambos com vantagens e desvantagens. A decisão sobre qual sistema deve ser adotado depende das características do local, bem como das pessoas que irão operá-lo havendo a necessidade de uma avaliação entre complexidade, instalação, manutenção, eficácia e eficiência do sistema na adotado.

Mesmo com a constante diminuição nos custos da dessalinização, graças aos avanços tecnológicos, é comum se deparar com despesas altas dependendo do método escolhido, em países como Austrália e no Oriente Médio essas alternativas possuem uma relevância ainda maior pois mais da metade do consumo de água potável é obtida por meio de dessalinização. Nesse contexto é possível afirmar que alguns países dependem da dessalinização para o provimento de recursos hídricos para suas populações, mesmo que estes invistam abundantemente nesses sistemas.

A água é considerada um símbolo precioso que poucas nações possuem em abundância sendo um fator cultural que qualifica a vida da população. Além de um recurso natural de valor imensurável é um insumo indispensável à produção, sendo um elemento vital para a sobrevivência e manutenção dos ciclos biológicos, geológicos e químicos, equilibrando os ecossistemas. Diante desse quadro de dependência, são produzidos métodos ou sistemas físico-químicos que retiram sais da água, transformando água salobra e salina em potável para o consumo e, portanto, a dessalinização é considerada uma alternativa que possibilita à humanidade um acréscimo da quantidade desse recurso, contribuindo para a solucionar o problema de abastecimento global. Porém, um dos desafios enfrentados que deve ser considerado, é a destinação dos rejeitos desses muitos processos. A partir desses problemas, é possível mensurar e solucionar, de forma ambientalmente correta, a destinação de rejeito gerado por cada tipo diferente de método de dessalinização?

O objetivo geral da pesquisa é estudar o rejeito de cada sistema de dessalinização quantificando, avaliando os danos ao meio ambiente e vislumbrando formas de utilização minimizando o impacto causado. Os objetivos específicos da pesquisa são: levantar os métodos de dessalinização, a quantidade de rejeito gerada em cada sistema dessalinizado e levantar formas sustentáveis e inovadoras na destinação final do rejeito salino.

2 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho foi a de pesquisa bibliográfica. Existem muitos artigos técnicos, trabalhos de pós-graduação e publicações sobre a dessalinização de água como alternativa à escassez hídrica que muitas regiões do planeta têm vivenciado nos últimos anos, além daquelas que sempre tiveram que contar com esta tecnologia, como as regiões desérticas, porém pouca importância foi dada à questão do rejeito salino, denominado concentrado, proveniente das plantas de dessalinização. Com o aumento da utilização de sistemas de dessalinização por todo o mundo, gera-se um grande volume de rejeito salino e a preocupação onde descartaremos ou utilizaremos esse rejeito. Atualmente, temos poucos estudos no mundo sobre a destinação do rejeito e os impactos sobre o ambiente da opção utilizada.

Neste contexto, optou-se por conhecer sobre como os demais países estão resolvendo a questão do rejeito salino de seus sistemas de dessalinização de água, a eficiência e o custo destas soluções. Segundo PANAGOPOULOS (2019), as principais destinações tem sido a descarga em águas superficiais, descarga nos sistemas de esgoto, injeção em poços profundos, lagoas de evaporação e na agricultura.

2.1 DESTINAÇÃO FINAL DO REJEITO DA DESSALINIZAÇÃO

“A escolha da melhor opção para se dispor o rejeito da dessalinização deve atender, dentre outros fatores, às disponibilidades locais (terra, compatibilidade das águas receptoras e distância), às disponibilidades regionais (geologia, leis estaduais, geografia e clima), ao volume de concentrado, aos custos envolvidos, à opinião pública e à permissibilidade.” (MICKLEY, 2004 apud SOARES, 2006).

2.1.1 DESCARTE EM ÁGUAS SUPERFICIAIS

É a destinação mais utilizada no mundo, principalmente nos países desenvolvidos com sistemas litorâneos. Consiste no descarte do rejeito salino em águas superficiais, como rios, lagos e mares. (PANAGOPOULOS, 2019). Têm como principais vantagens, fácil descarte, suportar qualquer volume de rejeito e baixos custos, porém exige preocupações com compatibilização ou diluição com a água receptora em casos de grandes volumes e estudos sobre o impacto no ecossistema aquático das águas receptoras (SOARES, 2006).

2.1.2 DESCARTE EM SISTEMAS DE ESGOTO

É o método que o descarte do rejeito salino é feito em esgotos. Têm como principal vantagem fácil descarte, por se tratar de uma estrutura já existente, porém deve ter um estudo prévio sobre o volume e compostos do rejeito que possam prejudicar o tratamento do esgoto, em casos, precisando-se de pré-diluição, pré-tratamento, pagamento de impostos e custos com estrutura de acesso ao esgoto. Usual para sistemas localizados no interior do continente (SOARES, 2006).

2.1.3 INJEÇÃO EM POÇOS PROFUNDOS

Consiste no método que injeta o produto da dessalinização em poços profundos. Segundo Soares (2006), restringe-se a grandes sistemas de dessalinização, por ter grandes custos, e depende das características hidrogeológicas, como o tipo do solo, vazão de poço e outras características que garantem o bom aproveitamento do solo e sua manutenção).

2.1.4 LAGOAS DE EVAPORAÇÃO

É o método que descarta o rejeito em lagoas de evaporação, em que há a evaporação gradual da salmoura por energia solar. (RODRÍGUEZ et al., 2012 apud PANAGOPOULOS, 2019). Têm como principais vantagens a fácil implementação e manutenção, porém o rejeito gera um acúmulo de

elementos tóxicos, como selênio, boro e metais pesados para o ecossistema da lagoa (peixes, aves aquáticas e invertebrados). A figura 1 mostra um exemplo de lagoas de evaporação (SOARES, 2006).

Figura 1: Lagoas de Evaporação

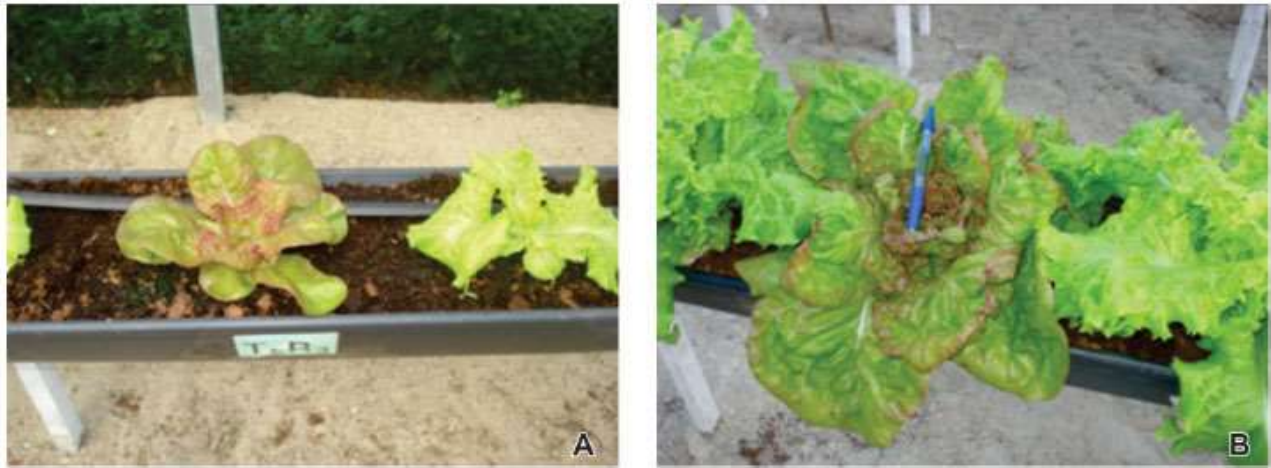


Fonte: Google Imagens. Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-lagoa-da-evapora%C3%A7%C3%A3o-de-sal-image50208110>

2.1.5 AGRICULTURA

O método de descarte na agricultura é utilizado em casos de pequenos volumes de rejeito, tem grandes vantagens e versatilidade de usos em culturas e vegetação, em irrigação de campos, gramados, parques, em que o volume de rejeito é misturado com água, com o intuito de diminuir a salinidade. As halófitas são as melhores opções para receber o rejeito (RITLEY, 1997 apud SOARES, 2006), pois elas têm uma grande tolerância aos sais. O rejeito pode ser utilizado no cultivo de Alface, conforme ilustrado na figura 2, em criação de Tilápias e no cultivo da Erva-sal, que é utilizada para engordamento de caprinos (BEZZERA, 2019). Tem como grandes restrições a necessidade de uma grande disponibilidade de terras e estudos de impacto sobre a agricultura receptora.

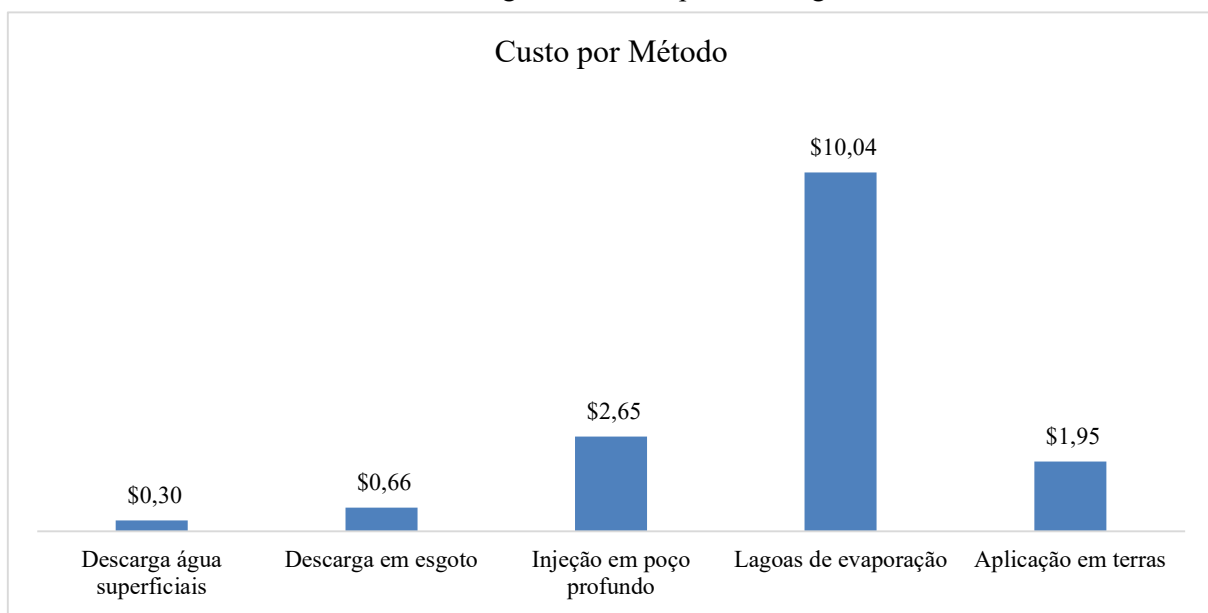
Figura 2: Cultivo de Alface com rejeito de dessalinização



Fonte: DIAS (2011)

Esses sistemas requerem um custo financeiro por m³ tratado para serem aplicados que são apresentados na Figura 3.

Figura 3: Custos por tecnologias atuais



Fonte: Modificado de (PEGANOPOULOS, 2019)

2.2 SISTEMAS DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA

Outras tecnologias têm surgido para o enfrentamento do problema do concentrado e dentre estas, aquelas voltadas à recuperação do máximo possível de água, dentro do rejeito salino. As técnicas relacionadas abaixo, utilizam membranas para a separação:

- Osmose reversa;
- Osmose reversa de alta pressão;
- Osmose direta;
- Osmose reversa assistida osmoticamente;
- Destilação por membrana;
- Eletrodialise;

A Osmose Reversa e Osmose Reversa de alta pressão, sistemas de dessalinização mais utilizados no Mundo são utilizados também para tratar o rejeito, consistindo na aplicação de pressão hidráulica ao compartimento de superior concentração de sal, forçando as moléculas de água a se moverem através de uma membrana semipermeável para um compartimento de menor concentração de sal. (MOURA et al. 2008). Tem como principal vantagem o baixo consumo de energia, baixos custos de implementação e operação e implantação em pequenos espaços, porém é um sistema que possui baixa eficácia de purificação da água, possíveis custos com reposição de membranas e a necessidade de um pré-tratamento da solução para evitar problemas de incrustações (TORRI, 2015).

A Osmose direta consiste em uma solução de concentração notavelmente alta (referida como a “solução de extração”) usada para produzir um gradiente de pressão osmótica através de uma membrana semipermeável, resultando no transporte de moléculas de água da alimentação da solução menos concentrada de salmoura para a solução de extração altamente concentrada. (SIGNORELLI, 2015). Segundo Peganopoulos (2019), tem como principais vantagens o baixo consumo de energia, a alta rejeição de contaminantes e baixas possibilidades de incrustações, porém precisa de um pré-tratamento da solução para evitar descamação e problemas de incrustações

Já a Osmose Reversa assistida osmoticamente, é a aplicação de pressão hidráulica para transportar moléculas de água através de uma membrana semipermeável, mas, neste caso, uma menor solução é adicionada ao sistema para diminuir a diferença na pressão osmótica. Esta modificação, aumenta o fluxo de água e uma série de estágios consecutivos são usados para aumentar o limite de concentração de TDS de entrada a partir do qual a água doce pode ser recuperada. Tem como principais vantagens o baixo consumo de energia, a alta rejeição de contaminantes e baixas possibilidades de incrustações, porém precisa de um pré-tratamento da solução para evitar descamação e problemas de incrustações (PEGANOPOULOS, 2019).

A Destilação por Membrana é um sistema que usa uma membrana termicamente controlada por tecnologia. É baseado em um gradiente de pressão de vapor que pode ser produzido pelo diferencial de temperatura através da membrana microporosa hidrofóbica. A natureza hidrofóbica da membrana impede moléculas líquidas de se moverem através dos poros, enquanto permitem o vapor das moléculas para passar. Assim, a separação é alcançada ao permitir a recuperação de uma água

doce de alta pureza. Tem como principais vantagens o baixo consumo de energia, a alta rejeição de contaminantes, baixas possibilidades de incrustações e possibilidade de utilização energia térmica de baixo grau, como por exemplo a geotérmica, permitindo reduzir custos operacionais e emissão de carbono, porém precisa de um pré-tratamento da solução para evitar deterioração das membranas e problemas de incrustações (PEGANOPOULOS, 2019).

Segundo Torri (2015), a Eletrodialise e Reversão de Eletrodialise (ED / EDR) é baseada no transporte seletivo de íons em soluções e usa um gradiente de tensão elétrica aplicada para conduzir cátions e ânions em direções opostas através de membranas semipermeáveis. Uma pilha ED convencional contém uma série de membranas de troca catiônica (MTC) e membranas de troca aniônica (MTA) alternadas entre um cátodo e um ânodo. Cátions são movidos em direção ao cátodo carregado negativamente, enquanto os ânions são movidos em direção ao ânodo carregado positivamente. Assim, as soluções de água doce e salmoura concentrada são separadas. Tem como principais vantagens a eficácia em salmoura com alto teor de Sílica e baixas possibilidades de incrustações, porém pode precisar de pré-tratamento adicional em caso de incrustações orgânicas na membrana (PEGANOPOULOS, 2019).

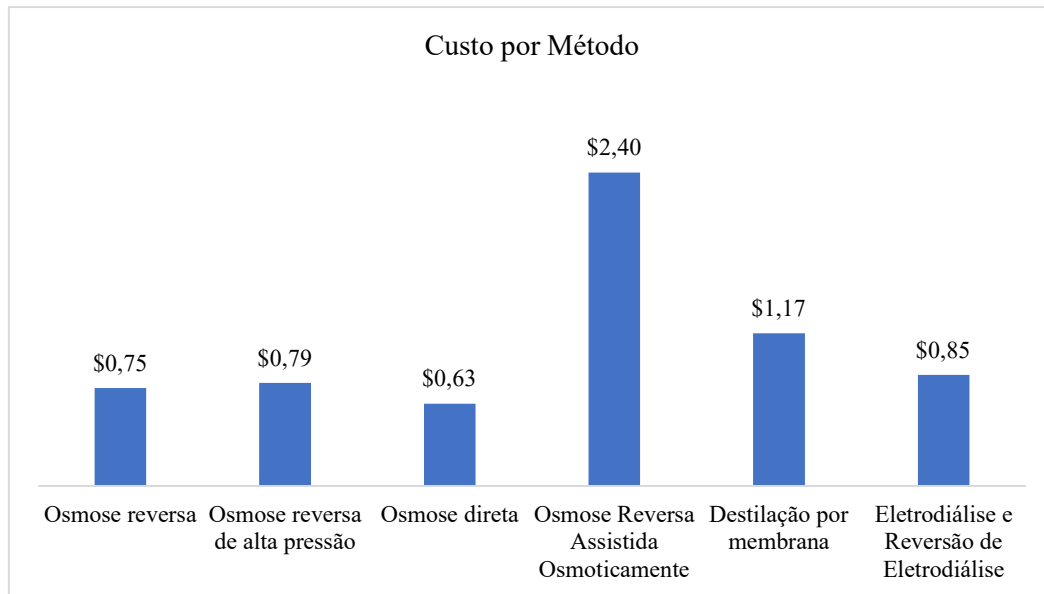
As limitações desses processos estão relacionadas à capacidade máxima de sólidos dissolvidos totais (TDS), a qual se ultrapassada resultará em perda considerável da eficiência na recuperação da água, conforme informado na Tabela 1. Ressalta-se que o TDS de uma água para consumo humano é de até 600 mg / L, de acordo com a OMS. Esses sistemas requerem um custo financeiro para serem aplicados e são apresentados na Figura 4.

Tabela 1: Tratamento do rejeito por tecnologias de membrana

Processo	Capacidade máxima TDS	Recuperação máxima da água (%)
Osmose reversa	70.000 mg / L	Até 50
Osmose reversa de alta pressão	120.000 mg / L	Até 50
Osmose direta	200.000 mg / L	Até 98
Osmose Reversa Assistida Osmoticamente	140.000 mg / L	Até 72
Destilação por membrana	350.000 mg/L	Até 90
Eletrodialise e Reversão de Eletrodialise	200.000 mg/L	Até 86

Fonte: Modificado de (PEGANOPOULOS, 2019)

Figura 4: Custos por tecnologias por membranas por m3 de rejeito a ser tratado.



Fonte: Modificado de (PEGANOPOULOS, 2019)

As tecnologias de base térmica são mais complexas e utilizam a elevação ou redução da temperatura para auxiliar na remoção dos sais. Os materiais dos equipamentos têm custos elevados devido a sua alta resistência à corrosão. Esses métodos são realizados por:

- Concentrador e cristizador de salmoura;
- Destilação flash de vários estágios e destilação de múltiplos efeitos;
- Cristalização por congelamento eutético.

O concentrador e cristizador de salmoura consiste na salmoura de alimentação submetida a um trocador de calor que eleva a temperatura da salmoura no ponto de ebulição e então segue para um desaerador que remove os gases não condensáveis. A salmoura é então inserida no cárter do evaporador e misturado com a pasta de recirculação. A pasta de salmoura é bombeada para o topo do concentrador e flui para um feixe de tubos de transferência de calor. A salmoura que flui cria uma película fina sobre a superfície do tubo interno, onde ocorre a evaporação da água. Uma porção da salmoura evapora e se move através dos eliminadores de névoa, antes de ser inserida no compressor de vapor, no qual o calor extra é adicionado. Subsequentemente, o vapor do compressor passa para o exterior do evaporador, onde seu calor é transferido para a salmoura mais fria que cai dentro do tubo. Tem como principais vantagens a tecnologia própria para salmoura com alto TDS e a água do produto é de alta qualidade ($TDS < 20 \text{ mg / L}$), porém existem altos custos de capital devido aos materiais caros (aço inoxidável ou titânio) necessários para evitar corrosão (PEGANOPOULOS, 2019).

Já a Destilação flash de vários estágios e destilação de múltiplos efeitos tem salmoura de alimentação pré-aquecida utilizando vapores de condensação do flash de unidades e atinge conclusivamente uma temperatura máxima (até 120°C) com uma fonte de calor externa, o aquecedor

de salmoura. O calor da salmoura de alimentação é transferido através de pressão de vapor sucessivamente mais baixa (e temperatura) de unidades de flash em que uma porção da solução de alimentação é evaporada e condensada nos trocadores de pré-aquecimento de alimentação. Assim, o vapor de água condensado é a água doce, enquanto o concentrado salmoura é o líquido que sai da unidade de flash final da série. (TORRI, 2015). Segundo Peganopoulos (2019), tem como principais vantagens que o sistema pode ser atualizado ou melhorado para tratar alto teor de TDS, a água do produto é de alta qualidade e possibilidade de utilização energia térmica de baixo grau, incluindo geotérmica ou desperdício de calor, permitindo reduzir custos operacionais e emissão de carbono, porém pode precisar de pré-tratamento adicional em caso de incrustações nas paredes internas do equipamento e existem altos custos de capital devido aos materiais caros (aço inoxidável ou titânio) necessários para evitar corrosão.

Cristalização por congelamento eutético é que cada solução salina possui um ponto eutético (PE). O PE é um ponto particular no diagrama de fases de uma mistura de água salgada em que existe um equilíbrio entre gelo, sal e uma concentração específica da solução. Essa concentração específica é chamada de "concentração eutética" (CE) e a temperatura de equilíbrio é chamada de "temperatura eutética" (ET). Especificamente, a Cristalização por congelamento eutético é operado no PE, no qual o gelo e o sal se cristalizam. Tem como vantagens a não necessidade de adição de produtos químicos e a baixa possibilidade de corrosão por operar a baixas temperaturas, porém forma uma escama de gelo na camada do cristizador e possui alto custo de implantação (PEGANOPOULOS, 2019).

As tecnologias térmicas possuem alta capacidade de recuperação de água, porém existem empecilhos que impossibilitam ou inviabilizam essa recuperação, conforme ilustrado na Tabela 2.

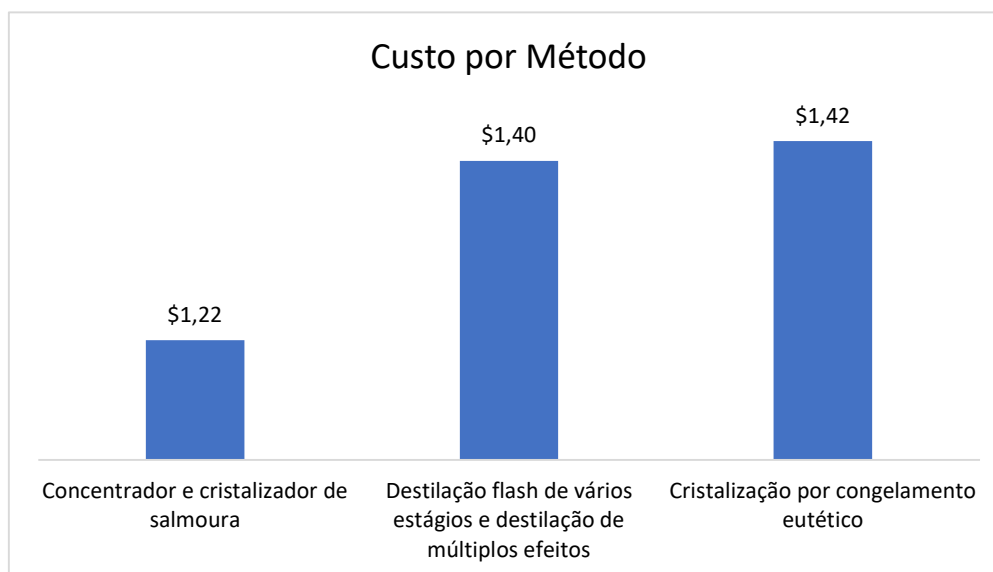
Tabela 2: Tratamento do rejeito por tecnologias térmicas

Processo	Capacidade máxima TDS	Recuperação máxima da água (%)
Concentrador e cristizador de salmoura	250.000 e 300.000 mg / L	Até 99
Destilação flash de vários estágios e destilação de múltiplos efeitos	180.000 mg / L	Até 90
Cristalização por congelamento eutético	250.000 mg / L	98 até 100

Fonte: Modificado de (PEGANOPOULOS, 2019)

Esses sistemas requerem um custo financeiro para serem aplicados e são apresentados na Figura 5.

Figura 5: Custos por tecnologias térmicas por m³ de rejeito tratado



Fonte: Modificado de (PEGANOPOULOS, 2019)

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 PROCESSO E MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO

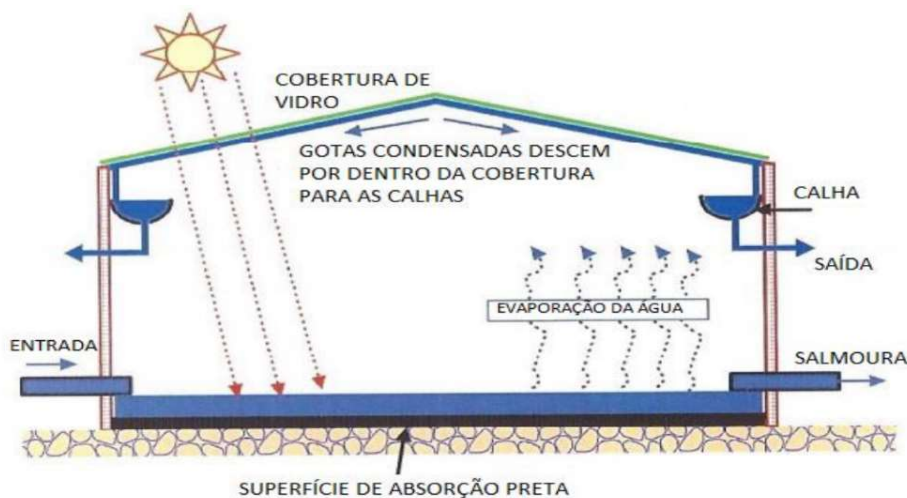
A dessalinização de água tem sido cada vez mais aplicada em nosso planeta e conseqüentemente, novas tecnologias e processos tem surgido em vários países dentro do contexto da escassez de água. Segundo MOURA et al. (2008), existem diversos métodos de purificação de água e os mais utilizados atualmente, são aqueles que retiram os sais dissolvidos através de processos térmicos e com tecnologias de membranas.

3.1.1 Destilação solar

A destilação solar é um processo de dessalinização térmico, que consiste é na utilização da luz solar para realizar a dessalinização. É um processo similar ao ciclo da água, em que os raios solares aquecem a água que apresenta altas concentrações de sais como a água dos oceanos ou subterrânea, esta passa do estado líquido para o gasoso. Consiste na construção de grandes tanques de vidro ou outro material transparente, a luz solar atravessa esse vidro, aquecendo a água do tanque até sua evaporação, essa se condensa na parte interna do vidro e escorre para um sistema de

recolhimento (BEZERRA et al. 2019). A figura 6 mostra um sistema desse tipo. As vantagens desse sistema são o baixo custo com energia e a não agressão ao meio ambiente; porém há problemas na vedação do tanque, custos com energia adicional de bombeamento de água no sistema e necessidade de grandes áreas para sua implantação são aspectos que podem diminuir a atratividade do sistema (TORRI, 2015). Estudos e implantações cresceram nos últimos anos em vários países, como Arábia Saudita, Austrália, Estados Unidos, Chile e Espanha. No Brasil, foi adaptado e implantado em regiões do semiárido com escassez de água. Comunidades isoladas no estado da Paraíba recebeu o sistema e treinamento para operá-lo.

Figura 6: Diagrama simplificado de um processo de Destilação Solar (SD).



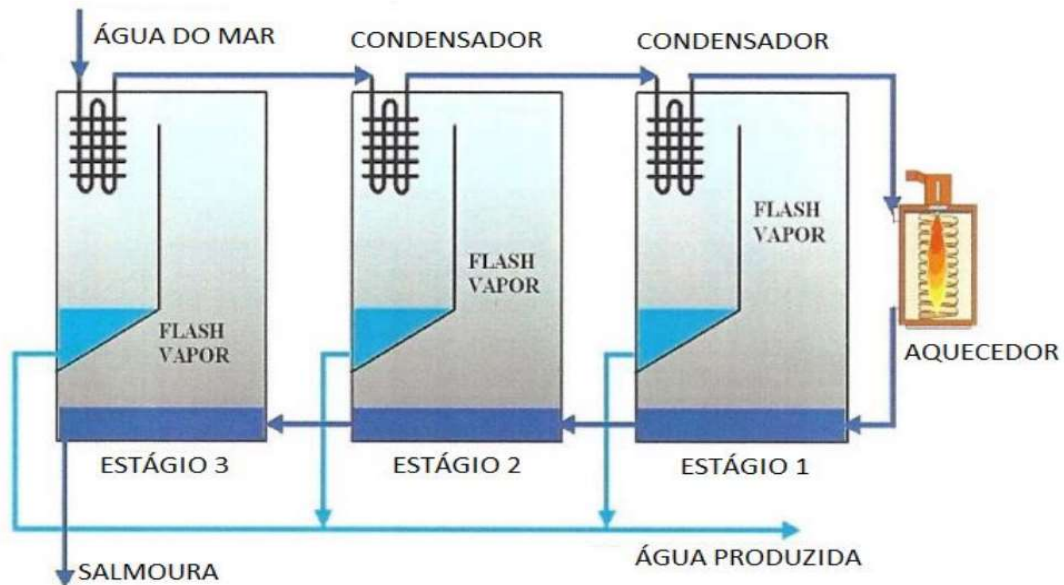
Fonte: Adaptado de Foundation For Water Research (2015) apud TORRI (2015).

3.1.2 Destilação Multiestágios

A destilação multiestágios não possui esse nome por acaso, o sistema consiste no aquecimento da água salgada, aumentando sua pressão e temperatura, e o transporte para um recipiente de menor pressão (estágio), causando uma vaporização imediata; o contato deste vapor com a superfície externa do tubo alimentador do primeiro estágio que contém água fria, provoca a condensação dessa água purificada, que é transportada para o exterior da câmara. O calor latente liberado no primeiro estágio é responsável pelo aquecimento da solução salgada (salmoura) e passa para o segundo estágio, que possui uma pressão ainda menor que a etapa anterior e ocorre vaporização novamente e outra porção de água pura é condensada. A figura 7 mostra um diagrama simplificado do funcionamento desse processo. Um sistema de destilação multiestágios pode ter até 40 estágios (TORRI, 2015). Trata-se de uma versão aprimorada do sistema denominado destilação solar e por conta dos vários estágios, acaba ocupando um espaço mais reduzido, no entanto tem funcionamento mais complexo. Esses equipamentos operam com uma temperatura máxima de até 110 °C, o que aumenta sua efetividade,

porém aumenta as possibilidades de ocorrência de incrustações nas paredes internas do equipamento e acelera o processo de corrosão dos materiais metálicos desses equipamentos. Alguns países do Oriente Médio como Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos e Kuwait dependem desse sistema para fornecimento de água para suas áreas urbanas (SINHORI, 2014).

Figura 7: Diagrama simplificado de um processo de Destilação de Multiestágios



Fonte: Adaptado de Foundation For Water Research (2015) apud TORRI (2015).

3.1.3 Eletrodiálise

A eletrodiálise é um processo de dessalinização, que consiste em uma câmara que possui um eletrodo positivo em uma extremidade e outro negativo na outra extremidade. Íons (positivos e negativos) são separados por membranas de troca iônica e migram da água para o eletrodo de sinal oposto. Cada íon tem uma membrana de troca, os cátions, membrana de troca catiônica (MTC) e os ânions, membrana de troca aniônica (MTA). As membranas são posicionadas alternadamente entre os eletrodos e são separadas por espaçadores de fluxo, que são responsáveis pela passagem de água.

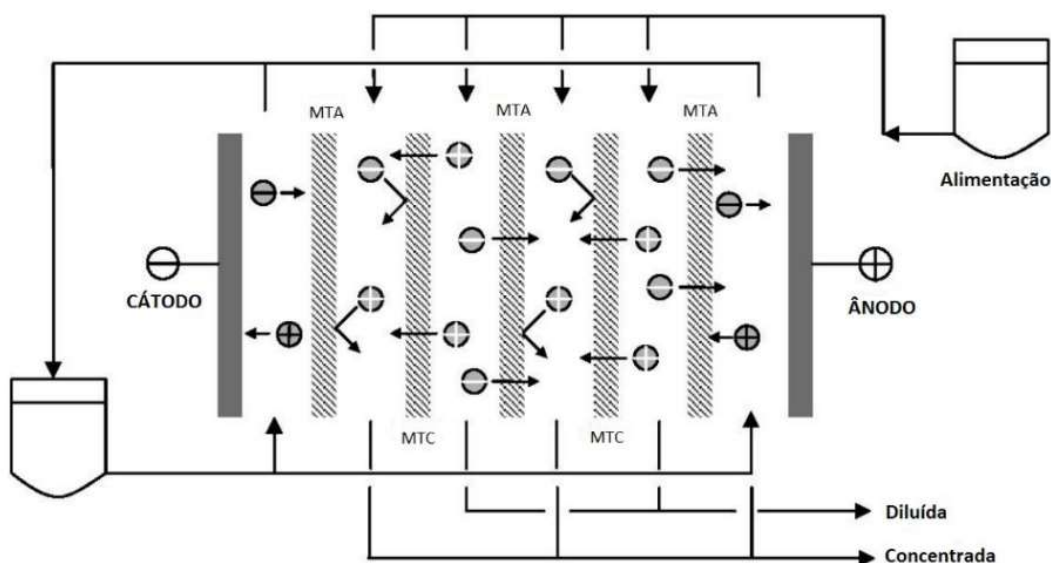
É necessário um pré-tratamento antes da eletrodiálise, como remoção de sólidos maiores que 10 μm , substâncias orgânicas, colóides e alguns óxidos, pois eles podem neutralizar a membrana e comprometer a efetividade desse processo (GUERREIRO, 2009 apud TORRI, 2015). A figura 8 mostra o esquema de funcionamento deste complexo sistema.

3.1.4 Osmose Reversa

A Osmose reversa, atualmente, é o processo de dessalinização mais utilizado no mundo, devido a simplicidade e aos baixos custos de instalação e operação (BEZERRA et al. 2019) e consiste em uma pressão maior que a pressão osmótica aplicada a uma solução salina, essa água atravessa uma membrana semipermeável, a qual possui poros microscópicos, que são responsáveis por reter sais, microrganismos e outras impurezas e passa para uma região de água pura (BEZERRA et al. 2019), conforme representado na figura 9. Os problemas deste sistema com relação à operação é a colmatção das membranas e questões relacionadas às bombas hidráulicas. O rejeito produzido, que consiste em água com concentração maior de sais em relação àquela que se está tratando, está sendo na atualidade um significativo problema ambiental através de seu lançamento em rios, no solo ou em redes coletoras de esgoto, quando o tratamento é realizado distante da costa.

O processo de Osmose reversa não precisa de aquecimento, pois ocorre em temperatura ambiente (TORRI, 2015).

Figura 8: Esquema de um Sistema de Eletrodialíse.



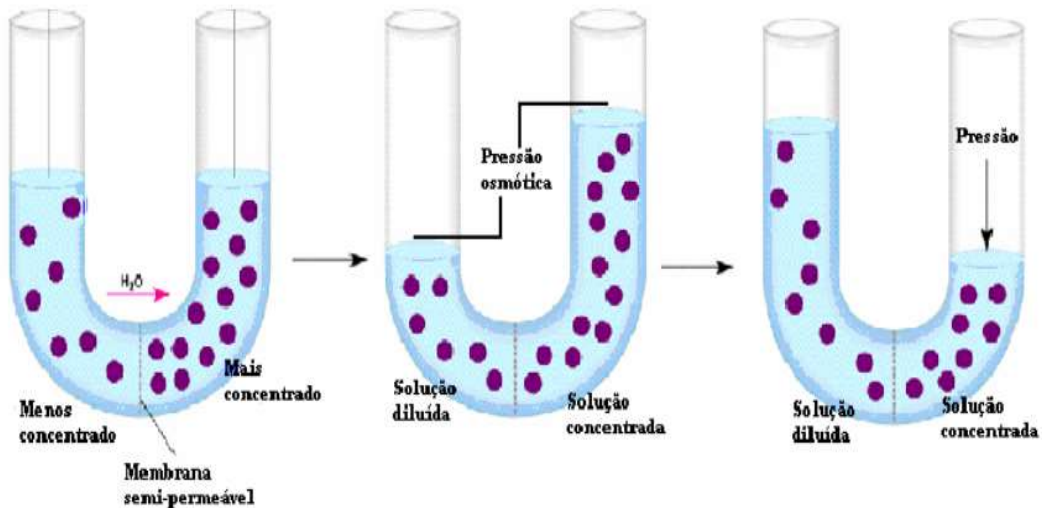
Fonte: Adaptado de Charcosset (2009) *apud* TORRI (2015).

3.1.7 Congelamento

A dessalinização por congelamento é um processo que ainda exige estudos de viabilidade e novas tecnologias; consiste em congelar a água do mar ou salobra, este processo produz gelo puro, ou seja, uma solução sem sais, que ao descongelar, tem-se água doce. O sal se concentra na superfície

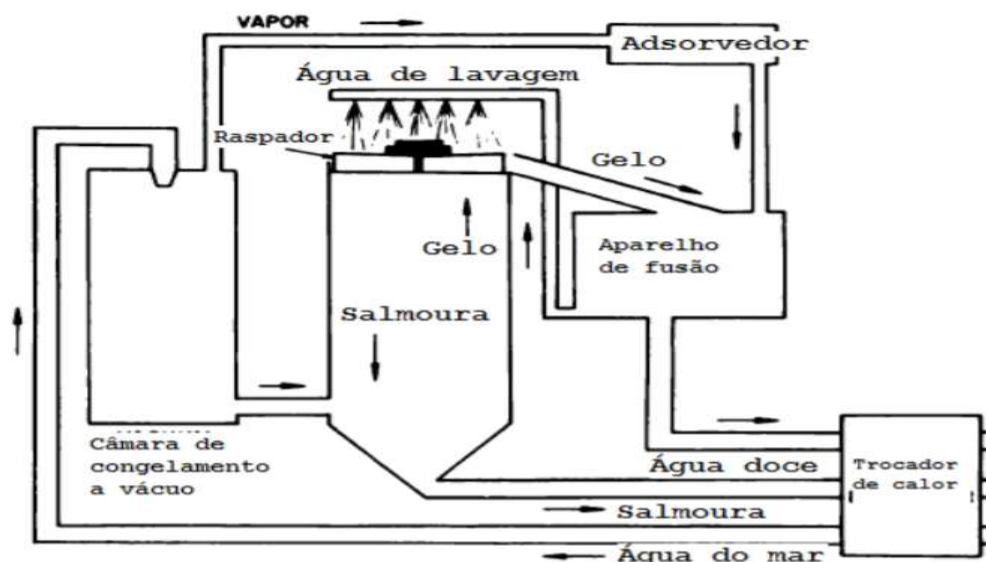
do gelo, precisando lavar o gelo para retirar esses sais e assim o deixar descongelar, conforme indicado na figura 10. Esse processo tem como vantagens a menor necessidade energética para resfriar e congelar a água do que para a evaporar e a baixa possibilidade de incrustações e corrosão, por trabalhar com baixas temperaturas. A maior desvantagem desse processo é o isolamento térmico (SIGNORELLI, 2015) e o alto custo (BEZERRA, 2019).

Figura 9: Representação do processo de Osmose Reversa.



Fonte: MOURA et al. (2008).

Figura 10: Dessalinização por Congelamento.



Fonte: Adaptado de Office of Saline Water (1962) apud SIGNORELLI (2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Diante do aquecimento global que vem acontecendo em nosso planeta, de países e cidades que vivem em secas de chuvas e de locais em que a disponibilidade de água é escassa, a dessalinização de água do mar ou salobra surge como um dos principais meios de fornecimento de água potável de uma determinada região. Porém, com a utilização destes sistemas, é gerado um rejeito com alto teor de sal, que não pode ser descartado em qualquer local. Há a necessidade de estudos de impacto dos locais de destino deste rejeito.

Para a dessalinização da água, tem-se opções para cada nível de TDS e para várias condições climáticas diferentes, como por exemplo, uma água do mar ou salobra que possua um TDS de 350 mg/L, há a necessidade de utilizar o sistema de Destilação por Membrana para se conseguir uma recuperação de água eficiente, ou em um local em que há grande incidência de sol na maior parte do dia, recomenda-se o sistema de Destilação Solar, que possui um baixo custo de implantação, não agride ao meio ambiente e possui boa performance dada essas condições climáticas.

Para a destinação final do rejeito, exige-se um estudo prévio sobre a composição do rejeito, estudos sobre a disponibilidade de terras locais, o volume de concentrado, a distância entre o dessalinizador e o local de destinação do rejeito, estudos de geologia da região, de compatibilização do rejeito com a água receptora e seus ecossistemas ativos, estudos climáticos, econômicos e legislativos da região, com o intuito de escolher a destinação que tenha o melhor custo benefício para a situação em questão, que possa trazer algum retorno para a população e que não impacte negativamente nenhum ecossistema aquático. Recomenda-se a destinação da Agricultura, pois existe a possibilidade de utilização do rejeito no cultivo de plantas halófitas, alface e tilápias, tendo a possibilidade de distribuição em feiras e mercados locais, trazendo retorno econômico.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Existem muitas tecnologias de tratamento do rejeito provenientes de sistemas de dessalinização de água, no entanto as práticas mais utilizadas não consideram tratamento ou recuperação de água doce. Uma das formas mais utilizadas de descarte é em águas superficiais e isso ocorre porque as grandes plantas estão próximas aos oceanos, de onde captam a água salgada, aplicam a dessalinização retornando o rejeito para o próprio oceano. Como dito anteriormente, podem não ocorrer impactos preocupantes na flora e fauna, caso seja um ambiente aberto favorável a diluição. Muitas usinas localizam-se no mar Vermelho que não tem uma grande capacidade de troca de água com o oceano aberto.

Despejos em rios ou rede coletoras de esgotos são situações corriqueiras, ao contrário do esperado. Essas ações contam com a capacidade de diluição destes corpos receptores.

Destaca-se a aplicação em terras visando a agricultura voltada para plantas halófitas que podem ser usadas como forrageiras ou para a alimentação de seres humanos, consistindo em uma alternativa interessante, uma vez que a produção de alimentos tem se tornado uma questão preocupante devido ao aumento da população do planeta que não tem sido acompanhado pelo aumento de terras de cultivo.

As várias tecnologias que utilizam membranas para o tratamento do rejeito, recuperam de 50 a 98% de água doce, apresentando algumas limitações como suportar uma certa quantidade máxima de sólidos totais dissolvidos (TDS) além da necessidade de pré ou pós tratamento dependendo do tipo de sais presentes. Os custos de tratamento variam de 0,60 dólar por m³ de rejeito tratado até 2,40 dólar. O preço médio da dessalinização está em torno de 1,15 dólar /m³ de água doce produzida configurando que os custos para tratar o rejeito podem ser elevados, comparado com 1,95 dólar/m³ da tarifa média do fornecimento de água de 17 grandes cidades espalhadas pelo mundo (SABESP, 2016).

As tecnologias de base térmica são muito eficazes na recuperação da água doce, acima de 90% do volume tratado. São técnicas complexas e apresentam custos altos de implantação, produzindo água doce também com custo elevado entre 1,22 e 1,42 dólar por m³ de salmoura tratada. E ainda resta a décima parcela de um líquido com concentrações elevadas de sais que também precisa de alguma forma ter uma destinação final.

Espera-se que nos próximos anos, muitas mais tecnologias de dessalinização sejam estudadas e desenvolvidas, com o intuito de maximizar a recuperação de água, conseqüentemente, diminuição do volume de rejeito, porém com um alto teor salino, gerando a necessidade de aumentar estudos de impacto dos locais de destinação desse rejeito.

REFERÊNCIAS

- BEZERRA, Vanessa Rosales et al. Reutilização de rejeito de dessalinizadores na Paraíba. **Mix Sustentável**, Florianópolis, v. 5, n. 1, p. 105-116, 2019. Disponível em: < <https://ojs.sites.ufsc.br/index.php/mixsustentavel/article/view/3392/2672>. > Acesso em: 18 abr. 2021.
- MOURA, J P et al. **Aplicações do processo de osmose reversa para o aproveitamento de água salobra do semi-árido nordestino**. 2008. 25 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Laboratório de Dessalinização, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2008. Disponível em: < <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23343/15435>. > Acesso em: 18 abr. 2021.
- NUVOLARI, Ariovaldo et al. **o Estudo do Binômio Vácuo – Temperatura em Ensaios de Dessalinização de águas salobras e salinas por meio de Destilação Térmica**. 2012. 7 f. tese (doutorado) - Curso de Engenharia, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Fatec, São Paulo, 2012. Disponível em: < [http://bt.fatecsp.br/system/articles/959/original/artigo%20bt%202013%20%C3%BAltima%20vers%C3%A3o%20\(1\).pdf](http://bt.fatecsp.br/system/articles/959/original/artigo%20bt%202013%20%C3%BAltima%20vers%C3%A3o%20(1).pdf). > Acesso em: 18 abr. 2021.
- SIGNORELLI, Matheus Ruas Miranda. **Dessalinização: métodos e possibilidades**. 2015. 67 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia, Departamento de Engenharia Química e de Petróleo, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2015. Disponível em: < <https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/1639/1/TCC%20Matheus%20Ruas.pdf>. > Acesso em: 18 abr. 2021.
- SINHORI, Naomi Gevaerd Correa. **Produção de água doce em alto mar: as principais tecnologias usadas a bordo**. 2014. 39 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Curso de Aperfeiçoamento Para Oficiais de Máquinas, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: < <http://www.redebim.dphdm.mar.mil.br/vinculos/000003/00000351.pdf>. > Acesso em: 18 abr. 2021.
- TORRI, Júlia Betina. **Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações**. 2015. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: < <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/127799>. > Acesso em: 18 abr. 2021.
- PANAGOPOULOS, Argyris; HARALAMBOUS, Katherine-Joanne; LOIZIDOU, Maria. Desalination brine disposal methods and treatment technologies - **A review**. **Science Of The Total Environment**. Athens, Greece, p. 1-23. jul. 2019.
- SABESP. Conheça como são as tarifas de água pelo mundo. 2016. Disponível em: < <http://g1.globo.com/sao-paulo/especial-publicitario/sabesp/a-sabesp-conta/noticia/2016/07/conheca-como-sao-tarifas-de-agua-pelo-mundo.html>. > Acesso em: 14 nov. 2021.
- SOARES, Tales M. et al. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2006, v. 10, n. 3, pp. 730-737. Disponível em: < <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000300028>. > Acesso em: 14 nov. 2021.

DIAS, Nildo da Silva et al. Uso de rejeito da dessalinização na solução nutritiva da alface, cultivada em fibra de coco. **Revista Ceres [online]**. 2011, v. 58, n. 5, pp. 632-637. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000500014>>. Acesso em: 28 nov. 2021.