

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FILLIPE GASPARINI FERREIRA
JOÃO VICTOR DE PAULA SILVA
NÍCOLAS ALVES DOS REIS**

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE MÉTODOS DE
DESSALINIZAÇÃO**

**VOLTA REDONDA
2019**

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO COMPARATIVO SOBRE MÉTODOS DE
DESSALINIZAÇÃO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Alunos:

Fillipe Gasparini Ferreira
João Victor de Paula Silva
Nícolas Alves dos Reis

Orientadores:

Prof.:Dr. Alexandre Fernandes
Habibe
Prof.:Dr. Alexandre Alvarenga
Palmeira

VOLTA REDONDA
2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Fillipe Gasparini Ferreira

João Victor de Paula Silva

Nícolas Alves dos Reis

ESTUDO COMPARATIVO SOBRE MÉTODOS DE DESSALINIZAÇÃO

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Membro

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Membro

Prof. Antônio de Pádua Sobreira Leal

Membro

DEDICATÓRIA

Aos professores e alunos do Curso
de Engenharia Mecânica do UniFOA.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradecemos a Deus por ter nos dado o dom de buscar novos conhecimentos, também as nossas famílias por terem nos apoiados em nossos momentos de dificuldade, agradecemos aos nossos colegas de turma pela convivência e bom relacionamento criando várias amizades, aos nossos professores que nos ensinam com total dedicação

EPÍGRAFE

“ Se clamares por conhecimento e por inteligência alçares a tua voz, se como a prata a buscares e como tesouros escondidos a procurares, então entenderás o temor do senhor, e acharás o conhecimento de Deus, por que o senhor dá a sabedoria; da sua boca é que vem o conhecimento e entendimento” (Pv 2 3;6).

RESUMO

A água doce é o bem mais precioso da humanidade. Sua falta vem se tornando um problema devido a poluição, crescimento populacional e a altas temperaturas do planeta terra. Em alguns lugares, sua disponibilidade é baixa, o que necessita de outros meios para se gerar água boa para consumo. É com base nisso, que a ciência vem avançando para se produzir água doce através dos mares e oceanos com a chamada dessalinização. Existem vários processos de dessalinização, que podem ser em dois tipos: processo térmico e processo de membrana. Em todas elas o gasto energético é alto, o que faz com que seja muito caro se produzir água por este meio. Porém com o passar dos anos, os processos estão ficando mais baratos devido a tecnologia e o crescimento desse mercado. Este trabalho tem como propósito apresentar os principais processos, mostrar o seu crescimento e compará-los com base em pesquisas e artigos.

Palavras chaves: Dessalinização, membrana, processo térmico.

ABSTRACT

Fresh water is humanity's most precious possession. Its lack has become a problem due to pollution, population growth and the high temperatures of planet earth. In some places, its availability is low, which requires other means to generate good water for consumption. It is on the basis of this, that science is advancing to produce fresh water through the seas and oceans with the so-called desalination. There are different water desalination processes, which are divided into two types: thermal process and membrane process. In all of them the energy expenditure is high, which makes it very expensive to produce water by this means. But over the years, processes are getting cheaper because of technology and the growth of that market. This work aims to present the main processes, show their growth and compare them based on research and articles.

Key words: Desalination, membrane, thermal process.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	15
2 - OBJETIVO	17
3 - REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 - Ciclo da Água.....	18
3.2 - Escassez da Água	19
3.3 - Formação da Água Salina.....	20
3.4 - Composição Química de Sais na Água.....	20
3.5 - História da Dessalinização.....	23
3.5.1 - Século XIX.....	26
3.5.2 - Século XX.....	28
3.5.3 - Século XX segunda parte.....	28
3.6 - Dessalinização.....	31
3.7 - Processos de Dessalinização.....	34
3.7.1 - Processos de dessalinização térmica.....	34
3.7.1.1 - Ebulição múltipla.....	36
3.7.1.2 - Controle de incrustações.....	36
3.7.2 - Destilação <i>flash</i> de múltiplos estágios (MSF).....	37
3.7.2.1 - Observações do processo.....	38
3.7.2.2 - Arranjos do processo MSF.....	39
3.7.3 - Destilação múltiplos efeitos (MED).....	40
3.7.3.1 - <i>Backward</i>	42
3.7.3.2 - Paralela.....	43
3.7.3.3 - Observações do processo.....	43
3.7.3.4 - Arranjos de processos MED.....	44
3.7.3.5 - Arranjos de tubo Horizontal.....	44
3.7.3.6 - Arranjos de tubo vertical.....	45
3.7.3.7 - Conjunto de tubos empilhados verticalmente.....	46
3.7.4 - Destilação por compressão de vapor (VC).....	47
3.7.4.1 - Observações do processo.....	48
3.8 - Processo de Membrana.....	48
3.8.1 - Osmose reversa ou invertida (OR).....	49
3.8.1.1 - Equipamentos de osmose reversa.....	51

3.8.1.2 - Membranas semipermeáveis.....	52
3.8.1.3 - Observações do processo.....	53
3.8.2 - Eletrodialise (ED).....	55
3.8.2.1 - Membranas bipolares.....	56
4.0- METODOLOGIA.....	58
5.0 - ESTUDO DE COMPARATIVO.....	60
5.1 - Vantagens e desvantagens dos processos por membrana.....	60
5.2 - Vantagens e desvantagens do processo térmico.....	61
5.3 - Fluxo energético.....	63
5.4 - Custos de operação e implantação do MSF e RO.....	65
5.5 - Custos totais de produção.....	69
5.6 - Crescimento da capacidade instalada.....	71
5.7 - Quadro Geral Comparativo.....	73
6.0 - CONCLUSÃO.....	74
7.0 - REFERÊNCIAS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Quantidade de água no planeta.....	15
Figura 2 - Ciclo natural da água	18
Figura 3 - Demonstrativo de excesso e escassez de água no mundo	19
Figura 4 - Abundância relativa dos principais íons dissolvidos na água do mar.	21
Figura 5 - Tripulação utilizando técnica de destilação.....	24
Figura 6 - Primeiros alambiques criados	24
Figura 7 - Forno com dupla câmara	25
Figura 8 - Destilador de tubo vertical.....	26
Figura 9 - Planta de dessalinização solar	27
Figura 10 - Destilador MSF	27
Figura 11 - Destilador MED.....	28
Figura 12 - Destilador MSF na América	29
Figura 13 - Destilador VC	29
Figura 14 - Dessalinização por eletrodialise.....	30
Figura 15 - Destilador solar.	30
Figura 16 - Dessalinizador por congelamento.. ..	31
Figura 17 - Fluxograma do processo.....	32
Figura 18 - Tipos de processos de dessalinização.....	34
Figura 19 - Processo de Destilação MSF	38
Figura 20 - Tipos de arranjos MSF	39
Figura 21 - Shuwei hat, 76500m ³ /dia.....	39
Figura 22 - Gela, 4x14400m ³ /dia	40
Figura 23 - Processo de Destilação MED.....	41
Figura 24 - Processo de Destilação MED com alimentação para trás.....	42
Figura 25 - Processo de Destilação MED com alimentação paralela	43
Figura 26 - Esquema MED com tubos horizontais	44
Figura 27 - Esquema MED com tubos verticais	45
Figura 28 - Esquema MED com tubos empilhados verticalmente	46
Figura 29 - Esquema do processo VC (MVC e TVC)	47
Figura 30 - Representação Esquemática do Processo de Separação por Membranas.	49

Figura 31 - Representação do processo de osmose.....	49
Figura 32 - Representação do processo de osmose inversa.	50
Figura 33 - Configuração de um dessalinizador por osmose inversa.....	50
Figura 34 - Representação do processo de osmose reversa com recuperação de energia.	54
Figura 35 - Sistema eletrodialítico convencional (C = membrana catiônica e A = membrana aniônica).....	56
Figura 36 - Estrutura da membrana bipolar.	57
Figura 37 - Fluxograma da metodologia.....	59
Figura 38 - Comparação do barateamento dos processos mais utilizados.	67
Figura 39 - Consumo de energia e preço da dessalinização RO	68
Figura 40 - Comparação mostrando a predominância no mercado da dessalinização.....	69
Figura 41 - Divisão dos custos MSF e RO respectivamente.....	70
Figura 42 - Crescimento da capacidade instalada dos processos térmicos e processos de membrana	71
Figura 43 - Capacidade instalada em 2011	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Proporções de íons diluídos em solução salina.....	22
Tabela 2 - Classificação da água quanto à sua concentração de SDT	32
Tabela 3 - Temperatura necessária para ebulição	35
Tabela 4 - Comparativo a partir das vantagens e desvantagens dos processos de dessalinização.....	63
Tabela 5 - Comparativo a partir do consumo de energia elétrica.	65
Tabela 6 - Comparação dos custo de produção de água dessalinizada RO e MSF.	70
Tabela 7 - Quadro geral comparativo dos processos.....	73

LISTA DE SIGLAS

MSF – Evaporação de *Flash* Em Múltiplos Estágios

MED – Destilação de Multi Efeitos

RO – *Reverse Osmosis*

ED – Eletrodialise

MVC – Compressor Mecânico de Vapor

VC – Compressor de Vapor

TVC – Termo Compressor a Jato

DDP – Diferencial De Potencial

PPM – Partícula Por Milhão

OWS – *Office Of Saline Water*

DRE – Mecanismo de Recuperação de Energia

TBT – Temperatura Máxima de Salmoura

SDT – Total de Sais Dissolvidos

SWRO – *Sea Water Reverse Osmoses*

ONU – Organização das Nações Unidas

OMS – Organização Mundial da Saúde

NRC – *National Research Council*

TDS – *Total Dissolved Solids*

PSS – *Practical Salinity Scall*

1. INTRODUÇÃO

Uma das coisas mais importantes para a vida humana é uma molécula muito simples, água, H₂O, a qual consegue reger praticamente todos os processos bioquímicos através da sua estrutura e suas interações únicas, bem como mantém as condições da terra. Ao longo da história a civilização humana tem tido limitações sobre a disponibilidade de água, os egípcios, os persas e os romanos eram especialistas em transporte de água movendo-a para onde for necessário, porém com o tempo, as civilizações foram se desenvolvendo e com elas veio a revolução industrial, mas houve uma dissociação entre a relação espacial e temporal com a água. Aproximadamente, 1,386 bilhão de quilômetros cúbicos de água pode ser encontrado dentro da terra. A figura 1 ilustra a quantidade de água na terra em duas esferas, a maior representa toda a água presente na terra incluindo oceanos, rios, calotas polares, lençóis freáticos, etc.; seu diâmetro é cerca de 1384,04 quilômetros e tem um volume de cerca de 1.386.000.000 quilômetros cúbicos. No entanto menos de 1 % (por cento) está disponível para uso no planeta,

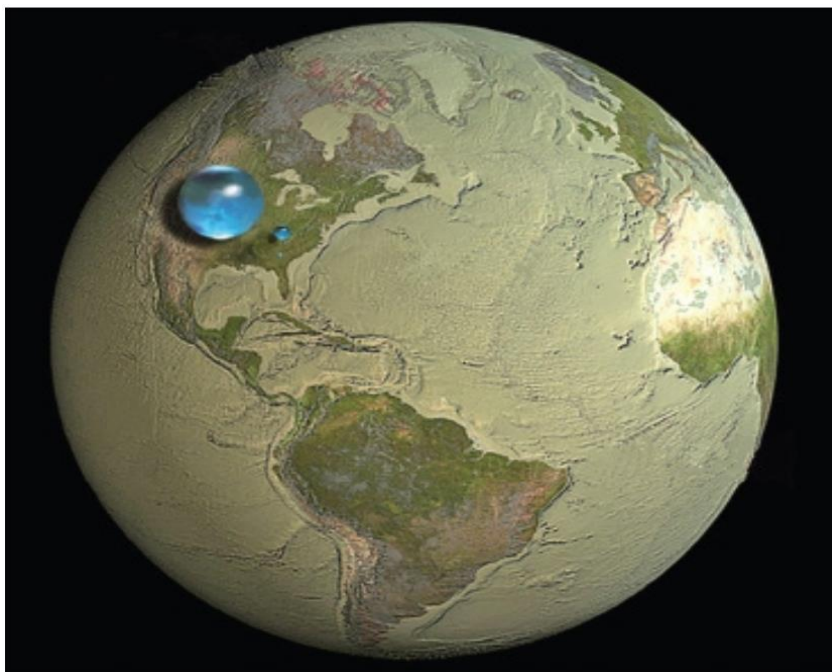


Figura 1 - Quantidade de água no planeta (Fonte: Adaptado de *A Multidisciplinary Introduction to Desalination*)

Tanto nas regiões desenvolvidas quanto nas em desenvolvimento, as fontes de água doce estão sendo utilizadas sem consciência e estão se tornando perigosamente poluídas. A busca crescente por água vem se tornando algo descontrolado, juntamente com o declínio dessa água potável, tornando muitas regiões do planeta vulneráveis à escassez de água.

Como resultado, fontes de água não tradicionais estão começando a ser exploradas como água salgada, salobra, águas subterrâneas e águas prejudicadas pelos resíduos municipais a ser consideradas 'novas fontes de água', para aproveitamento em apoio ao crescimento populacional mundial. Além disso há um reconhecimento de que quantidades significativas de água doce estão sendo desperdiçadas devido a infraestrutura envelhecida, o *US Geological Service* estima que os sistemas de águas dos EUA experimentam cerca de 240.000 quebras principais de água anualmente, resultando na perda de 1,7 trilhões de galões de água por ano; juntamente a outros problemas na rede de abastecimento do país. Para registrar essa perda de água é chamada de "sem receita" toda a quantidade que não foi utilizada. Em países desenvolvidos a água proveniente da receita muitas vezes representa cerca de 20 % do total retirado do meio ambiente e em países em desenvolvimento pode representar até 50 % de perdas no sistema de distribuição, para atender as necessidades da população.

A partir de águas não tradicionais a recuperação de água doce agora é alcançada com maior eficiência energética e custo benefício obtendo águas limpas e de alta qualidade usando tecnologias de membrana de osmose reversa (RO), e usinas de dessalinização térmica que fornecem quantidades significativas de água doce globalmente. A maioria dos profissionais consideram as tecnologias de membrana e dessalinização térmica bem comprovadas e comoditizadas com mais de meio século de experiência operacional em todo o mundo.

A modernização das técnicas de dessalinização pode ser considerada de 1960 em diante com o desenvolvimento e disseminação da evaporação de *flashes* em múltiplos estágios (MSF), destilação de multe efeitos (MED), compressor (VC), eletrodialise (ED) e osmose reversa (RO). Que serão descritos no decorrer do estudo.

2. OBJETIVO

Este estudo tem a finalidade de apresentar os principais processos de dessalinização, demonstrar o seu crescimento e compará-los com base em pesquisas e artigos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Ciclo da Água

Um dos meios essenciais para a manutenção da vida humana é a água, sendo que a maior parte deste recurso natural está situada em 71% da superfície do planeta, porém somente 3% está disponível para consumo e pode ser encontrado na forma de rios, aquíferos, calotas polares, lençóis freáticos, etc.

Para entender essa divergência de valores, temos de estudar o ciclo da água, que em seu estado natural, ao receber calor, gradualmente se evapora, passando do estado líquido para gasoso. Quanto maior for a superfície de exposição maior será o volume de água evaporada.

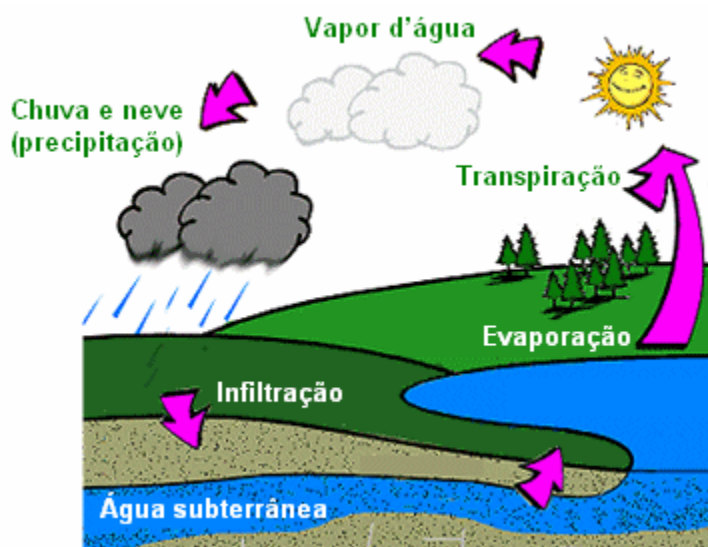


Figura 2 - ciclo natural da água (Fonte: Adaptado de www.todamateria.com.br)

Quando o vapor de água entra em contato com as camadas mais frias da atmosfera formam-se gotículas de água que se concentram e dão origem as nuvens. Quando há um acúmulo muito grande de água, as gotas começam a se precipitar formando assim as chuvas. Que ao retornar para a superfície abastecem rios, açudes, lagos e são absorvidas pela terra formando lençóis freáticos.

3.2 Escassez da água

Demonstrado a quantidade de água no planeta Terra, também temos que demonstrar como ela está distribuída. Sabemos que a forma que a água doce está dividida é bastante desigual em todo o mundo, por se tratar de um recurso finito, parte do Oriente Médio, África, alguns lugares da América Central já se encontram carentes de água.

A região no planeta que possui a maior concentração dos recursos hídricos do planeta está localizado na América do Sul segundo a Organização das Nações Unidas (ONU) são de: 334 mil metros cúbicos por segundo. Mesmo devido a uma política com pouca eficiência na infraestrutura, o Brasil pode ser considerado privilegiado por possui uma bacia hidrográfica imensa, tendo 20 % de todas reservas de água doce do mundo, sendo que 80 % está localizada na Amazônia e os outros 20 % nas demais regiões do país.

Como o Brasil possui uma grande fonte hídrica, torna-se um país internacionalmente valioso e visado, pois de acordo com a ONU estudos indicam que em 2025 a falta de água afetara mais de 3 bilhões de pessoas no mundo.

Devido a alta tecnologia alcançada tem levado à drenagem de vários rios e reservas para atender as necessidades de usinas, fábricas, agropecuária e agricultura. Entretanto estão fazendo isso de forma desenfreada em prol dessa alta necessidade de utilizar água doce. Alguns lençóis de água na China, na Índia, no EUA, estão secando rapidamente, segue na figura 3 dados sobre a situação atual.

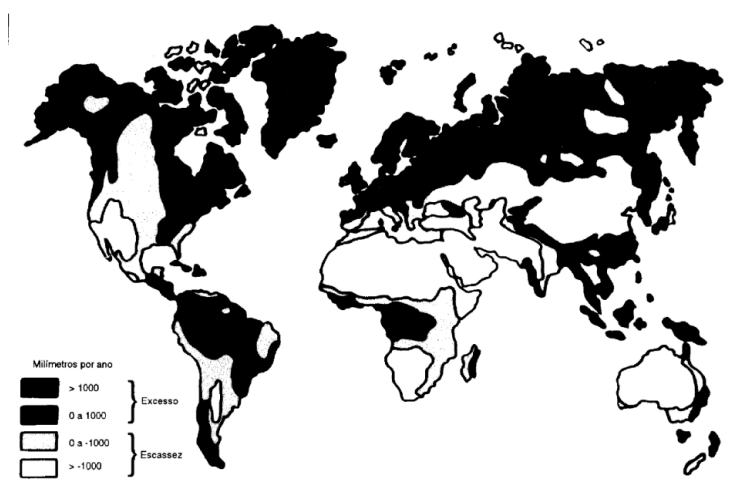


Figura 3 - Demonstrativo de excesso e escassez de água no mundo (Fonte: Adaptado de www.todamateria.com.br)

Devido ao uso abusivo de água doce, hoje o desenvolvimento e à proteção do meio ambiente se encontram em ameaça, o bem-estar de milhões de pessoas, os ecossistemas estão em perigo. Atualmente é urgente que seja feita a redistribuição desse recurso hídrico de forma organizada para que chegue a todos aqueles que carecem de água. Essa conclusão não é baseada em fatos teóricos, é um problema real que o planeta está passando, pois, a água é valiosa para o desenvolvimento.

3.3 Formação da Água Salina

Em 1715, um físico chamado Edmond Halley apresentou que os sais e diversos outros minerais fossem retirados de rochas ao terem contato direto com a água até chegarem aos oceanos. Como os minerais não conseguem subir junto com a evaporação da água na renovação de seu ciclo ficam acumulados nos oceanos, por parte a teoria estava correta. Quando os oceanos foram criados havia em seu fundo grande quantidade de sódio e com a presença do cloreto, proporcionado pela evasão de gases de vulcões, combinado com o sódio formam o constituinte mais abundante do mar, o cloreto de sódio.

3.4 Composição Química de Sais na Água

Na composição química da água do mar, encontram-se sais dissolvidos na forma de íons, em 1 quilograma de água do oceano há 35 gramas de compostos inorgânicos dissolvidos. Isso demonstra que a água do mar é composta por 96,5% de água pura e 3,5% de compostos inorgânicos. Se fosse possível retirar toda a água do oceano, no fundo sobraria apenas uma faixa de 60 metros de altura e que cobriria todo o assoalho oceânico.

Segue abaixo um gráfico, conforme figura 4 representando a quantidade em porcentagem de cada composto:

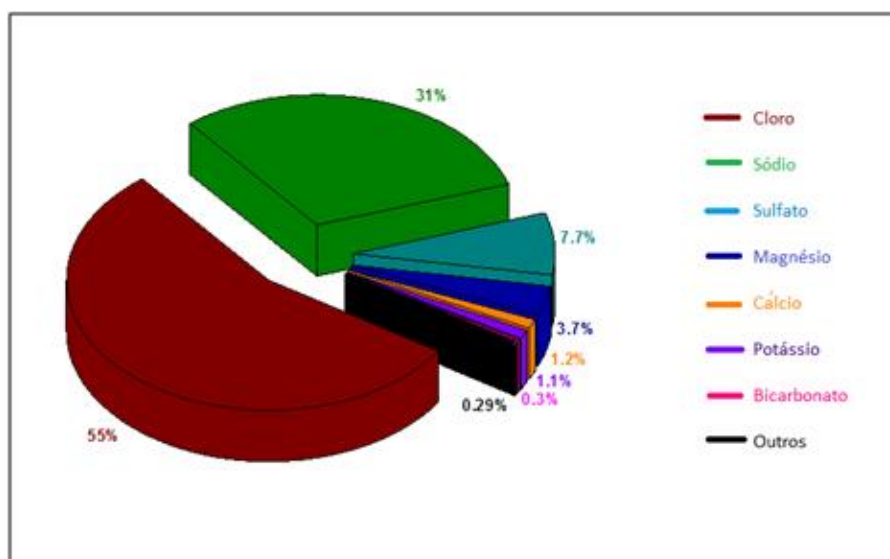


Figura 4 - Abundancia relativa dos principais íons dissolvidos na água do mar. (Fonte: Adaptado de www.todamateria.com.br)

O valor total em gramas de sais em um quilograma de água e com sua unidade de medida expressa em partes por mil. Era assim que podia ser definido a salinidade marinha, até que em 1978 foi dotada a PSS-78 escala de salinidade pratica e a partir dessa data passou a ser adimensional.

O oceano aberto, apresenta uma salinidade média de 35 podendo ter variações de 33 a 37. Em algumas exceções desvios acontecem devido a processos de evaporação e precipitações, como desembocaduras de rios, nas regiões polares por causa do degelo no verão. Em alguns mares semifechados a tendência é que uma salinidade acima da média seja apresentada. Por exemplo o mar mediterrâneo e o mar vermelho apresentando salinidades de 39 e 41.

Conhecendo o valor total de sais inorgânicos nos oceanos, podendo variar em diferentes regiões do planeta e em profundidades, esses sais mantêm as suas proporções constantes em todos os oceanos. De acordo com *Millero (2006)*, na tabela 1 temos as proporções de íons diluídos em solução salina:

Tabela 1 - Proporções de íons diluídos em solução salina. (Fonte: adaptado de https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81gua_salina)

Íon	Símbolo	Concentração (g/kg)	Proporção (%)
Cloreto	Cl ⁻	19,3529	55,056
Sódio	Na ⁺	10,7838	30,678
Sulfato	SO ₄ ²⁻	2,7124	7,716
Magnésio	Mg ²⁺	1,2837	3,652
Cálcio	Ca ²⁺	0,4121	1,172
Potássio	K ⁺	0,3991	1,135
Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	0,1070	0,304
Brometo	Br ⁻	0,0672	0,191
Carbonato	CO ₃ ²⁻	0,0161	0,046
Estrôncio	Sr ²⁺	0,0079	0,022
Borato	B(OH) ₄ ⁻	0,0079	0,022
Fluoreto	F ⁻	0,0013	0,004
Total		35,1514	100,000

3.5 História da Dessalinização

A origem da dessalinização é desconhecida e é provável que por muito tempo não foi documentada. Entretanto, podemos dizer que a destilação é um fenômeno que estava sendo observado á milhares de anos atrás, o qual, foi gerando bem lentamente e alguns relatos começaram a aparecer, datando mais de 2 milênios. Uma citação bem conhecida, é uma passagem bíblica no velho testamento no livro de Jó, segue abaixo um versículo do relato:

“Ele atrai as gotas de água, e do seu vapor as destila em forma de chuvas”

Jó 36,27

E outros versículos foram citados em Êxodo. Um exemplo, está na passagem do filosofo grego Aristóteles que afirma quando a água do mar vira vapor e novamente se condensa ela se torna doce.

Durante o império romano também houve relatos sobre a forma de destilar a água dos mares , Plínio, o Velho como era chamado foi um historiador que em seu livro História Natural, conta que a maior preocupação de expedições longas era a falta de água potável para tripulação, porém foram desenvolvidos algumas técnicas.

A primeira técnica que relata sobre a obtenção de água potável era extremamente simples, era necessário um novelo de lã e que fosse pendurado para fora do navio próximo a superfície da água do mar, durante o dia o sol esquentava a água dos oceanos e quando chegava à noite essa água evaporava encharcando o novelo de lã pendurado, assim quando fosse espremido em um jarro se obtinha água limpa e boa para beber.

A segunda técnica consiste em pegar vasos ocos de cera e afundá-los na água, e permanecendo mergulhado por algumas horas para que a cera do jarro filtrasse a água do mar passando para a parte oca somente água doce.

Outra técnica que foi relatada consistia em aquecer jarros de água e próximo a boca destes tivessem esponjas naturais que retinham o vapor, logo em seguida essas esponjas eram espremidas em jarros vazios, obtendo água para consumo, conforme figura 5.

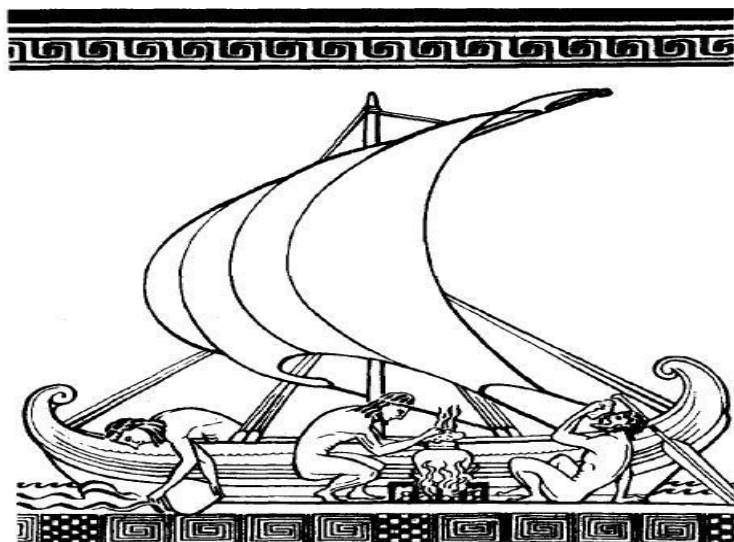


Figura 5 - tripulação utilizando técnica de destilação (Fonte: HOWARTH apud BIRKETT (1984))

Essas técnicas de obtenção de água com o tempo foram se desenvolvendo e se tornando melhor, na época foram criados alambiques que tinham a exata função de purificar substâncias. Esses alambiques geralmente eram aquecidos pelo sol e mesmo aparentando com os equipamentos de laboratórios atuais, foram essenciais para o desenvolvimento da dessalinização. Quando o processo foi tomando grandes proporções chegou a se espalhar para a Europa ocidental, conforme figura 6.

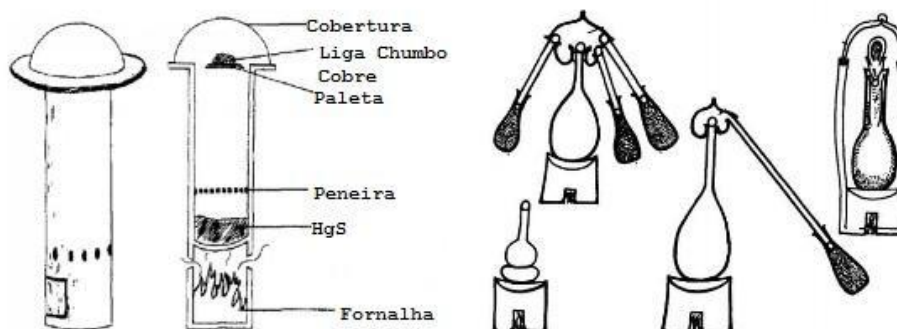


Figura 6 - Primeiros alambiques criados (Fonte adaptado: PÁEZ e GARRITZ (2013))

Entre tantas produções artísticas e invenções científicas que tornaram Leonardo da Vinci famoso, ele também desenhou uma técnica com baixo custo de dessalinizar água em poucas porções. O equipamento consistia em colocar em cima de um fogão dois destiladores acoplados para aproveitar o calor gerado. Representado na figura 7, a seguir.



Figura 7 - Forno com dupla câmara (Fonte: adaptado de DESSALINIZAÇÃO: MÉTODOS E POSSIBILIDADES.pdf

Durante o século XVI, foi quando começaram a ser desenvolvidos e publicados os primeiros livros sobre destilação e, por consequência dessalinização, todavia, não chegou a expressar grande reconhecimento.

Durante muitos anos houve uma pausa no desenvolvimento de novas tecnologias sobre dessalinização e destilação, até que *Robert Boyle* um filósofo natural, químico e físico, com seus protótipos sobre destilação a vácuo deu uma alavancada no desenvolvimento de métodos de dessalinização.

Nos anos de 1700, já havia sido descoberto o método por congelamento, que constava de congelar a água do oceano, e quando era derretida se obtinha água boa para consumo. Essa técnica foi observada por muitos físicos da época como *Thomas Barthoulinus*, *Samuel Reyer*, que comprovaram esse método. Com essa descoberta estava definitivamente aberto o caminho para que tivessem avanços na tecnologia de dessalinização e destilação

3.5.1 Século XIX

Com a industrialização do século XIX, o foco nessa época foi todo do desenvolvimento da máquina a vapor, e ao ser criado o condensador serviu de alavanca para o avanço dos dessalinizadores. Esse avanço na tecnologia somando com outros experimentos criou a priori não para uso da dessalinização, acabou-se gerando um plano para criação do primeiro destilador de tubo vertical, demonstrado na figura 8. Este equipamento foi de grande uso em navios proporcionando um maior rendimento em relação aos processos antigos.

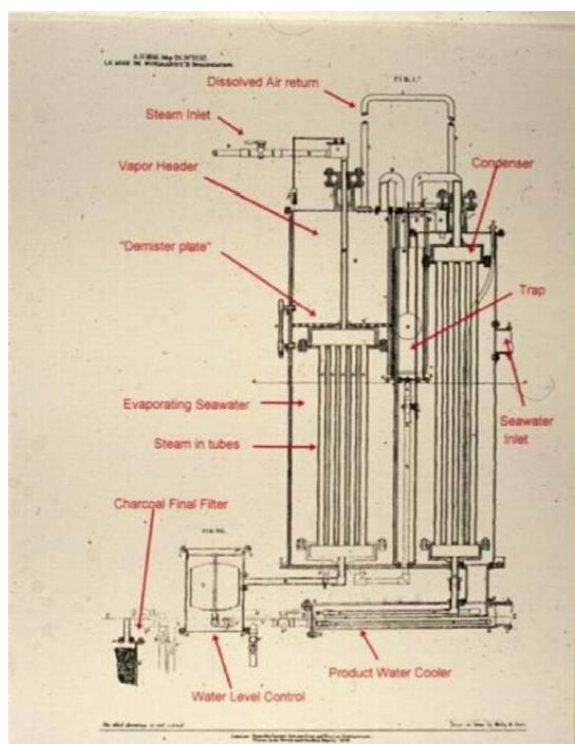


Figura 8 - Destilador de tubo vertical (Fonte: BIRKETT e RADCLIFFE (2014))

No hemisfério leste, nos Estados Unidos em 1870 ocorreu o primeiro patenteamento do método de dessalinização utilizando energia solar, um processo que havia pouco avançou quando surgiu a máquina a vapor. Demonstrado na figura 9, a planta de dessalinização operava produzindo em média 22,7 m³ de água potável por dia. Tendo como salinidade máxima de 140 000 ppm.

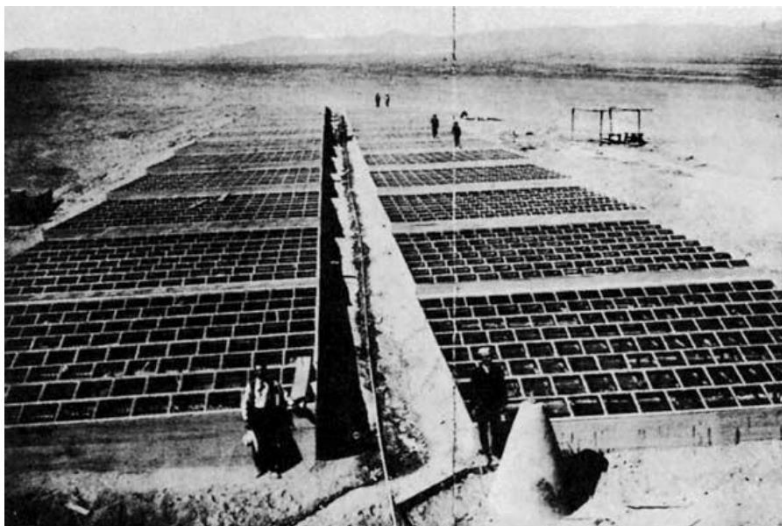


Figura 9 - Planta de dessalinização solar. (Fonte: TELKES M, 1956 apud DELYANNIS 2003)

Retornando à Europa, aperfeiçoamentos nos processos estavam sendo realizados com maiores frequências e a partir de então foram surgindo novos equipamentos e melhorias do processo *flash*, o MSF, hoje um dos processos mais utilizados, representado na figura 10.

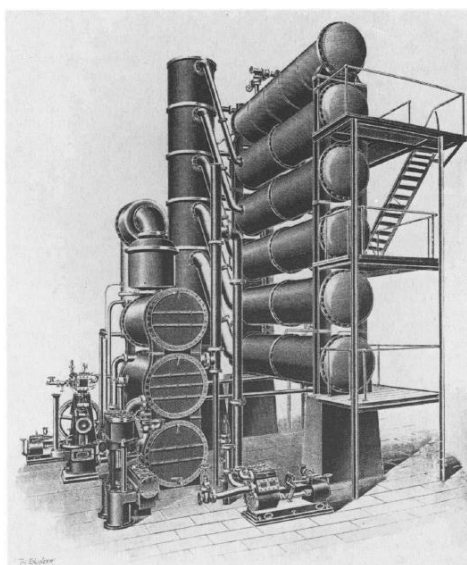


Figura 10 - Destilador MSF. (Fonte: ANON 1904, apud BIRKETT. (1984))

3.5.2 Século XX

No início do século XX, os avanços tecnológicos estavam cada vez mais frequentes; por exemplo, a técnica de congelamento e descongelamento na Inglaterra já era aplicada em uma estação de dessalinização utilizando resfriamento artificial. No início dos anos 30 as primeiras aparições da dessalinização por membrana começaram a serem feitos, pouco depois foi a vez da eletrodialise, mas também deveria esperar um pouco mais para que fosse gerada em grande escala.

Ainda no Estados Unidos a técnica por dessalinização por energia solar estava sendo muito utilizada, durante uma seca no estado da Califórnia esse processo foi fundamental para que não faltasse água para a população.

3.5.3 Século XX segunda parte

Logo ao final da segunda guerra mundial, os danos das batalhas proporcionaram falta de água em algumas regiões afetadas fazendo a dessalinização disparar nos avanços científicos. Porém, quando começaram a surgir as primeiras divergências dos processos, manter tais investimentos era muito caro. Durante cinco anos um programa chamado *Office of Saline Watter* (OWS) tinha o objetivo de baratear o custo no desenvolvimento da dessalinização. Ao passar esse tempo de pesquisas para redução de custo foram apresentadas 5 plantas de dessalinização, sendo elas:

- Uma planta com tecnologia MED, vide figura 11;



Figura 11 - Destilador MED. (Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010))

- Uma planta com tecnologia MSF, conforme figura 12;

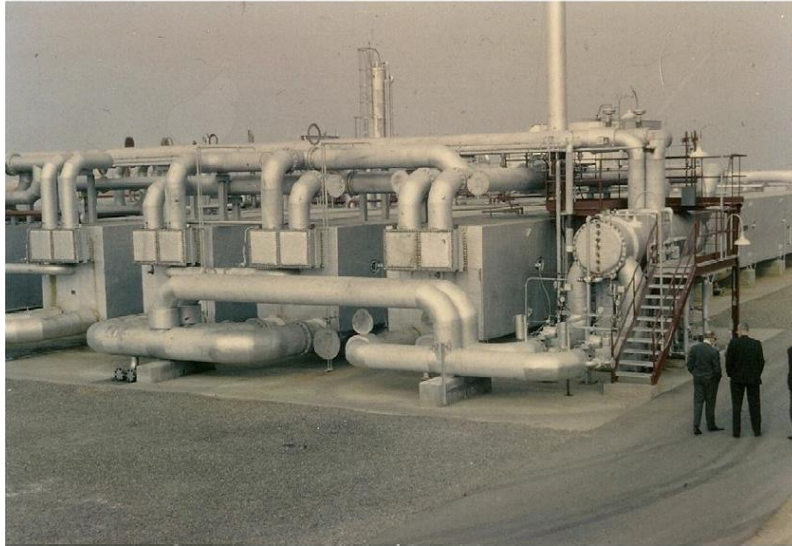


Figura 12 - Destilador MSF na América. (Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010))

- Uma planta com tecnologia VC, de acordo com a figura 13;



Figura 13 - Destilador VC. (Fonte: E. Delyannis, V. Belessiotis (2010))

- Planta utilizando eletrodialise, conforme figura 14;

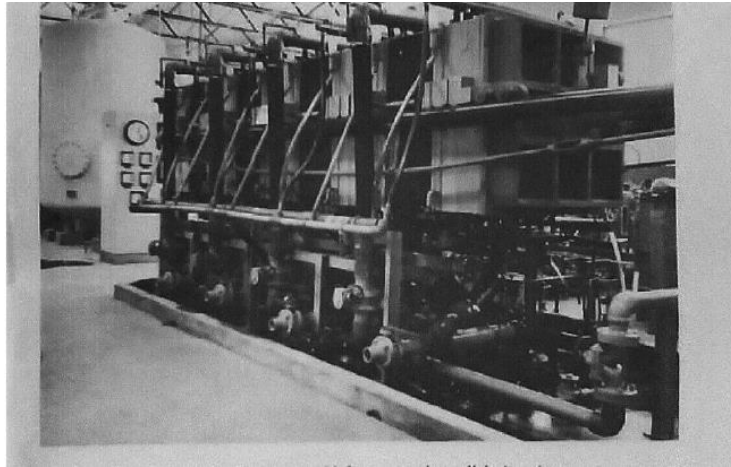


Figura 14 - Dessalinização por eletrodialise. (Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010))

- E uma planta com destilação com energia solar, conforme figura 15;

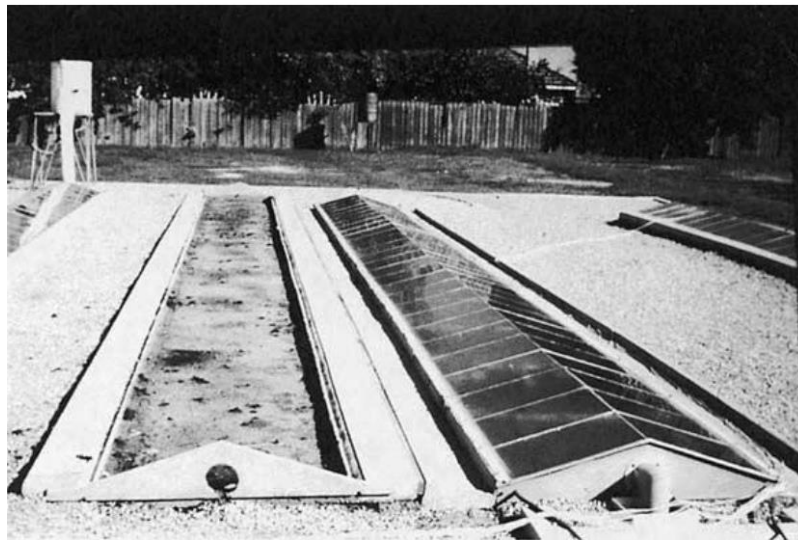


Figura 15 - Destilador solar. (Fonte: Delyannis (2003))

Foi também construída uma planta com tecnologia por congelamento, mas naquela época com criações de novos métodos a dessalinização por congelamento não era mais viável. Segue figura 16.



Figura 16 - Dessalinizador por congelamento. (Fonte: Delyannis e Belessiotis (2010)).

No ano de 1972 o governo americano encerra o investimento das pesquisas, fazendo que a OWS chegasse ao fim. A partir daquele ano toda a pesquisa ficaria por conta da iniciativa privada que se interessasse nos processos.

3.6 Dessalinização

É uma tecnologia com capacidade de tratar uma água com alto teor de salinidade em uma água potável e própria para uso tanto doméstico quanto industrial. Para tal transformação, os processos que serão apresentados mais para frente, precisam remover ou reduzir sais e sólidos que a água possui dissolvidos. Existem diversos meios para a retirada do sal pelo método de dessalinização, produzindo uma corrente de água com baixa concentração de sal (a corrente de produto) e outra com alta concentração de sais remanescentes (salmoura ou concentrado). A maioria dessas tecnologias depende de destilação (processos térmicos) ou membranas para separar os sais da água do produto.

A salinidade da água é a quantidade de sal dissolvido numa determinada quantidade de água. Essa quantidade pode ser expressa em partes por milhão (ppm) ou em miligramas por litro (mg/l) do total de sais dissolvidos (SDT), de acordo com a tabela 2. A água com salinidade superior à água do mar é designada como salmoura. Na salinidade presente em mais de 97 % da água do mar existe uma oscilação de 33 a 37 g/l de SDT. Segundo a OMS, concentrações de SDT na água inferiores a 1 g/l já são considerados valores aceitáveis.

Tabela 2 - Classificação da água quanto à sua concentração de SDT (Fonte: Adaptado de *The economics of desalination for various uses*)

Água	Concentração de SDT (mg/l)
Água doce	< 1000
Baixa salinidade da água salobra	1.000 – 5.000
Elevada salinidade da água salobra	5.000 – 15.000
Água salgada	35.000 – 50.000

Existe um padrão que apresenta todos os processos de dessalinização na figura 17. Deve ser alimentado o sistema com a fonte da água salina, e uma fonte de energia em forma de calor, eletricidade e/ou pressão realiza o processo em si. Por fim é gerada água dessalinizada e a salmoura (que pode retornar ao processo ou ser descartada).

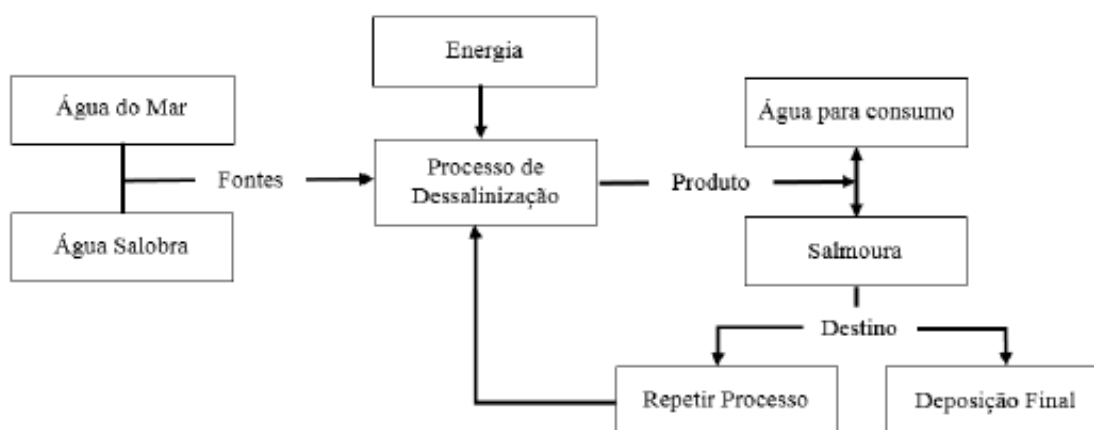


Figura 17 - Fluxograma do processo (Fonte: Adaptado de *Novas Fontes de abastecimento de água: Reutilização e dessalinização*)

O Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos da América (*National Research Council - NRC, 2008*), estipula essas etapas para a dessalinização, independente do processo a ser usado:

- **Captação:** mares, oceanos e fontes subterrâneas como os aquíferos, são os fornecedores de água salina e salobra usados nos tratamentos.
- **Pré-tratamento:** é feito um pré-tratamento em toda essa água para remover sólidos e controlar o crescimento biológico que acontece na captação.
- **Dessalinização:** ocorre o processo de dessalinização, onde há a redução ou remoção dos sais e sólidos presentes na água.
- **Pós-tratamento:** por fim é necessário um pós-tratamento. Com a dessalinização há uma descaída no nível de alcalinidade, o que pode causar corrosões nas tubulações. Também são retiradas propriedades necessárias ao consumo humano. Esse pós-tratamento altera a alcalinidade e o PH e deixando-a boa para o consumo.
- **Gestão de resíduos:** o concentrado é descartado. Alguns produtos utilizados podem ser tóxicos para organismos marinhos, mesmo em baixas concentrações e a temperatura da salmoura, em caso de mais elevada, pode afetar comunidades biológicas.

3.7 Processos de Dessalinização

Existem diversos processos de dessalinização, porém algumas se destacam. São essas que serão explicadas a seguir conforme figura 18, se dividindo em:

- Processos de dessalinização térmica;
- Processos de dessalinização por membrana.

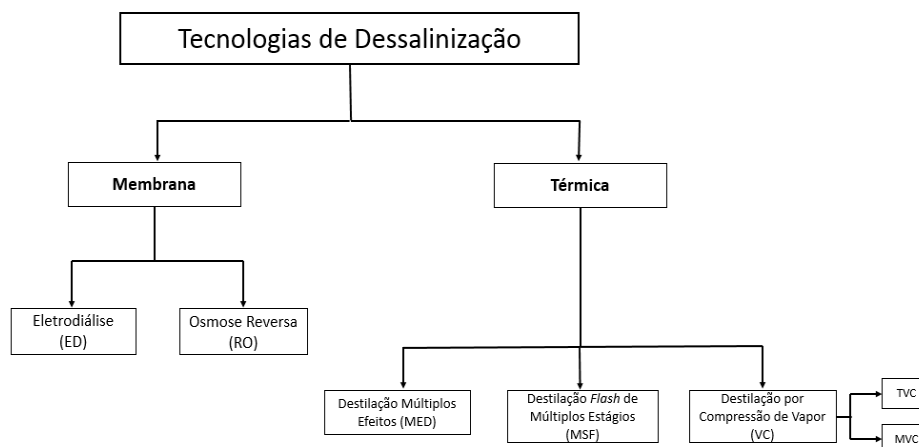


Figura 18 -Tipos de processos de dessalinização (Fonte: Adaptado de Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

Todos esses processos estão em constante evolução e alguns estão em grandes produções industriais. Será mostrado a seguir, o funcionamento de cada e algumas diferenças.

3.7.1 Processos de dessalinização térmica

Todos os processos de dessalinização térmica têm como base a destilação, repetindo o que seria o ciclo natural da água. Toda água salgada é aquecida para produzir água vapor, que é então condensado para produzir água fresca.

Os processos de destilação mais comuns, geralmente tem como base a redução da pressão de vapor de água dentro da unidade para permitir ferver a temperaturas mais baixas, sem qualquer calor extra. Nas unidades de destilação

são usados diversos estágios com pressões diferentes em sequência e com isso são feitas diversas ebulições diminuindo a energia necessária no processo.

Para ferver, a água precisa de duas condições importantes:

- a energia para evaporar;
- a temperatura adequada (relacionada à pressão ambiente).

Ao ferver a água em uma panela, todos sabemos que ao desligar a chama do fogão, a água para de entrar em ebulição quase que instantaneamente. Isso se deve ao fato de que ela precisa de uma energia externa para continuar o processo.

Quando a água deixa de ferver, a ebulição pode ser renovada adicionando mais calor ou reduzindo a pressão ambiente acima da água. Se a pressão ambiente for reduzida, a água estará a uma temperatura superior à do ponto de ebulição (por causa da pressão reduzida) e rapidamente irá produzir vapor diminuindo a temperatura para o novo ponto de ebulição. Se mais vapor puder ser produzido e depois condensado em água doce com a mesma quantidade de calor, a eficiência no processo é maior. A tabela 3 mostra a variação da temperatura de ebulição quando se varia a pressão onde se encontra a água aquecida.

Pressão ambiente ao nível do mar = 1 atm. = 1.013 bar

Tabela 3 - Temperatura necessária para ebulição (Fonte: Adaptado de Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

Pressão	1 bar	0,47 bar	0,32 bar	0,25	0,1
Temperatura de ebulição	100 °C	80 °C	70 °C	65 °C	45°C

O controle na pressão é muito importante em uma usina de dessalinização térmica, devido as alterações na temperatura de ebulição. Por exemplo, no Alasca a uma altitude de 620m, é necessária uma temperatura de 84° C para ferver uma água. Esta redução do ponto de ebulição é importante no processo de dessalinização por dois motivos principais: a ebulição múltipla e o controle de incrustações.

3.7.1.1 Ebulição múltipla

Para diminuir significativamente a quantidade de energia necessária para a vaporização, como foi dito anteriormente, os processos de dessalinização térmica costumam usar a ebulição múltipla em vasos sucessivos, cada um operando a uma temperatura e pressão mais baixas.

Este processo de redução da pressão ambiente para promover a ebulição adicional pode continuar para baixo e, se levado ao extremo com a pressão reduzida o suficiente, o ponto em que a água estaria fervendo e congelando ao mesmo tempo seria alcançado.

3.7.1.2 Controle de incrustações

Outro fator importante é o controle de incrustações. Embora a maioria das substâncias precipite mais prontamente em água mais fria, algumas precipitam mais prontamente em água mais quente. Infelizmente, algumas dessas substâncias, como carbonatos e sulfatos, são encontradas na água do mar. Um dos mais importantes é o sulfato de cálcio (CaSO_4), e começa a deixar solução quando a água do mar se aproxima de 115°C . Este material forma uma incrustação dura que reveste quaisquer tubos ou superfícies presentes que cria problemas térmicos e mecânicos e, uma vez formada, é difícil de remover. Uma maneira de evitar a formação disso é controlar o nível de concentração da água do mar e controlar a temperatura máxima do processo. Outra maneira é adicionar produtos químicos especiais à água do mar para reduzir a precipitação de incrustações.

3.7.2 Destilação *Flash* de Múltiplos Estágios (MSF)

O método de destilação *Flash* de Múltiplos Estágios (MSF) tem a maior capacidade instalada de dessalinização dos processos térmicos. A fábrica *The Saline Water Conversion* localizada em Jubail, Arábia Saudita é a maior fábrica do mundo, com capacidade de 815,120 m³/d e a maior unidade de MSF com capacidade de 75.700 m³/d está localizada em Shuweiat, Emirados Árabes Unidos.

No processo MSF, a água a ser dessalinizada é pré-aquecida a uma determinada temperatura. Ela faz o caminho inverso ao concentrado para receber o calor latente gerado no processo em si. Por haver uma variação de temperatura da a água do mar e o interior das câmaras, a água se aquece rapidamente e também condensa o vapor do interior.

Com a água do mar quimicamente tratada e pré-aquecida, ela é enviada para uma câmara de aquecimento para chegar em sua temperatura máxima. Esta câmara é aquecida com vapores de caldeira que também são aproveitadas ao condensar.

A água de alimentação é direcionada para a primeira câmara (chamada também de estágio) que está com uma pressão menor que a câmara de aquecimento. Logo ao entrar, ela se transforma em vapor rapidamente, devido a sua temperatura ser maior que a necessária para ebulição. Essa transformação rápida recebe o nome de *flash*. O vapor gerado condensa ao encontrar com os tubos de alimentação do sistema e caem em calhas que atravessam as câmaras. Todo o processo se repete, quando a salmoura que não foi destilada passa para o estágio seguinte. Com uma pressão menor e sem precisar adicionar mais calor ao sistema é possível fazê-la evaporar. O processo acaba quando chega no último estágio, onde foi calculado que a salmoura possui uma concentração de sais alta demais para a destilação.

A figura 19 mostra o esquema do processo:

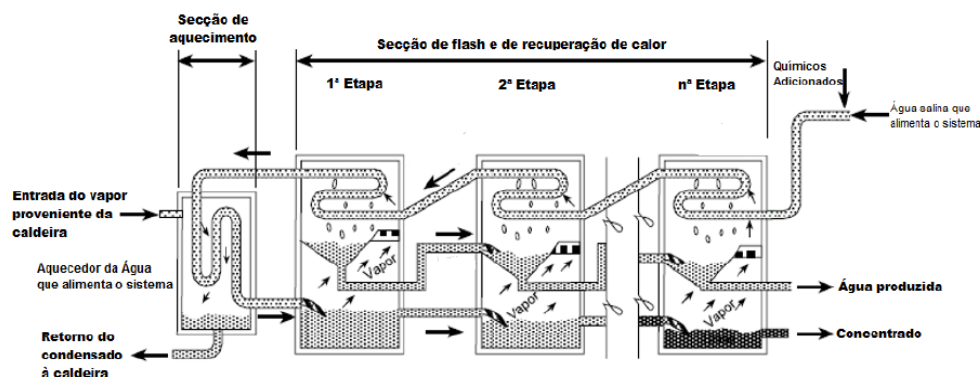


Figura 19 - Processo de Destilação MSF (Fonte: Adaptado de *Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade económica*)

3.7.2.1 Observações do processo:

- As usinas MSF geralmente operam em temperaturas máximas de 90 °C até 110 °C. Para uma maior eficiência são necessárias altas temperaturas, porém aumentam as chances de formação de incrustações e corrosões nas tubulações.
- As plantas mais modernas possuem de 19 a 28 estágios. Quanto mais estágios, maior a eficiência, porém maior o capital investido.
- O uso de energia elétrica nesse processo é baixa em comparação com a energia térmica, e é usada para serviços auxiliares como bombas, bombas dosadoras, ejetores de vácuo, etc.
- Quando o vapor *flash* condensa no processo, alguns gases gerados não condensam com ele, como o O₂, N₂ e CO₂ e são retirados do sistema.
- Toda a água destilada é armazenada para receber o pós tratamento e ser remineralizada.

3.7.2.2 Arranjos de processos MSF

O processo MSF pode ter 2 tipos de arranjos nas tubulações de abastecimento. O projeto pode ser de “tubo longo” ou “tubo cruzado”, conforme figura 20. No projeto de tubo longo, a tubulação é paralela ao fluxo de concentrado no vaso. No projeto de tubo cruzado a tubulação é perpendicular ao fluxo de concentrado. A maioria dos grandes destiladores de MSF modernos é do tipo cruzado com um único deck de estágios para facilitar o acesso aos estágios e caixas de água. Ele também tem a vantagem de ter uma maior área de contato com o vapor do processo.

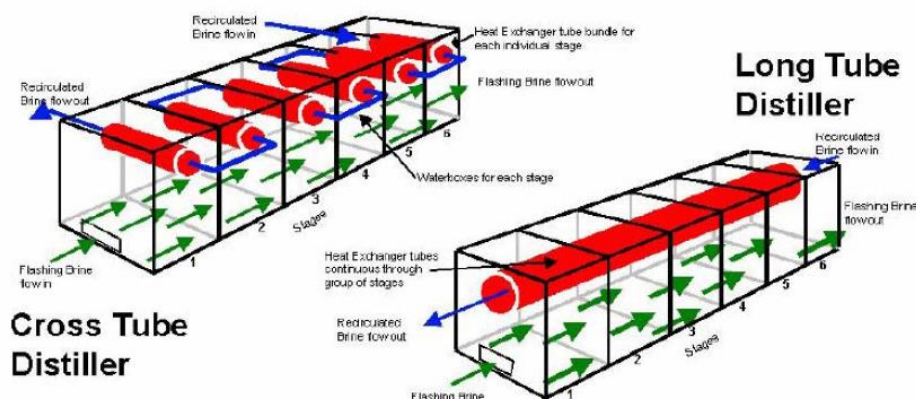


Figura 20 - Tipos de arranjos MSF (Fonte: Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

A maior unidade de MSF com capacidade de 75.700 m³/d localizada em Shuweihat, utiliza o arranjo de tubos cruzados, de acordo com figura 21.



Figura 21 - Shuweihat, 76500m³/dia (Fonte: Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

Na figura 22, o sistema MSF da cidade de Gela possui o arranjo de tubo longo em 4 unidades com produção de 14400m³/dia cada um.



Figura 22 - Gela, 4x14400m³/dia (Fonte: Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

3.7.3 Destilação Múltiplos Efeitos (MED)

Assim como no MSF, na Destilação Múltiplos Efeitos (MED), usam-se os princípios da condensação e evaporação trabalhando em conjunto com a variação de pressão nas câmaras. A diferença entre os processos está na evaporação da água e na transferência de calor. O MED utiliza diversos evaporadores chamados de efeitos e que dão nome ao processo.

O processo começa quando a água do mar depois de ser pré-aquecida pelo vapor proveniente do último efeito, entra no primeiro evaporador e através de chuveiros é pulverizada na superfície de tubos com altas temperaturas onde promove uma evaporação rápida. Esses tubos são alimentados com vapores de uma caldeira ou de uma usina com duplo propósito.

A água que evapora no primeiro efeito tem a função de transmitir calor a água pulverizada no segundo efeito, e com essa troca de calor, o vapor condensa. Esse processo se repete em todos os efeitos, sendo sempre o vapor anterior a aquecer a água do efeito seguinte.

Todo o concentrado que não evaporou no estágio é sempre bombeado para os chuveiros do estágio seguinte. Com uma pressão mais baixa, a sua temperatura de ebulição consegue ser atingida em contato com a tubulação de vapor. O processo se repete até a última câmara, onde a água terá uma alta concentração de sais e não será aproveitada. (khawaji, 2008)

A figura 23 mostra o esquema do processo MED:

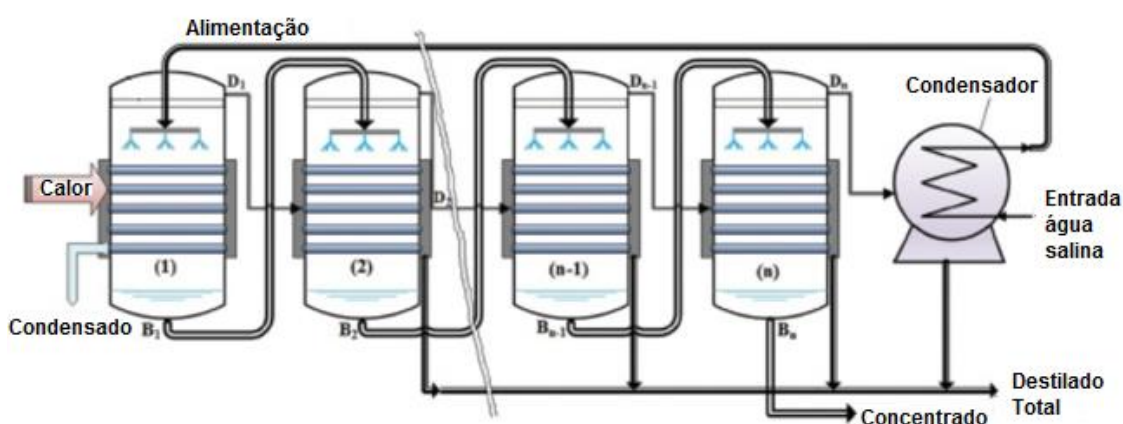


Figura 23 - Processo de Destilação MED (Fonte: Adaptado de A Multidisciplinary Introduction to Desalination)

O esquema acima representa a variação *forward*, onde a alimentação é feita no primeiro efeito e avança para os demais durante o processo. A principal vantagem desta configuração de avanço é sua capacidade de operar em altas temperaturas de salmoura.

Existem mais duas variações de alimentação do sistema MED, podendo ser *backward*, ou paralela.

3.7.3.1 Backward

Na configuração de alimentação para trás, a água do mar de alimentação, depois de passar pelo condensador final, entra no último efeito que tem a menor temperatura e pressão dentro do sistema. A salmoura é bombeada para o efeito anterior em direção ao primeiro efeito e depois é descartada. A temperatura e a pressão aumentam diferente do que acontece quando a alimentação é feita no primeiro efeito.

Nesse tipo de alimentação, a maior desvantagem é que a salmoura com a maior concentração é submetida ao efeito que tem a temperatura mais alta no sistema. Isso pode causar sérios problemas de incrustação no evaporador. Outra desvantagem desse arranjo é o aumento no custo de manutenção e na potência de bombeamento. Segue figura 24, como ilustração.

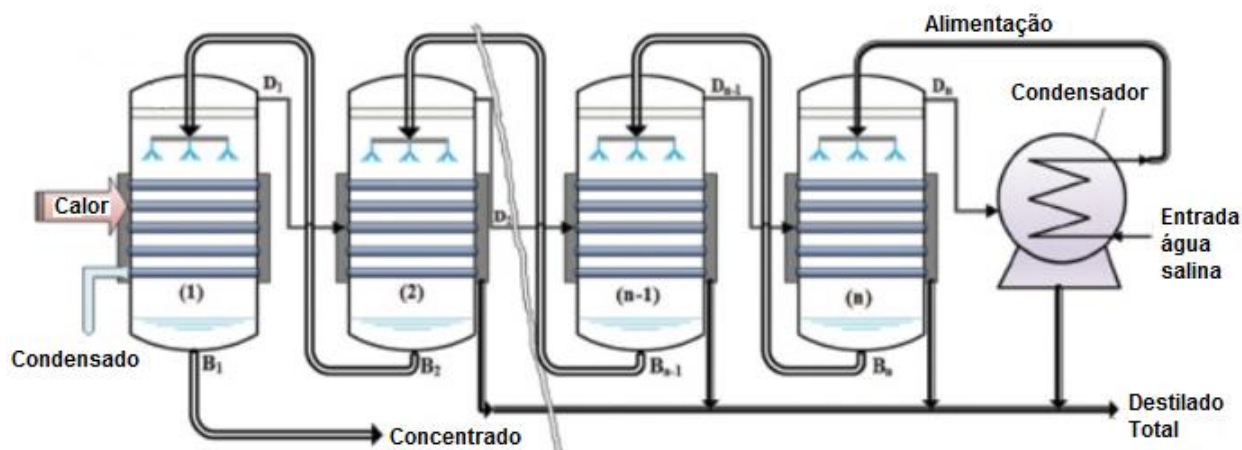


Figura 24 - Processo de Destilação MED com alimentação para trás (Fonte: Adaptado de A Multidisciplinary Introduction to Desalination)

3.7.3.2 Paralela

A figura 25, abaixo, mostra uma variação paralela, com todos os efeitos sendo alimentados juntos. A alimentação e o vapor gerado nos efeitos fluem na mesma direção nessa configuração. O fluxo é o mesmo que na configuração de alimentação para frente. A salmoura flui entre os efeitos devido a diferença de pressão e a baixa altura estática para ser retirada no último efeito. Uma variação pode retirar todo o concentrado sem a necessidade de passá-la para o efeito seguinte. Esse sistema MED de alimentação é o mais utilizado na escala industrial.

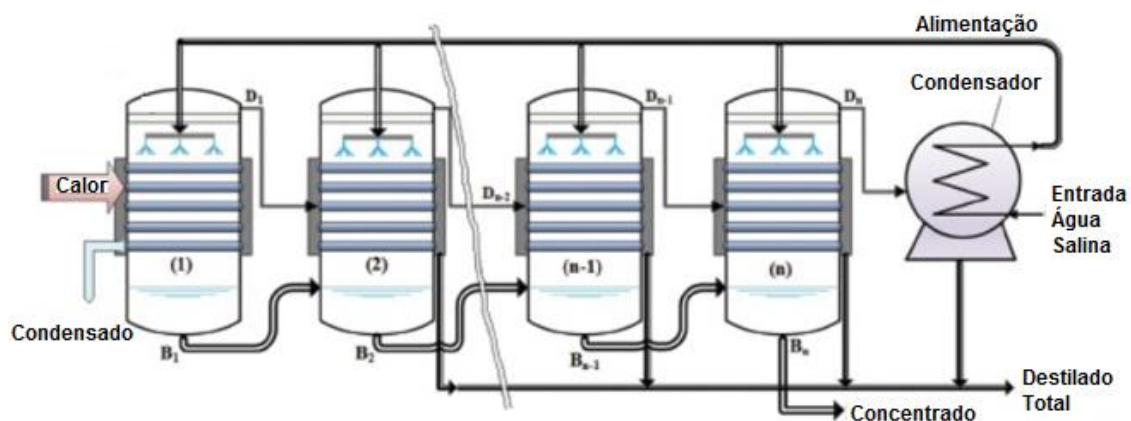


Figura 25 - Processo de Destilação MED com alimentação paralela (Fonte: Adaptado de *A Multidisciplinary Introduction to Desalination*)

3.7.3.3 Observações do processo

- O processo MED trabalha com 8 a 16 evaporadores;
- O consumo de energia de uma planta MED é consideravelmente menor do que uma planta MSF;
- A temperatura máxima do processo é próxima de 70 °C, o que reduz o potencial de incrustações;

- O vapor gerado no último efeito só se condensa ao encontrar com a tubulação de abastecimento, independente do sistema de alimentação. Com isso ela pré-aquece todo o sistema de entrada.

3.7.3.4 Arranjos de processos MED

As plantas MED podem ter tubos horizontais, verticais ou empilhados verticalmente. A maioria das plantas MED modernas tem uma configuração de tubo horizontal, com a película de alimentação de água pulverizada sobre o exterior dos tubos e condensação no interior.

3.7.3.5 Arranjo de tubo horizontal

Neste arranjo, o conjunto de tubos é disposto horizontalmente no vaso, como mostrado na Figura 26. A água de alimentação é pulverizada sobre a tubulação e o seu interior contém o calor para vaporizar a água de alimentação. O vapor gerado em cada efeito é direcionado para o próximo efeito de pressão mais baixo.

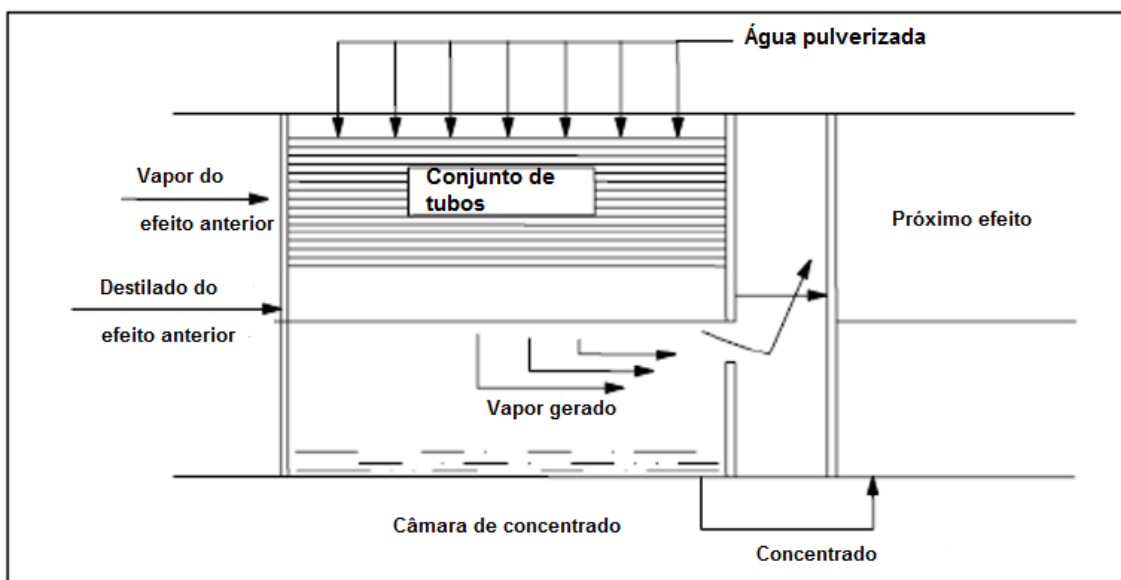


Figura 26 - Esquema MED com tubos horizontais (Fonte: Adaptado de Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

3.7.3.6 Arranjo de tubo vertical

O arranjo vertical do feixe de tubos é mostrado na Figura 27. A água de alimentação entra no topo do efeito e flui pelos tubos. O calor para a vaporização está na superfície externa da tubulação. A vantagem deste projeto em relação ao arranjo horizontal do tubo é a maior taxa de transferência de calor. Taxas de transferência de calor mais altas resultam de uma película fina nas superfícies interna e externa da tubulação do trocador de calor. Uma desvantagem desse projeto, no entanto, é a dificuldade de garantir que uma boa distribuição de fluxo seja alcançada para cada tubo.

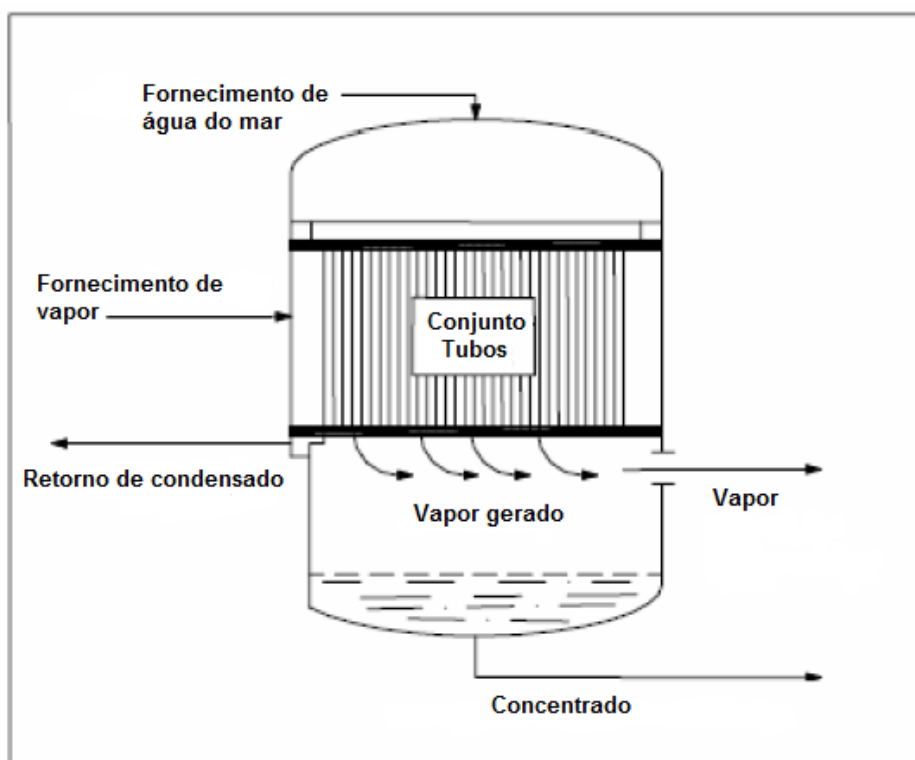


Figura 27 - Esquema MED com tubos verticais (Fonte: Adaptado de *Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination*)

3.7.3.7 Conjunto de tubos empilhados verticalmente

Neste arranjo, mostrado na figura 28, o concentrado flui entre os efeitos; eliminando assim a necessidade de bombas. Assim como no arranjo vertical descrita acima, a água de alimentação desce pelo interior da tubagem e o aquecimento para a vaporização está na superfície exterior do feixe tubular.

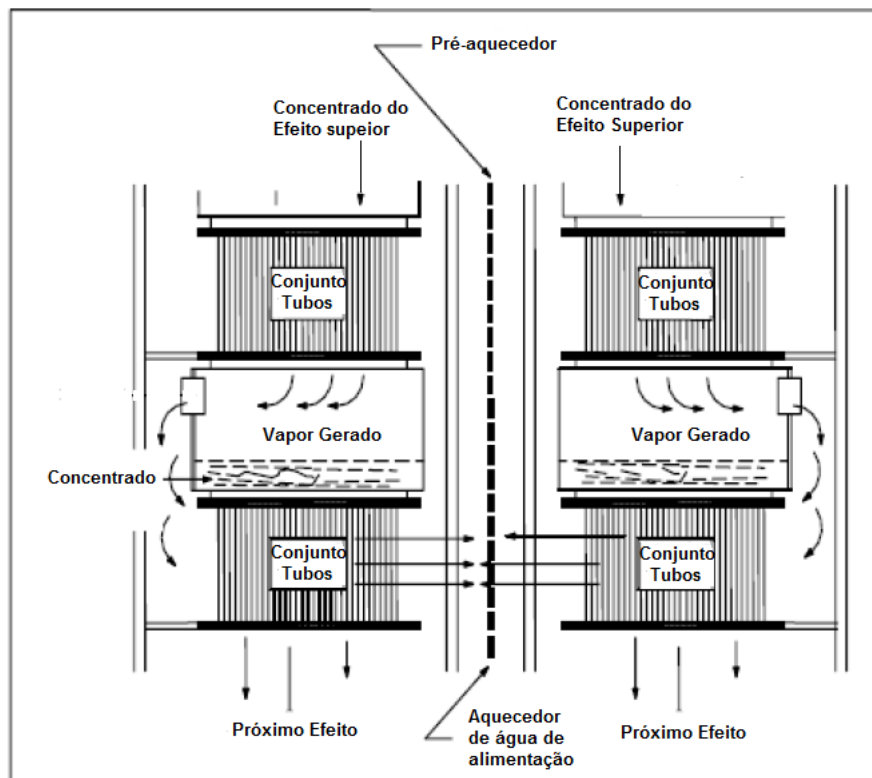


Figura 28 - Esquema MED com tubos empilhados verticalmente (Fonte: Adaptado de Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination)

3.7.4 Destilação por Compressão de Vapor (VC)

A destilação por compressão de vapor é muito parecida com a Destilação Múltiplo Efeito (MED) porém o calor para evaporar a água não vem de um vapor de uma caldeira e sim de um compressor. O vapor sofre uma compressão por um elemento mecânico (MVC) ou por um termo compressor a jato (TVC).

O processo se inicia com a água salina sendo pré-aquecida em trocadores de calor que recebem o fluxo de saída da salmoura e da água dessalinizada. Depois ela é pulverizada no conjunto de tubos e assim com uma troca de calor é gerado vapor. Esse vapor é aspirado, levado ao compressor e comprimido para receber um aumento de sua temperatura, que seja suficiente para ser a fonte de calor. Com isso, ela retorna a câmara por meio do conjunto de tubos e só assim se condensa, conforme figura 29.

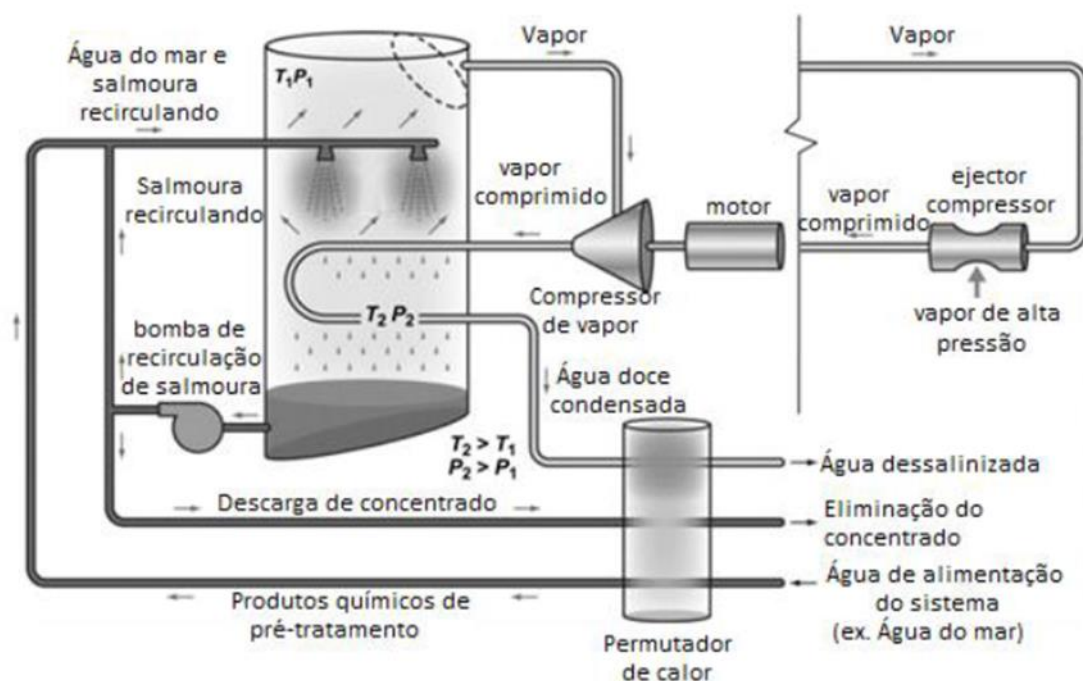


Figura 29 - Esquema do processo VC (MVC e TVC) (Fonte: Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica)

3.7.4.1 Observações do processo:

- Unidades VC são utilizadas em pequena/média escala e também podem ser usadas para melhorar o sistema MED;
- Assim como o MED, sua temperatura máxima é de 70 °C;
- O grande problema dessa planta, são os compressores de grande porte, devido ao seu alto preço.

3.8 Processos de Membrana

Nos dias atuais existem diversos processos de tratamento de água e um dos processos tecnológicos mais utilizados e inovadores são os constituídos por membranas, esses processos foram desenvolvidos no começo do século passado.

A definição de filtração é quando há a separação de dois ou mais componentes de um fluido corrente, baseado primeiro na diferença dos tamanhos, ela é referente à separação das partículas na água, sendo sólidas, líquidas ou gasosas, em relação as membranas, ela se estende á separação de solutos que são dissolvidos nas correntes líquidas e na separação de componentes em formas gasosas.

A membrana é um filtro que separa duas fases e transfere massas entre elas seletivamente. Ela é muito eficaz quando se trata de transportar determinados componentes e reter outros na mistura de alimentação do processo. A figura 30 demonstra a separação por membranas.

A principal distinção do processo de membranas de outras técnicas com a mesma função é a membrana, que seja na fase sólida, líquida ou gasosa, há a introdução de uma interface no volume das fases envolvidas para a separação e demonstra a criação de vantagens de seletividades e eficiência.

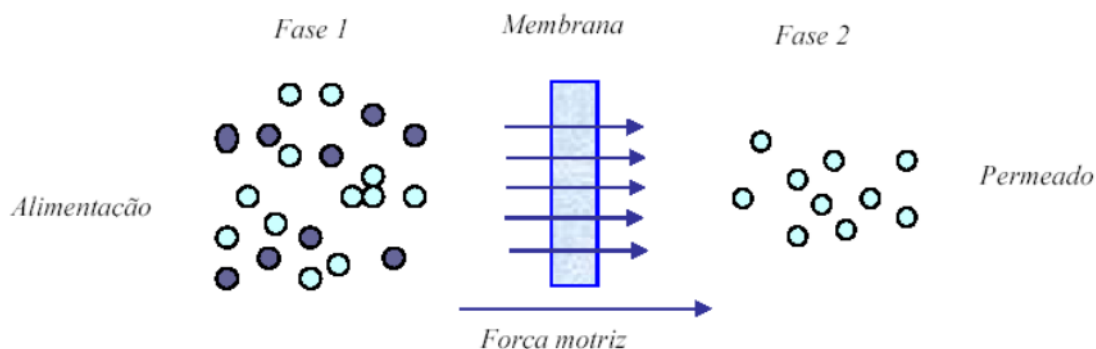


Figura 30 - Representação Esquemática do Processo de Separação por Membranas. (Fonte: Adaptado de <https://www.ebah.com.br/content/ABAAABZsYAL/utilizacao-eletricoagulacao-no-tratamento-efluente-industria-galvanica?part=3>)

3.8.1 Osmose reversa ou invertida (OR)

Tecnicamente osmose é o nome dado ao movimento de água entre meios com concentração diferente entre solutos separados por uma membrana semipermeável. É um processo físico-químico importante na sobrevivência de células.

Á água sempre se movimenta de um meio menos concentrado em soluto (hipotônico) para um meio mais concentrado em soluto (hipertônico) com o objetivo de atingir a mesma concentração nos dois meios, tornando os isotônicos, pois os poros da membrana semipermeável permitem a passagem de moléculas de água, porém impedem a passagem de outras substâncias. A representação dos tipos de osmose são mostrados nas figuras 31 e 32.

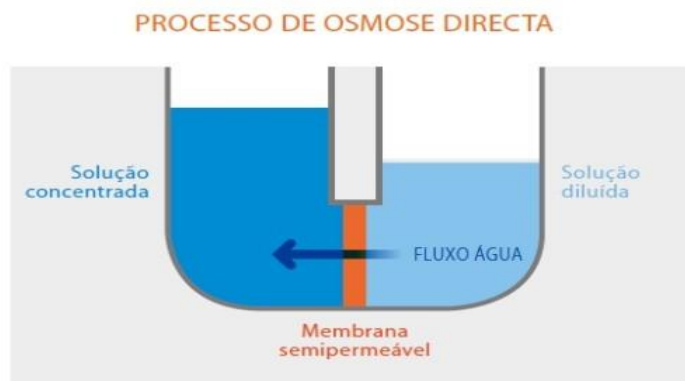


Figura 31 - Representação do processo de osmose. (Fonte: <https://www.hidraulicart.pt/osmose-inversa/>)

PROCESSO DE OSMOSE INVERSA

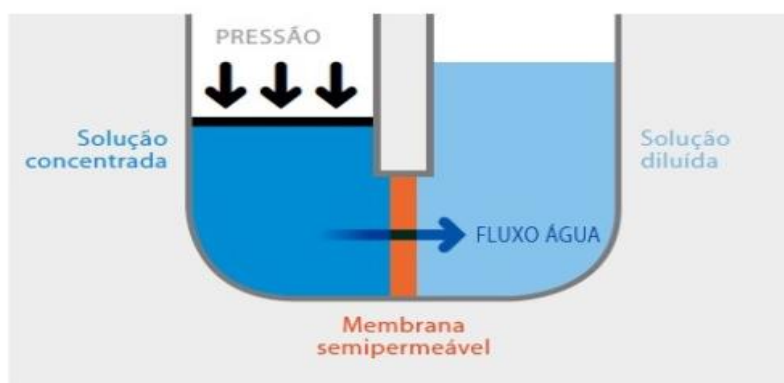


Figura 32 - Representação do processo de osmose inversa. (Fonte: <https://www.hidraulicart.pt/osmose-inversa/>)

A osmose reversa (RO) é um processo que usa pressão que força uma solução através de uma membrana semipermeável que impede que o soluto (cloreto de sódio) passe para o outro lado retendo-o, e permite que o solvente (água) passe, representado na figura 33. Tecnicamente, o processo força uma solução altamente concentrada de soluto através de uma membrana semipermeável para uma região com baixa concentração de soluto, utilizando uma pressão externa que seja maior que a pressão osmótica.

MEMBRANA DE OSMOSE REVERSA

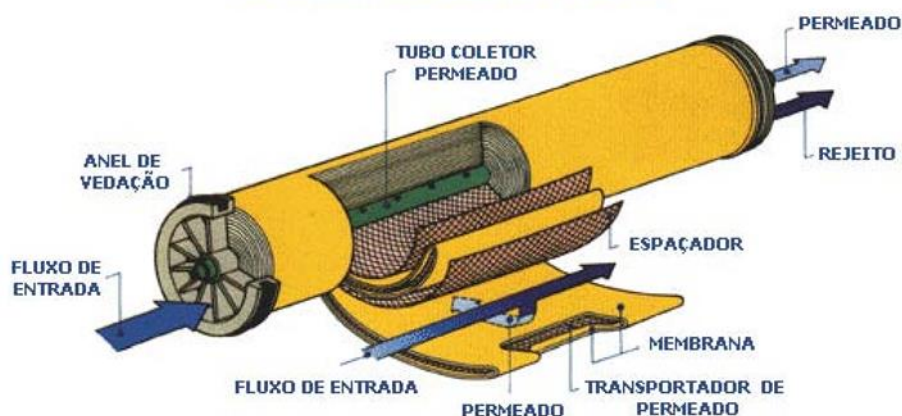


Figura 33 - configuração de um dessalinizador por osmose inversa. (Fonte: Artigo técnico osmose reversa entenda o seu funcionamento)

Na osmose reversa é utilizado uma membrana que possui uma densa camada de barreiras, feita de polímeros, onde é feita a maior parte da separação. Através dessa camada densa a membrana é projetada para permitir somente a passagem de água, prevenindo a passagem de soluto.

Dependendo da concentração do soluto e sua temperatura torna-se capaz de determinar a pressão osmótica, ou seja, quanto maior a concentração de soluto maior será a pressão osmótica a ser vencida, essa pressão é uma característica que cada líquido e solução possuem. Para a água temos uma pressão osmótica em torno de 30 atm. a 25°C.

Como último procedimento, a água que sai do processo de osmose reversa passa por um pós tratamento para que a água seja condicionada para o fim que será destinada, portando vários aspectos como salinidade e temperatura da água do mar, já que possui um permeado de pH levemente ácido, concentração de TDS está em torno de 70 a 350 mg/L, os íons de cálcio e magnésio possuem uma concentração de 2 a 6 mg/L e a concentração de boro encontra-se entre 0,5 a 1,2 mg/L

3.8.1.1 Equipamentos de osmose reversa

Os equipamentos de osmose reversa são geralmente compostos por:

- Pré-filtro de sedimentos: onde são feitos os tratamentos antes da água chegar à membrana, tem como objetivo de a eliminação dos resíduos em suspensão, que são as principais causas de ocorrer uma obstrução;
- Pré-filtro de carvão: tem como objetivo principal a proteção da membrana do cloro que existe na água que geralmente causa a oxidação;
- Membrana semipermeável de osmose: componente feito geralmente em poliamida a qual contém propriedades

semipermeáveis, ela tem como principal objetivo reter os sais, microrganismos e impurezas contidas na água;

- Regulador de fluxo de esgoto (restritor): responsável por controlar o fluxo e exercer a contrapressão necessária para um funcionamento ideal da membrana semipermeável;
- Acumulador: reservatório que garante instantaneamente o fluxo de água tratada;
- Pós-filtro de carvão: tratamento posterior à membrana para deixar a água ideal para consumo humano.

3.8.1.2 Membranas semipermeáveis

As membranas semipermeáveis possuem a capacidade de permitir que apenas o solvente passe por elas, impedindo que os sais as ultrapassem, assim os dissolvendo. As membranas são os principais e mais importantes elementos para que aconteça o processo de osmose reversa, podendo se apresentar em diversos tipos, como por exemplo as membranas assimétricas, as membranas de acetato de celulose e membranas do tipo espiral.

As membranas assimétricas geralmente são feitas de uma estrutura consistente e compostas de uma película final de alta densidade e com um substrato poroso com uma característica do mesmo polímero, apresentando composição química idêntica e oferecendo um suporte. Essa película possui a capacidade de dispensar os sais da solução quando acontece a dessalinização da água, enquanto o substrato poroso oferece uma resistência física a membrana, tornando estático o fluxo de água potável.

As membranas de acetato de celulose pertencem às classes das membranas assimétricas, ela já foi muito utilizada no passado, porém se tornou obsoleta com o avanço das pesquisas, assim sendo trocada por outros tipos de membranas, um tipo que começou a substituí-la são as membranas de poliamida

aromáticas pois possuem baixo custo de produção, são muito mais resistentes aos ataques por cloro, com taxas de rejeição de moléculas orgânicas superiores e cerca de 98% de taxa de rejeição de sílica.

Em escala industrial para um processo de dessalinização do tipo de membrana, os elementos mais utilizados são do tipo espiral, pois ele é utilizado entre dois espaçadores, sendo um para fornecer espaço para ter um escoamento da solução de alimentação, enquanto o outro faz a função de um canal coletor para o permeado. As membranas e os espaçadores são enrolados em torno de um duto perfurado para que possa ocorrer um escoamento, esse conjunto geralmente é selado com uma resina epóxi na sua parte externa.

O principal material para que ocorra a produção de água potável no processo de osmose reversa, e a qualidade da mesma, é a água de alimentação que vem da fonte hídrica na qual o sistema vai se alimentar para que ocorra seu funcionamento. Deve-se fazer observações para definir o tipo de água que irá ser utilizada no sistema, pois alguns fatores influenciam na composição física e química da água, as águas de rios, lagos ou até mesmo do mar tem como características elevados níveis de sólidos suspensos, atividades microbiológicas elevadas e as variações climáticas as afetam constantemente, já as águas subterrâneas tem menos fatores que as afetam.

Um dos principais componentes para dar o início ao processo é ter uma bomba de alta pressão para que haja o transporte de água para o sistema. Ela é um componente do sistema que gera a pressão inicial necessária para que as membranas produzam uma vazão mínima requerida com certa qualidade. As bombas são divididas em diversos tipos como por exemplo: as de estágio único, de pistão com deslocamento positivo, centrífuga de alta velocidade e centrífuga com multi estágios.

3.8.1.3 Observações do processo

- Quando a água chega no processo de osmose reversa alguns fatores tem que ser levados em consideração, assim como a

pressão e qualidade da água, a temperatura de entrada, como o equipamento foi instalado e como está a manutenção do sistema;

- Caso haja um sistema de osmose reversa no meio doméstico ele deve ser elaborado para o consumo humano;
- Quando a pressão está adequada percebe-se uma melhora no rendimento do equipamento e na qualidade do tratamento da água;
- A qualidade final da água está diretamente ligada a qualidade da água que chega nas estações de tratamento;
- A manutenção é de extrema importância para que a água tratada tenha uma boa qualidade, assim deve-se ter uma manutenção periódica do sistema, é recomendável ter uma substituição regular dos cartuchos filtrantes entre um período de 6 ou 12 meses.

Seu processo consiste em uma bomba de alta pressão, logo em sequência a um mecanismo de recuperação de energia (DRE) e suas membranas semipermeáveis, conforme figura 34.

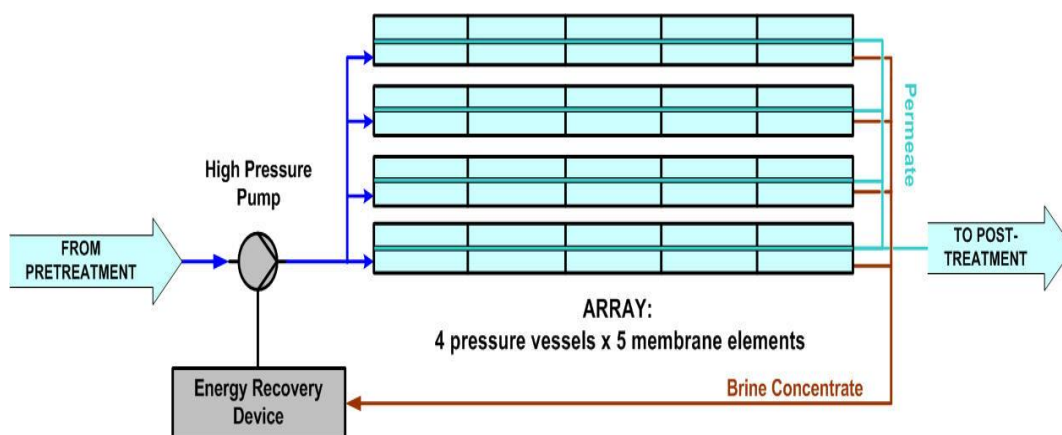


Figura 34 - Representação do processo de osmose reversa com recuperação de energia. (Fonte: <https://mundoeducacao.bol.uol.com.br/curiosidades/o-que-dessalinizacao-agua.htm>)

3.8.2 Eletrodialise

É um método para separar sais de água eletroquimicamente, nele uma diferença de potencial e membranas semipermeáveis são utilizadas para fazer a separação de íons de uma solução. Este processo somente se aplica a soluções salobras, não apresentando bons resultados com a água do oceano. O processo ocorre através do desenvolvimento das membranas e tem crescido mundialmente, apresentando melhores propriedades.

É uma tecnologia de separação, que não envolve mudança de fase, que comparado com os sistemas normais apresenta uma vantagem econômica no consumo energético. A eletrodialise ocorre devido a uma ddp nas membranas bipolares. Essas membranas através das suas superfícies promovem eletricamente uma difusão acelerada de cátions e ânions durante o processo gerando dois produtos: um com alta taxa de sais (água concentrada) e outra com baixa taxa (água diluída ou dessalinizada).

Desmineralização é o nome dado para a purificação da água através de membranas de troca iônica, todos os íons presentes na solução são removidos por esse processo, através de membranas catiônicas e aniônicas. Utilizadas mais industrialmente essas membranas fazem a purificação de água de caldeiras, obtenção de água pura, extração de materiais orgânicos.

A eletrodialise se baseia numa série de membranas bipolares colocadas alternadamente entre dois eletrodos, mostrada na figura 35. As membranas são separadas uma da outra através de espaçadores formando compartimentos entre elas. Quando uma solução passar entre essas membranas durante o efeito de um diferencial de potencial, os cátions migrarão para o catodo, atravessando a membrana catiônica e em seguida serão retidos pela membrana iônica. Os ânions tomam o caminho oposto em direção ao anodo, após atravessar a membrana aniônica, ficarão retidos pela membrana catiônica. No final do processo como resultado haverá um aumento de concentração de íons em compartimentos alternados e uma concentração baixa nos compartimentos

restantes, resultando na formação de duas correntes: uma diluída e outra concentrada.

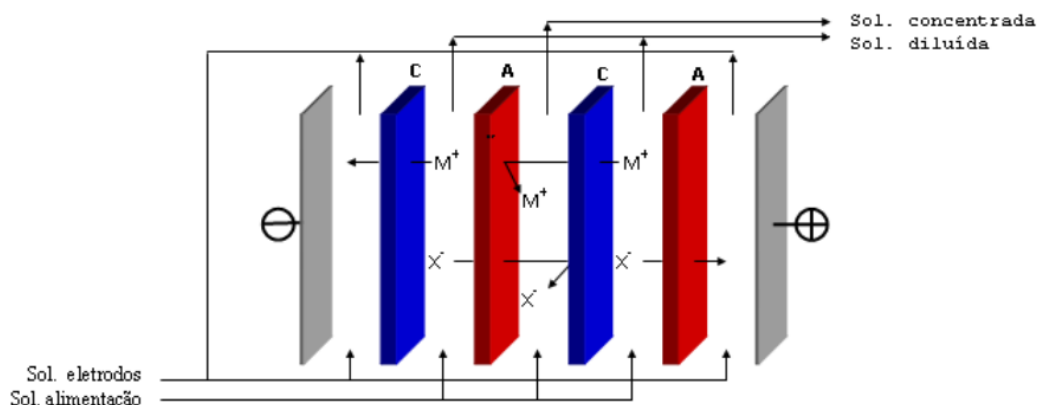


Figura 35 - Sistema eletrodialítico convencional (C = membrana catiônica e A = membrana aniônica). (Fonte: adaptado de obtenção de água para fins de análises através de um sistema Composto por membranas eletrodialíticas e resinas trocadoras de íons.pdf)

3.8.2.1 Membranas bipolares

Para as membranas catiônicas e aniônicas as suas matrizes geralmente são feitas de poliestireno. As catiônicas apresentam uma cadeia cruzada que é sulfonada com grupos sulfônicos presos ao polímero, já as aniônicas apresentam uma cadeia cruzada contendo grupos de amônia quaternária presos ao polímero. Essas membranas tem se destacado como uma ferramenta muito eficiente para a produção de ácidos e bases a partir de seus sais, devido à capacidade de promover uma rápida dissociação de moléculas de água. O processo de eletrodialise já é bastante reconhecido e economicamente viável e possui aplicações.

A seguir temos a figura 36 exemplificando a principal estrutura da membrana bipolar e sua função.

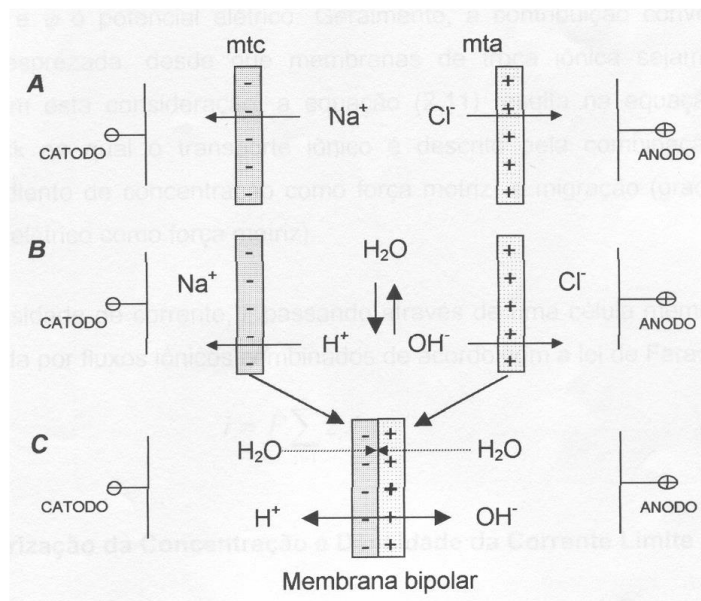


Figura 36 - Estrutura da membrana bipolar. (Fonte: adaptado de obtenção de água para fins de análises através de um sistema Composto por membranas eletrodialíticas e resinas trocadoras de íons.pdf)

Nesta figura temos representada duas membranas entre eletrodos, uma membrana catiônica e uma membrana aniônica, semelhante a um eletrodialise tradicional.

Atualmente há dois tipos de membranas bipolares produzidas:

- Membrana bipolar simples;
- Membrana de múltiplas camadas.

Membranas bipolares simples são produzidas unindo duas camadas, uma cobertura seletiva a cátions a uma membrana aniônica preparada. A membrana de múltiplas camadas é produzida juntando várias camadas de membranas catiônicas e aniônicas.

4. METODOLOGIA

Para definir os pontos a serem comparados sobre os dessalinizadores, decidimos fazer uma pesquisa mostrando rapidamente o ciclo da água, a composição da água salina, e a escassez hídrica para enfatizar o quão é necessário o uso da dessalinização hoje em dia. Por isso citamos também a história da dessalinização demonstrando o quanto o seu desenvolvimento tecnológico e investimento foram gradativamente ficando mais importantes no cenário mundial.

Os processos citados no capítulo anterior, sobre cada tipo dessalinizado foram de grande importância. Para que tivéssemos conhecimento detalhado sobre como é o funcionamento de cada um, e depois estudar sobre as técnicas e suas variações. Com isso foram, então, definidos os melhores pontos e também os dois processos mais utilizados, mundialmente, para fazer tal comparação.

Segue abaixo respectivamente a seleção dos pontos que foram comparados, e o diagrama de blocos do estudo na figura 37:

- Vantagens e desvantagens de cada processo;
- Fluxo energético;
- Custo de operação e de implantação dos processos mais utilizado;
- Capacidade instalada.

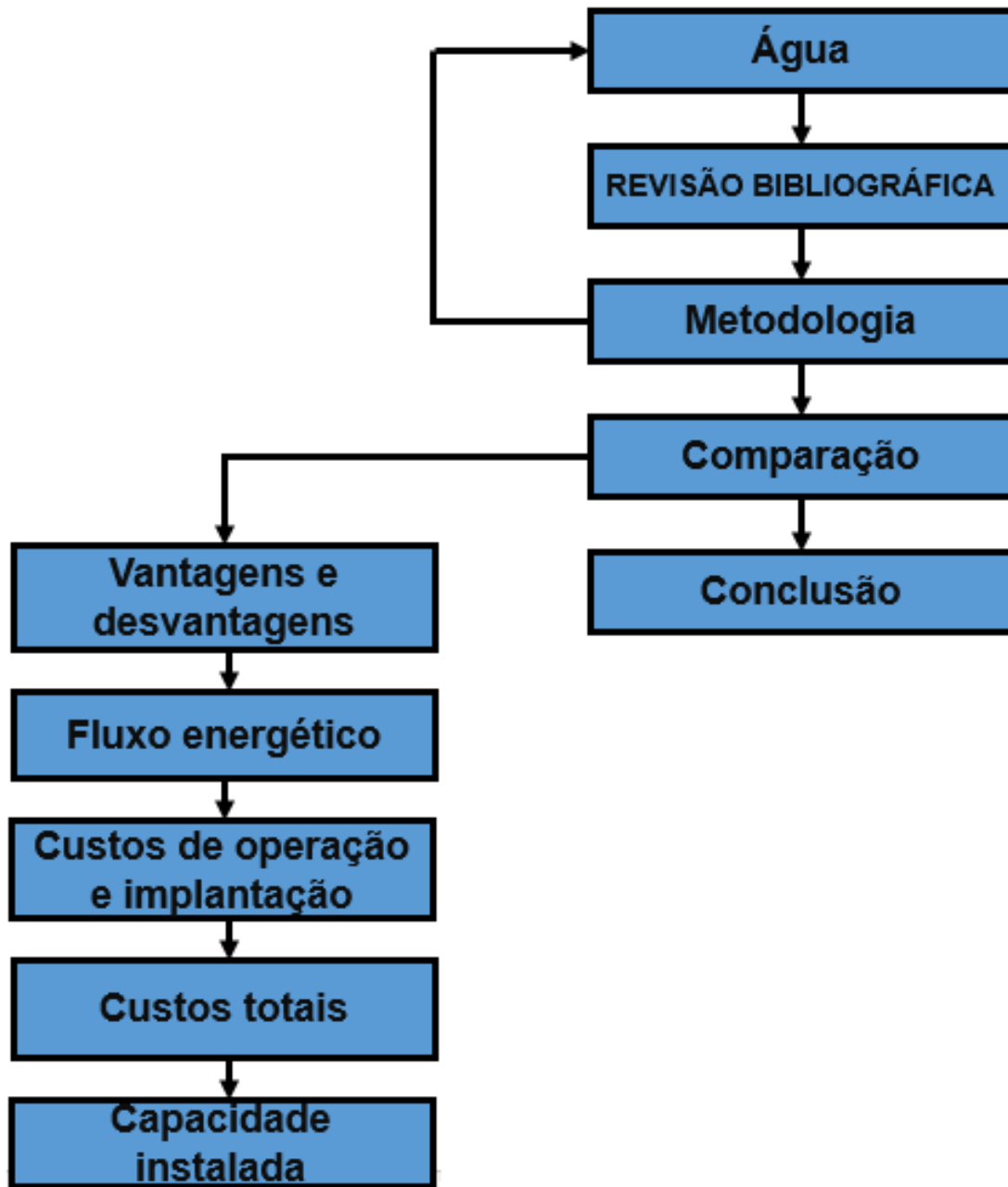


Figura 37- Fluxograma da metodologia.

5. ESTUDO COMPARATIVO

5.1 Vantagens e Desvantagens dos Processos por Membrana.

Osmose reversa (RO)

Vantagens

- Menor consumo de energia;
- Custo de investimento relativamente baixo;
- Sem fluxo de água de resfriamento;
- Operação simples e inicialização rápida;
- Alta capacidade de espaço / produção;
- Remoção de contaminantes além dos sais alcançados;
- Manutenção não exige que a planta inteira seja desligada.

Desvantagens

- Custos mais altos para a substituição química e de membrana;
- Vulnerável para alimentar mudanças na qualidade da água (SDT);
- Cuidado maior com o pré-tratamento;
- Membranas suscetíveis à bioincrustação;
- Falhas mecânicas devido à operação de altas pressões;
- Mínima expectativa de vida da membrana sete anos.

Eletrodíálise (ED)

Vantagens

- Uso de energia é proporcional aos sais removidos não tratados com volume;
- Maior vida útil da membrana de 7 a 10 anos;
- Trabalha com pressões baixas a moderadas.

Desvantagens

- Adequado somente para água de alimentação até 12.000 mg / L TDS;
- Limpeza periódica das membranas necessária;
- Vazamentos podem ocorrer em pilhas de membrana;
- Contaminantes bacterianos podem não ser removidos pelo sistema;
- Capacidade de produção relativamente baixo;
- Não adaptável para água do mar.

5.2 Vantagens e Desvantagens do Processo Térmico

Destilação Flash de Múltiplos Estágios (MSF)

Vantagens

- Projetos de grande capacidade;
- Tecnologia comprovada e confiável com longa vida operacional;
- Vapor *flash* reduz a incidência de incrustação;
- Pré-tratamento mínimo da água de alimentação;
- Água de alta qualidade;
- Processo da planta é independente do nível de salinidade;
- A energia térmica pode ser obtida combinando com energia geração.

Desvantagens

- Grande capital de investimento requerido;
- Processo intensivo em energia;
- Maior área de ocupação exigida (terra e material);
- Problemas de corrosão se materiais de menor qualidade forem usados;
- Taxas de partida lentas;
- Manutenção requer fechamento de planta inteira;
- Alto nível de conhecimento técnico necessário.

Destilação Múltiplos Efeitos (MED)

Vantagens

- Baixas incrustações;
- Pré-tratamento mínimo da água de alimentação;
- Processo muito confiável com requisitos mínimos para a equipe operacional;
- Tolerância aos níveis normais de matéria suspensa e biológica;
- A energia térmica pode ser obtida pela combinação com geração de energia;
- Água de alta qualidade.

Desvantagens

- Alto consumo de energia;
- Alto custo de capital e operacional;
- Materiais de alta qualidade exigidos;
- A água do produto requer resfriamento e mistura antes de ser usada para as necessidades de água potável.

Compressão de Vapor (VC)

Vantagens

- Processo desenvolvido com baixo consumo de produtos químicos;
- Econômico com alta salinidade;
- Demanda de energia relativamente baixa;
- Requisitos de temperatura mais baixos reduzem o potencial de incrustação e corrosão;
- Menor capital e custo operacional;
- Os projetos portáteis permitem flexibilidade;
- Pode ser adaptado como melhoria no processo MED;

Desvantagens

- Para dar o *start* requer fonte de aquecimento auxiliar para gerar vapor;
- Limitado a usinas de menor porte;
- Compressor (TVC) precisa de níveis mais altos de manutenção;

Tendo o conhecimento de todas as vantagens e desvantagens foi feita uma tabela comparativa dos processos, tendo como maior peso a ser avaliado os itens, consumo de energia, produção e qualidade da água. Fazendo uma análise podemos perceber que os que mais se destacam são os processos de osmose reversa e o MSF, conforme tabela 4.

Tabela 4 - Comparativo a partir das vantagens e desvantagens dos processos de dessalinização. (Fonte: Estudo comparativo sobre métodos de dessalinização)

Itens avaliados	Processo por membrana		Processo por energia térmica		
Consumo de energia (kw/m ³)	Osiose reversa	Eletrodiálise	MSF	MED	TVC
	Baixo	Médio	Alto	Alto	Baixo
Produção (m ³ /h)	Alto	Baixo	Alto	Médio	Baixo
Investimento (\$)	Baixo	Alto	Alto	Alto	Baixo
Custos (\$)	Alto	Alto	Alto	Alto	Baixo
Vida útil	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Confiabilidade	Médio	Alto	Alto	Alto	Médio
Qualidade da água	Alto	Médio	Alto	Alto	Médio

5.3 Fluxo Energético

Os processos de dessalinização consomem muito mais energia se comparados a outras opções de suprimento e tratamento de água. A energia necessária depende de vários fatores, como a tecnologia empregada, o projeto da usina, a qualidade e a temperatura da água de alimentação, a aplicação de dispositivos de recuperação de energia ou a qualidade pretendida da água produzida.

A dessalinização térmica precisa de energia elétrica e calor para o seu funcionamento, com exceção do MVC. A porcentagem de energia térmica nesses processos é sempre maior, para que chegue na temperatura desejada e a energia elétrica é necessária apenas para acionar bombas e outros equipamentos de auxílio. No MSF, o processo opera em uma temperatura máxima de salmoura (TBT) entre 90 e 110°C. Um aumento dessa temperatura,

eleva a taxa de produção e melhora o desempenho, no entanto, o TBT é limitado devido as incrustações. A energia equivalente elétrica total exigida pela MSF varia entre 13,5 e 25,5 kWh / m³. No caso do MED, as temperaturas da salmoura variam entre 64 e 70°C. O consumo total de eletricidade equivalente, considerando uma eficiência da usina de 30%, varia entre 6,5 e 11 kWh / m³. No caso do MVC, o consumo de energia elétrica varia entre 7 e 12 kWh / m³.

No método de dessalinização por membrana, a utilização de energia é somente elétrica que varia dependendo da salinidade da água de alimentação e da taxa de recuperação. Na osmose reversa (RO), o principal requisito energético é pressionar a água de alimentação. O consumo médio de energia do RO varia de 3 a 7 kWh / m³ para a água do mar, dependendo também do tamanho da instalação. Para uma unidade SWRO (água do mar) típica de 24.000 m³ / dia, o consumo varia entre 4 e 6 kWh / m³, com equipamentos que recuperam energia. No caso da ED, o consumo elétrico varia entre 2,6 e 5,5 kWh / m³ podendo ser menor em baixas salinidades. A quantidade de energia está relacionada com a pressão osmótica: quanto maior a salinidade da água de alimentação maior será a pressão osmótica, e conseqüentemente, maior será o consumo de energia.

Os processos com base na destilação (MSF, MED e VC) geralmente tem os maiores consumos energéticos devido a necessidade de altas temperaturas para evaporação. Porém, em todos esses processos térmicos, a energia necessária não depende da concentração de sais, diferente do que acontece com os processos de membrana. Osmose reversa é preferível a eletrodialise (ED) quando a salinidade é maior que 2500ppm e no caso de água salobra, a ED é mais eficiente energeticamente que a RO. Como a água de alta salinidade requer maiores quantidades de energia, devido a requisitos de pressão osmótica mais elevados, a ED não é considerada uma boa opção para a dessalinização da água.

Feito o estudo sobre quanto cada processo utiliza de energia térmica para os processos de destilação e energia elétrica para todos os processos, podemos comparar a utilização de energia dos processos, entre os quais se destaca, o processo MSF, conforme tabela 5.

Tabela 5 - Comparativo a partir do consumo de energia elétrica. (Fonte: Adaptado de A review of the water desalination systems integrated with renewable energy)

	MSF	MED	MVC	RO	ED
Consumo de energia elétrica(kwh/ m ³)	4.0 - 6.0	1.5 - 2.5	7.0 - 12.0	3.0 - 7.0	2.6 - 5.5
Consumo de energia térmica(MJ/ m ³)	190 - 390	230 - 390	nenhum	nenhum	nenhum
Energia elétrica equivalente a energia térmica(kwh/ m ³)	9.5 - 19.5	5 - 8.5	nenhum	nenhum	nenhum
Consumo total de energia elétrica(kwh/ m ³)	13.5 - 19.5	6,5 - 11.0	7.0 - 12.0	3.0 - 7.0	2.6 - 5.5

5.4 Custos de Operação e Implantação do MSF e RO

O custo da produção de água dessalinizada tem diminuído com o tempo devido às reduções no preço do equipamento, consumo de energia e avanços no projeto do sistema. Porém, esses custos variam com o processo, tecnologia empregada e também a localização de implantação, sendo difícil comparar custos de operação entre diferentes locais, mesmo que as instalações sejam parecidas. Incentivos locais e/ou subsídios também podem contribuir para a diferença de custos entre regiões e instalações.

As estimativas de custo para a água dessalinizada são específicas do local e dependem de vários parâmetros:

- Disponibilidade de energia elétrica e térmica: a usina de dessalinização pode ser, por exemplo, conectada a uma usina convencional já existente e utilizar seu calor térmico, ou ser conectada a uma rede de energia elétrica;

- Tecnologia escolhida e projeto de componentes: os custos de investimento variam muito entre usinas de dessalinização térmica e de membrana. Para uma capacidade de produção similar, os processos térmicos exigem maior área ocupada, maior energia específica (elétrica e térmica) e equipamentos mais caros do que os processos SWRO. Por outro lado, o destilado térmico tem uma qualidade superior à do destilado RO;
- Tamanho da planta: geralmente quanto maior a capacidade da planta, menor o custo total da água e o custo de investimento por volume de água;
- Localização geográfica e características específicas do local: custo da terra e transmissão da água;
- Qualidade da água de alimentação: salinidade, temperatura, arranjo de ingestão e qualidade necessária da água produzida influenciam o custo final, pois esses parâmetros afetam o pré-tratamento e o pós-tratamento, bem como os custos de operação e gerenciamento e a expectativa de vida dos componentes;
- Preço e disponibilidade de energia: o consumo de energia tem um impacto importante no custo final da água;
- Especificidades do financiamento: período de amortização, inflação;
- Operação e gerenciamento: substituição de equipamentos (especialmente membranas, bombas e tubos de cabeçote), custos de mão de obra qualificada e requisitos de treinamento.

Atualmente, as usinas de MSF exigem custos de implantação mais altos, enquanto a RO exige custos mais altos de operação e manutenção. As tecnologias de dessalinização estão se barateando cada vez mais, com a maior redução de custos na tecnologia de RO, sendo assim o motivo do seu grande crescimento. No entanto, os pesquisadores acreditam que esses custos não continuarão a diminuir na mesma proporção no futuro próximo, com o aumento dos custos de energia e matérias-primas.

Com o avanço da tecnologia, os custos para a produção de água dessalinizada têm diminuído rapidamente. Embora ainda seja uma opção de abastecimento mais cara se comparada com os recursos naturais, a dessalinização futuramente pode ser uma forma competitiva devido ao crescimento do custo na extração em fontes convencionais.

Os custos de energia, capital e operação e são os responsáveis pelo preço final da água dessalinizada. A figura 38 compara o barateamento dos principais processos devido à evolução da tecnologia, ao aumento da capacidade das unidades, à diminuição do custo das taxas de juro e de energia, à intensa competição entre fornecedores de equipamentos e melhorias na gestão de desempenho empresarial.

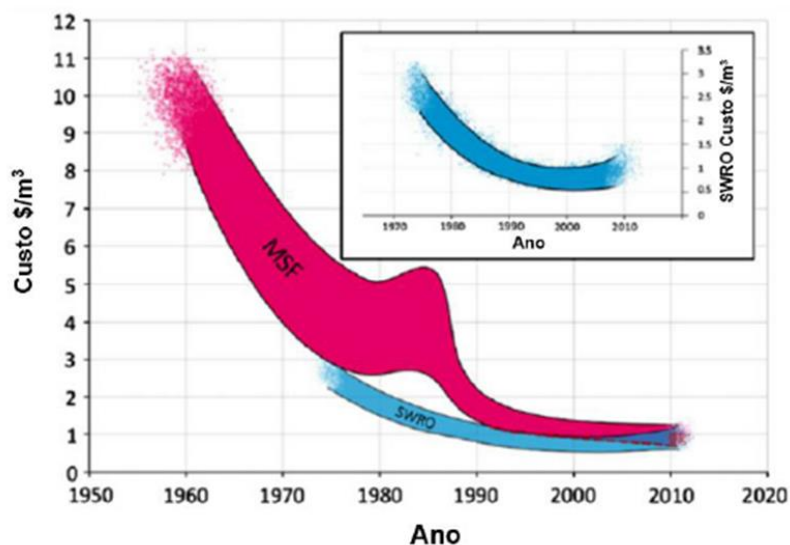


Figura 38 - Comparação do barateamento dos processos mais utilizados. (Fonte: Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica)

O crescimento de RO se leva ao fato do barateamento dele em relação ao processo MSF que mesmo com o seu processo ficando barato teve alguns picos de custo. O crescimento da osmose reversa é devido às melhorias da tecnologia, em particular à diminuição do consumo de energia desta tecnologia RO ao longo dos anos. Nos anos 90, o consumo era superior a 5 kWh/m³ caindo para menos de 2 kWh/m³ em 2010.

Outro fator que fez com que esse processo conquistasse o mercado foi o desenvolvimento das membranas que aumentaram seu tempo de vida e agora exigem menos pressão para o funcionamento. Isto está diretamente ligado ao gasto energético. A figura 39 mostra a redução no consumo de energia e consequentemente o custo.

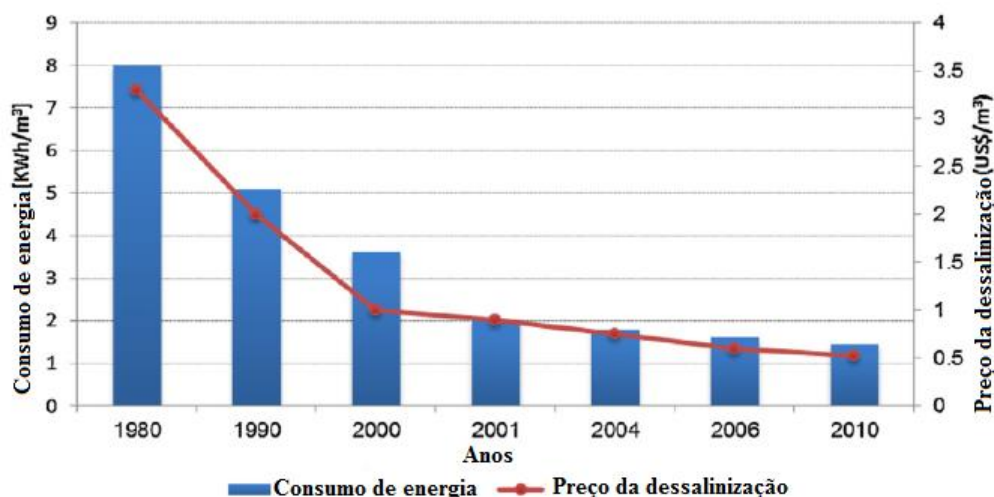


Figura 39- Consumo de Energia e preço da dessalinização RO (Fonte: Development of achievable energy consumption and cost in RO desalination).

O MSF teve melhorias específicas que contribuíram para a redução de custos, entre elas foram a otimização de projeto (com relação a equipamentos e configurações), eficiência termodinâmica, uso de novos materiais com melhores propriedades de transferência de calor e desenvolvimento de técnicas de construção e transporte. Mesmo com esse avanço, o MSF vem perdendo mercado pro RO em países com baixas fontes de energia térmica. A figura 40 a seguir, mostra a redução nos consumos de energia na Espanha e a predominância do mercado atual.

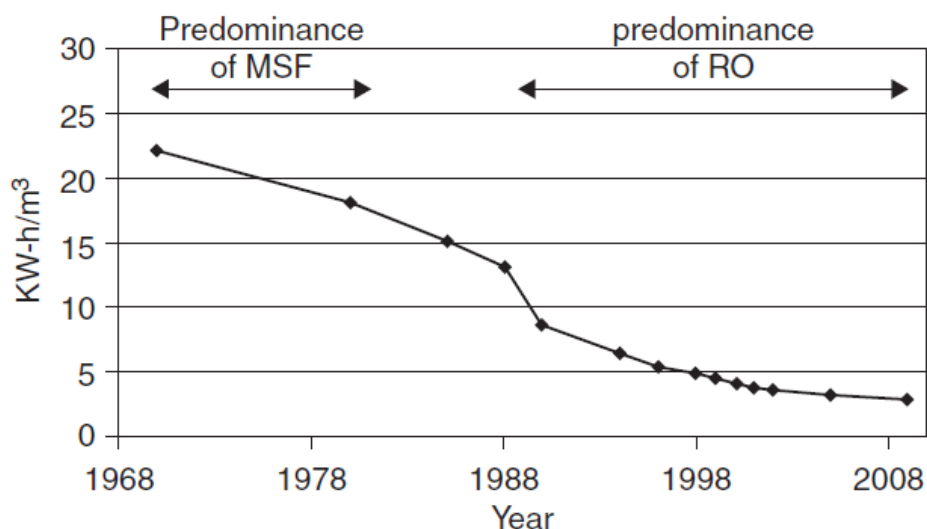


Figura 40 - Comparação mostrando a predominância no mercado da dessalinização. (Fonte: *The economics of desalination for various uses*)

5.5 Custos Totais de Produção

A fonte da água está diretamente ligada ao custo da dessalinização. Isso se leva ao fato que a quantidade de sais a serem removidos dessa água modifica o quanto de energia é necessária para o processo. Podemos concluir então que quanto maior a quantidade de sais, mais caro se torna o processo. O custo de dessalinização da água salgada pode chegar de 3 a 5 vezes mais cara que a dessalinização da água salobra. Além da salinidade, a capacidade de produção também afeta o custo de dessalinização, geralmente nas maiores usinas está havendo mais economia.

Em uma comparação de MSF e RO, podemos ver que o MSF é o mais caro, porém na maioria dos casos têm capacidade de produção superior a RO. O processo de dessalinização RO vem crescendo por ser uma tecnologia mais

barata e flexível e os custos de operação e das membranas têm diminuído. As instalações de processos RO são cada vez maiores e este processo é utilizado para a dessalinização de água salobra e água do mar.

A Tabela 6 apresenta uma comparação dos custos por metro cúbico de água produzida relacionando a capacidade da instalação com o método de dessalinização:

Tabela 6 - Comparação dos custos de produção de água dessalinizada RO e MSF.
(Fonte: *The economics of desalination for various uses*)

Método de dessalinização	Água de alimentação	Capacidade (m ³ /dia)	Custo (€/m ³)
MSF	Água do mar	23,000–528,000	0.42–1.40
RO	Água Salobra	<20	4.50–10.32
		20–1,200	0.62–1.06
		40,000–46,000	0.21–0.43
	Água do mar	<100	1.20–15.00
		250–1,000	1.00–3.14
		1,000–4,800	0.56–1.38
		15,000–60,000	0.38–1.30
	100,000–320,000	0.36–0.53	

A figura 41 mostra as divisões nos custos para se produzir água através do MSF e RO, respectivamente. É possível comparar que o processo MSF tem seus maiores gastos de energia e nos custos de implantação e por não possuir grandes necessidades de pré-tratamento, os produtos químicos são pouco usados. No RO, por necessitar de uma manutenção frequente, os gastos com trocas de membrana afetam o seu preço final e produtos químicos são mais usados para proteger as membranas.

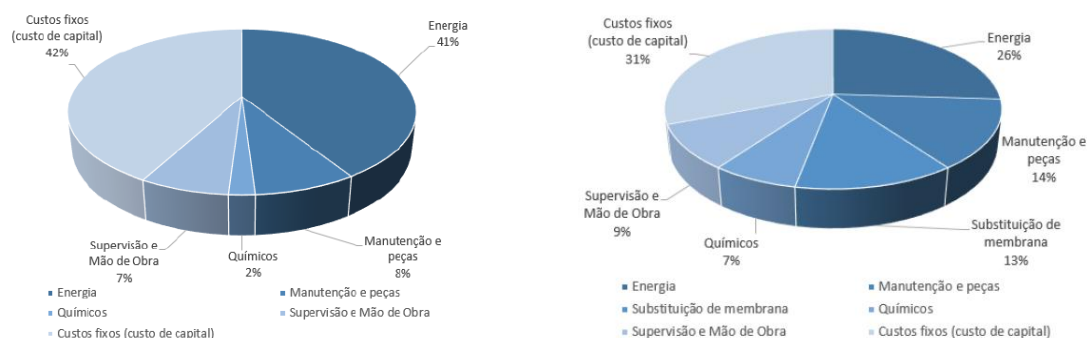


Figura 41 - Divisão dos custos MSF e RO respectivamente. (Fonte: *Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade econômica*)

5.6 Crescimento da Capacidade Instalada

O mercado da dessalinização vem crescendo ano a ano devido à procura de água boa para consumo mesmo com seu preço elevado. Este crescimento vem do avanço das tecnologias empregadas, aumentando a eficiência para se produzir altas quantidades de água pura. Cada vez mais países vêm investindo nesse mercado a fim de atender a população que sofre com o abastecimento de água.

A análise da figura 42 permite comparar que os processos de dessalinização por membrana estão em maior crescimento se comparados aos processos térmicos.

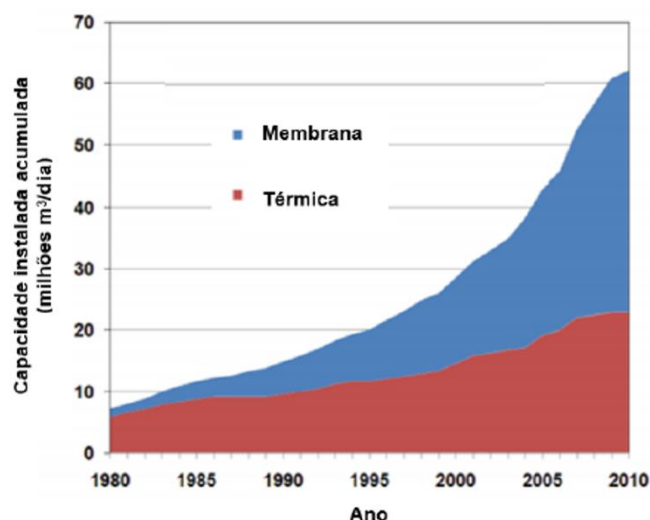


Figura 42 - Crescimento da capacidade instalada dos processos térmicos e processos de membrana (fonte: Adaptado de www.suswatec.de/download/presentations/Glade.pdf)

Os processos de MSF e RO são os que lideram o crescimento dos processos térmicos e de membrana, respectivamente. Os dois juntos correspondem a mais de 85 % da produção de água dessalinizada, sabendo da viabilidade da implantação depende da tecnologia escolhida, do preço da energia, da qualidade da água de alimentação e dos recursos da região implantada. A figura 43 mostra a diferença entre a capacidade em 2011 podendo ter tido um crescimento de RO em comparação com MSF nos dias de hoje.

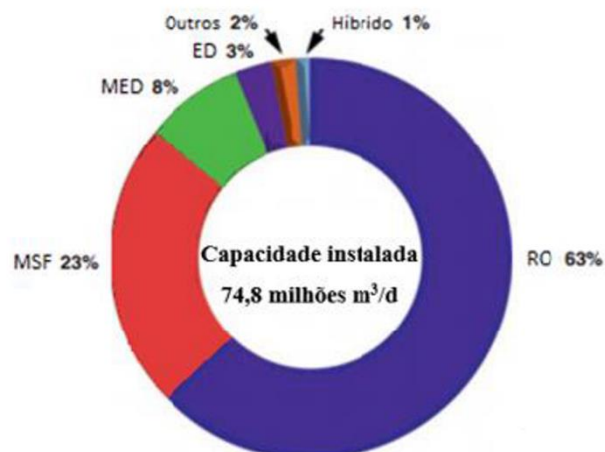


Figura 43 - Capacidade instalada em 2011 (Fonte: Adaptado de *Desalination Water from water*)

No Oriente médio são muito utilizados os processos MSF devido ao baixo custo na energia térmica. São países que possuem alto nível de extração de petróleo e devido a isso conseguem utilizar a energia para um duplo propósito, aquecendo a água nos processos térmicos. MSF é de longe a tecnologia de dessalinização mais robusta. Por isso é capaz de produzir quantidades significativas de dessalinizado de alta pureza e sem se preocupar com salinidade da água de alimentação. A principal desvantagem de MSF é a intensidade da energia. Países como os Emirados Árabes Unidos, a Arábia Saudita e Kuwait são referências quando falamos de dessalinização desse tipo.

Países que possuem baixas produções de petróleo e com altos gastos com combustíveis fósseis, procuram outras tecnologias, como RO. A Espanha tem uma grande produção utilizando Osmose Reversa com uma capacidade de água dessalinizada de 8% da capacidade de dessalinização global, enquanto a sua população representa apenas 0,6% da população mundial. A costa mediterrânea espanhola atualmente abriga as maiores usinas de dessalinização na Europa, tanto para água potável (em Barcelona com capacidade de 200.000m³ / dia) e água para irrigação (em Torrevieja com capacidade de 220.000m³ / dia). Em algumas regiões costeiras da Espanha, a água do mar dessalinizada é de 30 e 50% de água consumida. Outros países que são referências na produção por RO são Estados Unidos da América, China e Arábia Saudita.

As usinas de dessalinização usando MSF operam em capacidades mais altas do que aquelas que usam RO e estão geograficamente mais concentradas em torno do Golfo Pérsico. Usinas de dessalinização usando RO geralmente têm capacidades de produção mais baixas e são geograficamente mais distribuídas em todo mundo.

5.7 Quadro geral Comparativo

O quadro geral descrito na tabela 7, unifica e simplifica os parâmetros comparados no estudo.

Tabela 7 - Quadro geral comparativo dos processos.(Fonte: Estudo Comparativo sobre Métodos de Dessalinização)

PARÂMETROS	PROCESSOS				
	MSF	MED	TVC	RO	ED
PRODUÇÃO					
Capacidade produtiva(m ³ /dia)	23.000 - 528.000	20.000 - 250.000	10.000 - 35.000	100 - 320.000	1.000 - 145.000
Qualidade produtiva	Alto	Médio	Alto	Alto	Médio
CUSTOS					
Custo do produto (\$)	0.42 - 1.40	0.50 - 1.63	0.40 - 1.17	0.36 - 0.56	0.39 - 0.77
Consumo de energia(kw/m ³)	4.0 - 6.0	1.5 - 2.5	7.0 - 12.0	3.0 - 7.0	2.6 - 5.5
Consumo de energia térmica(MJ/m ³)	190 - 390	230 - 390	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Energia elétrica equivalente a energia térmica(kwh/m ³)	9.5 - 19.5	5 - 8.5	Nenhum	Nenhum	Nenhum
Consumo total de energia elétrica(kwh/m ³)	13.5 - 19.5	6.5 - 11.0	7.0 - 12.0	3.0 - 7.0	2.6 - 5.5
PREDOMINÂNCIA					
Utilização(%)	23%	8%	2%	63%	3%
Usinas instaladas	Oriente Médio	Oriente Médio	Oriente Médio	Europa, Américas	Europa, Américas

6. CONCLUSÃO

Com o passar dos anos as tecnologias relacionadas a dessalinização das águas do mar vêm se desenvolvendo cada vez mais para atender a demanda necessária para suprir a população mundial. Os processos de dessalinização têm capacidade de suprir a necessidade de regiões menos favorecidas com abastecimento de água doce, assim impactando na economia dessa região.

Foi observado através de estudos que as tecnologias RO e MSF são as mais utilizadas e possuem um crescimento substancial ao redor do mundo. Nas regiões que possuem grandes reservas de petróleo, existe a possibilidade de reaproveitamento da energia térmica gerada na extração para aquecer a água no processo MSF, assim elevando a capacidade de produção e barateando o processo. A Osmose Reversa apesar de produzir uma alta quantidade de água utilizando pouca energia, ela acaba sendo dependente da água que alimenta o seu processo.

De acordo com a pesquisa, não existe um método melhor que o outro, entre os processos de membrana e térmico. Sua implantação depende exclusivamente do local e para a melhor escolha do processo deve-se levar em consideração fatores como: água de alimentação; a capacidade; o tamanho do local a ser implantado; o custo e a disponibilidade de energia, operação e de manutenção, entre outros.

7. REFERÊNCIAS

ESCUDIER, J. L., COTTEREAU, P. & MOUTOUNET, M., **Electrodialysis Applications in the Treatment of Grape Musts**, Bull. O.I.V., v 62, p 695-696, 1989.

FILHO, D. F. DOS SANTOS, **Tecnologia de Tratamento de Água**, Ed. Livraria NOBEL, 2ª. Edição, 1983. Pág. 60.

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

AHMED, S. P., ALANSARI, M. S., **Biological fouling and control at Ras Abu Jarbus RO plant** – a new approach, Desalination vol. 74, p 69 – 84, 1989

AMORIM, EFIGÊNIA, **Adsorção de Tensoativos em Resina Trocadora de Cátions**, 1995. Dissertação de Doutorado, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 143p.

FILMTEC, Membranes. **Basics of RO and NF: Principle of Reverse Osmosis and Nanofiltration**. Form No. 609-02003-1004. 2003.

ZANDER, AMY K. ET AL. **Desalination a national perspective**. s.l. : National Academy of Sciences, 2008. ISBN: 978-0-309-11924-5.

KIM, D., **A review of desalting process techniques and economic analysis of recovery of salts from retentates**. Desalination, 270(1-3), p. 1-8 (2011)

AHMED, S. P., ALANSARI, M. S., **Biological fouling and control at Ras Abu Jarbus RO plant – a new approach**, Desalination vol. 74, p 69 – 84, 1989.

ALMEIDA, ALEX M. DE, **A Resina de Troca Iônica Como Extrator Multielementar em Análise de Solos Para Fins de Fertilidade**. 1999. Dissertação (Mestrado no Instituto de Química, Departamento de Química Analítica), Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 122p.

AMORIM, EFIGÊNIA, **Adsorção de Tensoativos em Resina Trocadora de Cátions**, 1995. Dissertação de Doutorado, Instituto de Química, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo. 143p.

CIENFUEGOS, F., VAITSMAN, D., **Análise Instrumental**, Editora Interciência Ltda., Rio de Janeiro, 2000.

FILMTEC, Membranes. **Basics of RO and NF: Principle of Reverse Osmosis and Nanofiltration**. Form No. 609-02003-1004. 2003.

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

KHAWAJI, AKILI D. ET AL. ***Advances in seawater desalination technologies***. s.l. : Elsevier B.V, 2008, Vol. 221, pp. 47-69.

AL-KARAGHOULI, ALI. ***Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes***. s.l. : ELSEVIER, 2013, Vol. 24, pp. 343–356.

GAIO, SUSANA SOFIA MARQUES. ***Produção de água potável por dessalinização: tecnologias, mercado e análise de viabilidade económica***; Lisboa, 2016

NRC. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. ***Desalination: A National Perspective***. **Comitee on Advancing Desalination Technology Board**. Estados Unidos da América, 2008.

TZEN, EFTIHIA. ***Promotion of Renewable Energy for Water production through Desalination***

LEVY, JOÃO DE QUINHONES. ***Novas Fontes de abastecimento de água: Reutilização e dessalinização***. Lisboa : s.n., 2008.

BERNAT, XAVIER ET AL. ***The economics of desalination for various uses. Re-thinking Water and Food Security: Fourth Botin Foundation Water Workshop***. s.l. : Fundación Botin, 2010

WHO, World Health Organization et al. ***Desalination for safe water supply: guidance for the health and environmental aspects applicable to desalination***. Switzerland: Public Health and the Environment World Health Organization, Geneva, 2007.

KUCERA, JANE. ***Desalination Water from Water***. s.l. : Scrivener Publishing LLC, 2014,

Eddy, Matthew (2008-01-01). **The Language of Mineralogy: John Walker, Chemistry and the Edinburgh Medical School, 1750-1800.** [S.I.]: Ashgate Publishing, Ltd

Schmiegelow, João Marcos Miragai. 2004. **O planeta azul: Uma introdução às ciências marinhas.** Interciência Ltda, Rio de Janeiro, 202p.

Ramos, J. A. P. 1999. **Uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e banco de dados para análise de parâmetros meteorológicos e oceanográficos.** São José dos Campos – INPE,141p.

Hill, T., and Symmonds, G. (2013). **The Smart Grid for Water: How Data Will Save Our Water and Your Utility** . Charleston, SC: Advantage.

Gleik, P. (2000). **The World's Water 2000–2001** . Biennial report, Pacific Institute, Oakland, CA.

USEPA. (2007). **Addressing the Challenge Through Innovation. Office of Research and Development National Risk Management Research Laboratory**, Washington, DC.

Brabeck-Letmathe, P. (2008). **“A Water Warning,”** in **The World in 2009 , Special Issue.** New York, NY:The Economist, 112.

Scanlon, J., Cassar, A., and Nemes, N., IUCN – **The World Conservation Union.(2004). “Water as a Human Right? IUCN Environmental Policy and Law Paper No. 51,”** in The International Union for Conservation of Nature and Natural Resources.

United Nations Economic and Social Council, Committee on Economic Social and Cultural Rights, General Comment No. 15. (2002). **“The right to water (Arts. 11 and 12 of the International Covenant on Economic, Social and Cultural Rights),”** in Twenty-ninth session , Geneva, 11–29, E/C.12/2002/11.

Alireza Bazargan Research and Development Manager Noor Vijeh Company (NVCO), **A Multidisciplinary Introduction to Desalination,2018,** River Publishers Lange Geer 44 2611 PW Delft The Netherlands.