

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOGRÁFICA, GEOFÍSICA E ENERGIA



Produção de água potável por dessalinização:
tecnologias, mercado e análise de viabilidade
económica

Susana Sofia Marques Gaio

Mestrado Integrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Dissertação orientada por:

Jorge Maia Alves

2016

Abstract

Desalinization has been gaining importance through the years as an alternative fresh water supply source in many countries around the world. The utilization of such technique allows not only the improvement of water quality, as well as finding a solution for water scarcity problems in certain situations, thus intensifying the social economical development.

There are several desalinization technologies, however they all can be summed up into two different processes: thermal and membrane processes.

Desalinization processes demand a big amount of energy, the energy cost being the main responsible for the produced water cost. Middle East concentrates a high percentage of the desalinized water production worldwide. Such region has a big number of thermal desalinization plants that operate through the use of fossil fuels. In cases such as Saudi Arabia, in which the fossil fuels reservoirs are abundant, the utilization of conventional systems is economically attractive. However, the increasing awareness of the population about environmental problems and the trend of increasing prices of fossil fuels have been altered this point of view.

There are several water desalinization technologies, all of them fit into two processes: thermal and membrane processes. All of them demand a big amount of energy during the process, the energy cost being the main responsible for the produced water cost. The renewable energy resources application in the desalinization process is becoming a feasible and promising option. Goals for the use of renewable energies might be defined, with many regions having the potential for developing and directing solar energy to the desalinization plants, therefore creating a sustainable alternative.

Keywords: Desalination; Thermal process; Membrane process; Renewable energy

Resumo

A dessalinização tem vindo a ganhar destaque ao longo dos anos, sendo uma opção no fornecimento de água potável em muitos países no mundo todo. Esta técnica permite não só melhorar a qualidade da água como pode, em certas situações, resolver problemas de escassez, obtendo-se um desenvolvimento económico e social.

A nível mundial, uma grande percentagem da produção de água dessalinizada está concentrada no Médio Oriente, e há um grande número de centrais de dessalinização térmica que operam usando combustíveis fósseis como fonte de energia. Nos locais onde as reservas de combustíveis fósseis são abundantes, como é o caso da Arábia Saudita, a utilização de sistemas convencionais é mais atrativa economicamente, todavia a consciencialização sobre os aspetos ambientais e a tendência de subida dos preços dos combustíveis fósseis tem mudado essa visão.

Existem diferentes tecnologias de dessalinização da água, todas elas enquadráveis em dois tipos de processos: processo térmico e processos de membrana. Em todas elas são necessárias grandes quantidades de energia durante o processo de dessalinização, sendo o custo da energia o grande responsável pelo custo de água produzida. A integração de recursos energéticos renováveis nos processos de dessalinização está a tornar-se mais viável e promissora. As metas de exploração de energia renovável podem ser definidas e em muitas regiões a energia solar pode ser uma alternativa sustentável para o funcionamento destas centrais.

Palavras-chave: Dessalinização; Processo térmico; Processo de membrana; Energia Renovável

Agradecimentos

O percurso na FCUL foi uma jornada gratificante onde ganhei mais conhecimentos e alicerces para a minha vida profissional. Também tive a oportunidade de fazer novas amizades que foram muito importantes durante este percurso.

Para a realização desta dissertação foi muito importante o apoio, a compreensão e a paciência dos meus amigos e da minha família.

Primeiramente gostaria de agradecer ao meu orientador, Professor Jorge Maia Alves, não só pela ajuda inicial no direcionamento do trabalho como no aconselhamento durante e na fase final deste trabalho.

Gostaria de demonstrar o meu agradecimento à minha família, pela insistência e apoio incondicional, tiveram imensa paciência e encorajaram-me a terminar. Também quero manifestar o meu agradecimento aos meus amigos pela amizade, cumplicidade e palavras de incentivo.

O meu sincero obrigada a todos.

Acrónimos

BWRO	Osrose Inversa alimentada por água salobra
CSP	Energia Solar Concentrada
ED	Eletrodíálise
EDR	Eletrólise Inversa
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
ETAR	Estação de tratamento de águas residuais
FER	Fontes de Energia Renovável
GOR	Razão dos ganhos de saída
LFR	Refletor linear Fresnel
MED	Destilação Múltiplo Efeito
MSF	Destilação <i>Flash</i> de Múltiplo estágio
MVC	Destilação por compressão mecânica de vapor
ODM	Organização de Desenvolvimento do Milénio
OMS	Organização Mundial e Saúde
PDC	Sistema parabólico
ppm	Partes por milhão
PR	Razão de desempenho
PTC	Coletor parabólico de calha
RO	Osrose Inversa
SD	Destilação Solar
SDT	Total de sais dissolvidos
SPT	Torre de energia solar
SWRO	Osrose Inversa alimentada por água do mar
TVC	Destilação por compressão de vapor térmico
TBT	Temperatura máxima alcançada
VC	Destilação por compressão de vapor
ZLD	Descarga zero de líquidos

Índices

Abstract	i
Resumo.....	iii
Agradecimentos.....	v
Acrónimos	vii
Índices	ix
1. Introdução.....	1
1.1 Uso e Consumo (por continente).....	2
1.2 Qualidade de Água e défice.....	9
1.3 Água e Meio Social	11
2. Dessalinização	17
2.1 Contextualização histórica	17
2.2 Processo de dessalinização.....	18
2.2.1 Processos de dessalinização térmica	20
2.2.2 Processo de dessalinização por membrana.....	27
2.3 A utilização de energia dos processos de dessalinização	31
2.4 Sistemas de Dessalinização - Energia Renovável	34
2.4.1 Energia Solar na Dessalinização	36
2.4.2 Energia Eólica na Dessalinização.....	40
2.4.3 Energia Geotérmica na Dessalinização	42
2.4.4 Sistemas Híbridos.....	43
2.5 Gestão do concentrado	44
2.6 Impactos e Medidas Mitigadores no Processo da Dessalinização.....	47
2.6.1 Fase de Construção.....	47
2.6.2 Fase Operação e Manutenção.....	48
2.6.3 Socioeconómicos.....	50
3. Visão Global do Mercado da Dessalinização.....	53
3.1 Mercado da dessalinização.....	53

3.1.1	Arabia Saudita	57
3.2	Projeto de uma Central de Dessalinização	59
3.2.1	Central de Dessalinização Combinada com Energias Renováveis.....	59
3.2.2	Estimativa do Fluxo de Energia	60
3.2.3	Avaliação do custo de água / Sistema de Energia	61
3.3	Análise económica da dessalinização.....	63
3.3.1	Parametros que influênciam o custo da água dessalinizada	63
3.3.2	Evolução e Avaliação do custo de água dessalinizada	65
4.	Conclusões	71
	Referências	73

Índice de Figuras

Figura 1 – Distribuição da água no planeta	2
Figura 2 – Disponibilidade de água doce m ³ /pessoa/ano (2007).....	3
Figura 3 – Relação entre disponibilidade de água e a população por continente	4
Figura 4 – Acesso a água potável nas regiões rurais	6
Figura 5 – Acesso a água potável nas regiões urbanas.....	6
Figura 6 – Consumo de água a nível mundial	8
Figura 7 – Áreas de escassez física e económica de água	11
Figura 8 – Uso de água doce no sector da agricultura, no início da década de 2000	13
Figura 9 – Uso de água doce no sector da indústria, no início da década de 2000	14
Figura 10 – Uso de água doce no sector de uso doméstico, no início da década de 2000	14
Figura 11 – Princípio da dessalinização da água esquematizado	19
Figura 12 – Linha de tratamento simplificada de um processo de dessalinização	20
Figura 13 - Esquema de um processo de destilação solar	22
Figura 14 – Esquema do Processo de Destilação MSF	23
Figura 15 - Esquema de um processo MED – com aproveitamento de água não evaporada nas etapas consecutivas.....	24
Figura 16 - Esquema de um processo MED – com fonte comum de abastecimento dos evaporadores	25
Figura 17 - Esquema de um processo VC (MVC e TVC).....	26
Figura 18 - O Princípio de funcionamento da Osmose Inversa.....	27
Figura 19 - Visão esquemática de uma membrana RO individual	28
Figura 20 - Secção de uma estrutura de pressão contendo 3 membranas individuais	28
Figura 21 - Esquema de um processo de eletrodíálise	29
Figura 22 - Combinação entre tecnologias de energia renovável e processos de dessalinização.....	35
Figura 23 - Perfil da Temperatura e Salinidade com a Profundidade	37
Figura 24 - Processo de destilação solar ligado a coletores solares	38
Figura 25 - Tecnologias de CSP: (a) SPT; (b) PTC; (c) LFR; (d) PDC	39
Figura 26 - Capacidade das tecnologias de dessalinização instaladas globalmente em 2010 e 2011 ...	54
Figura 27 - Esquema para identificar a combinação mais apropriada entre uma instalação de dessalinização e um parque de energia renovável	60
Figura 28 - Esquema para identificar se é necessário um sistema energético auxiliar.....	61

Índice de gráficos

Gráfico 1 – Utilização hídrica per capita por região, 1998-2002	4
Gráfico 2 – Acesso de água potável no mundo, 1990-2010.....	5
Gráfico 3 – Utilização de recursos de água melhorada e não melhorada pela população, em regiões urbanas e rurais.....	7
Gráfico 4 – Consumo mundial de água	8
Gráfico 5 – Evolução global do consumo de água	12
Gráfico 6 - Capacidade instalada de centrais de dessalinização no mundo a partir de 1950 até 2006..	17
Gráfico 7 - Fontes de Energia Renovável utilizada na dessalinização	35
Gráfico 8 - Capacidade instalada de processos de dessalinização térmicos e de membrana.....	53
Gráfico 9 - Os 10 países com maior capacidade de dessalinização térmica total instalada desde 1945	54
Gráfico 10 - Os 10 países com maior capacidade de dessalinização de membrana total instalada desde 1945.....	55
Gráfico 11 - Evolução do consumo de energia em processos de dessalinização RO.....	56
Gráfico 12 - Utilização de fontes de água para a dessalinização.....	56
Gráfico 13 - Capacidade instalada na Arábia Saudita pela tecnologia, categoria de utilização e qualidade da água bruta e tamanho da planta.....	58
Gráfico 14 - Evolução do custo de água dessalinizada	66
Gráfico 15 - Percentagem dos custos inerentes a uma central de dessalinização MSF.....	69
Gráfico 16 - Percentagem dos custos inerentes a uma central de dessalinização RO	70

Índice de tabelas

Tabela 1 - Classificação da água quanto à sua concentração de SDT	18
Tabela 2 - Consumo de energia dos processos de dessalinização	33
Tabela 3 - Custo da água dessalinizada de acordo com a fonte de água e a capacidade da instalação .	67
Tabela 4 - Custo de água dessalinizada de acordo com a fonte de energia	68
Tabela 5 - Custo de produção de água dessalinizada comparando os processos RO e MSF	69

1. Introdução

A água é um recurso com especial importância, distinguindo-se como uma prioridade comparativamente a outros recursos, uma vez que é vital para a vida humana e para a vida no planeta.

Neste Capítulo é feito um enquadramento sobre o consumo e a utilização de água assim como a quantidade, a qualidade e acessibilidade da água que têm vindo a suscitar uma grande atenção por parte de várias entidades governamentais.

Para contornar a necessidade de água em várias regiões, a dessalinização é uma opção estando este mercado a desenvolver-se e a crescer exponencialmente.

No Capítulo 2 é abordado o tema da dessalinização, onde é feita uma revisão das tecnologias de dessalinização, o seu consumo energético, e o uso das energias renováveis no contexto da dessalinização.

Na dessalinização de água são necessárias grandes quantidades de energia, dessa forma o uso de energia renovável acoplado à dessalinização tem um grande potencial como solução para o uso e diminuição de reservas de combustíveis fósseis e problemas climáticos.

No Capítulo 3 é feita uma análise do mercado e uma avaliação de custo associados à produção de água dessalinizada.

O uso de unidades de dessalinização acopladas a sistemas de energia renovável tem vindo a ganhar destaque nos últimos anos. Não só o custo da dessalinização tem vindo a diminuir, como os preços de energia renovável são cada vez menores, pelo contrário os preços dos combustíveis fósseis têm aumentado.

Por fim, no Capítulo 4 são apresentadas as conclusões do trabalho.

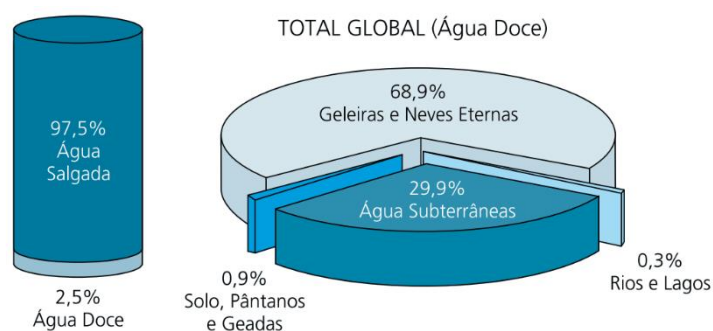
1.1 Uso e Consumo (por continente)

A água é um bem fundamental à vida no planeta, sendo essencial que se apresente no estado líquido para as condições do desenvolvimento dos processos vitais. Através do ciclo hidrológico, a água vai sendo um recurso renovável. Contudo, ao longo dos anos, o seu consumo tem excedido o seu renovamento e como tal tem-se vindo a sentir uma diminuição das reservas de água doce. Esse decréscimo é também provocado pela diminuição da sua qualidade, devido à poluição hídrica provocada por esgotos domésticos e industriais, tornando-se imprópria para consumo.

O planeta é coberto por 70 % de água, dos quais 97,5 % se encontra nos oceanos e mares, sendo imprópria para o uso e consumo humano e animal, devido ao elevado teor de sais. Apenas 2,5 % correspondem a água doce, e só uma percentagem mínima está disponível para a utilização nas diversas atividades. Isto, porque 68,9 % dessa água doce encontra-se na forma de glaciares e a restante apresenta-se no estado líquido. A água doce no estado líquido está distribuída da seguinte forma: 29,9 % correspondem a água subterrânea, 0,9 % à humidade do solo e pântanos e 0,3 % presentes em rios e lagos. Na Figura 1 encontra-se representada a distribuição de água no planeta referida anteriormente.

(1)

Figura 1 – Distribuição da água no planeta

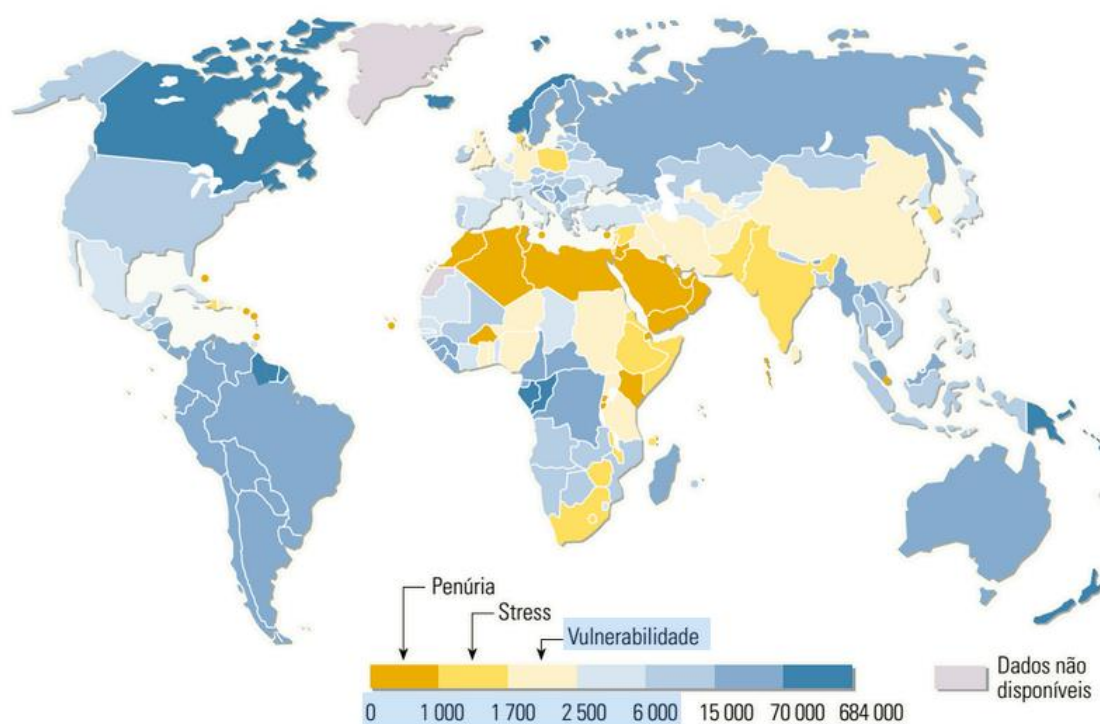


Fonte: Disponibilidade de água e a gestão de recursos hídricos (1)

A superfície terrestre contém cerca de 1.400 milhões de km³ de água, dos quais cerca de 45.000 km³ correspondem a água que poderá ser usada para beber ou para utilizar em higiene, atividades agrícolas e industriais. No entanto, nem toda essa água se encontra acessível, apenas 9.000 a 14.000 km³ dessa água se encontra disponível para uso nas diversas atividades humanas. (2)

É também de realçar que a distribuição de água é desigual em todo o globo terrestre, havendo grande disparidade da água disponível para consumo por continente, como se pode observar na Figura 2.

Figura 2 – Disponibilidade de água doce m³/pessoa/ano (2007)



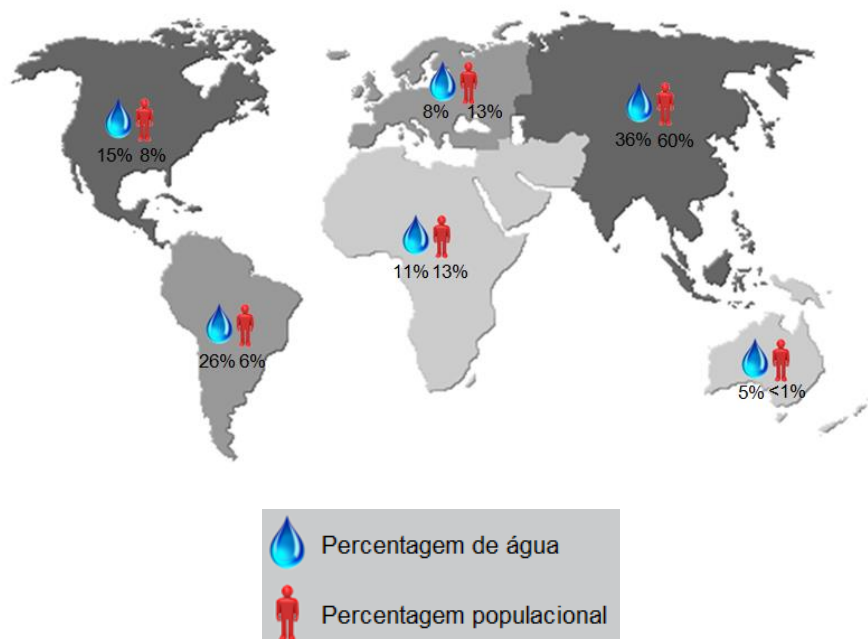
Fonte: Recursos Naturais. (3)

Como é perceptível existem regiões com grande abundância de água que são autossuficientes e outras em que a sua quantidade é deficitária para as necessidades da população. Os continentes mais afetados são: África, Ásia e Europa. (3)

A grande preocupação surge devido ao facto de o aumento do consumo de água ser superior ao crescimento populacional. Por exemplo, no século XX verificou-se um aumento do consumo de água em 9 vezes mais, enquanto o crescimento populacional ficou-se pelo triplo. Os estudos realizados demonstram que apesar de mais de um bilião de pessoas não possuírem atualmente água potável e saneamento básico, nas próximas décadas esse grupo populacional corresponderá a dois terços da população mundial. (1)

A Figura 3 demonstra a relação entre a disponibilidade de água global e a população do planeta. Pode verificar-se uma grande diferença entre a quantidade de água e a percentagem populacional existente em cada continente. O continente asiático abrange mais de metade da população mundial, contudo existem apenas 36 % de recursos hídricos nessa região. Ao contrário do que é apresentado no sul da América, onde cerca de 6 % da população do planeta tem disponível mais de um quarto dos recursos hídricos existentes no mundo. (4)

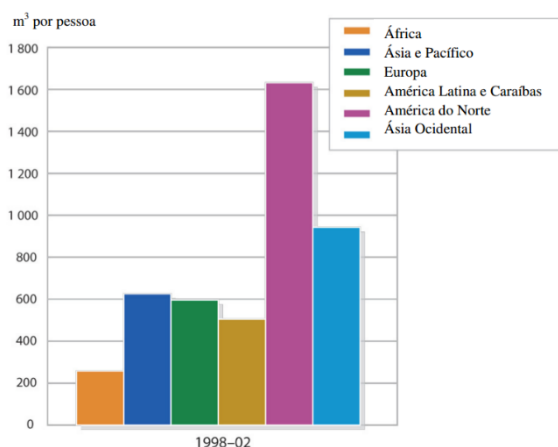
Figura 3 – Relação entre disponibilidade de água e a população por continente



Fonte: Adaptado de World Water (4)

A disponibilidade de água acessível para consumo é desigual de continente para continente, podendo influenciar os consumos de cada região. O Gráfico 1 apresenta a quantidade de água utilizada *per capita* por continente (1998-2002). A América do Norte possui um maior consumo de água *per capita*, seguido do continente asiático. A Europa, apesar de se encontrar como o terceiro continente com uma média de maior consumo *per capita*, apresenta maior rendimento por metro cúbico de água nos seus países relativamente à maioria dos países desenvolvidos. África é o continente com menor consumo de água por pessoa. (5)

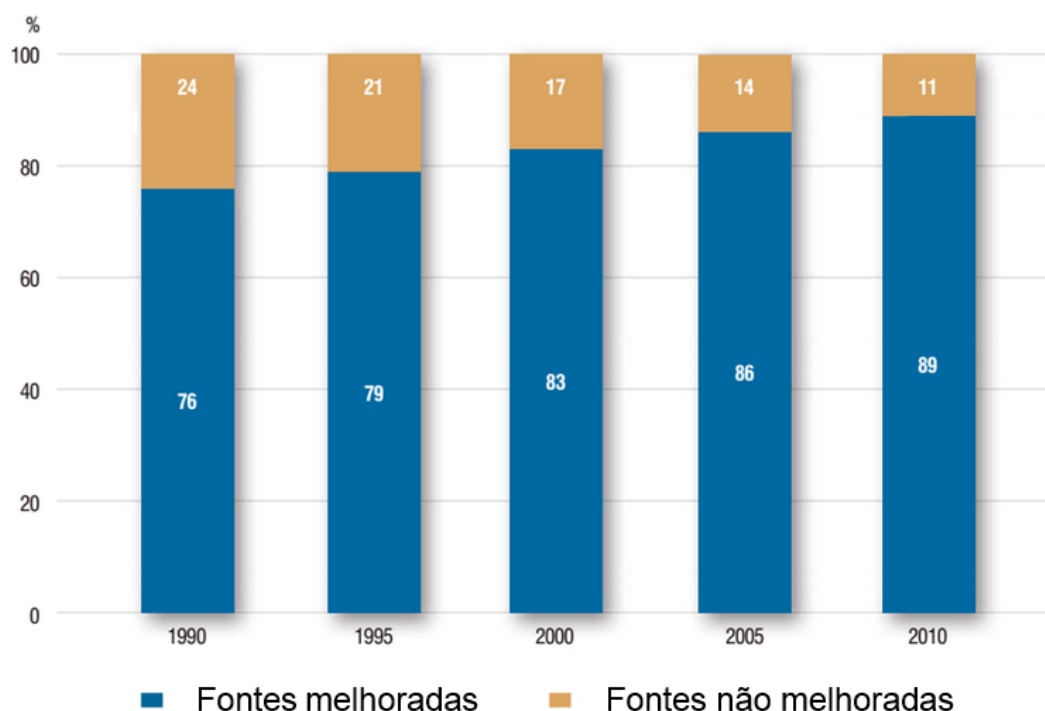
Gráfico 1 – Utilização hídrica per capita por região, 1998-2002



Fonte: Água no séc. XXI: desafios e oportunidades (5)

A meta de reduzir para metade, até 2015, a percentagem de população sem acesso a água potável, inserida no objetivo de garantir a sustentabilidade ambiental traçado pela Organização de Desenvolvimento do Milénio (ODM), foi alcançado em 2010. (6) No Gráfico 2 está representada a percentagem no acesso a água nas décadas entre 1990 e 2010, sendo visível um aumento dessa disponibilidade. Nestas duas décadas mais de 2 mil-milhões de pessoas tiveram acesso a água potável e apenas uma percentagem de 11% permanece sem acesso a esta, reduzindo para menos de metade da percentagem de 1990. (7)

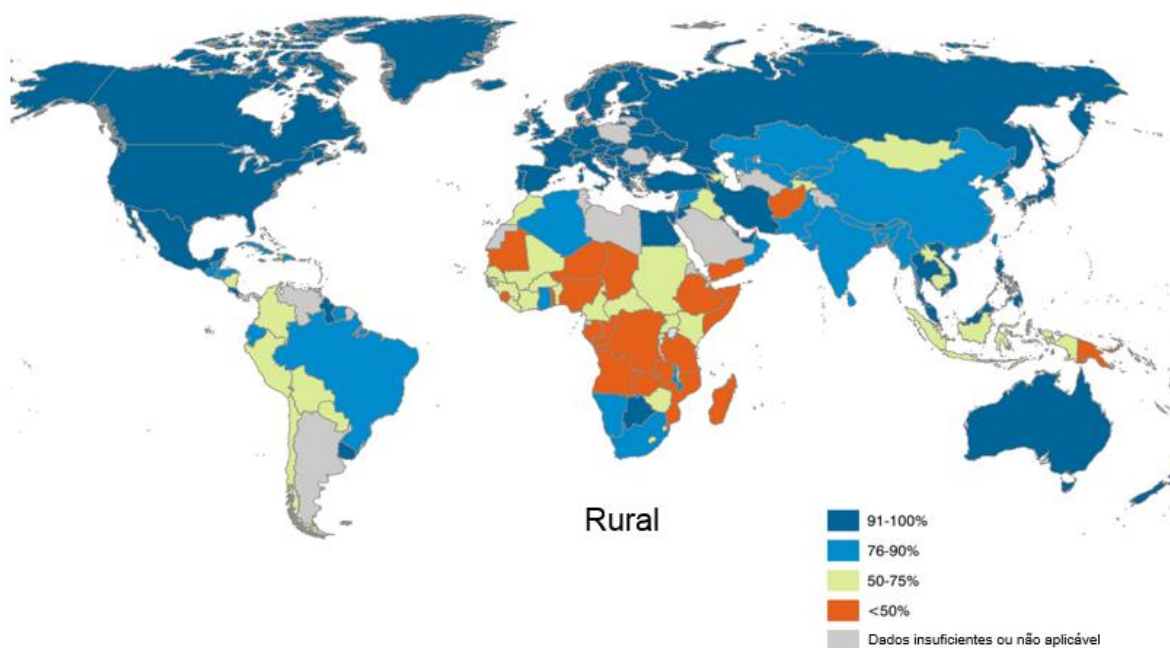
Gráfico 2 – Acesso de água potável no mundo, 1990-2010



Fonte: UNICEF and World Health Organization 2012 (7)

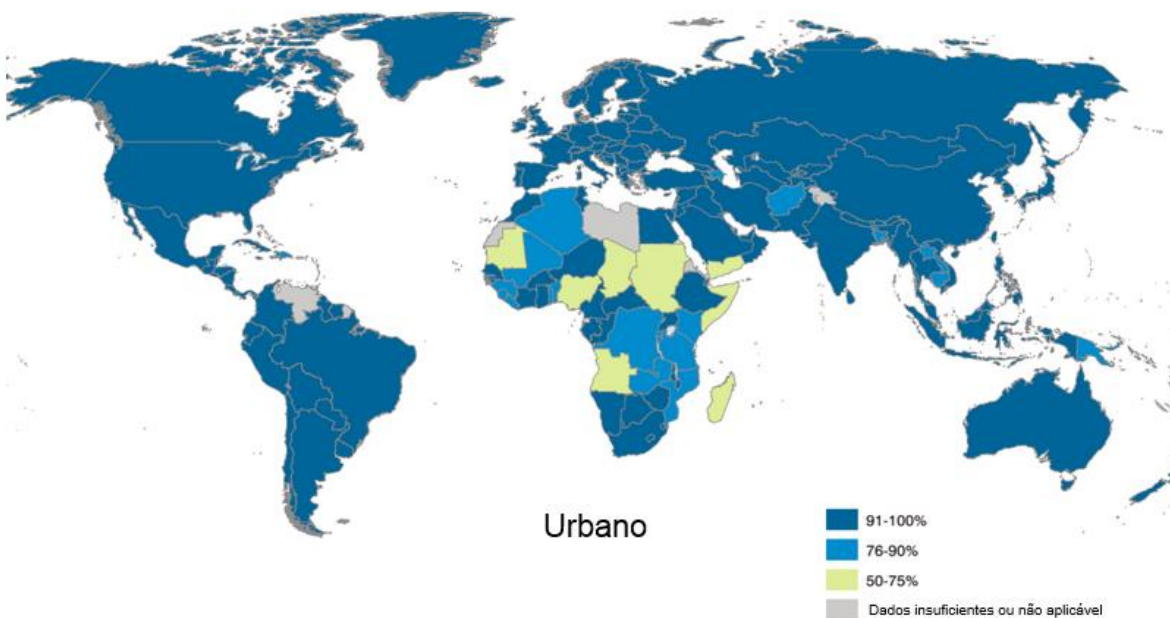
O melhoramento de fontes de abastecimento de água cobre 86 % dos países desenvolvidos e apenas 63 % dos países considerados menos desenvolvidos. Estas diferenças ocorrem também dentro dos países, entre áreas rurais e urbanas e entre classes sociais. Na Figura 4 e na Figura 5 é possível ter uma representação do acesso a água potável dentro dos próprios países, sendo visível que a mesma varia consoante se trata de regiões urbanas (Figura 5) ou rurais (Figura 4), sendo a quantidade de água potável superior em áreas urbanas. No entanto, enquanto que em áreas rurais existem inúmeros países em que menos de 50 % da população não tem acesso a água potável, nenhum país possui menos de 50 % de acesso a água potável em áreas urbanas.

Figura 4 – Acesso a água potável nas regiões rurais



Fonte: UNICEF and World Health Organization 2012 (7)

Figura 5 – Acesso a água potável nas regiões urbanas

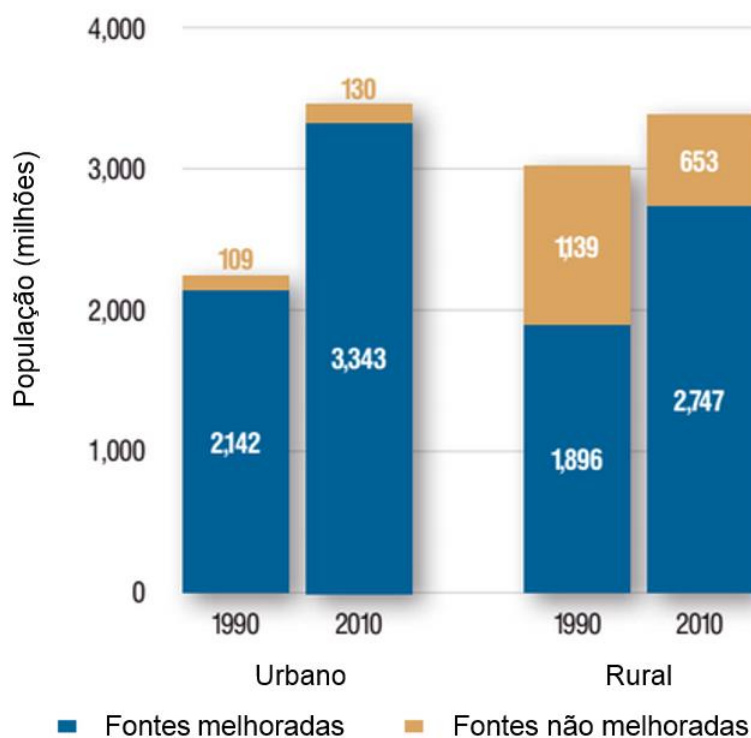


Fonte: UNICEF and World Health Organization 2012 (7)

Há que ter também em conta o crescimento da população que se representa no Gráfico 3. Atendendo a que o crescimento da população desde 1990 foi maior em zonas urbanas, e embora haja um aumento da população com acesso a água própria para consumo, aumentou também o número de

peças com acesso a água imprópria para consumo. Nas zonas rurais, o crescimento populacional não foi tão grande, e as peças com acesso a água própria e imprópria para consumo melhorou, porém em 2010 a população com acesso a água imprópria para consumo era 5 vezes maior que nas áreas urbanas.

Gráfico 3 – Utilização de recursos de água melhorada e não melhorada pela população, em regiões urbanas e rurais

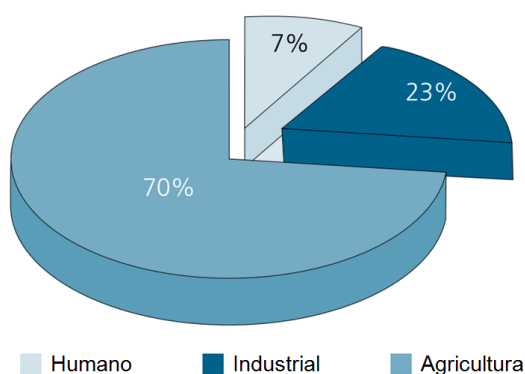


Fonte: UNICEF and World Health Organization 2012 (7)

A informação sobre a segurança da água potável não está disponível para uma monitorização global. Testar a qualidade da água em todos os países a nível nacional é dispendioso e logisticamente complicado, dessa forma a ODM definiu critérios para um indicador indireto. Assumindo como fonte de água melhorada, aquelas que pela natureza da sua construção não estão sujeitas ao contacto com contaminantes exteriores, fazendo assim a monitorização. Ou seja, através do meio tecnológico utilizado no abastecimento de água, aumenta a probabilidade da qualidade da água. No entanto, esses resultados podem estar superestimados e o número de peças que usufruem de abastecimento de água potável é provavelmente que seja menor. (7)

O consumo mundial de água divide-se em agricultura, indústria e uso doméstico. Estima-se que 70 % é utilizada na agricultura, 23 % na Indústria e apenas 7 % é usada para consumo humano, como está representado no Gráfico 4. (1)

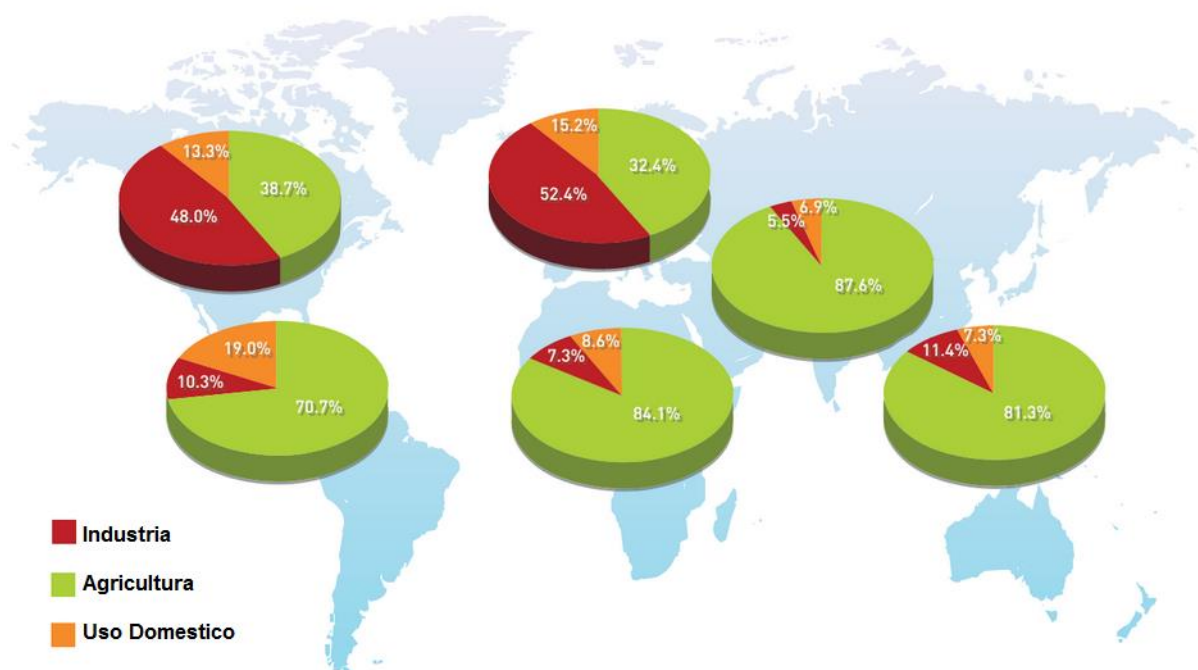
Gráfico 4 – Consumo mundial de água



Fonte: Disponibilidade de água e a gestão de recursos hídricos (1)

Contudo, consoante o continente, as percentagens da distribuição de consumo varia muito de acordo com o desenvolvimento do mesmo, como se pode observar na Figura 6.

Figura 6 – Consumo de água a nível mundial



Fonte: Water at a glance (2)

A Europa e a América do Norte apresentam uma maior utilização da água a nível industrial, enquanto os restantes continentes apresentam valores de maior consumo de água na agricultura. Esta divergência deve-se ao desenvolvimento dos referidos continentes. Este tema será aprofundado no subcapítulo Água e Meio Social.

1.2 Qualidade de Água e défice

A necessidade de água e a sua qualidade tem sido um problema global, uma vez que a água é um recurso vital que se encontra ameaçado, devido ao crescimento exponencial da população humana. Contudo, as diversas práticas humanas têm levado a uma deterioração da qualidade e simultaneamente da quantidade de água e esse impacto ambiental tem influenciado a disponibilidade de água potável para consumo humano. (8) O seu abastecimento deve ter uma qualidade suficiente para a saúde e o bem-estar dos seres humanos e dos ecossistemas, influenciando o desenvolvimento social e económico. Realça-se que a qualidade da água depende da utilização que se pretende dar à mesma.

A quantidade e a qualidade da água estão interligadas, embora sejam avaliadas de forma distinta. No entanto, a qualidade da água é influenciada não só por atividades humanas assim como por fatores naturais. A água no ambiente, sem ação humana, devido a diversos fatores naturais contém substâncias dissolvidas e partículas não dissolvidas. Essas substâncias podem ser sais e minerais dissolvidos que são importantes para a saúde e vitalidade dos organismos no ecossistema. Por outro lado, também pode conter outras substâncias como mercúrio, chumbo e cádmio (metais prejudiciais), pesticidas, toxinas orgânicas e contaminantes radioativos, prejudiciais para a vida. (8)

Muitos dos organismos vivos que fazem parte dos ciclos geoquímicos dos ecossistemas aquáticos como bactérias, protistas, vermes parasitas, fungos e vírus, presentes em fontes naturais, podem ser prejudiciais para os seres humanos, na água usada para consumo humano. (8)

É importante referir que a qualidade da água não se refere ao seu estado de pureza, mas às suas características físicas, químicas e biológicas que estão implementadas de acordo com a sua finalidade. (9)

O uso da água limpa é fundamental para muitas das atividades dos seres humanos, que englobam: consumo humano e abastecimento público de água; agricultura e aquacultura; indústria; geração de energia elétrica. No entanto, a qualidade necessária para cada utilização tem critérios de avaliação da água diferentes. Por exemplo, os critérios do padrão da pureza da água para consumo humano são mais exigentes do que os critérios da água utilizada nas indústrias. (10)

A qualidade da água tem vindo a ser uma preocupação global uma vez que o risco da sua degradação leva diretamente ao aumento de impactos sociais e económicos.

A quantidade e qualidade da água são ambos importantes, embora se verifique que a quantidade da água tem recebido mais investimentos, apoios científicos e atenção por parte do público. A má qualidade da água pode afetar a sua quantidade, uma vez que a água poluída pode não ser adequada para o uso pretendido (beber, banhos, indústria e agricultura) e dessa forma não pode ser usada, reduzindo a quantidade de água disponível. (11)

Deve haver um esforço político para melhorar a integração das questões da água, como a qualidade e a quantidade. O futuro depende do investimento dos governos e do apoio das comunidades para proteção e gestão deste recurso, desenvolvendo soluções corretivas para a sua sustentabilidade. A água de má qualidade é um risco para a saúde humana e ecossistemas ameaçando o desenvolvimento socioeconómico. (8)

Em geral, os países reconhecem os seus problemas quanto à disponibilidade e uso de recursos naturais. Contudo, existe algumas barreiras para aplicação de tecnologias de grande escala que resolveriam ou minimizariam esse problema e dificuldades em estabelecer programas de prevenção deste recurso. (12)

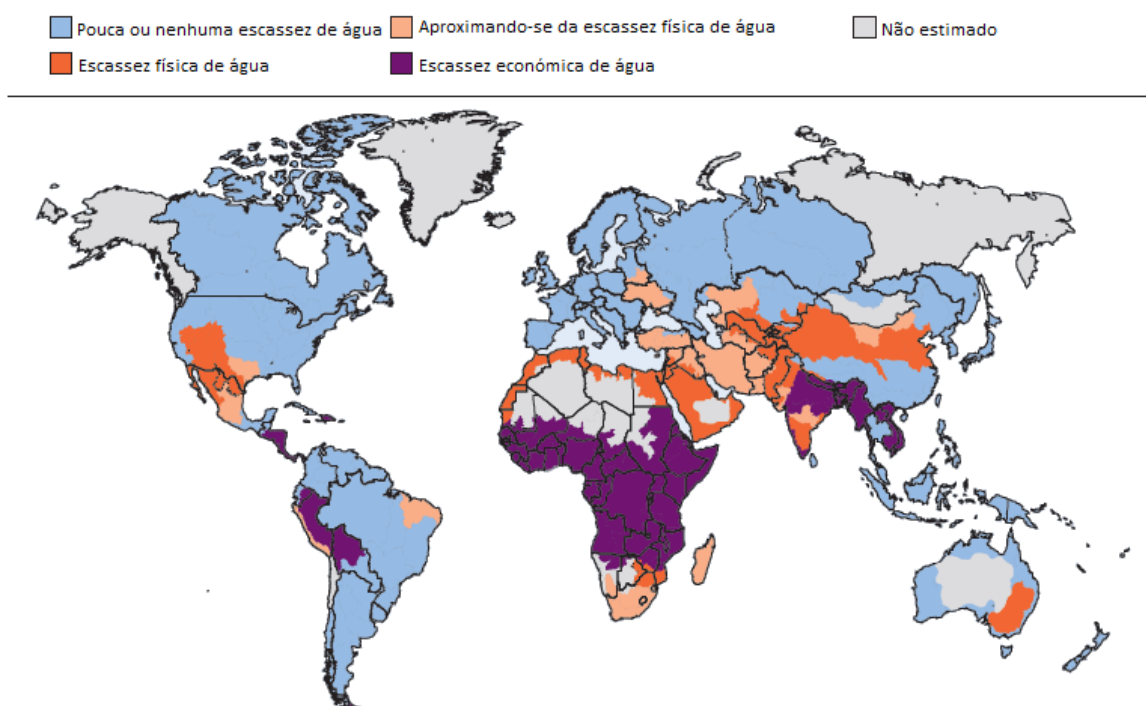
1.3 Água e Meio Social

O meio social e o consumo de água estão interligados, na medida que um maior desenvolvimento económico leva a uma maior necessidade de consumo.

O acesso à água não se restringe apenas à existência de recursos físicos, podendo verificar-se a existência de limitações em locais onde a água é abundante devido à falta de infraestruturas ou mesmo à implementação de acesso restrito por questões políticas e socioculturais de cada país. Atualmente, mais de 1,2 mil-milhões de pessoas residem em regiões com escassez física de água, sendo este recurso insuficiente para suprir as necessidades dessa população. Mas, cerca de 1,6 mil-milhões de pessoas reside em regiões com escassez económica de água, estando este recurso disponível na natureza, mas com acesso limitado devido às infraestruturas de distribuição existentes ou a questões políticas e financeiras locais. (13)

O crescimento populacional não é o único fator relevante para o problema da água, sendo de realçar a falta de compromissos, investimentos inadequados, má orientação governamental entre outros. A África subsaariana é afetada pela escassez económica de água, como representado na Figura 7, sendo uma região em que o desenvolvimento no sector da água ajudaria a reduzir a pobreza. (13)

Figura 7 – Áreas de escassez física e económica de água



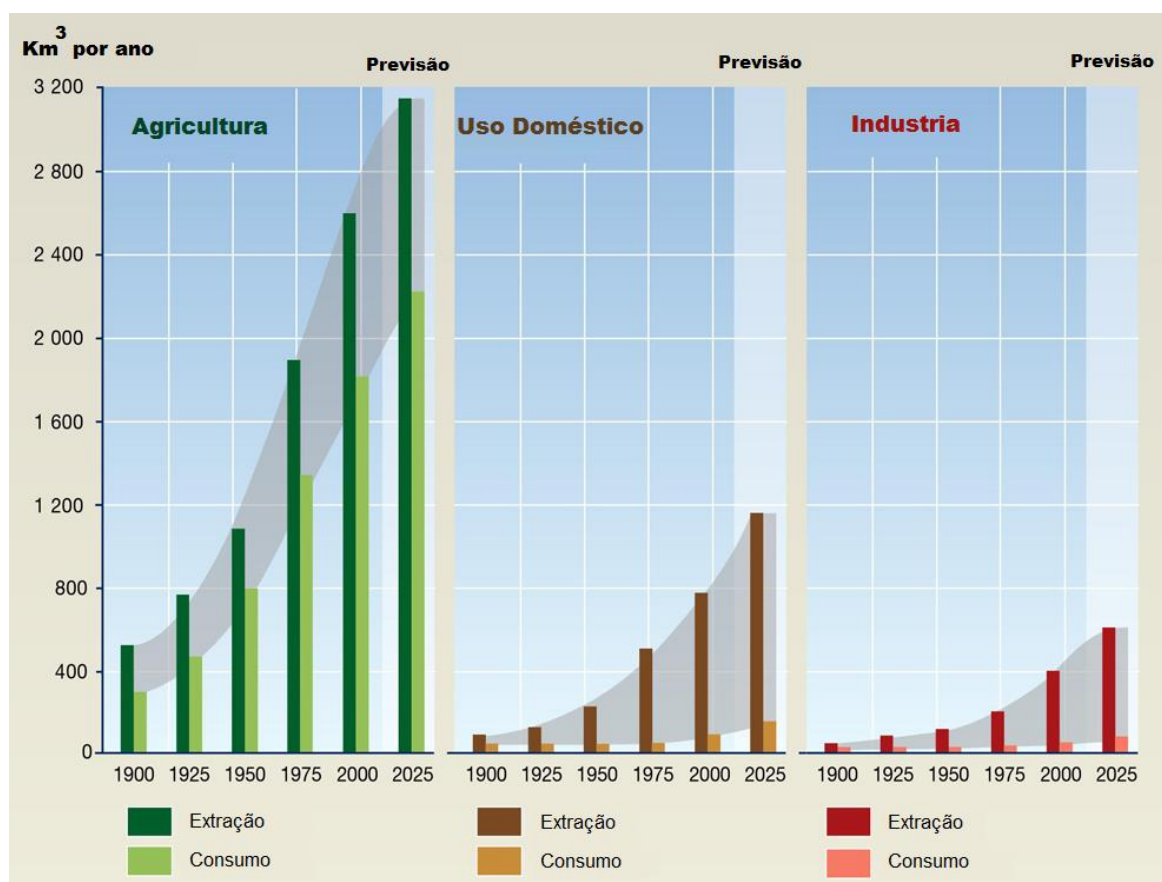
Fonte: Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture (13)

Na legenda da Figura 7, a pouca ou nenhuma escassez da água é referente à abundância de água, significando que o recurso é superior ao uso e que se verifica que menos de 25 % da água é retirada dos rios para utilização humana, suprimindo as necessidades. A escassez física da água indica que o

desenvolvimento dos recursos hídricos aproxima-se ou excede os limites sustentáveis, verificando-se que mais de 75 % dos fluxos dos rios são retirados. Aproximação da escassez física da água significa que já mais de 60 % do fluxo dos rios é retirado e como tal a escassez física poderá estar próxima. A escassez económica de água significa que embora esteja disponível na natureza de forma a responder às necessidades humanas continua a existir desnutrição, menos de 25 % da água dos rios é retirada para fins humanos, sendo os recursos hídricos abundantes em relação ao seu uso. (13)

O consumo de água é realizado para diversos fins. No entanto, estes variam de acordo com o desenvolvimento socioeconómico de cada país. Além disso, o crescimento populacional e as condições climáticas também influenciam o consumo deste recurso. A atividade agrícola lidera o consumo de água a nível mundial. Contudo, verifica-se um aumento progressivo de consumo de água no sector industrial nos países desenvolvidos, tornando-se superior ao utilizado no sector agrícola. Nos países desenvolvidos, grande quantidade de água disponível é utilizada para a produção de energia, sendo que grande parte desta não é potável. (14) No Gráfico 5 está representado o consumo e a extração da água nos diferentes sectores: agricultura, uso doméstico e indústria.

Gráfico 5 – Evolução global do consumo de água



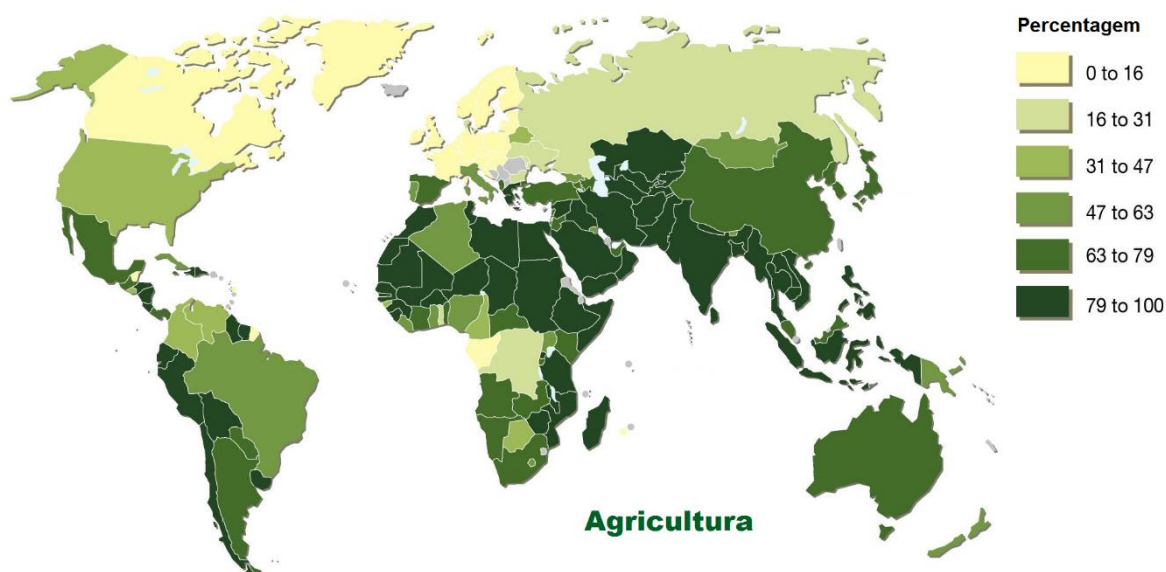
Fonte: Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. (15)

Na banda cinzenta está representada a diferença entre a água extraída, a partir de fontes naturais, e a consumida efetivamente. A água extraída pode ser utilizada, reciclada ou devolvida a rios ou aquíferos, e reutilizada. Após o consumo final de água esta já não pode ser reutilizada.

Segundo o Gráfico 5 prevê-se que o consumo de água aumente de um modo global tal como se verificou no último século. O consumo de água realizado por países desenvolvidos e em desenvolvimento diverge com base no consumo das pessoas destes dois tipos de países. Nos países desenvolvidos, a maior capacidade económica da população leva a um maior consumo de água e algumas vezes a desperdícios deste recurso. Nos países em desenvolvimento, a água pode não chegar em condições de ser consumida à população, havendo um menor consumo nestes países. (14)

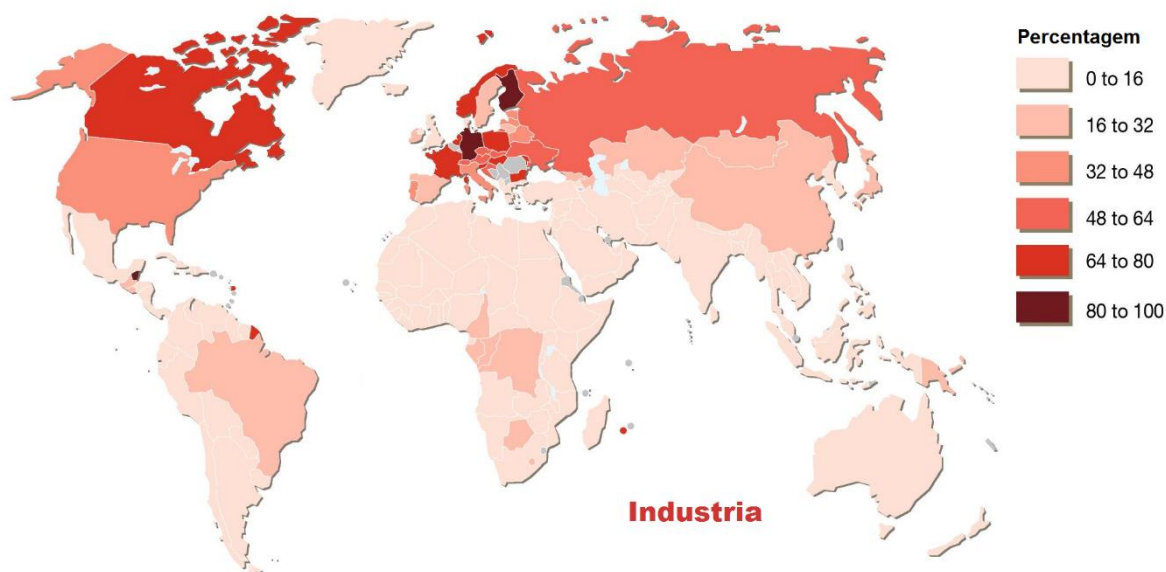
Através da análise das figuras seguintes (Figura 8, Figura 9 e Figura 10) verifica-se que, de um modo geral, os países em desenvolvimento apresentam um maior consumo de água no sector agrícola ao contrário dos países desenvolvidos em que o maior consumo de água é no sector industrial.

Figura 8 – Uso de água doce no sector da agricultura, no início da década de 2000



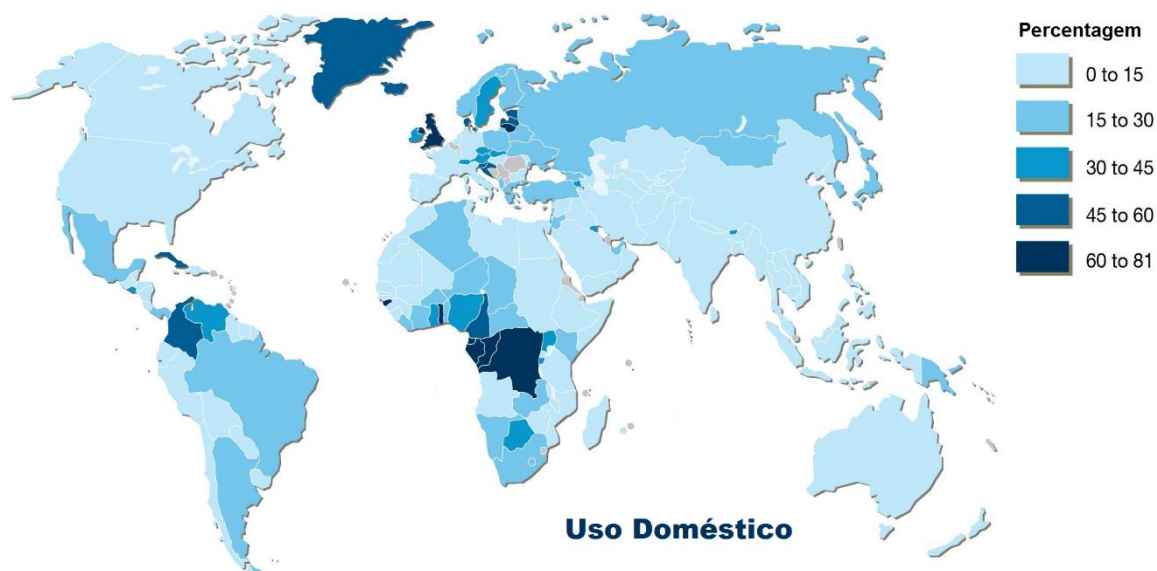
Fonte: Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. (15)

Figura 9 – Uso de água doce no sector da indústria, no início da década de 2000



Fonte: Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. (15)

Figura 10 – Uso de água doce no sector de uso doméstico, no início da década de 2000



Fonte: Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters. (15)

A nível mundial é estimado que o consumo de água doce seja de 20 % no sector industrial. Uma grande parte da água doce que é armazenada em reservatórios e represas é utilizada neste sector para geração de energia. (15)

A quantidade de água disponível numa região para a população influencia o uso doméstico de água. Em países desenvolvidos, o consumo doméstico de água é aproximadamente 10 vezes superior ao de países em desenvolvimento. (15)

Segundo a Organização das Nações Unidas houve uma utilização de 11 % do total de água para fins domésticos em todo o mundo no ano de 2010, sendo que esse consumo será 30 % superior em 2025. (16)

Estima-se que a utilização de água nos diferentes sectores deverá aumentar até 2025: 1,3 vezes na atividade agrícola, 1,5 vezes na atividade industrial; e 1,8 vezes no uso doméstico. (15)

Prevê-se que haja um crescimento populacional de cerca de 2 mil milhões de pessoas até 2050, sendo que 90 % destas viverão em países em desenvolvimento com escassez de água e sem acesso a água potável. Esta situação será cada vez mais evidente, devido a uma maior expectativa de vida da população. (16)

2. Dessalinização

2.1 Contextualização histórica

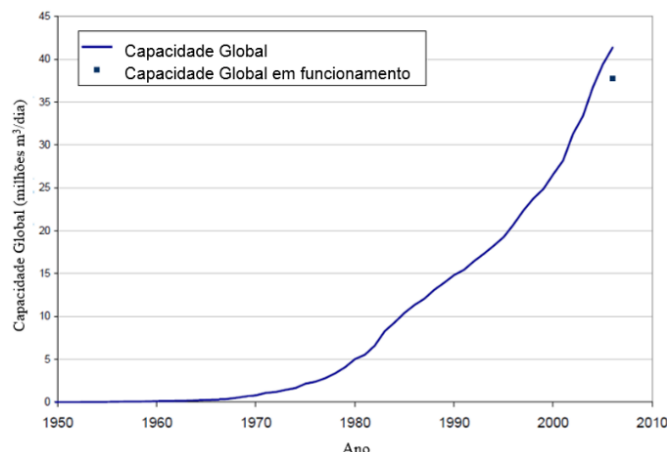
A separação do sal da água é um processo muito antigo, aquando o sal era um bem precioso. No entanto, as populações cresceram e a procura por água doce aumentou, o que levou ao desenvolvimento de tecnologias para produção de água doce em locais remotos e na navegação de longo curso.

A necessidade de água doce em alto mar, durante as navegações levaram a desenvolver processos de destilação da água do mar. Relatos de Richard Hawkins de 1662 referem que durante as suas viagens pelos mares do sul, por meio da destilação conseguiu fornecer água fresca, a bordo, aos seus homens. (17)

Foi instalada na ilha de Curaçao, nas Antilhas Holandesas, a primeira central de dessalinização que opera desde 1928. No território da Arábia Saudita foi instalada uma importante central de dessalinização, em 1938. Nos anos 40, durante a Segunda Guerra Mundial, houve por parte militar a necessidade de água potável, quando estes se encontravam em regiões áridas e em locais isolados. A potencialidade da dessalinização evidenciou-se nessa altura. Após a guerra continuaram-se a desenvolver, em vários países, processos de dessalinização. Um dos países que mais apostou no desenvolvimento desta tecnologia foram os Estados Unidos da América, cujo Governo financiou pesquisas e criou, no princípio dos anos 50, organizações como a *Office of Saline Water*, ajudando no desenvolvimento de diferentes tecnologias de dessalinização de água.

Globalmente, a dessalinização da água tem vindo a aumentar exponencialmente desde 1960, como se pode observar no Gráfico 6. Ainda antes de 2010, a capacidade instalada globalmente era de cerca de 42 milhões de m³/dia, estando operacional cerca de 37 milhões de m³/dia. Estes valores incluem a dessalinização de água do mar assim como de água salobra para uso industrial, agrícola, aplicações energéticas, militares, entre outras. (17)

Gráfico 6 - Capacidade instalada de centrais de dessalinização no mundo a partir de 1950 até 2006



Fonte: Desalination: A National Perspective (17)

2.2 Processo de dessalinização

Para que a água salgada ou salobra possa ser utilizada como fonte de água para produção de água potável, é necessário uma tecnologia de dessalinização. A dessalinização consiste em obter água para consumo através da remoção ou redução da concentração de sais e sólidos dissolvidos na água salgada. Neste processo deve-se eliminar também outros componentes químicos, orgânicos e biológicos.

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). Para o abastecimento de água, esta é classificada segundo os seus níveis de salinidade, como se apresenta na Tabela 1. A água doce tem uma salinidade inferior a 1000 mg/l, a água salobra tem uma salinidade entre a água doce e a água salgada e a salinidade da água salgada situa-se entre os 35.000 mg/l e os 50.000 mg/l. A água com salinidade superior à água do mar é designada como salmoura. A salinidade presente em mais de 97 % da água do mar oscila entre os 33 e os 37 g/l de SDT. Segundo a OMS, concentrações de SDT na água inferiores a 1 g/l já são considerados valores aceitáveis. A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América considera que água com valores de SDT acima de 0,5 g/l pode ser considerada desagradável. (17)

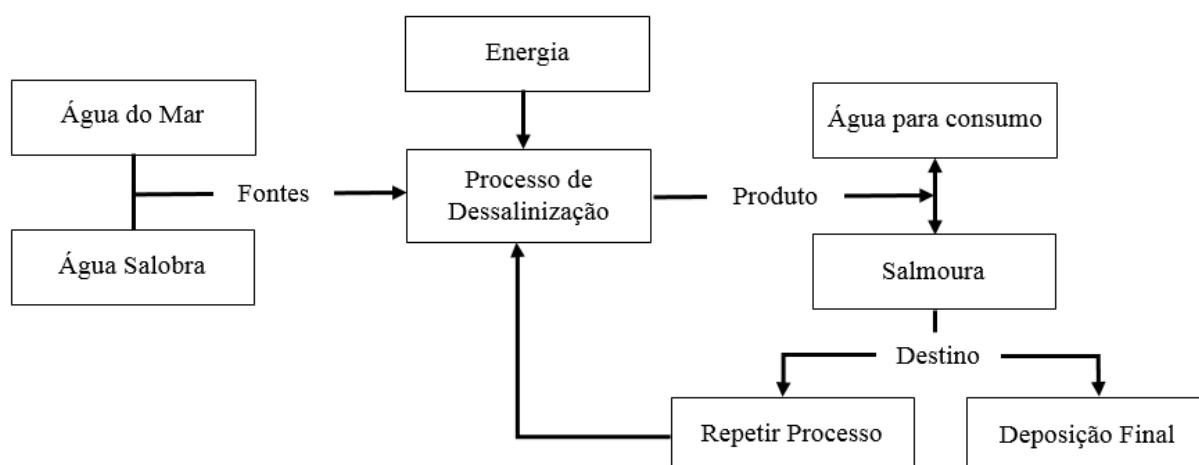
Tabela 1 - Classificação da água quanto à sua concentração de SDT

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

Fonte: Adaptado de The economics of desalination for various uses (18)

Para o processo de dessalinização existe um caudal de água de salinidade elevada, que alimenta o sistema. É aplicada uma energia sob a forma de calor, eletricidade e/ou pressão de água no processo de dessalinização e por fim existem dois caudais de saída: um corresponde à água dessalinizada que é o produto pretendido e outro é o rejeitado ou concentrado. (19) Este processo está representado na figura seguinte (Figura 11).

Figura 11 – Princípio da dessalinização da água esquematizado



Fonte: Adaptado de Novas Fontes de abastecimento de água: Reutilização e dessalinização (20)

As fontes para o efeito da dessalinização podem ser superficiais ou subterrâneas. As superficiais representam uma maior quantidade de água, incluindo os mares e oceanos. As fontes subterrâneas como os aquíferos, que fornecem água salobra ou salgada representam cerca de 1% da água no mundo. (17)

Para que a água possa ser distribuída pela rede pública, esta tem de preencher certos requisitos pré-estabelecidos por organismos internacionais como a Organização Mundial de Saúde (OMS), ou organismos administrativos que regulamentam a qualidade da água. (19)

Existem certos procedimentos comuns em todas as estações de dessalinização, independentemente da origem da água e da tecnologia utilizada no processo. Todo o processo de dessalinização compreende de uma forma geral cinco procedimentos que começam pela captação da água até ao fornecimento da água já tratada e em condições de ser distribuída para o consumidor.

Como se pode verificar na Figura 12, numa primeira fase é necessário extrair a água salina ou salobra da fonte e introduzi-la no sistema. De seguida é feito um pré-tratamento da água: nesta fase há a remoção de sólidos e um controlo do crescimento biológico inerentes ao processo de captação de água.

Posteriormente, ocorre o processo de dessalinização, durante o qual se procede à remoção dos sólidos dissolvidos, incluindo sais e outras impurezas da água. Nestas duas fases obtém-se o excedente, o concentrado de sais e outros resíduos, e como tal é necessário fazer a sua gestão. Essa gestão pode incluir a deposição e/ou reutilização desses subprodutos.

Por fim é necessário um pós-tratamento. Com o processo de dessalinização o nível de alcalinidade da água diminui, o que pode causar corrosões. Assim, para prevenir a corrosão das tubagens a jusante, deve-se ajustar a alcalinidade e o pH, repondo também as propriedades da água necessárias ao consumo humano retiradas pelo processo de dessalinização. (17)

Figura 12 – Linha de tratamento simplificada de um processo de dessalinização



Fonte: Adaptado de Seawater Desalination: Camp Pendleton Seawater Desalination Project Option (21)

A água natural possui sólidos dissolvidos como cloreto de sódio, bicarbonato de cálcio, sulfato de magnésio e outros existentes de forma natural. Uma água isenta de substâncias dissolvidas tem um gosto insípido, não sendo própria para fins de consumo. Se a água tiver como fim o consumo humano, devem ser adicionado alguns sólidos dissolvidos e ar à água dessalinizada. (19)

Os processos mais relevantes na dessalinização da água podem ser agrupados em dois grupos:

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

Existe um grande número de tecnologias de dessalinização disponíveis e aplicadas por todo o mundo, algumas destas tecnologias estão desenvolvidas e em funcionamento em grande escala, outras em pequenas unidades para fins de demonstração ou investigação e desenvolvimento.

2.2.1 Processos de dessalinização térmica

O processo térmico da dessalinização é assegurado por métodos de destilação, baseando-se no processo natural do ciclo hidrológico. A água salgada é aquecida até temperaturas de ebulição, evapora, e em seguida condensa e precipita sob a forma de água doce devido ao arrefecimento do vapor.

Para que haja evaporação são necessárias temperaturas adequadas e deve-se assegurar a quantidade de energia necessária para manter o processo térmico. De forma a reduzir a quantidade de energia necessária no processo, alguns destes utilizam diversos estágios. Desta forma são feitas múltiplas ebulições de forma sucessiva diminuindo a pressão nas operações seguintes para baixar o ponto de ebulição da água.

A necessidade de produção de energia, uma vez que é necessário vapor como força motriz, faz com que estes sistemas sejam mais comuns no médio Oriente, onde existe simultaneamente falta de água e abundância de petróleo, sendo este utilizado muitas vezes como fonte de energia primária para a produção de energia elétrica. (20)

Existem diversas tecnologias por destilação das quais se destacam:

- Destilação Solar (SD)
- Destilação *Flash* de Múltiplo estágio (MSF)
- Destilação Múltiplo Efeito (MED)
- Destilação por compressão de vapor (VC)

2.2.1.1 Destilação Solar

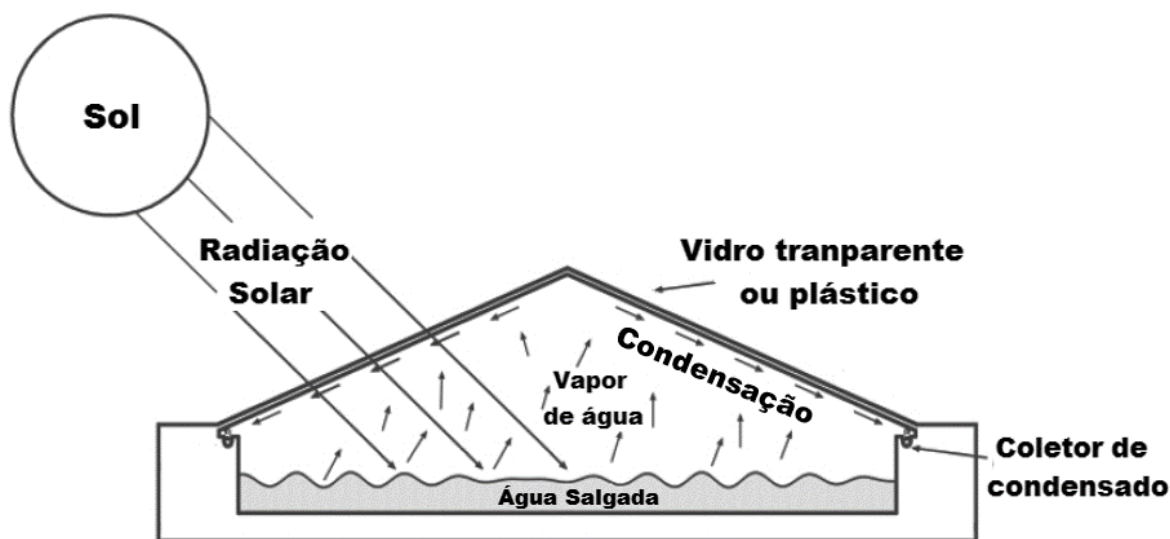
O método de destilação solar é um processo simples que utiliza a energia solar para que ocorra evaporação e posteriormente ocorra a condensação da água salgada.

Como podemos ver na Figura 13, o desenho é semelhante a uma estufa. A água salgada encontra-se confinada dentro de um tanque, com o fundo geralmente preto para a absorção da energia de forma mais eficiente, e é coberto por um material transparente (painel de vidro ou plástico) que permita a entrada de radiação solar. A água aquece e evapora, este vapor não contém sais. O material envolvente forma uma barreira e a acumulação de vapor no interior da cobertura leva a condensação e a água escoar para pontos de recolha. (19)

Em termos energéticos, a destilação solar é um processo pouco dispendioso. No entanto, vários estudos têm sido feitos para aumentar a eficiência e a produção por unidade de área. O calor latente é normalmente desperdiçado na cobertura, sendo a eficiência do sistema relativamente baixa. (22) Na prática, experiências mostram que 1 m² de terreno produz 3 a 4 litros de água doce por dia. Particularmente perto de cidades onde o terreno disponível é caro e escasso, esta tecnologia não é viável para produção em larga escala, onde são necessárias grandes áreas para coletar energia solar. Comparativamente a outros sistemas, a instalação tende a ser mais cara. Estes sistemas são também vulneráveis aos danos causados pelo tempo, o que leva a custos elevados de manutenção, para evitar incrustações e reparar perdas de vapor e danos no vidro. (23)

Esta tecnologia pode ser economicamente viável em produção de pequena escala, para famílias e pequenas comunidades onde a energia solar é abundante e o trabalho tem um custo reduzido. (23)

Figura 13 - Esquema de um processo de destilação solar



Fonte: Adaptado de Desalination Methods for Producing Drinking Water (24)

2.2.1.2 Destilação Flash de Múltiplos Estágios

A seguir ao sistema de osmose inversa, que será mencionado mais à frente, o método de destilação *Flash* de Múltiplos Estágios (MSF) tem a segunda maior capacidade instalada de dessalinização. (25) Estas centrais são muito utilizadas no Médio Oriente, particularmente na Arábia Saudita, nos Emirados Árabes Unidos e Kuwait, onde a capacidade de dessalinização de água do mar instalada corresponde a 58% da capacidade instalada no mundo. (26)

Na destilação MSF, a água desloca-se através de uma sequência de câmaras com pressões sucessivamente mais baixas. A pressão e a temperatura da água são controladas nas várias câmaras sucessivas de forma a ocorrer a ebulição da água. (27) A evaporação e condensação vão ocorrendo nas várias câmaras consecutivas e o calor latente de evaporação gerado no processo é reutilizado no pré-aquecimento da água que alimenta o processo. (26)

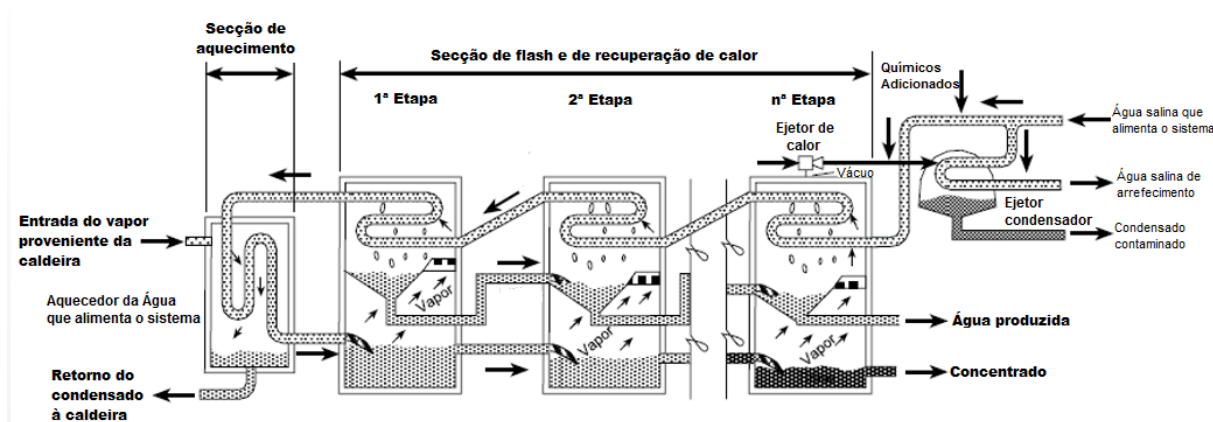
Numa primeira fase, a água salina que entra no sistema é pré-aquecida a elevadas temperaturas sendo a permuta de calor geralmente feita em conjunto com o processo. Os tubos que transportam a água do mar atravessam o interior das câmaras. A diferença de temperatura, entre o interior da câmara e a água salina que atravessa os tubos, faz condensar o vapor no interior da câmara e ao mesmo tempo existe uma permuta de calor que pré-aquece a água no interior dos tubos que alimentam o processo. (27)

De seguida, a água de alimentação já pré-aquecida atinge a temperatura máxima ao entrar em contacto com uma fonte de calor. A fonte de calor externa aumenta a temperatura da água de alimentação que de seguida, entra numa primeira câmara com uma pressão tal que faz com que a súbita introdução de água se transforme em vapor rapidamente, por esse motivo é dado o nome de *flash*. (27) O vapor

sobe até aos tubos (permutadores de calor que atravessam a parte superior de cada câmara), arrefece e condensa, sendo recolhido sob a forma de destilado. Os tubos são arrefecidos pela própria água salina que alimenta o sistema, ocorrendo assim a recuperação de uma parte da energia térmica utilizada para a evaporação na primeira fase, no pré-aquecimento da água de alimentação.

O processo repete-se, a salmoura atravessa um conjunto de evaporadores com pressões inferior à anterior, de modo a que a água possa ir evaporando repetidamente sem adição de mais calor, até que a salmoura atinja a pressão atmosférica e valores de concentração de sais muito elevados. (19) (28) Na Figura 14 está representado o processo de dessalinização MSF.

Figura 14 – Esquema do Processo de Destilação MSF



Fonte: Adaptado de The ABCs of Desalting (27)

O evaporador é constituído por diversos estágios, contendo tipicamente 19-28 estágios, em grandes instalações de MSF. O aumento de temperatura de funcionamento tende a aumentar a eficiência, mas aumenta também o potencial na formação de incrustações e acelera a corrosão. (28)

O sistema extrai os gases não condensáveis, tais como O_2 , N_2 e CO_2 libertados durante o processo de *flash*. O destilado produzido em cada fase passa pelas câmaras em paralelo à salmoura e é bombeado para um tanque de armazenamento. A água dessalinizada produzida pelo processo MSF contém tipicamente 2-10 ppm de sólidos dissolvidos. Na fase de pós-tratamento a água é remineralizada. (28)

Muitas vezes, grandes centrais de MSF estão associadas a centrais de cogeração, o que leva a um maior aproveitamento da energia do combustível. O vapor produzido a alta temperatura é utilizado para produzir eletricidade e o vapor de baixa temperatura é utilizado para acionar o processo de dessalinização térmico. (26)

A quantidade de vapor de água formado depende da pressão mantida em cada etapa, um aumento de etapas melhora a eficiência do processo, uma vez que a área de transferência de calor é maior, no entanto aumenta também o custo de capital. (28)

2.2.1.3 Destilação Múltiplo Efeito

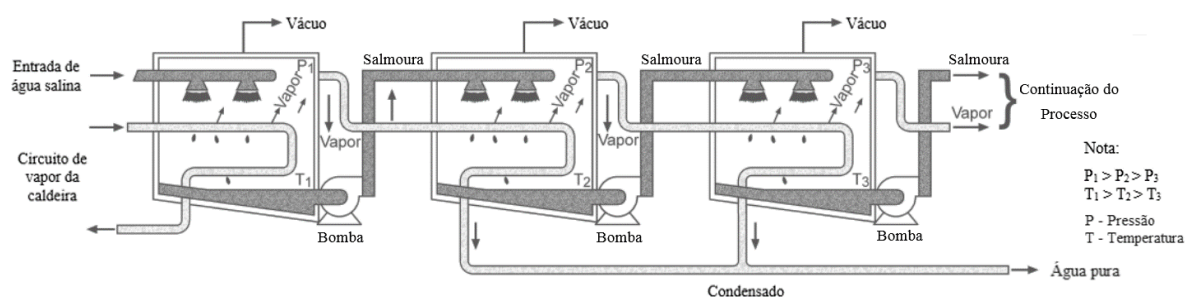
O processo de destilação de múltiplo efeito (MED) é o método de dessalinização mais antigo, sendo muito eficiente termodinamicamente. O funcionamento deste processo é através de uma série de evaporadores chamados de “efeitos”. Após o primeiro efeito não há fornecimento de calor e o processo consiste em múltiplas ebulições da água que alimenta o sistema. (28)

Numa primeira etapa, a água salgada entra no primeiro evaporador e é pulverizada sobre a superfície de um conjunto de tubos quentes que são aquecidos por uma fonte de calor externa. Esta fonte de calor pode ser uma caldeira ou vapor extraído de um ciclo combinado. (20) A água é pulverizada sobre os tubos do evaporador para promover a evaporação rápida. (28)

Uma parte da água é evaporada, entra em ebulição assim que absorve o calor, o resto da água é recolhida na parte inferior da câmara. O vapor obtido no primeiro compartimento é recuperado e utilizado como fonte de calor no compartimento seguinte, e posteriormente condensa sob forma de água pura. (20)

O processo MED consiste numa sequência de 2 a 16 evaporadores. (25) As superfícies do evaporador seguinte vão sendo aquecidas pelo vapor produzido no evaporador anterior e a pressão vai diminuindo. (26) Ou seja, a água que não é evaporada continuamente no sistema e é bombeada para o próximo compartimento, voltando a ser pulverizada, aquecida pelos tubos que transportam o vapor do compartimento anterior e evaporada. O processo vai-se repetindo até atingir níveis de concentração de sais desejados. (20) Este processo encontra-se exemplificado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema de um processo MED – com aproveitamento de água não evaporada nas etapas consecutivas

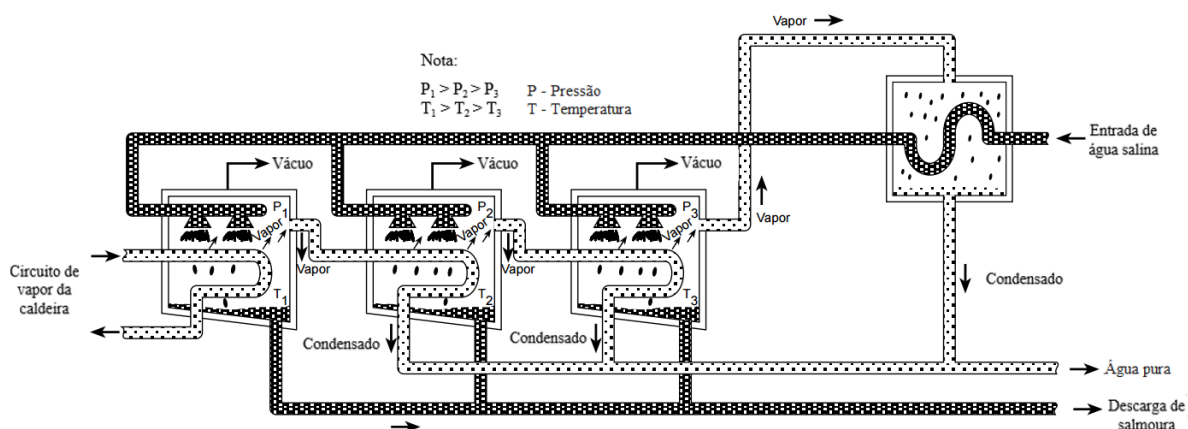


Fonte: Adaptado de *Desalination Methods for Producing Drinking Water* (24)

Como a água já foi aquecida na câmara anterior, não são necessárias temperaturas tão elevadas para a sua ebulição. Os compartimentos têm pressões inferiores à pressão atmosférica, o que também permite temperaturas de ebulição da água inferiores, reduzindo os custos de energia necessária ao processo e previne incrustações no equipamento.

Na Figura 16 está representado o mesmo processo MED, mas com outra forma de alimentação do sistema. A adição de água em todas as câmaras é feita a partir do mesmo canal proveniente da fonte de abastecimento. O processo é feito da mesma forma que o anterior, apenas uma porção da água que é pulverizada evapora e é utilizada no compartimento seguinte e posteriormente condensa em água pura. No entanto, a água que não é evaporada não volta a entrar no compartimento seguinte saindo do sistema sob a forma de concentrado. (27) O vapor produzido no último evaporador condensa num permutador de calor separado, que é arrefecido pela água de entrada, por outro lado pré-aquece a água de alimentação do processo de dessalinização. (26)

Figura 16 - Esquema de um processo MED – com fonte comum de abastecimento dos evaporadores



Fonte: Adaptado de The ABCs of Desalting (27)

O processo MED, em termos de consumo energético, é significativamente melhor, visto ter consumos menores comparativamente ao processo MSF. O desempenho do processo MED é mais elevado e mais eficiente no ponto de vista da termodinâmica e transferência de calor. O tamanho das centrais de dessalinização MED têm vindo a aumentar gradualmente. (28)

Os custos deste processo são reduzidos e as áreas para implantação são pequenas, sendo os trabalhos de engenharia de baixo custo, assim como o de manutenção. Opera 24 horas por dia exigindo pouca supervisão, com grande eficiência térmica poupando nos custos de combustível.

2.2.1.4 Destilação por compressão de vapor

O funcionamento do processo de destilação por compressão de vapor (VC) é semelhante ao de Destilação por Múltiplo Efeito, contudo utiliza um compressor.

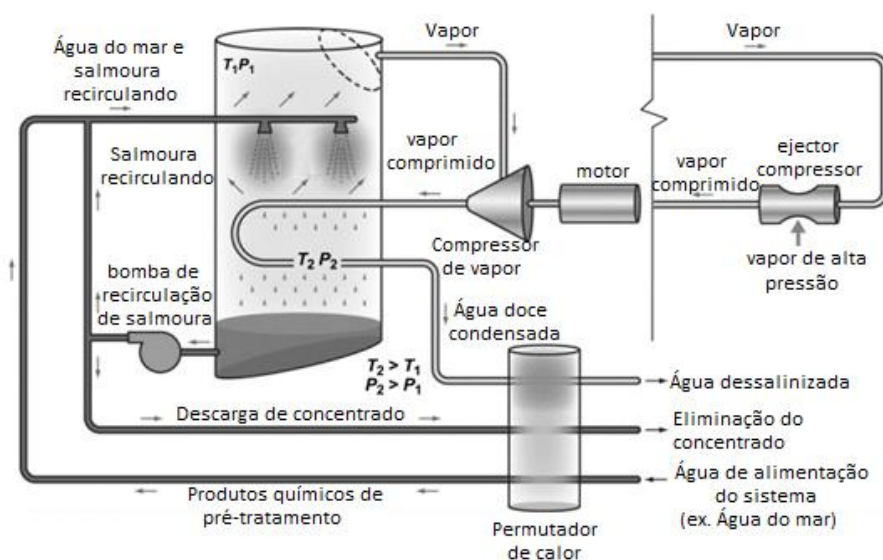
A destilação por VC utiliza o calor gerado pela compressão do vapor de água, para que haja evaporação da água salgada. São utilizados dois métodos de operação: compressão mecânica de vapor (MVC) e compressão de vapor térmico (TVC). O compressor mecânico é acionado eletricamente e o compressor térmico utiliza um jato de vapor que cria uma pressão mais baixa. (25)

Resumidamente, a destilação por VC ocorre a partir da compressão, em vez da condensação, do vapor gerado pela água evaporada. Consequentemente, o calor necessário para evaporar a água provém da compressão do vapor em vez da troca de calor direta de vapor produzido por uma caldeira. (27)

A água de alimentação passa por um permutador de calor onde é pré-aquecida pelos fluxos de saída de concentrado e água dessalinizada. A água de entrada é então pulverizada sobre tubos permutadores de calor. Esta troca de calor faz com que a água ferva sendo então produzido vapor no processo de evaporação. O vapor é aspirado por um compressor e é comprimido. A compressão do vapor aumenta a sua temperatura de saturação em quantidades suficientes para ser utilizado como fonte de calor. Este vai aquecer a água no evaporador e a água de alimentação. (29) Na Figura 17 está representado o esquema do processo nas duas formas de operação.

A destilação por VC pode funcionar de forma independente ou ser usada em combinação com outros processos de destilação térmica. Estas unidades são usualmente utilizadas em pequena e média escala para a produção de água dessalinizada. (24)

Figura 17 - Esquema de um processo VC (MVC e TVC)



Fonte: Adaptado de Renewable and Sustainable Energy Reviews (25)

2.2.2 Processo de dessalinização por membrana

No processo de dessalinização por membrana, a dessalinização é feita recorrendo-se a uma membrana semipermeável com capacidade de filtrar os sais presentes na água, obtendo-se uma solução com baixa salinidade e um concentrado com elevada salinidade, ao aplicar-se um gradiente de pressão ou uma diferença de potencial elétrico entre as superfícies das membranas.

As tecnologias mais utilizadas no processo de dessalinização por membrana são:

- Eletrodialise (ED)
- Osmose Inversa (RO)

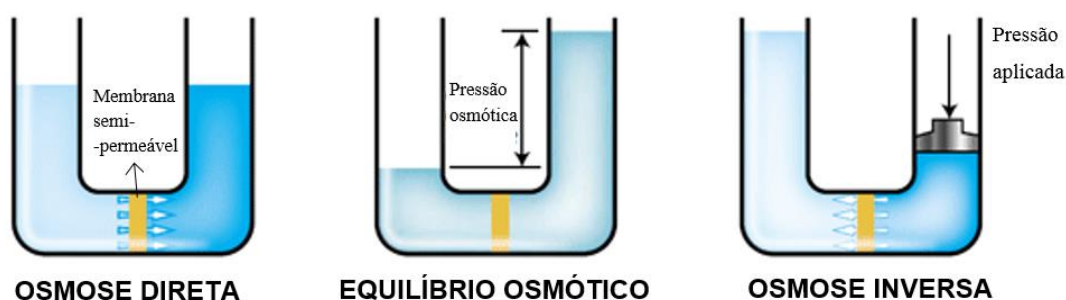
2.2.2.1 Osmose Inversa

Nas últimas duas décadas têm vindo a ser feitas melhorias no processo de osmose inversa (RO), que se refletiram já na redução de custos de capital e operação destes sistemas, sendo que o maior progresso foi feito no melhoramento das membranas.

O processo RO utiliza uma membrana semipermeável que possui um elevado grau de permeabilidade à água, mas é uma barreira impenetrável aos sais. Esta membrana separa as duas soluções com concentrações diferentes.

O processo de osmose direta dá-se de uma forma natural: a água migra para o lado onde a solução está mais concentrada de forma a equilibrar a concentração das duas soluções. O processo de RO não se dá de uma forma natural: para se obter um fluxo de água fresca é necessário aplicar uma pressão de forma a contrariar o processo natural. O caudal de água fresca que se obtém é proporcional ao diferencial de pressão (pressão que se aplica) que excede o diferencial de pressão osmótica em equilíbrio. A Figura 18 exemplifica de uma forma simplificada os tipos de osmose mencionadas anteriormente.

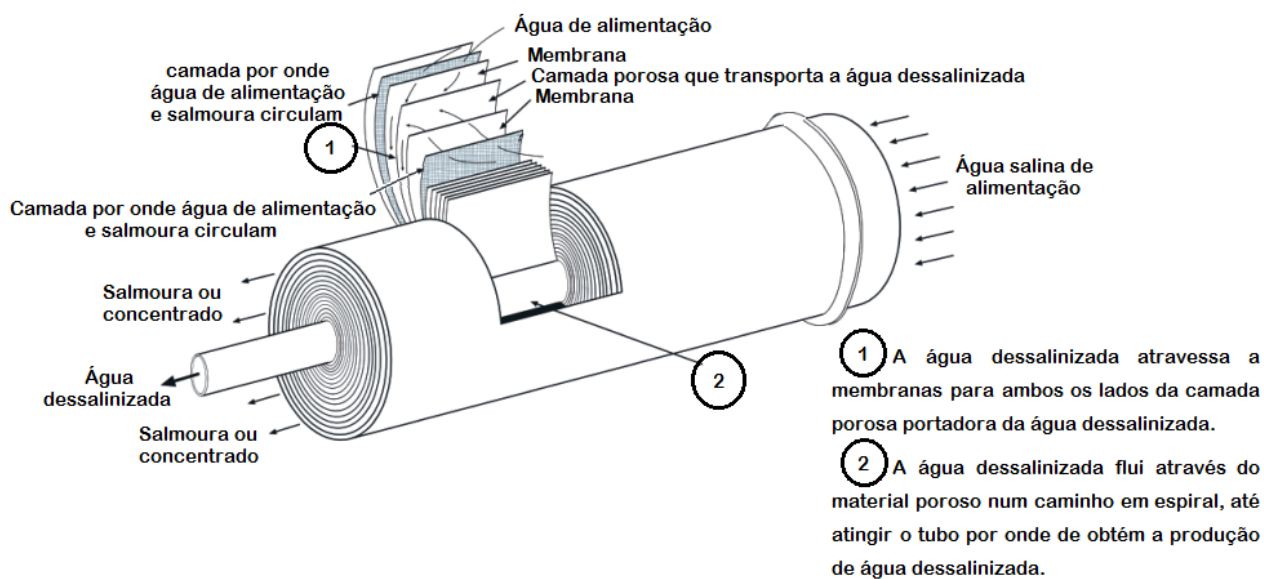
Figura 18 - O Princípio de funcionamento da Osmose Inversa



Fonte: http://www.degremont.com/cms/degremont_7_refonte/upload/savoir-faire/en/reverse_osmosis.png

A água de alimentação a alta pressão flui através de membranas individuais. Cada elemento de membrana RO em espiral, consiste numa espiral concêntrica de camadas alternadas, sendo estas constituídas por: camada por onde a água de alimentação e salmoura circulam, membrana RO e uma camada porosa que transporta a água dessalinizada. (24) A Figura 19 representa as várias camadas de uma membrana RO individual.

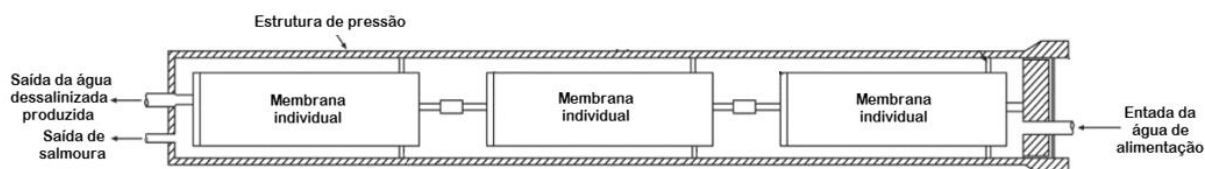
Figura 19 - Visão esquemática de uma membrana RO individual



Fonte: Adaptado de Desalination Methods for Producing Drinking Water (24)

A camada porosa transporta a água dessalinizada, o que permite que esta água flua para o centro da membrana onde é recolhida por um tubo. Para permitir que haja o tratamento de mais água, as membranas individuais são ligadas sequencialmente dentro de uma estrutura sob pressão, como representado na Figura 20.

Figura 20 - Secção de uma estrutura de pressão contendo 3 membranas individuais



Fonte: Adaptado de Desalination Methods for Producing Drinking Water (24)

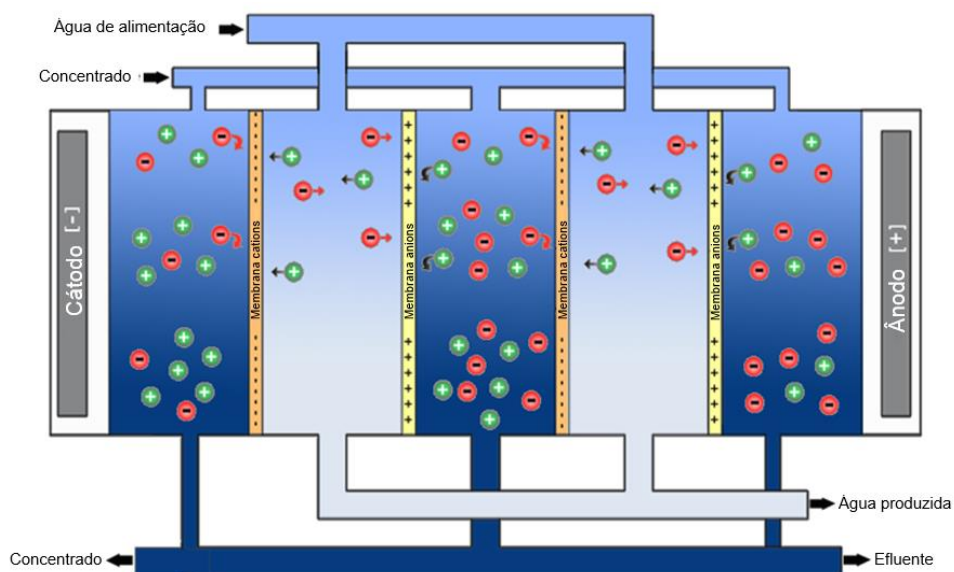
Para a dessalinização da água salobra as pressões de operação variam entre 15 a 30 bar, e para a dessalinização da água do mar as pressões variam entre 55 a 70 bar. Como a água doce atravessa a membrana, a água de alimentação vai ficando mais concentrada. Para não haver incrustações existe um limite para a quantidade de água fresca que pode ser obtida a partir da água de alimentação. Para água marinha, a percentagem de recuperação varia entre os 25% e os 45%, nas águas salobras a taxa de recuperação é mais alta podendo atingir os 90%. (30)

As propriedades da membrana e da salinidade da água de alimentação são os principais fatores que controlam os requisitos de energia de um sistema RO. Quanto maior a salinidade da água, maior a quantidade de energia necessária para superar a pressão osmótica. O pré-tratamento da água do mar também é importante, uma vez que minimiza os problemas de obstrução e pode proporcionar boa proteção das membranas e uma vida útil do sistema mais longa. (30)

2.2.2.2 Eletrodialise

A ED, para além de energia elétrica, utiliza membranas seletivas de iões, semipermeáveis, podendo ser catiónicas ou aniónicas. Numa solução salina ao serem colocados eléctrodos ligados a uma fonte externa com corrente contínua é transportada corrente elétrica através da solução, os iões da solução tendem a migrar para o eléctrodo de carga oposta. As membranas estão organizadas de forma alternada e em paralelo formando vários compartimentos. A água salina flui por entre cada par de membranas, os iões migram para os polos atravessando ou sendo detidos por estas. As membranas catiónicas permitem a passagem dos iões positivos ao contrário das membranas aniónicas que permitem a passagem apenas de iões negativos, assim como é possível verificar na Figura 21. (31)

Figura 21 - Esquema de um processo de eletrodialise



Fonte: waterions.aceenvironment.com/edr

Com esta combinação entre as membranas haverá espaços com diferentes soluções, estas podem ser soluções concentradas ou diluídas. Os espaços criados são chamados de células e haverá uma a partir da qual os iões migram, será a célula diluída com a água produto, e outra na qual os iões se concentram, célula com o concentrado de fluxo de salmoura. (32) Na ED haverá um perfilado de membranas, com centenas de pares de células, por onde a água passa. (31)

A eletrólise inversa (EDR) consiste na inversão do campo elétrico, que é feita periodicamente. A corrente do concentrado passa a ser a corrente de alimentação e vice-versa. Invertendo os fluxos aumenta a vida útil dos elétrodos e permite a limpeza das membranas. Quando as membranas operam sempre com o fluxo na mesma direção pode acumular-se precipitado no lado do concentrado.

2.3 A utilização de energia dos processos de dessalinização

Para a maioria dos processos de destilação, sendo estes MSF, MED e TVC, existem dois tipos de energia que mantêm a operação de um sistema de dessalinização: calor e eletricidade. O calor é a principal energia na operação do processo de dessalinização, no entanto é necessária energia elétrica para acionar as bombas do sistema. No caso do processo MVC precisa apenas de eletricidade para o seu funcionamento. Para o aproveitamento de energia, uma vez que para ferver água são necessárias grandes quantidades de energia, é reutilizado o consumo de energia através de múltiplos evaporadores consecutivos. (25)

A temperatura máxima alcançada dentro do evaporador, que nos processos MSF e MED corresponde à temperatura no primeiro evaporador, é conhecida como TBT. O aumento do TBT melhora o desempenho uma vez que aumenta a taxa de produção. No entanto esta temperatura máxima deve ser ponderada, uma vez que se deve ter em conta a temperatura a que a água salina deve ser aquecida para evitar corrosões críticas ao sistema. (25)

A eficiência na utilização do calor é traduzida por dois parâmetros: razão dos ganhos de saída (GOR) e a razão de desempenho (PR). GOR é a medida da quantidade de energia térmica consumida no processo de dessalinização, ou seja, é a quantidade de água em quilos que é produzida por quilograma de vapor consumido. Normalmente sistemas com GOR maior têm custos superiores mas consomem menos energia, sendo os custos operacionais em termos energéticos mais baratos. Desse modo, deve-se ter em consideração os valores GOR na fase de planeamento do sistema de dessalinização, dado que se podem comparar os custos operacionais e de capital de diferentes GORs tendo em conta quantidade e valor económico da energia e da água. GOR também está relacionado com o número de câmaras do sistema, quanto mais evaporadores maior o seu valor. Contudo, pode ser mais prático considerar a razão de desempenho PR que representa a quantidades de água produzida por unidade de energia consumida, ou seja, a quantidade de água em quilos produzida por 2326 kJ de calor consumido.

Aumentando a GOR (ou PR), o número de evaporadores e a área de transferência de calor diminui o consumo de energia. O consumo também é influenciado pela temperatura máxima da fonte de calor, a concentração da salmoura, o material de construção e a configuração do dispositivo de permuta de calor.

Para processos MSF, a gama de TBT de operação é da gama dos 90°C a 110°C. Os fabricantes comerciais de sistemas de MSF fornecem uma gama com GOR entre 8 e 12 $\text{kg}_{\text{destilado}}/\text{kg}_{\text{calor}}$, dependendo da temperatura do vapor que alimenta o sistema. Logo, o valor de energia térmica de uma unidade MSF varia entre 190 MJ/m^3 (GOR=12) e 282 MJ/m^3 (GOR=8) que corresponde a uma energia elétrica de 15,83 e 23,5 kWh/m^3 , tendo por base uma eficiência de 30% de energia da unidade de dessalinização. Considerando o valor de eletricidade consumido pelas bombas entre 2,5 e 5 kWh/m^3 , o consumo total varia de 19,58 e 27,25 kWh/m^3 . (25)

No fabrico de unidades MED, as temperaturas de funcionamento são mais baixas comparando com o processo MSF. O GOR varia de 10 a 16 sendo superior ao GOR do processo de MSF, porque as necessidades de energia são menores no processo MED. A TBT varia entre os 64°C e 70°C.

Em países árabes do Golfo onde há maior acessibilidade a combustíveis fósseis os valores da GOR são mais baixos, variando de 8 a 12. Considerando os valores especificados pelos fabricantes o consumo de energia térmica de uma unidade MED varia entre 145 MJ/m³ (GOR=16) e 230 MJ/m³ (GOR=10). Se a eficiência da unidade de dessalinização for de 30%, a energia elétrica relativa é de 12,2 a 19,1 kWh/m³, e considerando o mesmo consumo de energia elétrica por parte das bombas que no processo MSF, o consumo total de energia correspondente a uma unidade de MED varia entre 14,45 e 21,35 kWh/m³. (25)

No processo MVC, a TBT de operação atinge os 74°C, e necessita apenas de energia elétrica ou mecânica para o seu funcionamento, o seu consumo varia de 7 a 12 kWh/m³. O processo TVC necessita de calor e eletricidade. A TBT varia de 63°C a 70°C o consumo de potência calorífica é igual a 227,3 MJ/m³ (GOR=12), que corresponde a uma energia elétrica de 14,5 kWh/m³, e um consumo elétrico entre 1,6 a 1,8 kWh/m³. O consumo total de energia é proximamente de 16,26 kWh/m³. (25)

No caso dos processos de membrana, não ocorre destilação, e os processos de RO e ED utilizam apenas energia elétrica para o seu funcionamento. O consumo de energia no caso de um processo RO depende da salinidade da água e da taxa de recuperação. A quantidade de energia está relacionada com a pressão osmótica: quanto maior a salinidade da água de alimentação maior será a pressão osmótica, e consequentemente, maior será o consumo de energia. Embora a capacidade de um sistema de dessalinização RO possa variar de 0,1 a 395.000 m³/dia, considerando um tamanho típico de 24.000 m³/dia uma unidade de dessalinização RO, com um sistema de recuperação de energia, alimentada por água do mar (SWRO) consome cerca de 4 a 6 kWh/m³ de eletricidade. Se a água de alimentação da central for água salobra (BWRO), o consumo ronda 1,5 a 2,5 kWh/m³. (25)

No processo ED, a eletricidade é utilizada tanto para alimentar os elétrodos como para acionar as bombas. O consumo de energia elétrica varia de 0,7-2,5 kWh/m³ para água com salinidade inferior a 2500 ppm, 2,64 kWh/m³ para uma salinidade de 2500 ppm e 5,5 kWh/m³ para uma salinidade de 5000 ppm.

Os valores de consumo de energia dos processos de dessalinização referidos anteriormente estão presentes na tabela seguinte (Tabela 2).

Tabela 2 - Consumo de energia dos processos de dessalinização

Propriedades	MSF	MED	MVC	TVC	SWRO	BWRO	ED
Tamanho típico da central (m ³ /dia)	50.000 – 70.000	5.000 – 15.000	100 – 3.000	10.000 – 30.000	Até 128.000	Até 98.000	2 – 145.000
Consumo de energia elétrica (kW h/m ³)	2,5 – 5	2 – 2,5	7 – 12	1,6 – 1,8	4 – 6 com recuperação de energia	1,5 – 2,5	2,64 – 5,5
Consumo de energia térmica (MJ/m ³)	190 – 282	145 – 230	–	227	–	–	–
Energia elétrica equivalente a energia térmica (kW h/m ³)	15,83 – 23,5	12,2 – 19,1	–	14,5	–	–	–
Consumo total de eletricidade (kW h/m ³)	19,58 – 27,25	14,45 – 21,35	7 – 12	16,26	4 – 6	1,5 – 2,5	2,64 – 5,5 ; 0,7 – 2,5 com baixo SDT
Qualidade da água produzida (ppm)	≈ 10	≈ 10	≈ 10	≈ 10	400 – 500	200 – 500	150 - 500

Fonte: Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes (25)

Em geral, o consumo energético dos processos de destilação (MSF, MED e VC) é superior à dos processos de membrana (ED e RO), pelo facto de aqueles processos necessitarem de grandes quantidades de energia para vaporização da água. Por outro lado, nos processos térmicos, a energia necessária não depende da concentração de sal, ao contrário do que acontece com os processos de membrana: se a água de alimentação tiver SDT superior a 5.000 ppm, o processo RO tem menores consumos; contudo, se água que alimenta o sistema tiver SDT inferior a 2.500 ppm o processo ED é energeticamente mais rentável. (25)

2.4 Sistemas de Dessalinização - Energia Renovável

É esperado um futuro promissor na área da energia renovável no domínio da dessalinização da água salobra e água do mar, nos países em desenvolvimento. Em muitos dos países industrializados já está a ser feita uma transição dos sistemas de abastecimento de energia elétrica com energia renovável, com o apoio na introdução do mercado e expansão deste tipo de tecnologias. Foi estabelecida uma meta para duplicar a quota de energia renovável na União Europeia até 2010, e o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima aconselha uma redução das emissões de carbono até ao final do século de 75% de forma a evitar efeitos descontrolados sobre o clima e a economia mundial. (33)

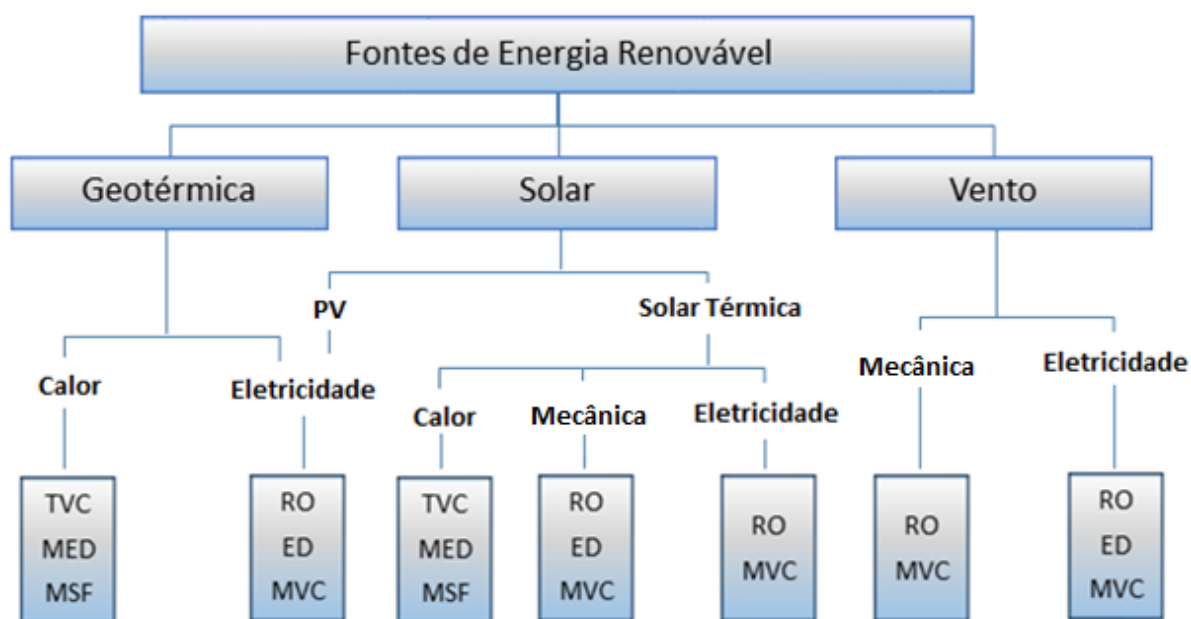
Os sistemas de energia renovável oferecem alternativas para diminuir a dependência dos combustíveis fósseis. O desenvolvimento das tecnologias de dessalinização, a partir de fontes de energia renovável (FER), vai permitir um aumento da segurança energética com a utilização de um recurso inesgotável, aumentando a sustentabilidade e reduzindo a poluição. (34)

Para sistemas autónomos, a melhor opção no fornecimento de energia é através de energia renovável, principalmente em locais onde não é suficiente ou é inexistente o fornecimento de energia convencional. (33) Fontes de energia renovável a operar em unidades de dessalinização de pequena escala têm um grande potencial em comunidades remotas e rurais onde são necessárias pequenas quantidades de água para consumo humano. Contudo, menos de 1% da totalidade da água dessalinizada é hoje produzida a partir destas fontes de energia renovável. (35)

A relação entre a disponibilidade de FER e a grande procura de água está em concordância com as condições climáticas favoráveis nessas regiões, especialmente em relação à energia solar. (33) A utilização de energia solar na produção de água fresca a partir de água salina pode ser viável, especialmente em países que estão localizados em climas semiáridos e ensolarados, com uma média de irradiação de 6-7 kWh/m²/dia, como é o caso de alguns países africanos, asiáticos e regiões do médio Oriente e norte de África. O facto de o pico de energia solar, nas temporadas de Verão, coincidir com a maior procura de água é também favorável o uso desta energia na dessalinização. (34)

Na sua maioria, os sistemas de dessalinização que utilizam FER podem ser divididos em três categorias, sendo estas: energia solar (que inclui energia solar térmica e fotovoltaica), energia eólica e energia geotérmica. Estas fontes de energia podem ser integradas com os processos de dessalinização de destilação térmica ou de membrana como se pode verificar o esquema da Figura 22. O tipo de energia fornecido pelo sistema de energia renovável ao processo de dessalinização pode ser diferente: energia térmica, energia elétrica ou mecânica. (23)

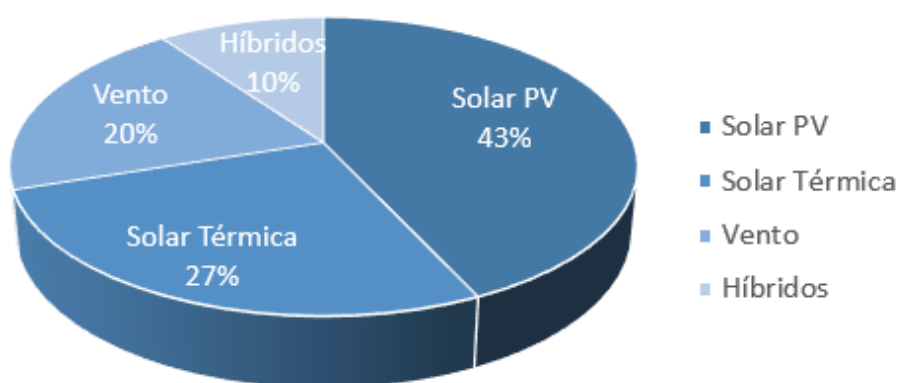
Figura 22 - Combinação entre tecnologias de energia renovável e processos de dessalinização



Fonte: Adaptado de A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems (33)

Através do Gráfico 7 podemos verificar que a fonte de energia renovável mais utilizada na dessalinização é a energia solar, sendo esta dividida em energia fotovoltaica e energia térmica que representam 43 % e 27 %, respetivamente, de toda a energia renovável utilizada na dessalinização.

Gráfico 7 - Fontes de Energia Renovável utilizada na dessalinização



Fonte: Adaptado de Opportunities for solar water desalination worldwide: Review (34)

Uma vez que os custos dos sistemas de energia renovável têm vindo a descer, estes sistemas podem tornar-se competitivos e as energias renováveis obterem um grande impulso como fontes de energia para o processo de dessalinização da água.

2.4.1 Energia Solar na Dessalinização

Na dessalinização, a energia solar pode ser utilizada para converter água salgada em água doce de uma forma simples e com custo reduzido. Podendo ser considerada uma tecnologia económica é, por isso, adequada para pequenas comunidades e áreas rurais, no fornecimento de água fresca. Em áreas rurais remotas, os processos de energia solar são considerados melhores do que outras alternativas.

O tamanho da central, a salinidade da água de alimentação, a acessibilidade e isolamento do local, a disponibilidade e viabilidade da rede elétrica, e as infraestruturas disponíveis são fatores que influenciam a escolha da tecnologia com recurso à energia solar para a dessalinização mais adequada.

São possíveis diversas combinações entre os processos de dessalinização e as tecnologias de energia solar. Para cada situação deve-se considerar em termos de viabilidade económica e tecnológica a mais adequada. No caso de grandes centrais as tecnologias e as combinações mais apropriadas não serão as mesmas do que para aplicações de pequena escala. (36)

Os processos de dessalinização alimentados por energia solar são usualmente divididos em duas categorias: sistemas diretos e indiretos.

Os sistemas diretos são aqueles em que o processo de dessalinização e o ganho de calor ocorrem naturalmente no mesmo dispositivo, tal como acontece na destilação solar. Neste processo, a radiação passa através de uma superfície transparente e é aprisionada (efeito de estufa), representando numa menor escala o ciclo natural hidrológico, sendo uma aplicação simples útil quando há uma exigência reduzida de produção de água. (34)

Os sistemas indiretos estão divididos em dois subsistemas: a unidade de dessalinização e a unidade de produção de energia. Esta energia é produzida recorrendo a tecnologias como coletores solares em placa, tubo em vácuo ou centrais de energia solar concentrada. Os coletores solares térmicos captam o calor absorvendo a radiação solar, podendo estar ligados a quaisquer unidades de destilação que utilize o princípio de evaporação e condensação, tais como MED, MSF e VC, combinando a dessalinização térmica com a energia solar. Os sistemas que utilizam dispositivos fotovoltaicos geram eletricidade, sendo portanto ideais para funcionar com os processos de dessalinização RO e ED. (34)

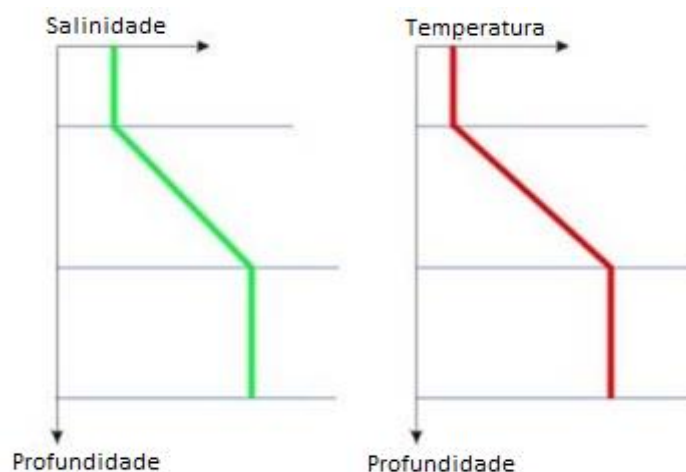
2.4.1.1 Lagoa Solar

As lagoas solares coletam energia solar e armazenam energia térmica. Estas combinam a captação de energia solar com a elevada capacidade de armazenamento a longo prazo, devido à sua natureza quimicamente estratificada. O gradiente de concentração de sal na lagoa ajuda no armazenamento de calor. (25) (36)

A lagoa solar é dividida em três camadas: a camada superior ou zona de convecção; a camada intermédia ou zona do gradiente de salinidade; e a camada inferior também chamada zona de armazenamento. A salinidade é relativamente constante nas zonas superior e inferior, na zona intermédia a salinidade aumenta com a profundidade. No topo, a temperatura é aproximadamente igual à temperatura ambiente e na parte inferior do tanque, onde a concentração do sal é superior, a temperatura pode atingir os 90°C. Os perfis de temperatura e salinidade típicos numa lagoa solar estão representados na Figura 23. (25)

A grande capacidade de armazenamento da lagoa solar pode ser útil em operações contínuas de processos de dessalinização MED, MSF ou TVC. O calor pode também ser utilizado para produção de eletricidade e ser utilizado em processos de dessalinização RO, MVC e ED. (25)

Figura 23 - Perfil da Temperatura e Salinidade com a Profundidade



Fonte: Adaptado Integration of Solar Pond with Water Desalination (37)

O armazenamento diário e sazonal, em lagoas solares, fornecem a opção mais conveniente e menos dispendiosa, sendo vantajoso a nível económico e operacional na produção constante de água. A grande capacidade de armazenamento permite o funcionamento das centrais de dessalinização em dias nublados e períodos noturnos. A eficiência de calor útil na dessalinização é da ordem dos 10 a 15 % a nível anual, o que é adequado para abastecer aldeias e pequenas cidades. (36)

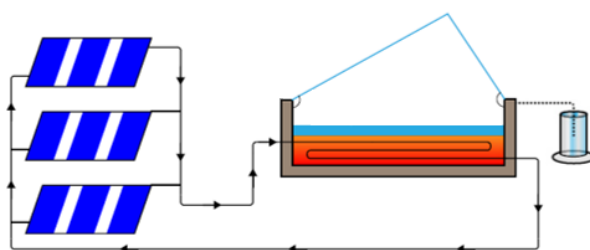
2.4.1.2 Coletor Solar Térmico

Um coletor solar térmico é resumidamente um permutador de calor que converte a energia que absorve da radiação solar incidente em calor e transfere-o para um fluido (geralmente ar, água ou óleo) que circula pelo coletor.

Existem diferentes tipos de coletores térmicos com diferentes temperaturas de funcionamento, como tal e com base na temperatura que é pretendida no processo de dessalinização é escolhido o coletor.

Muitos pesquisadores têm experimentado acoplar coletores solares térmicos com o processo de destilação solar, a fim de aumentar a produtividade, como está representado na Figura 24. De forma a aumentar a eficiência dos destiladores solares conectados ao coletor solar térmico pode-se aumentar o número de coletores. (23)

Figura 24 - Processo de destilação solar ligado a coletores solares



Fonte: Adaptado de Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources (23)

O uso desta tecnologia é favorável quando a procura de água doce é baixa e o terreno disponível é barato e com dimensões consideráveis. Têm sido feitas modificações de forma a melhorar o seu desempenho e reduzir o custo, utilizando materiais menos dispendiosos na sua construção. Contudo, este sistema não é economicamente viável para aplicações de grande escala. (36)

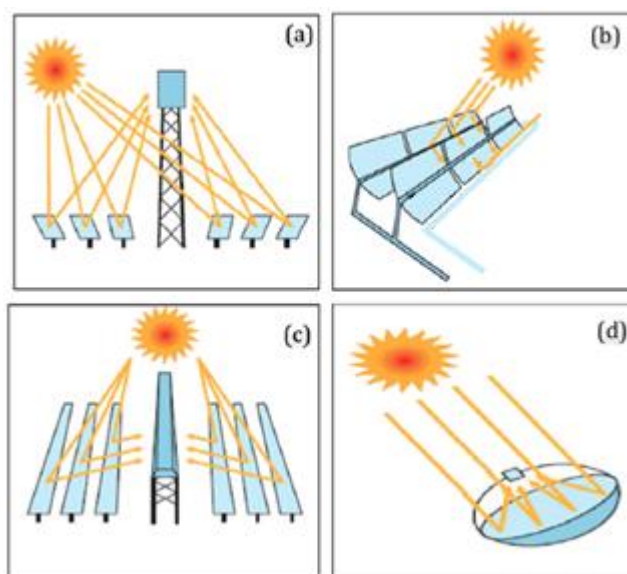
2.4.1.3 Centrais de Energia Solar Concentrada

As tecnologias de energia solar concentrada (CSP) convertem a energia do sol em calor de alta temperatura. São utilizados refletores que refletem a energia solar para um recetor, concentrada numa pequena área, onde o calor é recolhido por um transportador de energia térmica. Esta energia pode ser utilizada diretamente na operação de instalações de dessalinização térmicas ou ser utilizada num circuito secundário com o intuito de geração de energia elétrica, através de ciclos convencionais, tais como turbinas de vapor (e.g. ciclo de Rankine). A energia elétrica pode ser utilizada em processos auxiliares

da dessalinização e em processos de dessalinização onde o seu funcionamento necessita desta energia, como ED e RO. (38) (39)

Neste tipo de processo podem ser incorporadas tecnologias de armazenamento de energia térmica e sistemas de recuperação, valorizando este processo por permitir uma operação contínua e durante todo o ano. (38) Existem diversas tecnologias CSP disponíveis no Mercado, entre as quais o coletor parabólico de calha (PTC), a torre de energia solar (SPT), o refletor linear Fresnel (LFR) e o sistema parabólico (PDC), como se representa na Figura 25.

Figura 25 - Tecnologias de CSP: (a) SPT; (b) PTC; (c) LFR; (d) PDC



Fonte: Adaptado de Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems (38)

As torres solares atingem temperaturas muito altas, aumentando a eficiência do calor produzido para a dessalinização térmica ou para conversão em eletricidade. O sistema SPT é composto por um campo de heliostatos (espelhos) que acompanham o sol refletindo e concentrando a energia solar térmica num recetor central localizado na parte central de uma torre fixa. O calor é absorvido e a transferência de calor é feita por um fluido, que é utilizado como permutador de calor fornecendo a energia térmica para aplicações diretas ou para alimentar um ciclo de vapor, gerando energia elétrica. (38)

No caso da tecnologia PTC existe um tubo montado numa linha que absorve a luz solar que é concentrada por refletores parabólicos. Os refletores e o tubo movem-se acompanhando o sol. Estes tubos de absorção são revestidos de um material com elevada absorção a irradiação solar e baixas perdas térmicas (emissor seletivo). (38)

Os coletores parabólicos de calha acompanham o sol, são dispendiosos e têm um baixo grau de armazenamento térmico. Os LFR são semelhantes aos coletores parabólicos de calha, utilizam longas filas de espelhos planos ou ligeiramente curvos que refletem para um recetor linear virado para baixo. O seu *design* simples e um recetor fixo requer menos custos de investimento e facilita a geração de calor direto não sendo necessário um fluido de transferência de calor. (38)

Entre as tecnologias CSP, os sistemas PTC estão mais estabelecidos em centrais comercialmente operacionais. Em termos de custos SPT e PDC são sistemas mais caros, no entanto os PDC são menos exigentes.

2.4.1.4 Coletor Solar Fotovoltaico

A conversão de energia solar em energia elétrica é chamada de efeito fotovoltaico. Para que esta conversão aconteça é necessário um sistema de painéis fotovoltaicos compostos por células solares. Resumidamente as células solares, também denominadas como células fotovoltaicas, produzem corrente elétrica por ação da luz.

As células solares fotovoltaicas são feitas de silício ou outros materiais semicondutores, e são interligadas de modo a formar um módulo fotovoltaico. Estes podem ser combinados formando uma matriz que fornece a potência necessária para a carga. Na utilização desta tecnologia numa instalação de dessalinização são importantes outros equipamentos que possibilitem um funcionamento adequado como: baterias para o armazenamento de energia, controladores de carga para proteger as baterias e evitar sobrecargas, inversores que convertam a corrente contínua (produzida pelo sistema fotovoltaico) em corrente alternada (que alimenta a carga). Os módulos têm um tempo médio de vida de 20 a 30 anos e podem ser utilizados na alimentação de unidades de dessalinização RO e ED. (25)

Com introdução de tarifas que permitem vender uma parte ou a totalidade da energia elétrica produzida, fez com que a energia solar fotovoltaica se torna-se mais popular e incentivou a sua utilização. O seu desenvolvimento e a redução acentuada nos preços das células fotovoltaicas no mercado tornaram algumas das tecnologia de dessalinização mais acessíveis particularmente em áreas remotas e pobres. (23)

2.4.2 Energia Eólica na Dessalinização

A energia do vento tem origem indireta no sol: o vento sobre os oceanos e os continentes ocorre devido às diferenças de temperatura. A energia radiante emitida pelo sol é recebida desigualmente nas diversas latitudes do planeta. Em resultado desta assimetria umas aquecem mais do que outras. (40)

O ar está em constante movimento, nas áreas mais quentes o ar sobe e o ar mais frio nas áreas envolventes movimenta-se de forma a repor a camada de ar que se elevou, criando fluxos de ar designados de vento. A energia eólica resulta do aproveitamento desta energia cinética contida nas massas de ar comumente chamadas de ventos. Os homens criaram diversos dispositivos para aproveitar a energia do vento como os aerogeradores também conhecidos como turbinas eólicas. Os aerogeradores são máquinas rotativas que captam a energia cinética do vento e a convertem em energia mecânica. A força do vento faz girar as pás que propulsiona o rotor. Posteriormente, a energia mecânica é convertida em energia elétrica. O eixo principal conecta o rotor ao gerador elétrico movendo-o e produzindo eletricidade. A velocidade de rotação da turbina é baixa e por isso é utilizado um multiplicador de velocidade entre o eixo da turbina e o gerador. A energia gerada é enviada por cabos que descem pelo interior da torre e é transferida para o sistema elétrico ou para baterias, para ser armazenada ou utilizada. Os aerogeradores são preferencialmente instalados em locais com vento significativo, sendo preferível a existência de um regime tão constante quanto possível. (40)

Na dessalinização em unidades de pequena capacidade, a energia eólica é a fonte de energia mais utilizada depois da energia solar. (35) Em certos locais onde existe um potencial de energia eólica, como as ilhas, a aplicação de sistemas de energia eólica são vantajosos na produção de água doce a partir da dessalinização da água do mar. O custo de produção de água é reduzido comparado com os custos de transporte de água para as ilhas ou comparado com a utilização de combustíveis convencionais como fonte de energia. (33)

A partir da energia eólica, uma unidade de dessalinização pode ser alimentada por diferentes interfaces: eletricidade, energia térmica, energia potencial gravítica e energia cinética, sendo a eletricidade a mais utilizada. (30) Após a energia eólica ser convertida em eletricidade, esta pode ser utilizada para alimentar sistemas de RO, ED e MVC, mas a mais utilizada é a RO devido ao baixo consumo de energia específica. (25)

Existem diferentes formas de conectar um sistema de dessalinização a partir da energia eólica, direta ou indiretamente. As turbinas eólicas e o sistema de dessalinização podem estar conectados a um sistema de rede ou podem estar acoplados de forma mais ou menos direta. (33) Na última situação, devido à característica variável da energia eólica, o sistema de dessalinização é afetado por variações de potência e interrupções. As variações de potência causadas pelo vento levam a efeitos adversos na vida e desempenho dos equipamentos de dessalinização. Desta forma são essenciais sistemas de apoio como baterias, tanques de água, ou geradores a *diesel* que podem ser integrados ao sistema para armazenar ou disponibilizar energia quando o vento excede ou não alcança o nível exigido. (39)

Existem algumas barreiras quanto ao crescimento de energia eólica instalada, desde a aceitação popular, as necessidades de terreno, o impacto visual, o ruído, a interferência nas telecomunicações e vários impactos no habitat natural e na vida selvagem. Com a instalação de parques eólicos *offshore* a maioria destes problemas é resolvido. (35)

2.4.3 Energia Geotérmica na Dessalinização

O aproveitamento de energia térmica localizada debaixo da superfície da terra é chamado de energia geotérmica. A temperatura no interior da terra aumenta com a profundidade, no entanto a distribuição da temperatura com a profundidade não é constante devido à heterogeneidade da crosta terrestre. A variação da temperatura com a profundidade é diferente de local para local dependendo das suas características.

A energia térmica localizada no interior da terra é usualmente extraída com permutadores de calor no solo. (25)

Os reservatórios geotérmicos são classificados em duas categorias: baixa entalpia (com temperaturas inferiores a 150°C) e alta entalpia (com temperaturas superiores a 150°C). Os reservatórios de baixa entalpia são utilizados geralmente em usos mais diretos e os de alta entalpia utilizam normalmente o calor para ser convertido em energia elétrica. (25)

Em locais geologicamente mais ativos como o Vale do Rift (na África Oriental), ou o Anel de Fogo do Pacífico (em torno da Ásia) e a região do Pacífico Leste, a poucas centenas de metros abaixo da superfície da terra encontra-se diferenças de temperaturas muito grandes capazes de gerar eletricidade. Noutros locais menos ativos para encontrar um diferencial de temperatura tão elevado é necessário uma perfuração tão profunda como os cinco mil metros. (41)

Uma vez que a energia geotérmica pode fornecer calor e eletricidade, esta pode ser combinada com ambas as tecnologia, térmicas e de membranas, de dessalinização. (42) O uso direto de temperaturas moderadas e altas é utilizado em tecnologias de dessalinização térmica, fornecendo calor para MSF, MED e TVC. Os reservatórios com temperaturas mais elevadas são mais procurados para a produção comercial de eletricidade, que por sua vez poderá ser utilizada em RO, ED e MVC. O método preferencial na escolha das centrais de dessalinização é o baseado no aquecimento direto de energia geotérmica na técnica de destilação térmica. (25)

A utilização de energia geotérmica não é tão comum como a energia solar e energia eólica que são energias com tecnologias mais desenvolvidas e que podem fornecer energia para a dessalinização com custos mais competitivos. A opção mais interessante no uso da energia geotérmica é a que envolve a utilização direta de um fluido geotérmico com temperatura suficientemente elevada para o uso de uma tecnologia de dessalinização térmica. (33)

Para determinar as condições geológicas é necessário um investimento de capital significativo, na perfuração e em testes caros, de forma a obter conhecimento da qualidade e acessibilidade do recurso para a geração de energia. É desvantajoso uma vez que o investimento inicial é extremamente elevado e poderá ser considerado um investimento de alto risco comparado com outras formas de produção de energia. (43) Tal como outros recursos de energia renovável, a energia geotérmica tem custos operacionais e de funcionamento reduzidos. (41) Por outro lado, esta energia comparada com outros

tipos de energia renovável é mais vantajosa, visto não ser necessário o armazenamento de energia térmica uma vez que é contínua e previsível. (33)

2.4.4 Sistemas Híbridos

Sistemas híbridos são sistemas que combinam duas ou mais fontes de produção de energia. Estas fontes de energia podem ser de origem renovável, como a energia solar, eólica, geotérmica, entre outras, que poderão ser integradas ou complementadas com fontes ditas convencionais, que consomem combustível fóssil, como os geradores a *diesel*.

A utilização de alguns recursos naturais, como o sol, o vento, não é totalmente previsível e é variável. Embora exista uma grande complexidade destes sistemas, a utilização de diferentes recursos ou diferentes origens na produção de energia permite que a energia produzida seja complementada e/ou compensada.

Em zonas remotas onde a extensão elétrica levaria a custos muito elevados, a dificuldade de acesso a esses locais faz com que o custo de combustíveis fósseis, devido ao seu transporte, atinja preços muito elevado. Estes sistemas, que utilizam os recursos locais, podem funcionar em modo isolado e melhorar a qualidade de vida da população local.

2.5 Gestão do concentrado

O concentrado é uma consequência inerente ao processo de dessalinização, e como tal deve ser levado em conta no planeamento da instalação. A preocupação com a sua deposição tem vindo a crescer devido ao aumento da procura de água, assim como ao aumento da capacidade e do número de centrais de dessalinização limitando as opções de eliminação. A regulamentação mais rigorosa e as questões ambientais e financeiras estão a tornar cada vez mais difícil encontrar métodos viáveis para a gestão do concentrado. São necessárias mais pesquisas para melhorar, desenvolver novos e rentáveis processos de gestão do concentrado. (44)

É essencial considerar uma variedade de fatores de forma a escolher a melhor opção para o método de eliminação do concentrado: o volume ou quantidade do concentrado, a qualidade do concentrado, a localização geográfica do ponto de descarga do concentrado, os regulamentos ambientais locais, a aceitação pública, os custos de capital e operacionais e a capacidade para a instalação ser expandida. (45)

Para centrais de dessalinização que se encontram junto a zonas costeiras, a forma mais prática e económica e também mais utilizada por todo o mundo é a deposição do concentrado em águas superficiais, tanto à superfície como através de deposição submersa. As descargas podem ser feitas em rios, riachos, oceanos, estuários, baías, lagos e lagoas. No caso de centrais de dessalinização de água salobra, em zonas interiores, as opções de eliminação do concentrado são mais limitadas. No entanto, existem outros métodos alternativos para eliminar o concentrado, por exemplo a injeção de poços profundos, descarga em esgotos, lagos de evaporação, descarga de líquido zero ou aplicação de fertilizantes. (45)

Quando a água recetora entra em contato com o concentrado, cria-se nesta uma pluma de alta salinidade e dependendo da densidade do concentrado pode afundar, estabilizar ou flutuar. O raio e o impacto que a pluma terá variam. Sem a diluição adequada, a pluma poder-se-á estender centenas de metros para além da zona de mistura, prejudicando os ecossistemas por onde passa. Por esse motivo é muito importante a quantidade de diluição e de dispersão natural que ocorre após a deposição, que depende da localização dos tubos de descarga e das condições do ambiente recetor como ondas, correntes, marés e a profundidade da água. (45)

O concentrado pode ser diluído através de difusores e de mistura. A mistura como o nome indica é quando se mistura o concentrado com água de refrigeração, ou água de alimentação do processo de dessalinização ou outras águas com baixo SDT antes da eliminação. Os difusores são jatos que diluem o concentrado quando este é libertado para o meio recetor para uma mistura mais eficaz. (45)

A deposição do concentrado à superfície é uma forma de descarga perto da costa a níveis rasos. A distância da costa é geralmente de alguns metros. Uma vez que as correntes e as ondas perto da costa em pequenas profundidades são menores e mais fracas, a diluição do concentrado na coluna de água

pode levar mais tempo. Este método não é indicado para mares com alta sensibilidade a alterações do seu ecossistema, para grandes instalações de dessalinização e para áreas com elevada população e com consciência ambiental. (44)

A deposição submersa é feita a uma distância entre centenas de metros até alguns quilómetros da costa e é feita em profundidade. Na maioria dos casos é feita utilizando difusores que diluem o concentrado de forma a evitar que o concentrado fique no fundo do mar. O distanciamento da praia e de áreas rochosas que sejam ricas em organismos e longe de áreas com grande número de pessoas que estão envolvidas em atividades humana como pesca, passeios e divertimento leva a uma maior aceitação. Existe também um maior consenso quando este tipo de descarga é feito no mar em áreas em que o fluxo é constantemente turbulento, sendo uma opção de projeto bastante atrativa uma vez que minimiza a extensão espacial e a intensidade da concentração das plumas. (44)

A deposição do concentrado em estações de tratamento de águas residuais (ETAR) pode ser feita no início ou no fim do processo de tratamento das águas residuais. A deposição no início é a segunda forma mais utilizada para eliminar o concentrado produzido por processos de dessalinização, porém esta forma de eliminação de concentrado pode ter um impacto no processo de tratamento biológico da ETAR se o volume for muito grande, porque o nível de SDT do concentrado pode prejudicar a performance do tratamento. Existem muitas estações de tratamento de águas residuais convencionais que não estão preparadas para remover os STD, que permanecerá na água, o que representa uma preocupação ambiental se a central devolver a água em sistemas de água superficial.

A deposição também pode ser feita no final do processo de uma ETAR devido às desvantagens que tem a eliminação do concentrado no início. Neste caso faz-se a mistura do concentrado com a água tratada diluindo a salmoura. Este método requer a instalação de um gasoduto para transportar o fluxo de salmoura, e muitas vezes pela localização distante das centrais de dessalinização esses gasodutos são extensos, traduzindo-se em custos adicionais. (45)

As lagoas de evaporação permitem que a água do concentrado evapore, através de energia solar, enquanto os sais se acumulam na base do tanque onde o concentrado é depositado. Historicamente este método já era utilizado para a produção de sal. Porém, as lagoas de evaporação só são viáveis em locais com clima quente e seco, com elevada taxa de evaporação. Dependendo da taxa de evaporação da região há uma variação no tamanho do tanque. O custo das lagoas de evaporação está ligado ao custo de terreno, sendo uma opção viável para centrais com pequenas capacidades de dessalinização de água salobra em zonas interiores ou em zonas costeiras com baixo valor económico. No entanto deve-se ter atenção a possíveis fugas que possam afetar aquíferos de água subterrânea havendo alguns riscos de contaminação por infiltração. O custo das lagoas de evaporação é devido principalmente a tubulações, bombeamento, custos de terreno e preparação da terra, sistema de distribuição, revestimento de argila sintética e monitorização. Pode haver custos adicionais de eliminação associados à retirada de sais sólidos acumulados ao longo do tempo. (44) (45)

A utilização de poços profundos, já utilizada por todo o mundo para depositar constituintes industriais, municipais e resíduos perigosos, também pode ser considerada uma opção para eliminar permanentemente o concentrado de uma central de dessalinização. A injeção de concentrado é feita em aquíferos subterrâneos e inutilizáveis com profundidades que variam entre 330 e 2600 metros. A viabilidade de injeção em poços profundos depende das condições geológicas e hidrológicas do local, por isso este método não pode ser aplicável em todos os locais. É importante assegurar o desempenho e a confiabilidade desta opção e fazer um estudo geológico. A determinação da viabilidade da utilização dos poços profundos é dispendiosa e mesmo após vários testes de avaliação, não há garantias que a operação seja confiável a longo prazo. (44)

A técnica de descarga zero de líquidos (ZLD) é um método térmico que utiliza evaporadores para converter o concentrado líquido num sólido seco. Os resíduos sólidos gerados podem posteriormente ser colocados em aterros sanitários, mas estes devem estar concebidos de forma adequada para não ocorrerem problemas com a contaminação de águas subterrâneas. O processo ZLD é uma técnica que necessita de grandes quantidades de energia e por isso tem custos muito elevados, sendo pouco utilizada. A redução do custo deste sistema de descarga zero de líquidos pode estimular o setor de dessalinização. (44)

Outra forma de descarga de concentrado é a concentração de salmoura que utiliza permutadores de calor e compressão a vapor. A salmoura é recuperada em 95% e com uma elevada pureza, menos de 10 mg/l de concentração de SDT, os restantes 5% são transformados em sólidos secos e são facilmente transportados. Estes sólidos podem ser depositados em locais apropriados ou transportados para empresas de fabricação de sal. (45)

2.6 Impactos e Medidas Mitigadores no Processo da Dessalinização

A dessalinização é atualmente considerada uma opção para o abastecimento de água, principalmente em locais onde a escassez e a crescente necessidade de água têm levado à procura de soluções, o que tem levado a um crescimento rápido no número de instalações de dessalinização. Apesar disso existem barreiras à aceitação desse tipo de tecnologia pelas preocupações que levanta relativamente aos impactos ambientais. A melhor forma de mitigar estes impactos é fazer uma análise prévia dos mesmos. Algumas das principais preocupações ambientais incluem a localização da instalação de dessalinização, a estrutura de captação de água, a gestão e eliminação do concentrado.

Resumidamente, estes impactos estão associados à emissão de poluentes atmosféricos e gases com efeito de estufa que são libertados na geração de energia resultante do consumo intensivo de energia, ao aprisionamento de vida marinha na captação de água necessária ao processo e na descarga do concentrado devido às elevadas temperaturas, elevada salinidade e a elevada quantidade de produtos químicos presentes. (46)

Como exigência para novos projetos de dessalinização, um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) é fundamental no que diz respeito ao estudo dos potenciais efeitos adversos da dessalinização. Da análise deste tipo de estudo poderá resultar a autorização do projeto pelas autoridades competentes, acompanhada ou não de um conjunto de restrições. Um EIA analisa individualmente as componentes de um projeto e os efeitos socioeconómicos e ambientais esperados, de forma a combater estes impactos.

2.6.1 Fase de Construção

No planeamento de uma instalação de dessalinização, a escolha da localização da construção é muito importante, como já foi referido anteriormente, devido a diversos fatores como as fontes de energia disponível, os custos e riscos associados ao transporte da água de alimentação e localização da descarga do concentrado, inerentes ao processo, que permite precaver impactos maiores.

Uma nova instalação de dessalinização altera não só as propriedades do local onde será instalada como pode alterar permanentemente outras opções de uso da terra.

Os impactos associados à fase de construção resultam da atividade de obra onde advêm perturbações do solo, o uso de maquinaria pesada, construção de infraestruturas de apoio como estradas, oleodutos, linhas de transmissão de energia, tubagens para entrada da água entre outras. Todas estas perturbações levam a impactos ao nível do ar, do solo, e do meio de captação de água (mar, oceano, rio, aquíferos), o que leva a alterações da fauna e da flora, terrestre e aquática. Alguns destes manter-se-ão mesmo depois da fase de construção podendo ser irreversíveis. (47)

A proximidade de centros populacionais pode ser prejudicial para o ambiente residencial, uma vez que algumas destas centrais geram emissões de ruído e de gases. Um exemplo são as centrais RO

que devido à utilização de bombas de alta pressão geram ruído. O seu planeamento nestes locais deve portanto incluir medidas para mitigar a poluição sonora com recurso a material com isolamento acústico. (45)

Para minimizar os impactos do uso da terra, a nova instalação de dessalinização deve estar perto de outras instalações com necessidades e objetivos semelhantes, ou seja, locais onde existam já infraestruturas adequadas e onde o distúrbio visual e sonoro seja aceitável ou onde as águas já tenham sido classificadas para uso industrial. Caso não seja possível, deve-se reduzir o uso de terra e evitar os impactos nessa área. Para minimizar os impactos da qualidade de água e do ar deve ser implementado as melhores técnicas disponíveis. (47)

2.6.2 Fase Operação e Manutenção

2.6.2.1 Captação de água

As unidades de dessalinização podem fornecer água com elevada qualidade e existem diversas fontes de água não utilizável (como mares, oceanos, aquíferos, águas residuais e estuários) que podem ser tratadas por esta tecnologia. Dependendo da fonte que abastece a estação de tratamento existem diferentes impactos ambientais.

A forma mais comum de abastecimento de água destas centrais é através de águas superficiais provenientes de mares e oceanos. Um dos principais problemas na captação de água de zonas costeiras é o arrastamento, colisão e aprisionamento de organismos aquáticos para além de sólidos em suspensão. (46)

Com a necessidade de captação de grandes volumes de água do mar ou estuários, são construídas infraestruturas de ingestão de água que causam ferimentos, enclausuramento e morte de peixes e outros organismos de maiores dimensões, e arrastamento de organismos mais pequenos como larvas, ovos de peixe e plâncton, que sendo submetidos a elevadas temperaturas ou esmagados por membranas de alta pressão acabam por morrer. (17) Como efeito no habitat haverá uma quebra na produtividade do ecossistema, resultante da morte de um número elevado de organismos marinhos, sendo o principal impacto ambiental provocado pelo funcionamento de um sistema de captação de água. (47)

Este processo tem um potencial impacto na fauna e na flora marinha da zona. Para reduzir estes impactos em zonas costeiras existem sistemas modernos de admissão de água localizados em partes mais profundas, onde existem menos organismos que podem ser afetados ou arrastados, com aberturas maiores cobertas por uma malha diminuindo a velocidade da água de entrada e evitando assim o arrastamento de organismos mais pequenos. (46) No entanto, estes sistemas provocam maiores perturbações no fundo marinho na fase de construção.

No caso de águas provenientes de aquíferos ou poços, os problemas que afetam os organismos relativamente ao arrastamento, colisão e aprisionamento não se aplicam. No entanto, impõe-se problemas relativamente à sustentabilidade física e qualidade deste recurso. Para mitigar estes impactos deverá haver uma avaliação prévia do recurso que permita analisar a qualidade e a quantidade de água que pode ser dessalinizada de forma a assegurar a sustentabilidade e renovação do recurso. Durante a operação é importante uma monitorização periódica de forma a promover uma adequada utilização e para ir avaliando o estado do recurso.

2.6.2.2 Descargas de produtos químicos e de concentrado

Durante o processo de dessalinização, as propriedades físicas e químicas da água que alimenta o sistema são modificadas com procedimentos utilizados de pré-tratamento e dessalinização. As formas de pré-tratamento variam com o processo de dessalinização. A escala e o controlo de contaminantes biológicos são semelhantes nos diferentes processos de dessalinização. Contudo, existem diferenças na remoção de material em suspensão utilizado somente em processos de membrana e no controlo de corrosão e formação de espumas em processos de destilação.

A salmoura e soluções de limpeza são os principais fluxos resultantes da dessalinização da água do mar. A salmoura é produzida de forma contínua em grandes quantidades ao contrário da solução de limpeza que é produzida descontinuadamente e em quantidade relativamente pequena. O nível de salinidade de salmoura depende do método de dessalinização utilizado, da taxa de recuperação da unidade e da salinidade da fonte de água.

O fluxo de salmoura produzido por processos de dessalinização e abastecidos por água do mar tem constituintes comumente presentes na mesma, com uma concentração mais elevada, tais como: magnésio, boro, cálcio e sulfatos. No processo de dessalinização são adicionados produtos químicos como coagulantes, exemplo do cloreto de ferro e cloreto de alumínio, utilizados na remoção de matéria em suspensão presentes na fonte de água; anti incrustantes, tais como fosfonatos e polifosfatos usados de forma a inibir a formação de precipitado no equipamento; e são utilizados também biocidas, agentes anti espuma, e detergentes o que leva a um melhor desempenho do sistema, evita entupimentos e diminui a necessidade de limpeza. Contudo, estes produtos podem ser tóxicos para organismos marinhos mesmo em baixas concentrações. (48)

Durante a fase de operação, o equipamento poderá sofrer corrosão, havendo libertação de metais pesados como cobre, zinco, e níquel na descarga de concentrado. Grandes concentrações destes componentes podem ser tóxicas no meio aquático prejudicando as comunidades biológicas.

Outras das alterações provocadas no processo de dessalinização é a produção de salmoura a temperaturas mais elevadas que a água recetora. Este problema é agravado em tecnologias de

dessalinização térmica. Em tecnologias de membrana, o impacto da temperatura sobre o ambiente marinho não é tão grande, já que as diferenças de temperatura serão muito pequenas. Contudo, se a salmoura for misturada com água de refrigeração de uma central elétrica, de processos industriais ou efluentes de uma estação de tratamento de águas residuais, a diferença de temperatura aumenta tornando-se um problema. (48)

2.6.2.3 Uso de energia e qualidade do ar

Cerca de 90 % da energia utilizada nas centrais de dessalinização é inerente ao próprio processo de dessalinização, sendo utilizada sob a forma de energia térmica ou energia mecânica, muitas vezes obtida através de eletricidade, dependendo do tipo do processo. Em todas as centrais existe consumo de energia elétrica para o funcionamento de equipamentos auxiliares, como bombas e sistemas de dosagens.

Geralmente, os processos que consomem mais energia são os que utilizam a destilação para dessalinizar a água. O consumo de energia não depende só do tipo de processo, como também vai depender da temperatura e da qualidade da água. (47)

Algumas instalações utilizam a energia da rede local, outras produzem e utilizam a sua própria energia e em outros casos utilizam a sua energia e a da rede. Quando o consumo de energia é proveniente da queima de combustíveis fósseis, ocorre a emissão de gases e aumenta a poluição do ar. Os impactos estão relacionados com as emissões de dióxido de carbono e outros gases poluentes na atmosfera, no entanto o transporte de combustíveis e manuseamento para a produção de energia aumenta o risco de acidentes e derrames. (47)

Para minimizar estes impactos, as autoridades nacionais devem promover a utilização de tecnologias e processos de poupança de energia, que podem incluir a utilização de sistemas de recuperação de energia, e incentivar a utilização de energia renovável nos locais onde exista um potencial para o seu uso. A substituição de energia convencional por energia renovável diminui as emissões de poluentes na atmosfera, no entanto caso não aconteça deverão haver normas para o controlo de poluição do ar. (47)

2.6.3 Socioeconómicos

A falta de água e o problema da sua qualidade tem impactos diretos e indiretos sobre o bem-estar e a saúde humana. Para determinados requisitos básicos, como o acesso a água potável para consumo, saneamento e higiene, é necessária uma quantidade mínima de água por pessoa de 50 m³ por dia. Contudo é necessária uma quantidade adicional para a irrigação agrícola e para o desenvolvimento industrial. (47)

A escassez da água impede o desenvolvimento de setores dependentes de água e a melhoria do nível de vida. O aumento da necessidade de água aumenta a pressão sobre os recursos hídricos naturais, que pode resultar numa exploração insustentável e em consequências negativas nos ecossistemas de onde a água é retirada.

Embora existam benefícios socioeconómicos na dessalinização da água do mar, também existem impactos negativos. Tem como aspetos positivos assegurar o acesso a água potável de forma segura e suficiente para uso doméstico, criar riqueza a partir do turismo, desenvolvimento agrícola e industrial e criar novas oportunidades de emprego. Também diminui a pressão sobre os recursos naturais de água doce e protege os ecossistemas, evitando desertificação e contaminação de águas subterrâneas, assim como contribui para a estabilidade e a paz na região. Porém, também existem aspetos negativos referentes ao padrão de consumo que muda, visto dar a sensação que a água tem uma disponibilidade imediata e é acessível facilmente o que pode levar a uma utilização incorreta. A dependência desta tecnologia pode levar à deterioração da qualidade da água do mar. O maior desenvolvimento centralizado em zonas costeiras faz com que haja uma crescente migração das regiões interiores. (47)

O custo da dessalinização influencia a gestão da água, levando a que, para manter um preço baixo, a água dessalinizada seja em geral subsidiada para a tornar mais acessível, o que pode incentivar o seu uso indevido. Para evitar o mau uso e garantir água suficiente para todos, setores como indústrias e turismo que podem arcar com o custo real de água dessalinizada. Para tal devem existir sistemas que permitam taxar a água dessalinizada de forma diferenciada, evitando subsídios desnecessários e que potenciem o uso indevido. (47)

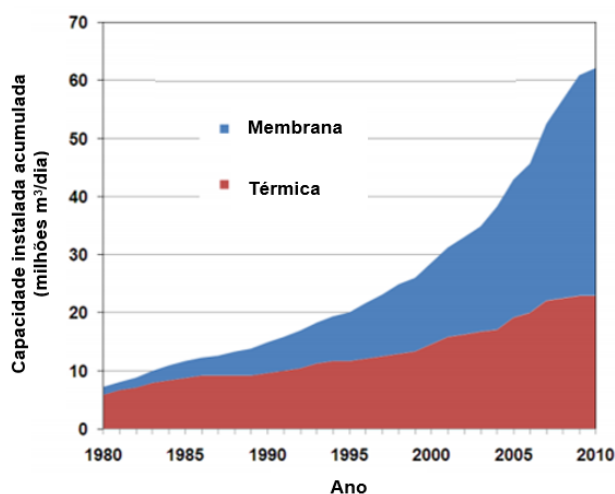
3. Visão Global do Mercado da Dessalinização

3.1 Mercado da dessalinização

Ao longo dos anos, tem-se vindo a verificar um crescimento do mercado da dessalinização como é possível observar-se no Gráfico 8. Este crescimento deve-se, não só à necessidade crescente de água, como aos avanços e melhorias das tecnologias da dessalinização que se caracterizam por um aumento da eficiência dos processos de dessalinização e pela redução dos impactos ambientais. Cada vez mais as organizações governamentais e as indústrias adotam estes processos de forma a responder ao aumento da procura. (49)

A análise do Gráfico 8 permite concluir que a capacidade instalada em processos de dessalinização por membrana tem vindo a superar a capacidade instalada por processos térmicos, o que se traduz no facto de a capacidade instalada com base em processos de membrana ser hoje muito superior à capacidade instalada que recorre a processos térmicos, o que evidencia o grande desenvolvimento dos processos de membrana.

Gráfico 8 - Capacidade instalada de processos de dessalinização térmicos e de membrana

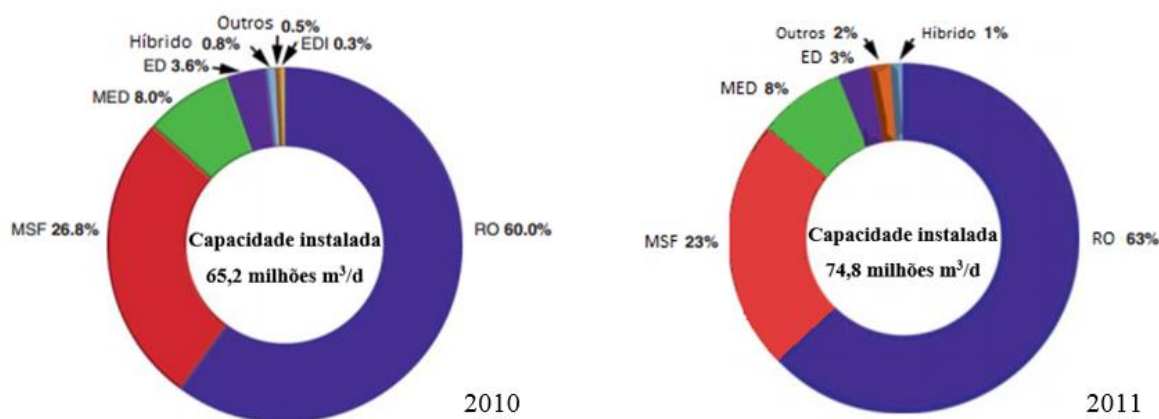


Fonte: www.suswatec.de/download/presentations/Glade.pdf

Segundo a Associação Internacional de Dessalinização, a 30 de Junho de 2015, a capacidade mundial de dessalinização encontrada era de mais de 86,8 milhões de metros cúbicos por dia, sendo que o número total de instalações era de 18.426. Em 2010, a capacidade de dessalinização instalada globalmente era de 65,2 milhões de m³/dia e em 2011 esse valor subiu para 74,8 milhões m³/dia. (50) A Figura 26 apresenta a distribuição da capacidade instalada globalmente com recurso a várias tecnologias de dessalinização em 2010 e 2011, e pode observar-se que os processos de MSF e RO correspondem a mais de 85 % da capacidade total de dessalinização instalada, sendo que a escolha da tecnologia de

dessalinização resulta da viabilidade das tecnologias resultante do preço da energia, da qualidade da água de alimentação e dos recursos técnicos e climáticos das regiões. (51) Também é possível verificar que houve um crescimento da capacidade instalada de RO de um ano para o outro, e uma diminuição da capacidade instalada de MSF.

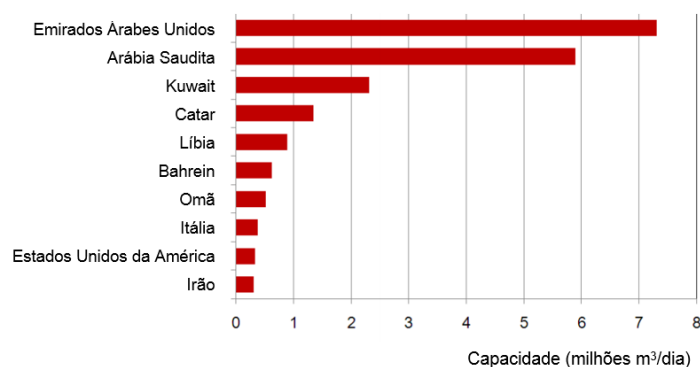
Figura 26 - Capacidade das tecnologias de dessalinização instaladas globalmente em 2010 e 2011



Fonte: Adaptado de Desalination Water from water (50)

No Médio Oriente onde os custos locais de energia são reduzidos, a tecnologia MSF é a escolha preferida. Por isso, e como se pode ver pelo Gráfico 9, países como os Emirados Árabes Unidos, a Arábia Saudita e Kuwait lideram a capacidade de dessalinização com recurso a tecnologias térmicas. (23)

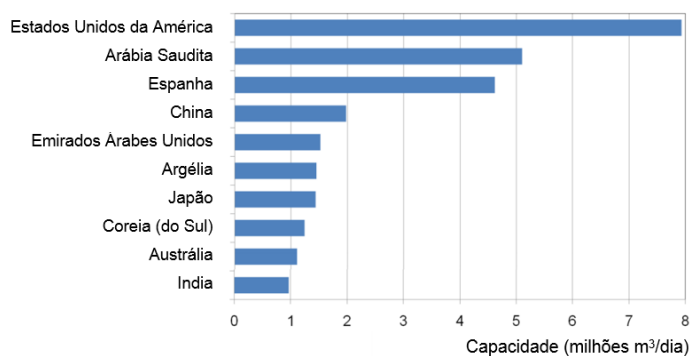
Gráfico 9 - Os 10 países com maior capacidade de dessalinização térmica total instalada desde 1945



Fonte: www.suswatec.de/download/presentations/Glade.pdf

Em países onde o custo de petróleo e outros combustíveis fósseis é muito elevado, outras tecnologias, como RO, são preferidas. No Gráfico 10 mostra que países como os Estados Unidos da América, a Arábia Saudita, a Espanha e a China tem uma capacidade de instalação de membra maior.

Gráfico 10 - Os 10 países com maior capacidade de dessalinização de membrana total instalada desde 1945

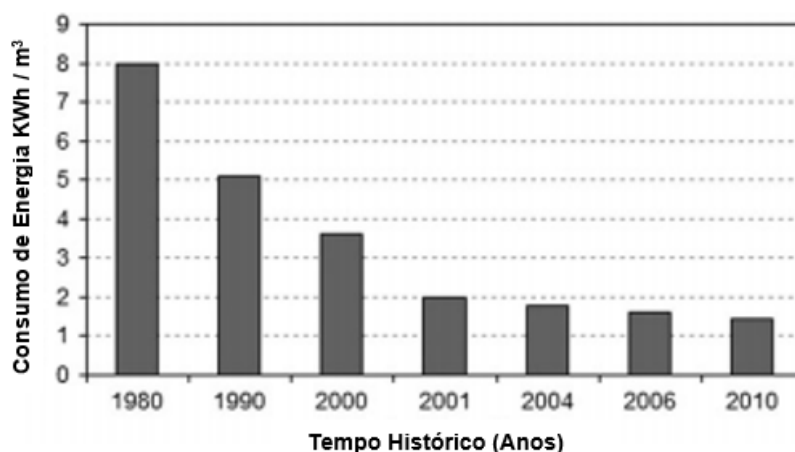


Fonte: www.suswatec.de/download/presentations/Glade.pdf

A tecnologia de RO tornou-se dominante em outras partes do mundo devido à procura de água, incluindo Espanha, China e mesmo países do Médio Oriente que têm aumentado o uso de RO nos últimos anos devido ao seu baixo custo. Sendo nos dias de hoje a tecnologia mais utilizada, RO desencadeou o aumento da capacidade instalada por processos de membrana. Os sistemas de RO tornaram-se mais económicos do que outros processos de dessalinização, devido às melhorias da tecnologia, em particular à diminuição do consumo de energia desta tecnologia RO ao longo dos anos (Gráfico 11). Em 2000, o consumo era superior a 3 kWh/m³ descendo para menos de 2 kWh/m³ em 2010.

O desenvolvimento das membranas permitiu uma diminuição da pressão exigida e consequentemente um menor consumo de energia. O aumento do tempo de vida e diminuição dos custos foram fatores que também permitiram a conquista de mercado desta tecnologia.

Gráfico 11 - Evolução do consumo de energia em processos de dessalinização RO

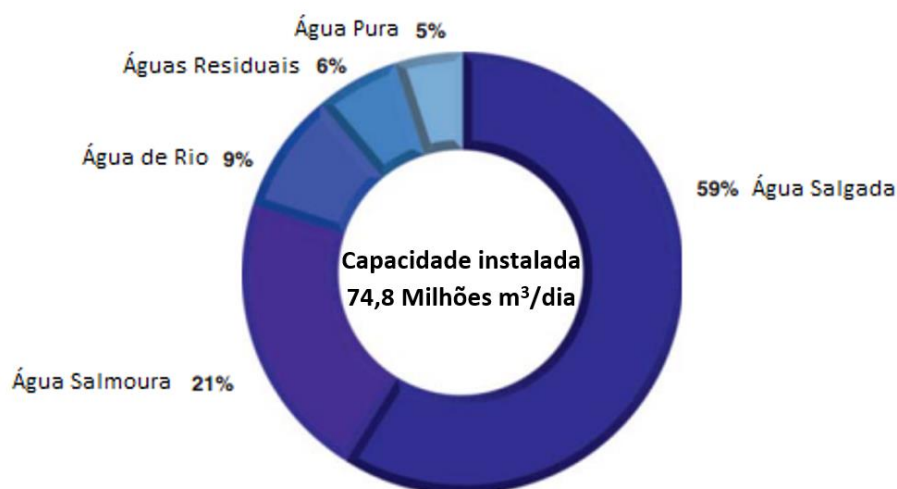


Fonte: Adaptado de Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources (23)

Todavia em certos cenários em que o fornecimento de calor tem um custo reduzido ou a concentração da água de alimentação é elevada, os processos térmicos podem ser mais económicos e mais viáveis. Quando o calor provem de uma fonte de calor residual, exemplo do subproduto de uma central de eletricidade, ou quando está disponível de forma económica como através de uma fonte solar e se a fonte de água for muito salgada, com mais de 60.000 mg/l, os processos térmicos tornam-se mais atrativos.

Como está exposto no Gráfico 12, as unidades de dessalinização são alimentadas maioritariamente por água do mar: em 2011 para uma capacidade instalada mundial de 74,8 milhões de metros cúbicos por dia quase 60 % da água de alimentação foi por água do mar, de seguida, a mais utilizada foi a água salobra com mais de 20 %.

Gráfico 12 - Utilização de fontes de água para a dessalinização



Fonte: Adaptado de Desalination Water from water (50)

O mercado da dessalinização está cada vez mais consolidado e empresas como a Siemens (Alemanha), Suez (França), Veolia (França) e Acciona (Espanha) são líderes de mercado e são não só construtores de centrais de dessalinização, como utilizadores da tecnologia e desenvolvem a tecnologia fornecendo toda a gama de serviços desde a construção à distribuição.

3.1.1 Arabia Saudita

Com uma população estimada de cerca de 25 milhões de pessoas, e com um crescimento populacional anual de 3%, com uma área de 2,15 milhões de metros quadrados, a Arábia Saudita tem o maior mercado de dessalinização do mundo, cujo papel no abastecimento de água é fundamental. (52) Desde a produção, transporte e distribuição, a água dessalinizada é subsidiada pelo governo em todas estas fases. As tarifas de água estão entre as mais altas do mundo. Tanto a quantidade como a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos está em declínio e muitas das instalações de dessalinização estão a chegar ao fim da sua vida útil. (44)

A economia da Arábia Saudita é baseada no petróleo: este país é o maior produtor de petróleo do mundo e tem as maiores reservas comprovadas. Em 2008, o setor dos hidrocarbonetos representava 60 % do PIB. (53) Mais de um quarto da produção de petróleo na Arábia Saudita é consumido pelo próprio país, no entanto a economia neste país depende da receita de exportação de petróleo. O crescimento do consumo diminuirá a capacidade de exportação para os mercados internacionais. O crescimento da taxa de consumo de energia local não é sinal de desenvolvimento económico mas sim do uso ineficiente de energia. A produção de eletricidade por combustíveis é subsidiado pelo governo o que torna os preços baixos para os utilizadores. (54) A ilusão de custos baixos inibe o investimento no desenvolvimento e melhoria na produção de energia e de eficiência energética a partir de fontes renováveis.

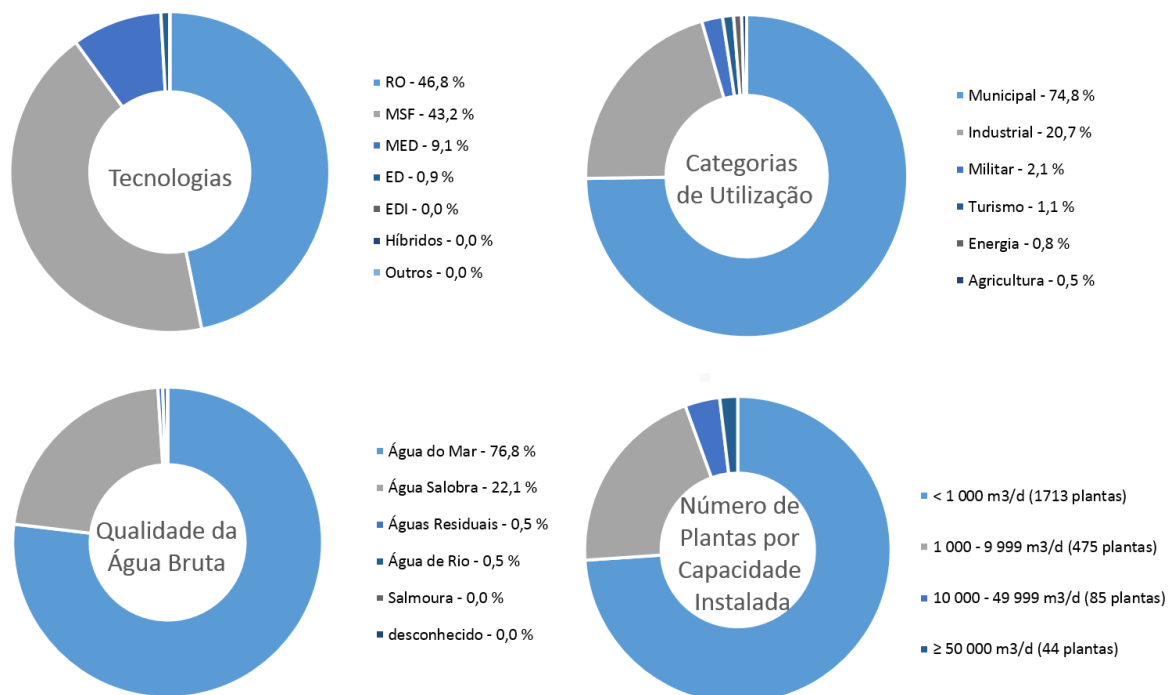
As tecnologias de dessalinização alimentadas por energia renovável estão-se tornando promissoras, a Arábia Saudita pretende em 2019 que as centrais de dessalinização sejam alimentadas por tecnologia solar. A energia solar é um recurso abundante nesta área e por isso uma energia potencial na utilização como fonte de energia. A maior central de dessalinização que usa energia solar fotovoltaica no mundo encontra-se em Al Khafji. (53)

O abastecimento urbano de água é de 5,72 milhões de m³/dia sendo que a dessalinização cobre 60 % deste valor. (52) A junção de FER com a dessalinização permitirá que as fontes de energia convencional, deste país, sejam melhor rentabilizadas.

A Arábia Saudita tem uma grande quantidade de instalações de dessalinização no seu território, como se pode ver no Gráfico 13. Na sua maioria as tecnologias utilizadas são RO com 46,8% e MSF com 43,2%. A água dessalinizada é utilizada maioritariamente no setor municipal (com quase 75% do

seu uso) e na indústria (quase 21%). A água de alimentação das centrais é fundamentalmente água do mar (76,8%) sendo a restante água salobra. Na sua generalidade a capacidade das centrais é inferior a 1000 m³/d.

Gráfico 13 - Capacidade instalada na Arábia Saudita pela tecnologia, categoria de utilização e qualidade da água bruta e tamanho da planta



Fonte: Adaptado de MENA Regional Water Outlook Part II Desalination Using Renewable Energy (44)

3.2 Projeto de uma Central de Dessalinização

3.2.1 Central de Dessalinização Combinada com Energias Renováveis

Para determinar a viabilidade de um projeto de dessalinização que utilize fontes de energia renovável para o seu funcionamento é necessário saber a capacidade necessária e o custo total do investimento. (55)

Podem ser feitas diferentes combinações entre as fontes de energia renovável e as tecnologias de dessalinização. A fonte de energia renovável mais adequada depende não só do processo de dessalinização como das características do local. (33)

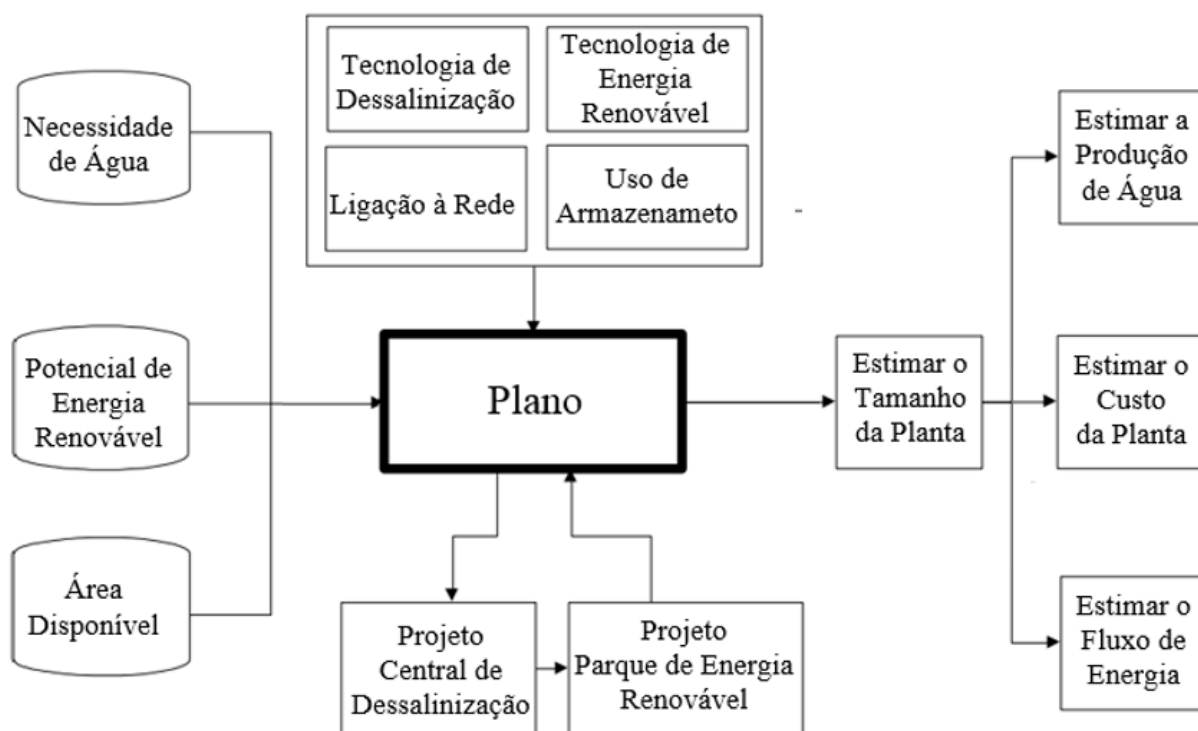
Nem todas as combinações fonte de energia renovável e tecnologia de dessalinização são viáveis em determinadas circunstâncias. Para fazer um dimensionamento de um sistema apropriado de dessalinização com fonte de energia renovável é necessário conhecer as condições do local. Como tal, deve-se estudar cada caso individualmente e combinar alguns parâmetros como: condições geográficas, topografia do local, recursos renováveis disponíveis, acessibilidade e disponibilidade de infraestruturas do local (exemplo: rede elétrica). Deve ter-se também naturalmente uma noção da dimensão da central que é necessária instalar e determinar a fonte de captação de água e a salinidade dessa mesma água. (33)

Para se fazer uma abordagem de um projeto combinando uma tecnologia de produção de energia renovável e um processo de dessalinização, é indispensável uma avaliação da necessidade de água na região, a área necessária ou que pode ser disponibilizada para o projeto, e obter os fluxos de energias anual e os custos de produção de água e de investimento para toda a unidade. (55) Deve-se ter também em conta a robustez e simplicidade do sistema, a aceitação e apoio por parte da comunidade, a necessidade de manutenção e as condições de tratamento de água. (33)

Como se pode verificar pelo esquema da Figura 27, podem ser feito diferentes combinações das tecnologias de produção de energia renovável e de dessalinização e então decidir a necessidade de ligação à rede e de vir a utilizar um dispositivo de armazenamento de energia. (55)

Dependendo da necessidade de água e do processo de dessalinização escolhido é calculada a capacidade e as necessidades de energia da central de dessalinização. Posteriormente, poderá ser realizado o projeto de um parque de energia renovável que irá abranger o máximo das necessidades energéticas do sistema, tendo em conta o potencial das fontes de energia renovável da região e as restrições existentes em termos de área. Por fim, é feita a estimativa de produção de água, dos fluxos de energia anuais e dos custos, com base no investimento da unidade de dessalinização e do parque de energia renovável e no caso de ser necessário dos geradores e dispositivos de armazenamento. (55)

Figura 27 - Esquema para identificar a combinação mais apropriada entre uma instalação de dessalinização e um parque de energia renovável



Fonte: Adaptado de: The Design of a desalination Plant Powered by Renewable Energies (55)

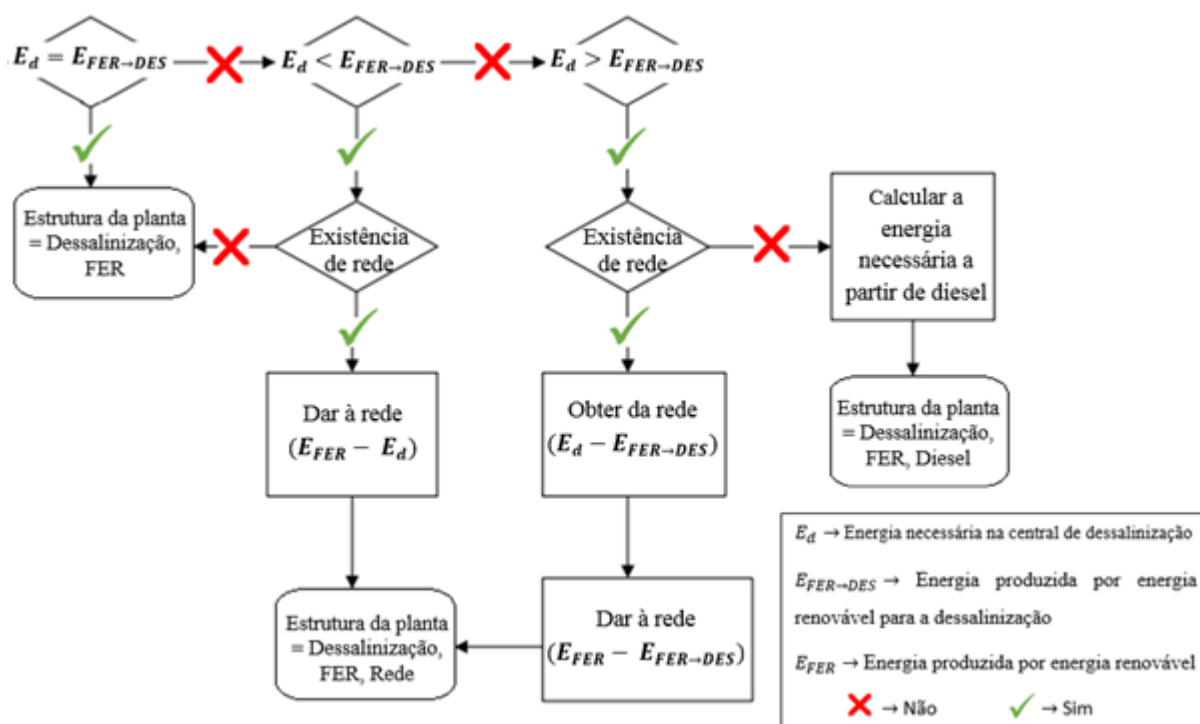
3.2.2 Estimativa do Fluxo de Energia

A capacidade da instalação é proporcional à produção de água. Após se saber as necessidades de água e calcular-se a capacidade de uma central de dessalinização, é necessário fazer um balanço energético.

Para uma unidade de dessalinização combinada com FER é necessário verificar-se se a energia produzida pelas fontes renováveis é suficiente para as necessidades de consumo energético do sistema de dessalinização. Na Figura 28 está representado um esquema que determina se é ou não necessário um sistema auxiliar para abastecimento de energia. (55)

Não será preciso um sistema energético auxiliar se as exigências energéticas por parte da unidade de dessalinização forem preenchidas pela energia fornecida pela FER. Caso isso não aconteça a energia em falta deve ser preenchida através de fontes de energia auxiliar como a rede elétrica ou no caso de um sistema autónomo um gerador a *diesel*. (55) Em situações em que há excedente energético, a energia pode ser vendida à rede elétrica, mas neste caso o sistema terá de estar ligado à rede, ou pode ser armazenada.

Figura 28 - Esquema para identificar se é necessário um sistema energético auxiliar



Fonte: Adaptado de: The Design of a desalination Plant Powered by Renewable Energies (55)

3.2.3 Avaliação do custo de água / Sistema de Energia

Para que seja feita uma análise económica no setor da dessalinização é necessário ter em conta diversos parâmetros técnicos e económicos: capital, energia, capacidade da instalação, produtos químicos, tipo de processo, água de alimentação, disponibilidade energética, pré-tratamento, eliminação de saloura, entre outros.

Os custos relativos ao abastecimento de água dessalinizada têm em conta os custos de capital e os custos de operação e manutenção. Todavia para melhorar a eficiência e sustentabilidade da gestão dos recursos hídricos deve-se considerar custos ambientais e de exploração dos recursos através de decisores políticos e intervenientes do setor da água. (56)

Para se fazer uma estimativa do preço de venda de água de um sistema de Energia Renovável em combinação com um sistema de dessalinização é necessário fazer previamente uma avaliação financeira do investimento proposto, durante as várias etapas, garantindo a rentabilidade do investimento no processo energético. Deve-se analisar e estimar o investimento, incluindo custos de operação e manutenção; deve-se ter em conta parâmetros de financiamento do investimento como taxa de desconto, tempo de vida, período de construção subsídios e empréstimos; o custo global de água

atual; definir o índice de lucratividade necessário por unidade de investimento inicial; e estimar o preço de venda de água com base no índice de lucratividade e o custo total descontado. (55)

Com o preço da água de consumo estimado a partir de energias renováveis é possível verificar se o investimento proposto é competitivo com os métodos convencionais com fim a suprir as necessidades de água.

3.3 Análise económica da dessalinização

As melhorias apresentadas nas tecnologias e no desempenho dos processos de dessalinização, assim como o aumento da capacidade das centrais, a utilização de sistemas híbridos, entre outros fatores, têm contribuído para a redução de custos e de consumo energético inerente ao processo de dessalinização. Todavia, os custos de operação variam com o processo e a tecnologia utilizada, assim como variam com a localização geográfica, não sendo confiável comparar custos de operação entre locais que não partilham as mesmas características, mesmo que as instalações sejam similares. Incentivos locais e/ou subsídios também podem contribuir para a diferença de custos entre regiões e instalações. (56)

As condições do local onde será instalada a central de dessalinização são importantes e influenciarão o custo da água que será dessalinizada, porém existem outros fatores que levam a uma heterogeneidade do preço. A disponibilidade, a quantidade, a qualidade e a proximidade com os utilizadores finais do recurso hídrico, os custos ambientais e de energia e os investimentos relativos à manutenção da rede e também já falados anteriormente, da tecnologia de dessalinização e a capacidade da central, são alguns desses fatores que serão abordados mais a frente. (56)

3.3.1 Parametros que influenciam o custo da água dessalinizada

O custo de investimento de diferentes tecnologias de dessalinização varia muito entre as tecnologias. Para capacidades de centrais semelhantes, os processos térmicos exigem maiores gastos e usam materiais e equipamentos mais caros em comparação com processos de RO. Os processos térmicos consomem maiores quantidades de energia específica, exigem energia elétrica e térmica, enquanto RO necessita apenas de eletricidade. Os processos térmicos também necessitam de mais produtos químicos, que são necessários para controlar a deposição, corrosão e espuma, que ocorrem durante o processo de dessalinização. Todavia, o destilado térmico é de maior qualidade comparativamente ao produto de RO, e não necessita de um extenso pré-tratamento.

A capacidade da instalação também é uma questão importante, porque por norma quanto maior for a capacidade da instalação, menor será o custo total de água e o custo de investimento por metro cúbico de produto. Mas questões políticas ou ambientais podem ser uma limitação para a implementação destes projetos maiores.

A localização geográfica assim como as características específicas do local terão de ser avaliadas e levadas em conta de forma a evitar custos adicionais, de transferência de água ou de funcionamento em condições menos apropriadas.

A fonte de alimentação do sistema também tem de ser considerada, para um melhor funcionamento do sistema e por isso uma redução de custos. A qualidade da água de alimentação do

processo de dessalinização, a temperatura, a estrutura de admissão e a qualidade da água final exigida no pós-tratamento têm de ser considerados. E por isso a localização, como já foi dito, é muito importante, deve ser seleccionada cuidadosamente pensando também na qualidade da água de alimentação. Como exemplo, temos o caso de RO que se necessitar de um pré-tratamento mais avançado para evitar o entupimento biológico que reduz a expectativa de vida da membrana e aumenta o custo de operação e manutenção e por vezes a suspensão temporária do seu funcionamento.

A forma como é feita a descarga necessita de obdecer a certos regulamentos ambientais, que vão se tornando mais exigentes, obrigando designers e construtores de plantas a desenvolver continuamente métodos avançados de descarga de concentrado. As novas normas requerem diluição do concentrado em uma zona de mistura, a redução da temperatura de salmoura por água de arrefecimento, e remoção dos produtos químicos antes de despejar o concentrado para o mar.

A água dessalinizada necessita de um pós-tratamento, onde há o reajustamento do pH e da dureza da água, tornando-se aceitável para utilização potável, e é introduzida no sistema de distribuição de água. Esta também poderá ser armazenada num local de água para o consumidor. O tipo de armazenamento depende da fiabilidade não só da infra-estrutura da estação de tratamento e da fonte de energia elétrica, como pela necessidade de armazenamento de água produzida por períodos de emergência. A capacidade de armazenamento pode variar entre horas até 5 dias de capacidade da instalação para o local.

O preço da energia está incluído no acordo de contrato para o período de serviço como parte do custo total de água. Muitos contratos contêm um ajustamento da previsão de custo de energia para cobrir variações, principalmente aumentos, nos custos de energia elétrica. Portanto, a minimização ou a redução no consumo de energia da instalação tem um grande impacto na redução do custo de água da unidade.

Materiais, equipamentos, produtos químicos e tudo o que é necessário para o funcionamento da instalação requerem custos de operação e manutenção. Assim como a substituição das membranas, a substituição de equipamentos, como bombas e tubos coletores, os custos de mão-de-obra qualificada e requisitos de formação.

A disponibilidade de pessoal qualificado resulta em maior capacidade de produção com menos desligamento. No entanto, em regiões onde a mão-de-obra qualificada é insuficiente ou inexistente, os custos operacionais podem ser maiores, porque a importação de trabalho qualificado leva ao aumento dos salários dos trabalhadores, ou pelas ineficiências da instalação causadas pelo seu mau funcionamento.

3.3.2 Evolução e Avaliação do custo de água dessalinizada

Para que haja uma avaliação do custo do fornecimento da água dessalinizada deve-se distinguir entre o custo real do tratamento da água por uma tecnologia de dessalinização e o custo real do fornecimento de água para o consumo. Como tal, o custo de entrega de água dessalinizada para os consumidores inclui também custos administrativos, de transporte, lucro do fornecedor. A análise feita é referente à avaliação dos custos do tratamento no processo de dessalinização.

Os governos têm sido uma peça importante na mobilização de fundos para projetos no setor da dessalinização. Porém, a quantidade dos investimentos previstos tem levado os governos a convencer o sector privado, no que diz respeito ao seu papel a desempenhar neste desenvolvimento, beneficiando-se dos avanços do sector privado em tecnologia e gestão. Consequentemente tem resultado em modelos de transação público-privadas que têm sido bem-sucedidas e em contratos sem propriedade inicial do governo, mas com garantias contratuais.

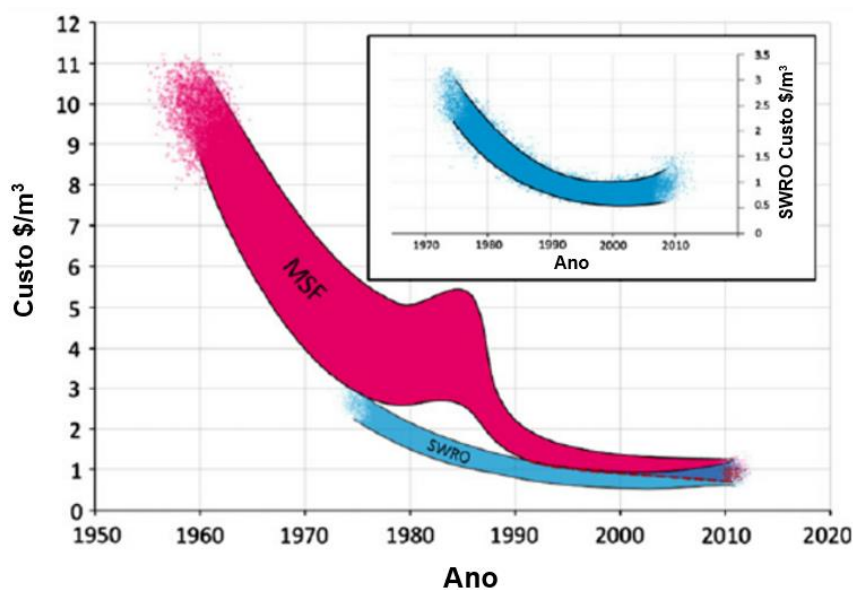
Os governos compram a água tratada das empresas a um preço fixo e vendem-na à população a um preço subsidiado. Em alguns casos, existem parcerias com as indústrias locais para obtenção de água que pode ser parcialmente subsidiado pela indústria, e não pelo governo ou um organismo internacional. Se existem parâmetros conhecidos que permitem estimar e determinar de forma razoável o custo total de água, como a salinidade, a capacidade da central de dessalinização, a tecnologia utilizada, o custo de energia e os requisitos regulamentares, existem outros parâmetros específicos, incluindo subsídios, riscos financeiros e políticos, que afetam o preço, e levam a variações consideráveis observadas na licitação do projeto. (18)

Devido aos avanços tecnológicos, os custos operacionais na produção de água dessalinizada têm diminuído nas últimas décadas, como está representado no Gráfico 14. Embora ainda seja uma opção de abastecimento mais cara comparando com os recursos naturais, a dessalinização poder-se-á tornar em breve uma alternativa competitiva. (56)

A tendência dos custos para a água a partir de fontes convencionais é aumentar ao contrário do que acontece com o custo de água dessalinizada que tende a diminuir com os melhoramentos da tecnologia. (18)

Os custos de capital, de operação e manutenção e de energia são os principais agentes no custo da água dessalinizada. A intensa redução dos custos nos diferentes processos de dessalinização verificados no Gráfico 14 é devida à evolução da tecnologia, ao aumento da capacidade das centrais, à diminuição do custo das taxas de juro e de energia, a intensa competição entre fornecedores de equipamentos e melhorias na gestão de desempenho empresarial. Os custos no início da década de 60 era para MSF entre 7 e 9 US \$/m³ e para RO entre 3 e 5 US \$/m³, em 2010 este custo era inferior a 1 US \$/m³ para os dois casos. (18)

Gráfico 14 - Evolução do custo de água dessalinizada



Fonte: Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability (57)

Para que haja um fornecimento de água adequado é necessário saber as necessidades de uma região. Os responsáveis políticos devem fazer uma gestão adequada da procura e do abastecimento de água, por isso as questões políticas associadas à procura da água têm uma grande importância.

A garantia de abastecimento de água, principalmente em regiões com escassez deste recurso, tem custos relativamente elevados. Porém os benefícios adquiridos com este investimento permitirão uma maior disponibilidade do recurso, e por isso uma diminuição da dependência de transferência de água proveniente de locais distantes, um controle direto sobre o volume do recurso hídrico disponível, maior proteção no serviço de entrega ficando menos dependente de fatores externos como desastres naturais e maior flexibilidade no uso de fontes de água.

A natureza da água que alimenta o processo de dessalinização tem relação no custo da dessalinização. A quantidade de sais a serem removidos da água interfere também na quantidade de energia necessária, ou seja, quanto maior a quantidade de sais a serem removidos mais caro se torna o processo, uma vez que é necessária mais energia. O custo de dessalinização da água do mar é 3 a 5 vezes superior ao custo da dessalinização da água salobra. (18)

A capacidade da central é outro aspeto que tem impacto no custo da dessalinização, instalações de maior porte, em geral são mais económicas. Na Tabela 3 está sintetizado o custo típico de dessalinização de acordo com a natureza da água de alimentação e a capacidade da central. Pode observar-se que a água salobra é economicamente mais vantajosa comparativamente à água do mar. Para centrais de grande escala, o custo da água salobra situa-se entre 0,21 e 0,43 €/m³, sendo

economicamente mais viável que a dessalinização da água do mar nas mesmas condições, visto que o custo varia neste caso entre 0,40 e 0,80 €/m³. Para centrais com menores capacidades de dessalinização, os custos aumentam tanto para a água salobra, com o custo entre 0,63 e 1,06 €/m³, como para a água do mar, aumentando para valores entre 1,78 e 9,00 €/m³. Estes valores podem ser superiores se as condições não forem as ideais. (18)

Tabela 3 - Custo da água dessalinizada de acordo com a fonte de água e a capacidade da instalação

Natureza da água de alimentação	Capacidade de produção (m ³ /dia)	Custo (€/m ³)
Água salobra	< 1.000	0,63 – 1,06
	5.000 – 60.000	0,21 – 0,43
Água do mar	< 1000	1,78 – 9,00
	1.000 – 5.000	0,56 – 3,15
	12.000 – 60.000	0,35 – 1,30
	> 60.000	0,40 – 0,80

Fonte: Adaptado de The economics of desalination for various uses (18)

A energia necessária para ocorrer a separação dos sais presentes na água que irá alimentar o sistema, pode ser proveniente de fontes convencionais de energia, que ainda representa a maneira mais económica para satisfazer as necessidades energéticas das instalações de dessalinização. Porém as FER conectadas aos sistemas de dessalinização são uma opção viável principalmente em locais remotos onde a água potável e infraestruturas convencionais são inexistentes. Ao longo dos últimos anos, foram instaladas por todo o mundo com êxito, em muitos casos, sistemas de energia renovável, que operam com energia solar, eólica ou energia geotérmica para produção de água doce em centrais de dessalinização.

Na Tabela 4 é feita uma comparação dos custos de acordo com a fonte de energia utilizada. Embora as FER sejam mais caras do que as fontes convencionais, o custo é equilibrado pelos seus benefícios ambientais. O custo de dessalinização utilizando fontes de energia convencional varia entre 0,21 e 2,70 €/m³ dependendo da qualidade da água de alimentação (salobra ou água do mar), o custo da dessalinização utilizando FER varia entre 1,00 e 10,32 €/m³, dependendo não só da qualidade da água de alimentação como do tipo de energia renovável utilizada. Espera-se que no futuro se tornem uma alternativa competitiva com as centrais de energia convencional, visto que os preços dos combustíveis continuam a subir e a sua aplicação está em contante avanço e expansão. (18)

Tabela 4 - Custo de água dessalinizada de acordo com a fonte de energia

Natureza da água de alimentação	Fonte de energia	Custo (€/m ³)
Água salobra	Convencional	0,21 – 1,06
	Fotovoltaica	4,50 – 10,32
	Geotérmica	2,00
Água do mar	Convencional	0,35 – 2,70
	Eólica	1,00 – 5,00
	Fotovoltaica	3,14 – 9,00
	Solar	3,50 – 8,00

Fonte: Adaptado de The economics of desalination for various uses (18)

Ao comparar-se os tipos de tecnologia de dessalinização mais utilizados, MSF e RO, os sistemas de MSF são mais caros, mas na maioria dos casos têm capacidade de produção superior a RO. MSF é utilizado principalmente em países produtores de petróleo onde a disponibilidade de combustível não é um problema. Os processos de dessalinização térmica correspondem a 90 % da produção total de água dessalinizada nos países da região do Golfo Pérsico. (18)

O processo de dessalinização RO tem vindo a ganhar terreno nos últimos anos, visto 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.

Na Tabela 5 estão apresentados os custos da água dessalinizada relacionando a capacidade da instalação com o método de dessalinização. O custo de dessalinização da água do mar varia entre 0,42 e 1,40 €/m³ para o processo de MSF, o custo para RO varia entre 0,38 e 1,38 €/m³ para centrais de médio porte (produzindo 1.000 – 60.000 m³/dia) e para com maiores capacidades de produção (produzindo 100.000 – 320.000 m³/dia) entre 0,36 e 0,53 €/m³. Contudo deve-se ter em consideração que as centrais de MSF são geralmente maiores que as centrais de RO e o baixo custo é favorecido por uma economia de escala. Para água salobra, a dessalinização por processos de RO é uma melhor solução, sendo que os custos variam entre 0,21 e 0,43 €/m³.

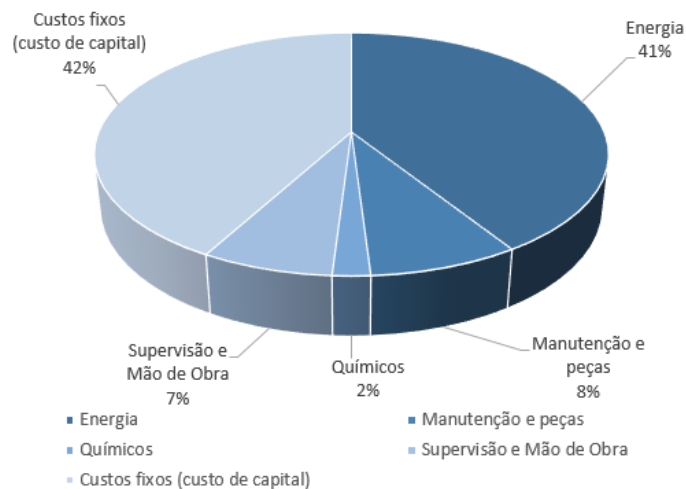
Tabela 5 - Custo de produção de água dessalinizada comparando os processos RO e MSF

Método de dessalinização	Natureza da água de alimentação	Capacidade de produção (m ³ /dia)	Custo (€/m ³)
MSF	Água do mar	23.000 – 528.000	0,42 – 1,40
		< 20	4,50 – 10,32
		20 – 1.200	0,62 – 1,06
RO	Água salobra	40.000 – 46.000	0,21 – 0,43
		< 100	1,20 – 15,00
	Água do mar	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

Fonte: Adaptado de The economics of desalination for various uses (18)

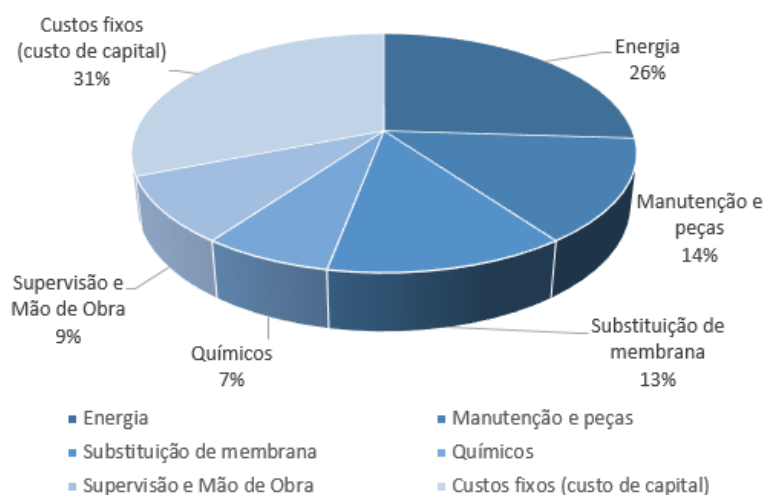
No Gráfico 15 e no Gráfico 16 é possível comparar os custos desagregados de duas instalações com capacidades de produção semelhantes. O Gráfico 15 é relativo a uma instalação de dessalinização MSF e verifica-se de imediato que o investimento inicial de capital e o custo energético representa mais de quatro quintos do custo total do processo. Estas duas combinações para o custo são semelhantes, a energia representa 41% e o custo de capital representa 42% do custo total. O Gráfico 16 diz respeito a uma instalação de dessalinização RO: neste caso o custo da energia para este processo representa 26% do custo total, e o custo de capital é de 31%, valores muito diferentes aos que apresentam o processo térmico. A percentagem de custo de capital para o processo térmico é superior, reflexo do custo de uma instalação de dessalinização térmica que excede o das instalações de membrana. (58)

Gráfico 15 - Percentagem dos custos inerentes a uma central de dessalinização MSF



Fonte: Adaptado de Review of the Current State of Desalination (58)

Gráfico 16 - Percentagem dos custos inerentes a uma central de dessalinização RO



Fonte: Adaptado de Review of the Current State of Desalination (58)

Por outro lado, os custos relativos à operação de uma central de dessalinização tendem a ser mais elevados em processos de membrana. A complexidade e as tarefas de manutenção em processos de membrana fazem com que os custos de operação sejam por isso mais elevados. Os produtos químicos, a manutenção e os custos de mão-de-obra têm uma fração de custo maior nos processos de RO (43%), relativamente ao que se verifica numa instalação e MSF (17%). A substituição de membrana é ausente nos processos térmicos o que acresce ao custo de manutenção em processos de dessalinização de RO. (58)

A diminuição dos custos de manutenção juntamente com os baixos custos de capital necessário para instalações de RO tem levado a um rápido crescimento desta tecnologia. (58)

4. Conclusões

Ao longo dos anos, a necessidade de água aumenta e por vezes o problema não está no acesso a este recurso, mas sim na sua qualidade. É também importante salientar que o acesso a água potável é fundamental para o desenvolvimento social e económico de um país.

A dessalinização permite que regiões com acesso a grandes quantidades de água imprópria para consumo, principalmente zonas costeiras, possam usufruir das suas condições geográficas privilegiadas. O tratamento da água através da dessalinização permite o acesso em abundância a água própria para consumo e permite um crescimento económico e social da região.

As tecnologias de dessalinização mais utilizadas são atualmente a RO seguida de MSF. Os países da região do Médio Oriente têm grandes quantidades de reservatórios de petróleo, como é o caso da Arábia Saudita que é o maior produtor de petróleo, e existem grandes centrais térmicas com capacidades elevadas e por isso a percentagem de dessalinização efetuada nestes locais recorrendo à tecnologia MSF é ainda muito elevada.

Contudo, para o projeto de uma central de dessalinização deve-se avaliar vários fatores, não existindo um processo melhor que todos os outros em qualquer situação. A melhor opção da tecnologia de dessalinização e do recurso energético vai depender sempre das condições e das características do local em que se pretende instalar a central de dessalinização. Para que haja uma seleção mais adequada deve-se ter em conta fatores como: a salinidade e a qualidade da água de alimentação; a capacidade necessária para a central de dessalinização; as condições e a acessibilidade do local; o custo de energia, operação e de manutenção; e a disponibilidade de mão-de-obra qualificada.

As unidades de dessalinização alimentadas por sistemas de energia renováveis são especialmente adequadas para fornecer água e eletricidade em áreas remotas onde as infraestruturas de água e eletricidade atualmente não existem ou não funcionam de forma adequada.

As questões ambientais relativas à gestão do concentrado, produzido durante o processo de dessalinização, é outro problema inerente à dessalinização que necessita de maior investimento na área de investigação. A técnica ZLD é a mais vantajosa, sendo no entanto ainda muito cara e por isso a melhor alternativa em termos económicos e também a mais utilizada é a deposição do concentrado em águas superficiais.

Referências

1. **Brito, Luiza et al.** Disponibilidade de água e a gestão recursos hídricos. p. 17. Acedido a 23/06/2014, Disponível em:
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:HyuqzMAAbVsJ:ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/CPATSA/36533/1/OPB1514.pdf+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt>.
2. **FAOWATER.** Water at a glance. *The relationship between water, agriculture, food security and poverty*. Acedido a: 23/06/2014, Disponível em:
<http://www.fao.org/nr/water/art/2007/flash/glance/gallery1.html>.
3. **FAO.** Recursos naturais. *O desafio da escassez e mudança climática*. Acedido a: 16/06/2014, Disponível em:
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:H15NRtDqENcJ:www.fao.org/docrep/012/i0765pt/i0765pt13.pdf+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt>.
4. **UNESCO.** World Water. *Agua para todos Agua para la vida*. 2003, p. 9. Acedido a: 23/06/2014, Disponível em:
http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:yRox_xZ6EPEJ:www.un.org/esa/sustdev/sdissues/water/WWDR-spanish-129556s.pdf+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt.
5. **Lopes, Paula Duarte.** Água no séc. XXI: desafios e oportunidades. N. 1 Junho/Dezembro de 2009, ISSN 1647-6336. Acedido a 16/06/2014, Disponível em:
<http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:dCWZrWW1sE0J:europa-direct-aveiro.aeva.eu/debatereuropa/images/opportunities.pdf+&cd=1&hl=pt-PT&ct=clnk&gl=pt>.
6. **ODM.** <http://www.cplp.org/id-223.aspx>. [Online] Acedido a: 08/07/2014.
7. **Organization, UNICEF and World Health.** *Progress on Drinking Water and Sanitation*. 2012. Acedido a: 11/06/2014, Disponível em:
http://www.who.int/water_sanitation_health/publications/2012/jmp_report/en/. ISBN: 972-924-1503297.
8. **GEMS, UNEP.** *Water Quality for Ecosystem and Human Health*. 2ª. 2008. ISBN: 92-95039-51-7.
9. **Merten, Gustavo H. et Jean P. Minella.** *Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura*. Porto Alegre : s.n., 2002. Vol. 3. 4.
10. **GEMS, UNEP.** *Global Drinking Water Quality Index Development and Sensitivity Analysis*. 2007.
11. **UNESCO.** *The United Nations World Water Development Report 4: Managing Water under Uncertainty and Risk*. 2012. ISBN: 978-92-3-104235-5.

12. **Paz, Pedro da Silva et al.** *Recursos Hídricos, Agricultura Irrigada e Meio Ambiente*. Campina Grande : s.n. Vol. 4. ISSN: 1807-1929.
13. **Molden, David et al.** *Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in Agriculture*. 2007. ISBN: 978-1-84407-396-2.
14. **Cheatle, Marion et al.** *Global Environment Outlook 3*. 2002. ISBN: 92-807-2087-2.
15. **Rekacewicz, Philippe et al.** *Vital Water Graphics - An Overview of the State of the World's Fresh and Marine Waters*. 2008. ISBN: 92-807-2236-0.
16. **Leclerc, Guy et al.** *Water: challenges, drivers and solutions*. s.l. : PwC, 2012.
17. **Zander, Amy K. et al.** *Desalination A National Perspective*. s.l. : National Academy of Sciences, 2008. ISBN: 978-0-309-11924-5.
18. **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, pp. 329-346.
19. **Clayton, R.** *Desalination for Water Supply FR/R0013*. U.K. : Foundation for Water Research, 2006. Review of Current Knowledge.
20. **Levy, João de Quinhones.** *Novas Fontes de abastecimento de água: Reutilização e dessalinização*. Lisboa : s.n., 2008. ISBN: 978-989-96061-0-4.
21. **Water Authority, San Diego Country.** *Seawater Desalination: Camp Pendleton Seawater Desalination Project Option*. Outubro de 2014.
22. **Li, Chennan et al.** Solar assisted seawater desalination: A review. s.l. : Elsevier, 2013, Vol. 19, pp. 136–163.
23. **Shatat, Mahmoud et al.** Water desalination technologies utilizing conventional and renewable energy sources. UK : s.n., 2012, pp. 1-19.
24. **Mechell, Justin K. and Bruce Lesikarar.** *Desalination Methods for Producing Drinking Water*. s.l. : Texas A&M AgriLife Extension Service.
25. **Al-Karaghoul, Ali.** Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. s.l. : ELSEVIER, 2013, Vol. 24, pp. 343–356.
26. **Franz, Trieb et al.** *Advanced CSP Teaching Materials. Chapter 10 - Secondary Applications* .
27. **Buros, O.K.** *The ABCs of Desalting*. 2^a . s.l. : IDA.
28. **Khawaji, Akili D. et al.** *Advances in seawater desalination technologies*. s.l. : Elsevier B.V, 2008, Vol. 221, pp. 47-69.
29. **Al-Karaghoul, Ali A. et al.** *Renewable Energy Opportunities in Water Desalination*. s.l. : National Renewable Energy Laboratory.

30. **Bourouni, Karim.** Optimization of Renewable Energy Systems: The Case of Desalination. [ed.] Dr. Arzu Şencan. *Modeling and Optimization of Renewable Energy Systems*. 2012.
31. **Souza, Luiz Faustino.** Dessalinização como fonte alternativa de água potável. 2006, Vol. 1.
32. **Alves, Célia.** *Tratamento de águas de abastecimento*. [ed.] Publindústria. 3ª. 2010. ISBN: 9789728953461.
33. *A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems.* **Eltawil, Mohamed A. et al.** [ed.] ELSEVIER. 2009, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, pp. 2245–2262.
34. **Shatat, Mahmoud et al.** Opportunities for solar water desalination worldwide: Review. s.l. : Elsevier B.V, 2013.
35. **Kalogirou, Soteris A.** Seawater desalination using renewable energy sources. *Progress in Energy and Combustion Science*. s.l. : ELSEVIER, 2005, Vol. 31, pp. 242–281.
36. **Quteishat, Koussai et al.** *Promotion of Solar Desalination in the MENA Region Muscat*. Oman : Middle East Desalination Research Center.
37. **Fisher, U. et al.** Renewable Energy Systems and Desalination. *Integration of solar Pond with Water Desalination*. s.l. : Encyclopedia of Desalination and Water Resources (DESWARE) , Vol. II.
38. **Ghaffour, Noreddine et al.** Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. 2014, Vol. 356, pp. 94 –114.
39. **Eltawil, Mohamed A. et al.** Renewable Energy Powered Desalination Systems: Technologies and Economics-State of the Art. s.l. : Twelfth International Water Technology Conference, 2008.
40. **Júnior, Ângelo Stano.** *ENERGIAS RENOVÁVEIS*. 1ª edição. s.l. : CERPCH, 2007. ISBN: 978 - 85 - 60858 - 01 - 9.
41. **The World Bank.** *Renewable energy desalination : an emerging solution to close the Middle East and North*. 2012. ISBN: 978-0-8213-7980-6.
42. **Isaka, Mirei.** Water Desalination Using Renewable Energy Technology Brief. s.l. : IEA-ETSAP and IRENA, Março de 2012.
43. **Richards, Bryce S. et al.** Renewable Energy Powered Water Treatment Systems. *Sustainability Science and Engineering*. s.l. : ELSEVIER, 2010, Vol. 2, pp. 353-373.
44. **Verdier.** *MENA Regional Water Outlook Part II Desalination Using Renewable Energy*. s.l. : FICHTNER, 2011.

45. **Younos, Tamim.** Environmental Issues of Desalination. [ed.] Universities Council on Water Resources. 2005, pp. 11-18.
46. **Miller, Sydney et al.** Energy and environmental issues in desalination. s.l. : Elsevier B.V., 2014.
47. **UNEP/MAP.** *Sea Water Desalination in the Mediterranean: Assessment and Guidelines.* s.l. : MAP Technical Reports Series No. 139, 2003. ISBN : 92 807 2379 0.
48. **Cooley, Heather et al.** *Key Issues in Seawater Desalination in California: Marine Impacts.* s.l. : Nancy Ross and Paula Luu, 2013.
49. **Glade, Heike.** Thermal Processes for Water Desalination. s.l. : University of Bremen, 2013.
50. **Kucera, Jane.** Desalination Water from Water. s.l. : Scrivener Publishing LLC, 2014, pp. 14 - 19.
51. **Isaka, Mirei et al.** *Water Desalination using Renewable Energy : Technology Brief.* s.l. : IEA-ETSAP and IRENA, 2012.
52. **Bahlas, Fawaz.** Business Opportunities in Water and Wastewater Industry in Saudi Arabia- Public sector Perspective. [ed.] National Water Company. 2009.
53. **Novak, Sara.** 5 countries with cutting-edge water technology. [Online] 18 de Junho de 2014. [Citação: 12 de Setembro de 2016.] <http://www.fromthegrapevine.com/innovation/5-countries-cutting-edge-water-technology>).
54. **El Khashab, Hisham et. al.** Comparison between hybrid renewable energy systems in Saudi Arabia. s.l. : Elsevier B.V, 2015, Vol. 2, pp. 111-119.
55. **Missirlis, K. et al.** *The Design of a Desalination Plant Powered by Renewable Energies.* s.l. : National Technical University of Athens, 2010.
56. **The World Bank.** *Renewable Energy Desalination : An Emerging Solution to Close the Water Gap in the Middle East and North Africa.* s.l. : World Bank Publications, 2012. ISBN: 978-0-8213-8838-9.
57. **Missimer, Thomas M. et al.** Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. s.l. : Elsevier, 2013, Vol. 309, pp. 197-207.
58. **Ebensperger, Ulrich et al.** *Review of the Current State of Desalination.* Georgia Water Planning & Policy Center. 2005.