



INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO
Universidade Técnica de Lisboa

Dessalinização como alternativa sustentável: análise multi-critério de apoio à decisão

Marisa Barreto Fernandes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia do Ambiente

Júri

Presidente: Prof. Dr. Eng. José Saldanha Matos

Orientador: Prof. Dr. Eng. António Gonçalves Henriques

Co-orientador: Dra. Eng.^a Maria do Céu de Sousa Teixeira Almeida

Vogal: Prof. Dr. Eng. Eduardo Ribeiro de Sousa

Setembro de 2007

Resumo

Este trabalho teve como principal objectivo avaliar a aplicabilidade das tecnologias de dessalinização de águas, identificando as circunstâncias em que se considera propícia a instalação de uma central. Assim, numa primeira fase, foi efectuada uma extensa revisão bibliográfica após o que foi aplicada uma análise SWOT (*Strenghts, Weaknesses, Opportunities, Threats*), como forma de sistematização da informação obtida. Seguidamente, no caso de estudo, aplicou-se uma metodologia de análise multi-critério de apoio à decisão, para sustentar a selecção da tecnologia de dessalinização mais sustentável para o Algarve.

Para a análise de decisão recorreu-se à metodologia MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*). Dispondo dos resultados obtidos, foram feitas análises de sensibilidade e robustez, sendo que os resultados do modelo podem ser considerados, globalmente, robustos. A ordenação final das alternativas, em termos de benefícios não-económicos, seguida de uma análise custo-benefício, permitiu averiguar os aspectos mais relevantes para um decisor representante de uma entidade responsável pelo abastecimento de água multimunicipal, assim como retirar conclusões e fazer recomendações para estudos futuros. O resultado final indica que a *MED solar* constitui a alternativa com mais benefícios não-económicos. Na análise custo-benefício, o decisor escolheu a alternativa relativa às *tecnologias convencionais* devido ao elevado custo da *MED solar*. A dessalinização apresenta potencial para reforçar o abastecimento de água do Algarve, não podendo ser encarada como única solução. A alternativa *MED solar* deve ser a alternativa escolhida para o Algarve a médio prazo, uma vez que os custos das energias renováveis ainda não são competitivos. No final, foram ainda sugeridas medidas de minimização de impacto recomendáveis para esta tecnologia de dessalinização escolhida para a região algarvia.

Palavras-chave

Dessalinização; Tecnologia sustentável; Caso de estudo: análise de decisão multi-critério; MACBETH

Abstract

The following work had the main objective of evaluating the applicability of water desalination technologies, identifying the adequate circumstances to install a plant. Therefore, in an initial stage, an extensive bibliographic revision was composed. Afterwards, a SWOT (*Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats*) analysis was applied, in order to systematise all the obtained information. Subsequently, a methodology of multiple criteria decision analysis was employed in a case-study to uphold the selection of the most sustainable desalination technology for the Portuguese region of Algarve.

For this decision analysis it was chosen the MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) approach. The obtained results allowed a sensitivity and robustness analysis, and the model results can be considered overall robust. The final ordination of the alternatives, in terms of non-economical benefits, and the *cost-benefit analysis* enables to resume the most important aspects for a decision maker that represents a company responsible for supplying potable water. The final results indicate that *Solar MED* is more scored, in terms of non-economic benefits. In cost-benefit analysis, the decision maker has chosen the *Conventional technologies* due to high cost of *Solar MED*. Desalination of seawater offers a potential for water supply enhancement in the Algarve and cannot be seen has a unique solution. *Solar MED* should be the option for this region in a medium term, because costs of renewable energies aren't yet competitive. As a result of the work in hand, conclusions emerged and recommendations were presented for future research. There were also suggested measures of environmental mitigation impacts for this desalination plant selected for the region of Algarve.

Keywords

Desalination; Sustainable technology; Case-study: multiple criteria decision analysis; MACBETH

Agradecimentos

Agradeço ao Prof. Dr. Eng. António Gonçalves Henriques (Director-Geral da Agência Portuguesa do Ambiente e Professor do Instituto Superior Técnico), a disponibilidade e prontidão que demonstrou em ser meu orientador, acolhendo o tema que escolhi e inserindo-me como estagiária no Núcleo de Engenharia Sanitária, no Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Também agradeço a sua contribuição, a nível técnico e científico, para a elaboração da dissertação.

À Dra. Eng.^a Maria do Céu de Sousa Teixeira Almeida (Investigadora auxiliar do Laboratório Nacional de Engenharia Civil), por todo o auxílio prestado na elaboração da dissertação, a sua disponibilidade para me apoiar e a forma empenhada como contribuiu para o meu enriquecimento académico.

Ao Prof. João Lourenço (Professor do Instituto Superior Técnico), por me ter dado a oportunidade de assistir à cadeira MMAD (Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão) do Instituto Superior Técnico, enquanto cadeira extra ao curso, que considerei extramente enriquecedora. Assim como a sua disponibilidade para esclarecimentos ao longo da elaboração do modelo.

Ao Eng.^o Jaime de Melo Baptista (Presidente do Conselho Directivo do Instituto Regulador de Água e Resíduos) pela amabilidade em prestar esclarecimentos a nível regulamentar.

À Eng.^a Helena Lucas (Directora de operações da Águas do Algarve, S. A.) pela sua colaboração, enquanto decisor, desta análise de decisão. E à Eng.^a Fátima Carapuça (Responsável pelo sistema de gestão ambiental da Águas do Algarve, S. A.) pelo apoio prestado durante a reunião de aplicação do modelo.

Ao Eng. Pedro Horta (pertencente ao Departamento de energias renováveis do Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Informação) pelo apoio em esclarecer o projecto em que esteve envolvido, contribuindo para a elaboração do modelo.

À minha mãe, irmã e Tiago, pelo apoio que sempre me deram.

Índice

1. Introdução	1
1.1 Enquadramento temático	1
1.2 Motivações	1
1.3 Objectivos	2
1.4 Organização da dissertação	2
2. Dessalinização – definição e sua relevância na actualidade	3
3. Tecnologias de dessalinização	7
3.1 Fases da produção	7
3.2 Processos de dessalinização	8
3.2.1 Energia térmica	8
3.2.2 Energia mecânica	12
3.2.3 Energia eléctrica	18
3.2.4 Energia química	19
3.2.5 Síntese das tecnologias disponíveis	19
3.3 Critérios de selecção do processo de dessalinização	20
3.4 Qualidade da água produzida	22
4. Enquadramento regulamentar	23
5. Aspectos ambientais	25
5.1 Considerações gerais	25
5.2 Identificação de impactos ambientais	26
5.2.1 Impactos ambientais negativos da dessalinização da água do mar	26
5.2.2 Impactos ambientais positivos da dessalinização	29
5.3 Avaliação qualitativa de impactos ambientais	30
5.4 Medidas de mitigação de impactos	30
5.4.1 Tipos de medidas	30
5.4.2 Destino da salmoura	31
5.4.3 Descentralização da produção	32
5.4.4 Uso de energias renováveis na dessalinização	32
5.5 A sustentabilidade da dessalinização	33
5.5.1 Considerações gerais	33
5.5.2 Estudos de avaliação da sustentabilidade	33
5.5.3 Exemplo de solução sustentável	36
6. Aspectos económicos	39
6.1 Principais componentes de custo	39
6.2 Estimativas de custos	40
6.3 Custo da dessalinização em Espanha	41
7. Aspectos sociais	45

7.1	Enquadramento	45
7.2	Aceitabilidade social dos projectos de dessalinização.....	45
7.3	Percepção do público em relação à água dessalinizada vs água reutilizada	46
8.	Análise SWOT da dessalinização	49
9.	Caso de estudo: dessalinização sustentável na região algarvia	53
9.1	Condições para a implementação de uma central de dessalinização	53
9.2	O abastecimento de água na região algarvia – contexto de decisão	55
9.3	Introdução teórica à análise de decisão	58
9.3.1	Enquadramento	58
9.3.2	Estruturação.....	59
9.3.3	Metodologia MACBETH.....	60
9.3.4	Determinação de coeficientes de ponderação	61
9.3.5	Validação dos resultados	61
9.4	Definição do modelo multi-critério de apoio à decisão.....	62
9.4.1	Alternativas consideradas.....	62
9.4.2	Estruturação do modelo	63
9.4.3	Pontos de vista fundamentais (PVF)	64
9.4.4	Descritores dos PVF	65
9.5	Apresentação e discussão dos resultados.....	72
9.6	Análise de sensibilidade	80
9.7	Análise de robustez	85
10.	Conclusões e recomendações.....	87

Lista de Figuras

Figura 1 – Distribuição percentual, por países, da capacidade de produção de água dessalinizada (Torres, 1999).....	5
Figura 2 – Distribuição dos métodos de dessalinização por capacidade de água produzida no mundo (Medina, 2000)	8
Figura 3 – Central de destilação multi-efeito com evaporadores horizontais (Valero <i>et al.</i> , 2001)	9
Figura 4 – Central de destilação súbita multi-etapa por efeito flash (Valero <i>et al.</i> , 2001)	10
Figura 5 – Esquema típico de um termocompressor acoplado a uma central de CTV com HFF (<i>horizontal falling film</i>) (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	11
Figura 6 – Esquema de um colector solar para dessalinização (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	11
Figura 7 – Esquema de compressão mecânica de vapor com evaporador de tubos verticais (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	13
Figura 8 – Crescimento da osmose inversa de água do mar e declínio do custo unitário da água produzida (Campbell e Jones, 2005)	13
Figura 9 – Processo natural de osmose (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	14
Figura 10 – Processo de osmose inversa (Valero <i>et al.</i> , 2001)	14
Figura 11 – Esquema de uma central de osmose inversa com Turbina Pelton incorporada (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	14
Figura 12 – Corte de membranas em espiral (Almeida, 2006)	15
Figura 13 – Esquema do processo de electrodialise (Valero <i>et al.</i> , 2001)	19
Figura 14 – Distribuição típica dos custos da dessalinização de água do mar por osmose inversa (Semiat, 2000)	39
Figura 15 – Distribuição típica dos custos de uma central térmica de dessalinização de água do mar (Wangnick, 2002)	39
Figura 16 – Questões de saúde pública – comparação de percepções entre os dois tipos de águas (Dolnicar, 2006)	47
Figura 17 – Instalação de dessalinização Carboneras, em Almería. Com capacidade de produção de 120 000 m ³ /dia (Hidroprojecto, 2005)	54
Figura 18 – Média mensal da precipitação observada para um mês chuvoso e um mês seco, no período 1941/42 – 1990/91 (Santos <i>et al.</i> , 2002).....	55
Figura 19 – Matriz de julgamentos do M-MACBETH (Lourenço, 2006)	60
Figura 20 – Escala de valor sugerida pelo M-MACBETH (Lourenço, 2006)	61
Figura 21 – Árvore dos pontos de vista, criada no M-MACBETH.....	64
Figura 22 – Distribuição percentual do total de energia consumida na África do Sul, em 2004 (EIA, 2007).....	67
Figura 23 – Custos de produção de água (€/m ³ de água produzida) das cinco alternativas consideradas no modelo multi-critério de apoio à decisão	72

Figura 24 – Pontuações de referência do modelo	72
Figura 25 – Propriedades do PVF – Contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas	73
Figura 26 – Matriz de julgamentos do PVF – Contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas	73
Figura 27 – Função de valor do PVF – Contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas e ajustamento da pontuação do nível de impacto 0,91 kg CO ₂ /m ³ de água produzida.....	74
Figura 28 – Propriedades do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos	74
Figura 29 – Matriz de julgamentos do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos	74
Figura 30 – Propriedades do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar	75
Figura 31 – Matriz de julgamentos do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar.....	75
Figura 32 – Propriedades do PVF – Flexibilidade na produção	75
Figura 33 – Matriz de julgamentos do PVF – Flexibilidade na produção	75
Figura 34 – Propriedades do PVF – Descentralização da produção.....	76
Figura 35 – Matriz de julgamentos do PVF – Descentralização da produção.....	76
Figura 36 – Matriz de julgamentos de ponderação.....	77
Figura 37 – Esquema auxiliar das perguntas de aplicação do método de ponderação	77
Figura 38 – Ponderação dos PVF	77
Figura 39 – Referências de ponderação	78
Figura 40 – Tabela de performances	78
Figura 41 – Tabela de ordenações	78
Figura 42 – Tabela de pontuações	78
Figura 43 – Resultado da análise custo-benefício	79
Figura 44 – Alteração no peso do PVF – Contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas	80
Figura 45 – Alteração no peso do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos.....	81
Figura 46 – Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar	82
Figura 47 – Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar	82
Figura 48 – Ponderação se fosse alterado o peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar para 6%	83
Figura 49 – Ponderação se fosse alterado o peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar para 19,97%	83
Figura 50 – Alteração no peso do PVF – Flexibilidade na produção.....	84
Figura 51 – Alteração no peso do PVF – Descentralização da produção	84
Figura 52 – Análise de robustez: resultado predominante	86
Figura 53 – Análise de robustez: resultado para máxima variação da informação cardinal global	86

Lista de Quadros

Quadro 1 – Concentração de sal para diferentes tipos de água (OTV, 1999; Gleick, 1993) ..	3
Quadro 2 – Métodos de dessalinização existentes no mercado (Valero <i>et al.</i> , 2001).....	8
Quadro 3 – Vantagens e desvantagens da dessalinização de água do mar por osmose inversa (OAS, 2006).....	17
Quadro 4 – Comparação dos processos (Moya, 1998a)	20
Quadro 5 – Matriz de impactos do processo de osmose inversa	30
Quadro 6 – Estimativa da utilização mundial de métodos para a rejeição da salmoura (WHO, 2007)	31
Quadro 7 – Resumo dos valores dos indicadores de sustentabilidade para cada opção considerada (Afgan <i>et al.</i> , 1999)	34
Quadro 8 – Emissões atmosféricas associadas às tecnologias de dessalinização em ACV (Raluy <i>et al.</i> , 2004).....	35
Quadro 9 – Emissões atmosféricas em avaliação de ciclo de vida das tecnologias, em diferentes modelos de produção de electricidade (Raluy <i>et al.</i> , 2004)	36
Quadro 10 – Estimativa de custos para uma central MSF com capacidade de 100 000 m ³ /dia (Van der Mast e May, 1994).....	40
Quadro 11 – Estimativa de custos para uma central MED com capacidade de 100 000 m ³ /dia (Van der Mast e May, 1994).....	41
Quadro 12 – Estimativa de custos para uma central OI com capacidade de 100 000 m ³ /dia (Van der Mast e May, 1994).....	41
Quadro 13 – Custo do consumo energético por tecnologia (Valero <i>et al.</i> , 2001)	41
Quadro 14 – Resumo dos custos de dessalinizar em Espanha (Valero <i>et al.</i> , 2001)	42
Quadro 15 – Custo de produção, em €/m ³ , de quatro tecnologias, para quatro tipos de centrais (Moya, 1998b)	43
Quadro 16 – Síntese da análise SWOT	49
Quadro 17 – Balanço estimado entre oferta e procura de água no Algarve em ano médio (DO Ó e Monteiro, 2005)	55
Quadro 18 – Alternativas consideradas no modelo multi-critério de apoio à decisão	63
Quadro 19 – Pontos de vista fundamentais (PVF) de cada componente do modelo.....	64
Quadro 20 – Descritores dos pontos de vista fundamentais	66
Quadro 21 – Emissões de CO ₂ , em ACV, para cada uma das alternativas de produção de água	66
Quadro 22 – Níveis quantitativos de performance do PVF – contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas	68
Quadro 23 – Emissões de CO ₂ da ETA de Alcantarilha, da AdAlg, no ano de 2006 (cortesia da AdAlg)	68

Quadro 24 – Emissões de CO ₂ da Águas do Douro e Paiva, S. A., no ano de 2006 (AdDP, 2007)	
68	
Quadro 25 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos	
69	
Quadro 26 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar	
69	
Quadro 27 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Flexibilidade da produção.....	71
Quadro 28 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Descentralização da produção .	71

1. Introdução

1.1 Enquadramento temático

A disponibilidade de água em quantidade e qualidade suficiente constitui um factor de grande importância no desenvolvimento de qualquer região e a investigação, no que diz respeito a novas fontes de obtenção de água, deve ser uma realidade em todos os países que são passíveis de sofrer carências em água potável. A dessalinização de água do mar ou salobra enquadra-se num conjunto de alternativas de abastecimento de água possíveis. Esta alternativa tem-se destacado pelo seu rápido crescimento, enquanto processo de produção de água potável a partir de fontes sem limitações, como a água do mar em regiões costeiras do mundo, onde a falta de água é uma realidade. De facto, a captação de água por via subterrânea ou superficial já não constituem as únicas soluções para o abastecimento de água. Na realidade, novas tecnologias, que possibilitam reforçar este sistema, são hoje em dia cada vez mais estudadas em todo o mundo, com vista à sua implementação de forma eficiente e sustentável. Na verdade, seja a curto, a médio ou a longo prazo, adivinha-se a implementação da dessalinização em locais que sofram de fenómenos extremos, tais como a seca, e onde se prevê um agravamento da escassez de água no futuro, seja pelo agravamento das alterações climáticas, seja pela tendência de crescimento no consumo de água, motivado pelas actividades sociais e económicas como, por exemplo, o turismo ou os desportos de lazer, tal como o golfe.

1.2 Motivações

A dessalinização pode vir a tornar-se uma importante fonte para obtenção de água no mundo. A contaminação de águas superficiais e subterrâneas, aliada ao consumo crescente de água, promove a investigação cada vez mais aprofundada de novas alternativas de obtenção de água. Também as alterações climáticas, alvo de grande investigação, colocam cada vez mais regiões do globo perante o desafio de encontrar novas fontes de água para compensar a diminuição da disponibilidade de água. É, assim, de extrema importância estudar a dessalinização, enquanto uma verdadeira alternativa que pode vir a ser aplicável a uma região, desde que seja sustentável. Esta tecnologia deve ser alvo de uma análise devidamente fundamentada, incorporando os vários factores relevantes para a selecção, e de investigação, de forma a reduzir os actuais pontos fracos e enaltecer as suas vantagens. Sendo uma tecnologia que acarreta impactos, a nível ambiental, económico e social, há que identificar em que circunstância é que esta deve ser implementada, ou seja, a sua aplicabilidade. Embora numa primeira fase de selecção de uma tecnologia de dessalinização se possa recorrer a métodos do tipo SWOT - forças (*Strengths*), fraquezas (*Weaknesses*), oportunidades (*Opportunities*) e ameaças (*Threats*), pela inúmera quantidade de critérios que podem ser considerados, revela-se vantajoso recorrer a um modelo de análise multi-critério de apoio à decisão. O decisor pode, através da análise de decisão, que recorre a especialistas e a um facilitador, encontrar uma solução globalmente mais adequada. O desafio desta dissertação está em explorar a aplicação desta metodologia com o fim de seleccionar a solução mais sustentável a todos os níveis para um determinado caso de estudo.

1.3 Objectivos

Este trabalho tem como **principal objectivo** avaliar as condições favoráveis à aplicação da dessalinização como origem alternativa de água, tendo por base vários critérios de sustentabilidade. Para tal, tem-se como **objectivos específicos** efectuar uma compilação de informação, com base numa revisão bibliográfica, incidindo sobre aspectos tecnológicos, ambientais, económicos e sociais, aplicar a análise SWOT e implementar um método de análise multi-critério de apoio à decisão, recorrendo ao *software* M-MACBETH. Esta última análise será relativa à decisão de implementar uma tecnologia de dessalinização ao caso de estudo da região do Algarve.

1.4 Organização da dissertação

A dissertação apresenta-se dividida em 10 capítulos. O capítulo 1 apresenta o tema da dissertação, as suas principais motivações, objectivos e estrutura. No capítulo 2 descreve-se o estado-de-arte da dessalinização, sendo realçada a sua aplicação no mundo e no nosso país. No capítulo 3 apresentam-se as tecnologias de dessalinização disponíveis actualmente, sendo descritos os processos mais utilizados. No capítulo 4 efectua-se o enquadramento regulamentar, sendo destacados os obstáculos inerentes à aplicação da dessalinização por privados, assim como a principal legislação aplicável. Os aspectos ambientais são desenvolvidos no capítulo 5, sendo descritos os principais impactos ambientais, os métodos para avaliação qualitativa de impactos e propostas de mitigação de impactos, após o que se analisa a sustentabilidade da dessalinização. No (6 apresentam-se os aspectos económicos associados à dessalinização. No capítulo 7 são analisadas questões sociais, incluindo a aceitabilidade dos projectos e a aceitação pública. No capítulo 8 é apresentada a análise SWOT realizada à dessalinização de água. O capítulo 9 diz respeito ao caso de estudo, sendo descrito o contexto de decisão, assim como a metodologia que se pretende aplicar, ou seja, a análise de decisão multi-critério. Ainda neste capítulo é apresentada a estruturação do modelo realizada, os resultados obtidos e as análises de sensibilidade e robustez efectuadas. No capítulo 10 são apresentadas as conclusões e feitas as recomendações.

2. Dessalinização – definição e sua relevância na actualidade

A água potável constitui um bem indispensável à vida humana, seja para satisfazer as necessidades básicas, seja para as diferentes actividades económicas e sociais. O aumento dos consumos, com exigências de qualidade crescentes, torna-se cada vez mais significativo a partir da segunda metade do século XX (Semiat, 2000), sendo claro, actualmente, que a água potável não é um recurso totalmente renovável, pouco dispendioso e acessível a todos. Assim, em muitas regiões do mundo, existe urgência em adoptar soluções alternativas viáveis para a obtenção de água potável.

Na realidade, no que diz respeito aos recursos hídricos globais, no planeta, 97,5% dos recursos hídricos existentes são salinizados, e apenas 2,5 % da água total é potável. Desta parcela, 0,3% constitui água doce existente em lagos e rios, 29,9% diz respeito a água doce subterrânea, 68,9% corresponde a água doce presente em glaciares e neves permanentes e 0,9% inclui outras origens, como por exemplo a humidade do solo (Shiklomanov, 1999).

O processo de dessalinização de água surge como uma tecnologia que apresenta potencial de produção alternativa de água. No entanto, condicionantes várias levam a que não se adapte a todos os casos, sendo recomendável que sejam adoptadas, por exemplo, medidas de gestão e uso eficiente da água, ou origens alternativas, como seja a reutilização de águas residuais tratadas ou a utilização de água pluvial, em usos compatíveis.

A dessalinização é o processo segundo o qual se efectua a separação de sais de uma fase aquosa. Os recursos hídricos susceptíveis de dessalinização podem ter duas origens: água do mar ou água salobra. Esta última pode ser proveniente de estuários e de aquíferos costeiros, que podem ter, ou não, contacto directo com o mar.

A água salgada dos oceanos possui uma percentagem de sal acima dos 3% e as águas salobras contêm entre 0,05 e 3% de sal. De referir, que uma água é considerada doce se contiver menos de 0,05% de sal (UA, 2006).

As novas tecnologias permitem, hoje em dia, a obtenção de água doce, contendo sais inferiores a 500 ppm a partir de água do mar contendo sal na ordem dos 35 000 ppm (OTV, 1999; Gleick, 1993). No quadro 1 apresenta-se a concentração de sal para diferentes tipos de água.

Quadro 1 – Concentração de sal para diferentes tipos de água (OTV, 1999; Gleick, 1993)

Tipo de água bruta	Concentração aproximada de sal (g/l)¹
Água salobra	0,5 – 3
Mar do Norte (perto dos estuários)	21
Golfo do México	23 – 33
Oceano Atlântico	35
Oceano Pacífico	38
Golfo Pérsico	45
Mar Morto	≈ 300

¹ Os valores apresentados no quadro são considerados típicos. Uma grama por litro é equivalente a aproximadamente 1000 partes por milhão (ppm) de sal.

O sistema físico de eliminação do sal da água por destilações e condensações sucessivas é conhecido desde a Antiguidade. Contudo, este processo implicava um consumo muito elevado de energia, que tornava o processo economicamente inviável. Recentemente, têm-se desenvolvido novas tecnologias que permitem a obtenção de água doce a um custo ainda elevado mas progressivamente decrescente. Na última década, foi possível obter valores na ordem de 0,60 €/m³ (Hispagua, 2001).

Não obstante o custo do processo de dessalinização de água do mar ou de águas salobras ter vindo a diminuir, esta tecnologia não está ainda ao alcance de muitos países, principalmente daqueles que dependem grandemente da importação de combustíveis fósseis para a produção de electricidade. Do mesmo modo, países que não possuem capacidade económica para grandes investimentos iniciais em centrais de grande escala, não beneficiando da “economia de escala” que diminui o custo de produção, também encontram dificuldades na implementação desta tecnologia. No entanto, há que salientar que a centralização da produção implica maiores danos ambientais, como será referido nesta dissertação.

É de salientar que, no mercado global, a competitividade das empresas permite uma redução dos custos. Verifica-se que o mercado da dessalinização tem vindo a aumentar, prevendo-se que ronde os 70 biliões de dólares americanos num horizonte de 20 anos. Assim, verifica-se a redução de custos dos equipamentos e tecnologias, à medida que vão sendo mais utilizadas mundialmente (Wolf, 2003).

Na verdade, o custo da água obtida de forma convencional, por exemplo em zonas onde a água potável é cada vez mais escassa, pode ser de tal forma elevado que compense apostar na dessalinização para obtenção de água potável, com a grande vantagem de, em zonas costeiras, a matéria-prima não estar limitada – água salina ou salobra. Os custos de abastecimento de água em sistemas de produção e adução têm, de facto, aumentado durante os períodos de seca extrema. Por outro lado, o custo da água obtida pelos métodos convencionais de produção de água, com origem superficial ou subterrânea, deverá, em muitos casos, ser superior ao praticado devido à não internalização dos custos ambientais (ou externalidades ambientais). É, no entanto, de referir, que a Directiva-Quadro da Água visa implementar uma política de estabelecimento de preços eficaz para a água, sendo que estes variarão consoante as áreas, em função de factores como a referida internalização dos custos ambientais. Prevê-se, assim, que a nível europeu, as taxas a aplicar à água venham a internalizar diversos custos, quer económicos, quer ambientais, no preço da água permitindo uma afectação mais justa, ao mesmo tempo de que influencia uma conduta de utilização mais racional.

No que diz respeito à qualidade da água dessalinizada, é possível obter água adequada para consumo humano sendo, no entanto, necessário efectuar um pós-tratamento. Uma vez que as exigências para a rega, na agricultura, são menores, os requisitos de qualidade são normalmente cumpridos.

Em termos mundiais a dessalinização de água salinizada já se pratica há mais de 50 anos, constituindo um processo bem estabelecido em numerosos países (Semiat, 2000). Na figura 1 apresenta-se a distribuição mundial da produção de água dessalinizada.

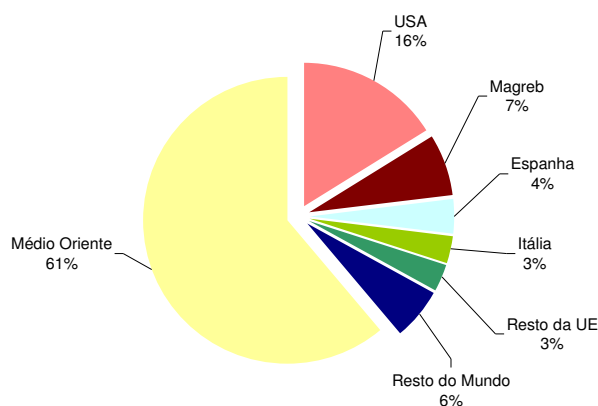


Figura 1 – Distribuição percentual, por países, da capacidade de produção de água dessalinizada (Torres, 1999)

A nível mundial, a dessalinização tem sido bastante explorada em países do Golfo Pérsico, do Mediterrâneo e das Caraíbas (Akkad, 1990).

Em 1999, mais de 11 000 centrais dessalinizadoras encontravam-se em funcionamento em todo o mundo, produzindo mais de 20 milhões de m³ de água por dia. A dimensão das centrais pode ir de 500 000 m³/dia até 20 a 100 m³/dia. (Cotruvo, 2006)

Em Israel, a central de Ashkelon, que começou a operar em 2005, constitui a maior unidade de osmose inversa e a mais avançada do mundo fornecendo, a um custo de 0,66 US\$/m³, cerca de 15% da água doce utilizada em Israel para consumo doméstico (Watkins *et al.*, 2006; Dreizin, 2006)

Na Europa, Espanha é o país mais desenvolvido em termos de tecnologia de dessalinização, assim como em número e capacidade de instalações (Valero *et al.*, 2001).

Prevê-se que, com os projectos actuais no mundo, a produção mundial de 400 milhões de m³/dia passe para 750 milhões de m³/dia em 2020 (Watkins *et al.*, 2006).

Em Portugal, a dessalinização é aplicada na região de Porto Santo, no arquipélago da Madeira, e a potencial implementação desta tecnologia na região algarvia, tem sido cada vez mais abordada, principalmente por grupos hoteleiros de grande dimensão que encontram nesta tecnologia uma solução para responder eficazmente aos elevados picos de consumo na época de Verão.² Também a entidade gestora, Águas do Algarve, S. A. (AdAlg), encomendou estudos às consultoras *Ambio, S. A.* e *Hidroprojecto, Engenharia e Gestão, S. A.* para analisar a viabilidade de implementação da dessalinização no Algarve. Os resultados obtidos foram bastante satisfatórios a favor desta tecnologia de obtenção de água.

² O grupo hoteleiro português - Pestana, encontrava-se, no ano 2005, a aguardar licença para implementar uma central de osmose inversa no Alvor (Algarve), com capacidade para produzir 360 mil m³/ano, satisfazendo as suas necessidades locais em rega de espaços verdes, duches, limpeza de infra-estruturas, lavagem de carros, exceptuando cozinhas (JN, 2005a). Não tendo sido possível obter informação acerca da situação em que se encontra o processo do grupo Pestana, pressupõe-se que esteja ainda a aguardar licença para a implementação da central de dessalinização.

A utilização destas tecnologias é particularmente atractiva em regiões onde se verifica grande sazonalidade nos consumos. Assim, o potencial de aplicação na região algarvia é clara, pelo que se pretendeu seleccionar esta região para o caso de estudo.

A ilha de Porto Santo apresenta elevada escassez em água subterrânea e superficial o que obriga a que se recorra à dessalinização para abastecimento público. A água produzida pela central de dessalinização cobre cerca de 90% das necessidades de água (PRPA, 2000).

Assim, Porto Santo encontrou, na dessalinização, uma solução viável, capaz de responder ao consumo na ilha, onde vivem permanentemente cerca de 5 mil habitantes, mas que, no Verão, acolhe uma população superior a 25 mil pessoas. Propriedade do Governo Regional da Madeira e gerida pela entidade gestora *Investimentos e Gestão da Água, SA.*, a central dessalinizadora de Porto Santo começou a funcionar em 1979, tendo sido a primeira na Europa e uma das primeiras no mundo a utilizar o processo de osmose inversa. A central tem sofrido diversas obras de ampliação, desde 1996, sendo que actualmente produz 6 000 m³/dia de água potável, tendo iniciado a sua actividade com 500 m³/dia (JN, 2005b).

3. Tecnologias de dessalinização

3.1 Fases da produção

A produção de água por via de dessalinização envolve vários processos que podem ser divididos em três fases (Cotruvo, 2006):

- 1 – Selecção da água bruta;
- 2 – Processos de tratamento;
- 3 – Pós-tratamento.

Relativamente à selecção da água bruta, os recursos hídricos susceptíveis de sofrer dessalinização são: água do mar ou água subterrânea salinizada (ou salobra). Esta última fonte pode ter origem em aquíferos em contacto directo com o mar ou em aquíferos isolados do mesmo (figuras A1.1, A1.2 e A1.3, em anexo).

Das duas possibilidades que existem, de acordo com Geta e Moreno (2000) é mais razoável aproveitar os aquíferos que não estão em contacto com o mar, por ser menos complexa a caracterização e exploração destes aquíferos, ou então efectuar a extracção da água do mar através de captações subterrâneas, para facilitar a sua depuração natural.

No quadro A1.1, em anexo, resumem-se as principais vantagens e inconvenientes da opção por água salobra em relação à água do mar, num processo de osmose inversa.

No que diz respeito água do mar, esta pode conter sais dissolvidos totais na ordem dos 40 000 ppm. Os iões e sais típicos, presentes na água do mar, assim como a sua concentração média, são apresentados nos quadros A1.2 e A1.3, em anexo. A água do mar pode ainda conter compostos orgânicos, devido a contaminação com derrames de petróleo e organismos microbiológicos contaminantes.

Ainda em relação à água do mar, existem dois aspectos importantes a considerar e que encarecem todo o processo de tratamento: quanto mais baixa a sua temperatura, mais elevadas são as pressões requeridas na operação e mais baixos são os fluxos nas membranas; quanto mais elevada for a concentração de sais e de compostos tais como o H_2S , mais exigente será o pré-tratamento requerido (Swartz *et al.*, 2006).

O tratamento da água bruta envolve, tipicamente, os seguintes processos:

- pré-tratamento;
- osmose inversa ou destilação (tecnologias mais utilizadas);
- mistura com a água da origem;
- desinfecção.

Por último, e antes de se proceder à distribuição da água é necessário proceder a pós-tratamento. A distribuição da água dessalinizada requer a adição de:

- aditivos de controlo da corrosão e da precipitação de iões presentes na água;
- aditivos para impedir o crescimento bacteriano nas redes de distribuição;

No quadro A1.4, em anexo, apresentam-se as principais características dos desinfectantes mais utilizados.

3.2 Processos de dessalinização

A classificação dos métodos existentes de dessalinização pode ser feita pela forma de separação, pelo tipo de energia utilizada e pelo processo físico de separação. A primeira classificação permite diferenciar os métodos que recolhem os sais da água, dos métodos que recolhem a água, ficando os sais em repouso. No quadro seguinte apresentam-se os métodos existentes no mercado de acordo com estes critérios de classificação.

Quadro 2 – Métodos de dessalinização existentes no mercado (Valero *et al.*, 2001)

Separação	Energia	Processo Físico	Método
Água dos sais	Térmica	Evaporação	Destilação súbita (flash)
			Destilação multi-efeito
			Compressão térmica de vapor
			Destilação solar
		Cristalização	Congelamento
			Formação de hidratos
		Filtração e Evaporação	Destilação com membranas
Sais da água	Mecânica	Evaporação	Compressão mecânica de vapor
		Filtração	Osmose Inversa
	Eléctrica	Filtração selectiva	Electrodialise
	Química	Permuta iónica	Troca iónica

A figura 2 mostra que as tecnologias de destilação e osmose inversa lideram, percentualmente, a distribuição mundial percentual, por capacidade de água produzida. Dentro da destilação, é de salientar que é a tecnologia de destilação súbita (flash) a que domina o mercado actualmente (Ettouney, 2006).

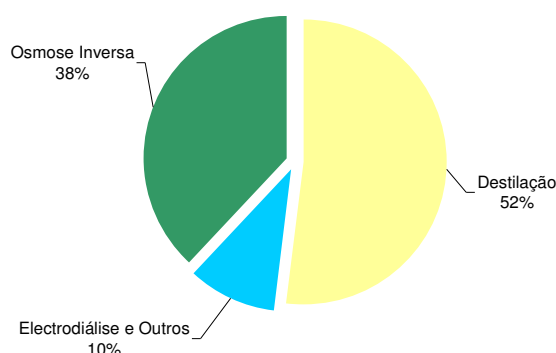


Figura 2 – Distribuição dos métodos de dessalinização por capacidade de água produzida no mundo (Medina, 2000)

Nas secções seguintes apresenta-se uma descrição dos processos de dessalinização existentes, sendo que será dada maior ênfase aos processos mais utilizados actualmente.

3.2.1 Energia térmica

3.2.1.1 Considerações gerais

As tecnologias descritas neste capítulo são as que necessitam directamente de energia térmica para se processarem.

Nos processos de destilação, a água a dessalinizar é aquecida e vaporizada, sendo que este vapor é condensado, obtendo-se uma água dessalinizada, com baixo teor de sólidos dissolvidos totais, e um

concentrado de sais residual. De referir que os sais são voláteis a partir de 300° C (Valero *et al.*, 2001).

A quantidade de energia necessária para vaporizar a água, ou seja, a energia de vaporização, corresponde a 2,256 kJ/kg a 100° C (Cotruvo, 2006). A mesma quantidade de energia é retirada do vapor, na passagem ao estado líquido, por condensação.

Nestes processos de dessalinização, o calor gerado na condensação do vapor é geralmente transferido para a água a dessalinizar, de modo a promover a sua vaporização. Este aspecto aumenta a eficiência térmica do processo, reduzindo o uso de combustível e consequentes custos.

Os processos de destilação apresentam como principal vantagem, em relação aos outros métodos, o facto de poderem ser aplicados, com a mesma eficiência, a uma água bruta de pior qualidade, requerendo um menor pré-tratamento do que os processos de dessalinização por membranas (Kita *et al.*, 2005).

Os principais sistemas de destilação (vaporização seguida de condensação) são: destilação multi-efeito, destilação multi-etapa por efeito flash e destilação por compressão a vapor.

3.2.1.2 Destilação multi-efeito (MED – *Multiple Effect Distillation*)

Neste método existe a ligação de vários destiladores simples, com configuração dos tubos na vertical e na horizontal. A água salinizada é submetida a uma sequência de evaporações e destilações sucessivas, em que a evaporação se efectua de forma natural, aproveitando o calor latente libertado pela condensação de vapor. A pressão é reduzida sequencialmente em cada etapa, à medida que a temperatura diminui, sendo que é necessário adicionar calor em cada etapa para manter e melhorar a eficiência. Na figura 3 é esquematizado este processo.

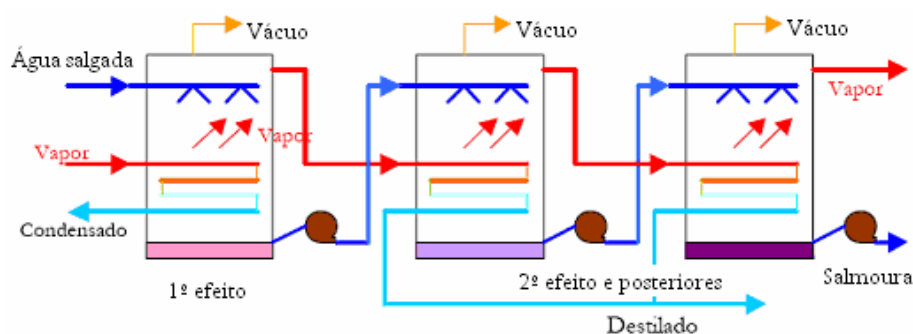


Figura 3 – Central de destilação multi-efeito com evaporadores horizontais (Valero *et al.*, 2001)

É de salientar que a tecnologia MED tem vindo a ganhar terreno à destilação MSF, devido aos avanços no *design* e nos materiais destas centrais, competindo económica e tecnicamente com a tecnologia de MSF. Avanços recentes na diminuição da temperatura do processo conduziram a um aumento da capacidade de produção e numa redução do consumo de energia destas centrais de MED (Blanco *et al.*, 2002).

3.2.1.3 Destilação multi-etapa por efeito flash (MSF – *Multiple stage flash*)

As centrais de MSF são as que mais contribuem para a capacidade de dessalinização instalada no mundo, sendo que este processo constitui o mais comum e o mais simples de aplicar (Semiat, 2000).

A maioria das centrais de MSF opera com sistema de co-geração, produzindo electricidade e dessalinizando água simultaneamente. Parte do vapor gerado para produzir electricidade é utilizada para aquecer a água bruta, a dessalinizar (ESCWA, 2001).

O princípio do processo consiste na rápida ebulição da água aquecida (flash) quando a pressão de vapor é reduzida abaixo da pressão de vapor do líquido, à mesma temperatura.

Em termos de características gerais, o MSF apresenta elevado volume e fluxo de água tratada, com corrosão e precipitação de iões e uma elevada taxa de uso de químicos.

As principais diferenças em relação ao processo MED são as seguintes:

- a evaporação em cada efeito não se produz mediante energia térmica mas antes por *flashing* (expansão brusca da água quente pressurizada a uma pressão inferior à de saturação);
- as temperaturas de operação são mais elevadas (115-120° C contra 70° C da MED), o que implica um pré-tratamento mais exigente (incluindo acidificação, desgaseificação e neutralização mais exigentes) e mais dispendioso na operação e manutenção.

O processo MSF é especialmente utilizado no Médio Oriente, pelo facto de ser indicado para águas com fraca qualidade (salinidade, temperatura e contaminação elevada) e de possuir uma capacidade de produção superior às outras tecnologias. Na figura 4 é esquematizado este processo.

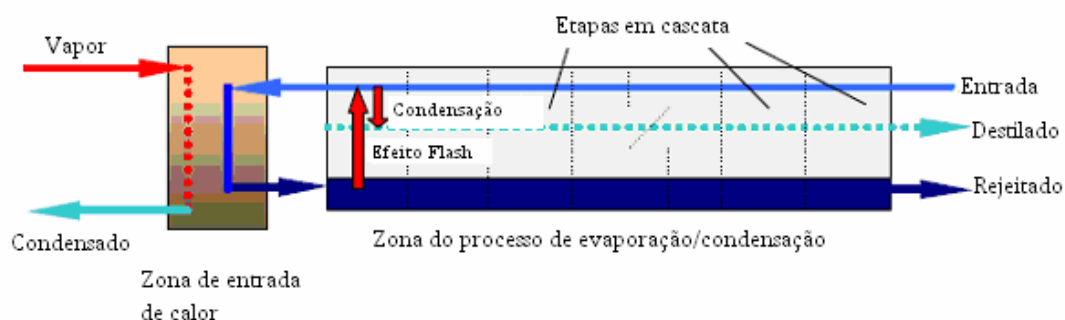


Figura 4 – Central de destilação súbita multi-etapa por efeito flash (Valero *et al.*, 2001)

3.2.1.4 Compressão térmica de vapor (CTV)

Na compressão térmica de vapor a produção de água dessalinizada é feita através do mesmo processo que a destilação MED, mas utilizando uma fonte de energia térmica diferente: são utilizados os designados compressores térmicos (ou termocompressores). Estes consomem vapor de alta pressão proveniente, por exemplo, da produção de electricidade numa central dual (termoeléctrica e dessalinizadora), que succiona parte do vapor gerado na última etapa, a muito baixa pressão, comprimindo-se e dando lugar a um vapor de pressão intermédia, adequado para a primeira etapa, que constitui a única etapa que consome energia no processo, tal como no MED. Este processo é esquematizado na figura 5. Este processo, que não é mais do que uma destilação por compressão a vapor, utiliza um compressor adiabático – sem trocas de calor com o exterior – criando dois sectores de pressões distintas e um fluxo de vapor, desde o sector de maior pressão e temperatura de condensação, até ao inferior, no qual se produz a condensação. Embora o seu rendimento seja semelhante à das unidades MED, a sua capacidade de produção é superior a estas.

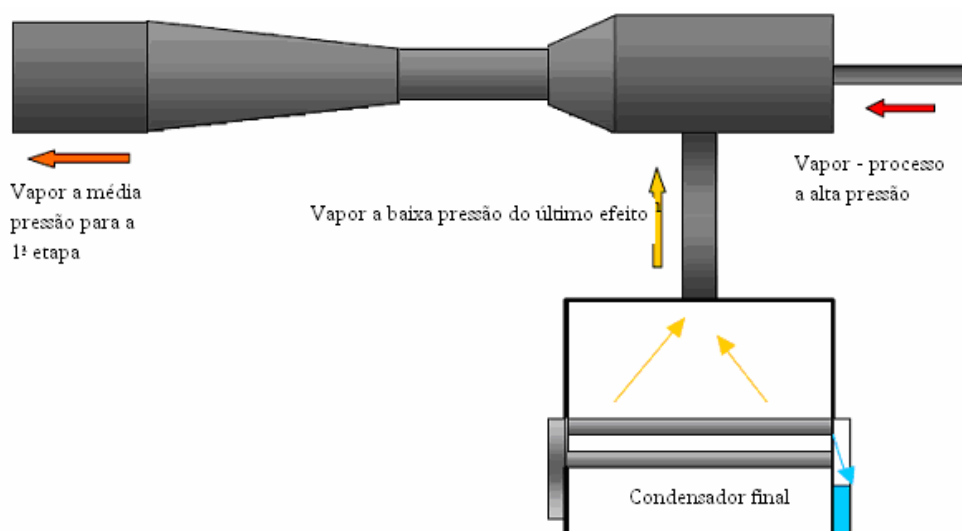


Figura 5 – Esquema típico de um termocompressor acoplado a uma central de CTV com HFF (*horizontal falling film*) (Valero *et al.*, 2001)

3.2.1.5 Destilação solar

A destilação solar constitui um método indicado para produzir água em zonas áridas e isoladas. Apesar de acarretar um custo energético nulo e ter baixo investimento, apresenta baixa rentabilidade, devido à escassa produção por metro quadrado de colector, que está intimamente dependente de condições climatológicas favoráveis. Assim, esta tecnologia não se aplica em regiões onde o consumo de água é elevado.

Como mostra a figura 6, o sol aquece uma câmara-de-ar, através de um tecto transparente, em cujo fundo se encontra a água salgada em repouso. Podem ser utilizadas técnicas de concentração dos raios solares, através de lentes ou espelhos (parabólicos ou lisos).

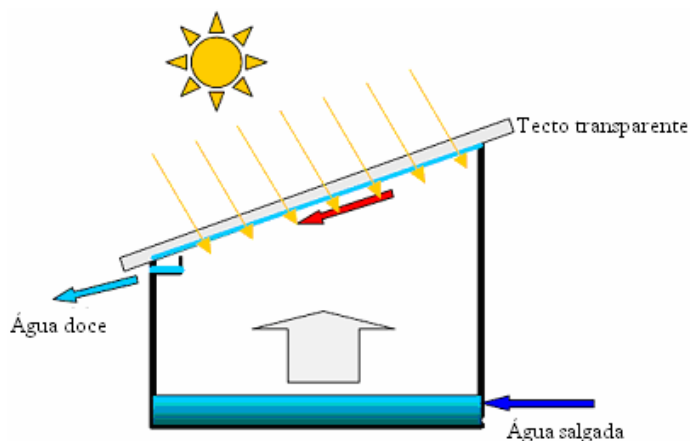


Figura 6 – Esquema de um colector solar para dessalinização (Valero *et al.*, 2001)

No entanto, a energia solar também pode ser fonte de energia de um processo de destilação (MED ou MSF), através do uso de colectores de concentração parabólicos e, ainda, pode ser utilizada para produção de energia eléctrica, em instalações de osmose inversa, através do uso de painéis fotovoltaicos.

3.2.1.6 Congelamento

No processo de congelamento, que é um método de cristalização, a água salina é submetida a vários sistemas de refrigeração para ser posteriormente evaporada, a baixa pressão, num cristizador em vácuo. Obtêm-se cristais de gelo misturados com cristais de sal, que podem ser separados por processos mecânicos.

Da pesquisa efectuada, não foram encontrados dados de consumo específico deste processo, sendo apenas referida a existência de instalações piloto de pequena escala, que não são extrapoláveis para protótipos (Valero *et al.*, 2001).

3.2.1.7 Formação de hidratos

A formação de hidratos constitui outro método baseado no princípio de cristalização, que consiste em obter, mediante a adição de hidrocarbonetos à solução salina, hidratos complexos em forma cristalina, com uma relação molécula de hidrato/molécula de água da ordem de 1/18 (Torres, 1999). Esta tecnologia não é aplicada a nível industrial pois não apresenta soluções para a eficaz separação e lavagem dos cristais.

3.2.1.8 Destilação com membranas

No processo de destilação com membranas combinam-se as técnicas de evaporação e filtração. Primeiramente, a água salinizada bruta é aquecida para melhorar a produção de vapor e, seguidamente, este vapor é exposto a uma membrana que permite a sua passagem (a membrana impede a passagem da água no estado líquido - membrana hidrófoba). Depois de atravessar a membrana, o vapor condensa sobre uma superfície mais fria, resultando a água dessalinizada, que é recolhida. Este processo foi desenvolvido apenas em laboratório, por vários grupos de investigação científica, um dos quais da Universidade de Málaga, sendo que as expectativas em relação à viabilidade deste processo, ainda em desenvolvimento, são elevadas.

3.2.2 Energia mecânica

3.2.2.1 Compressão mecânica de vapor

A compressão mecânica de vapor evapora o líquido num lado da superfície de intercâmbio e, do outro lado, comprime-se a água salgada o suficiente para que condense. O funcionamento está esquematizado na figura 7.

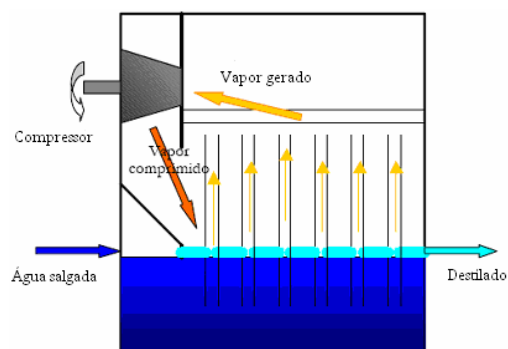


Figura 7 – Esquema de compressão mecânica de vapor com evaporador de tubos verticais (Valero *et al.*, 2001)
Esta tecnologia apresenta o inconveniente de não estarem disponíveis compressores volumétricos de vapor, de baixa pressão, de tamanho suficiente para uma produção considerável. De referir que este processo é muito utilizado na indústria, geralmente em processos de concentração da indústria alimentar.

3.2.2.2 Osmose inversa

O processo de dessalinização por osmose inversa é considerado o processo mais promissor, para a dessalinização de água do mar (Furukawa, 1997).

Nos últimos 15 anos, a nível mundial, o volume de água tratada por osmose inversa aumentou em resultado dos avanços tecnológicos e da redução de custos. A água dessalinizada por osmose inversa tem vindo a ser utilizada como água potável para as populações, para a indústria ou para agricultura (OAS, 2006).

A figura 8 mostra o crescimento da utilização da tecnologia de osmose inversa, passando de menos de 600 000 m³/dia, em 1997, para mais de 1 500 000 m³/dia em 2002, ou seja, duplicando a capacidade em 6 anos. Paralelamente, no mesmo intervalo de tempo, o custo da água dessalinizada decresceu de 1,40 dólares americanos para perto de 0,50 dólares americanos (Campbell e Jones, 2005).

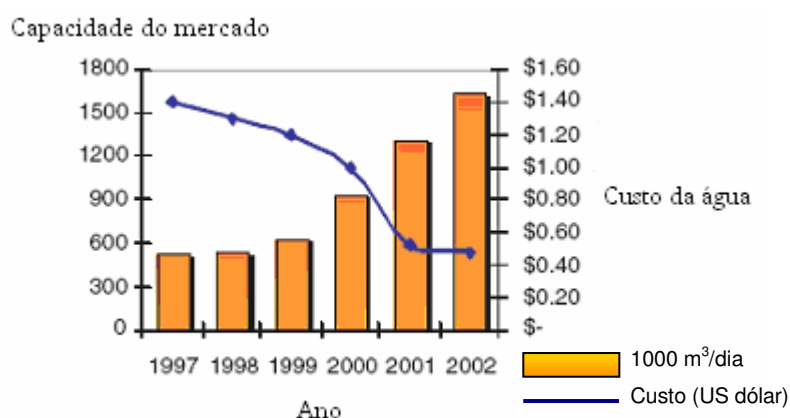


Figura 8 – Crescimento da osmose inversa de água do mar e declínio do custo unitário da água produzida (Campbell e Jones, 2005)

Neste processo, através da aplicação de uma pressão mecânica externa à água salinizada, pretende-se inverter a pressão osmótica natural, para que a água passe através de uma membrana, da zona com maior concentração de sais, para a zona com menor concentração de sais, de maneira a obter água pura. Os sais são assim retidos pela membrana, constituindo o concentrado em sais ou a designada salmoura. As figuras 9, 10 e 11 esquematizam o processo de osmose natural, osmose inversa e o seu processo numa central. As figuras A1.4, A1.5 e A1.6, em anexo, são relativas a uma central de osmose inversa de Eilat, em Israel.

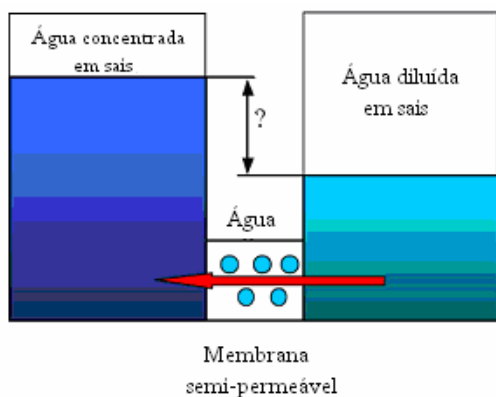


Figura 9 – Processo natural de osmose (Valero *et al.*, 2001)

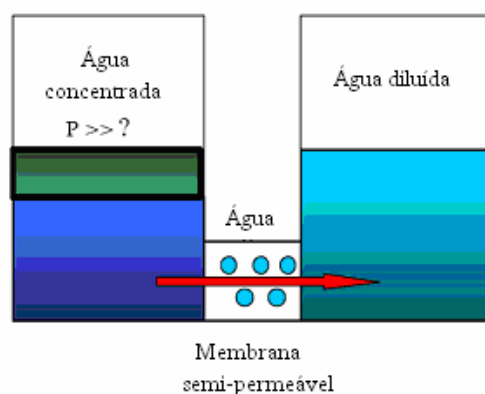


Figura 10 – Processo de osmose inversa (Valero *et al.*, 2001)

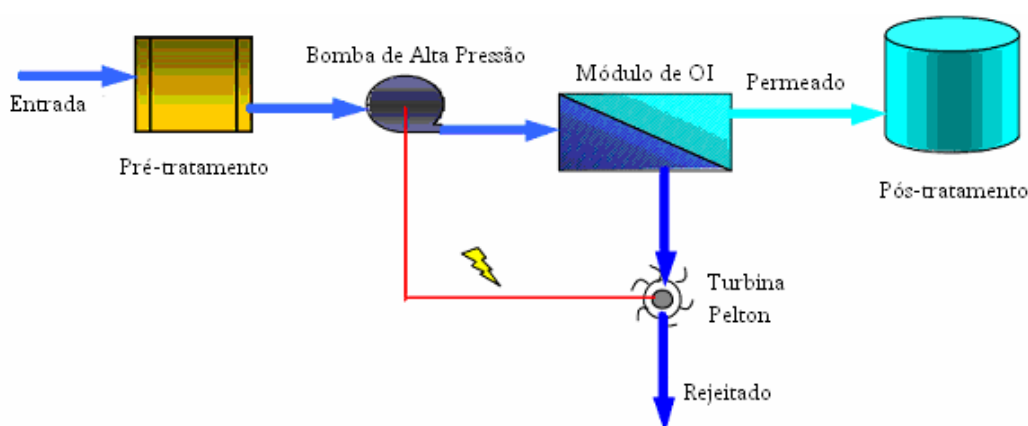


Figura 11 – Esquema de uma central de osmose inversa com Turbina Pelton incorporada (Valero *et al.*, 2001)

Caracterização das membranas

As membranas na osmose inversa são semipermeáveis, sendo geralmente produzidas através de acetato de celulose e seus derivados, poliamidas aromáticas lineares ou com cruzamentos, polieter-ureia ou polisulfonas sulfonadas.

Na osmose inversa, algumas membranas podem rejeitar 99% de todos os sólidos iônicos (Cotruvo, 2006), sendo que o tamanho das partículas em que a osmose inversa opera é da ordem dos 10^{-4} a 10^{-2} micrómetros (Tchobanoglous e Burton, 1991).

Como principais factores de selecção de membranas têm-se: estabilidade de pH, tempo de vida, força mecânica, capacidade de pressurização e selectividade para solutos.

As membranas podem ser, quanto à estrutura, transversais, integrais ou de capa fina. Podem ainda ter configuração plana, em espiral, tubular ou de fibra oca. A figura 12 e a figura A1.4, em anexo, mostram membranas em espiral. A configuração em espiral é a mais utilizada, uma vez que apresenta características operacionais que tornam a relação custo-benefício mais favorável (Cotruvo, 2006).

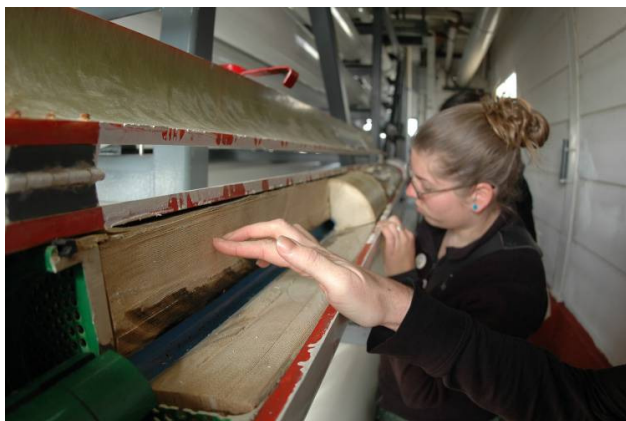


Figura 12 – Corte de membranas em espiral (Almeida, 2006)

É de referir que os mecanismos de remoção de sais, através das membranas de osmose inversa, ainda não são completamente conhecidos, sendo que alguns sais, como por exemplo iões borato ou arsenite, não são removidos com elevada eficiência. Há quem defenda que as cargas de superfície no polímero da membrana afectam a polaridade da água (Cotruvo, 2006).

Uma melhor compreensão dos mecanismos a nível molecular poderá originar novas membranas que permitirão uma maior eficiência (Semiat, 2000). A primeira membrana fiável para osmose inversa foi elaborada e patenteada pelos investigadores de engenharia da UCLA (*University of California, Los Angeles*), nos anos 60.

No ano de 2006, investigadores da UCLA *Henry Samueli School of Engineering and Applied Science* desenvolveram novas membranas para a osmose inversa, que podem reduzir o custo da dessalinização. Estas membranas, estruturadas a nível nanométrico, contêm essencialmente nanopartículas sintetizadas, dispersas num polímero, que atraem as moléculas de água e são extremamente porosas criando túneis moleculares que deixam passar a água e impedem a passagem aos contaminantes. Estas membranas repelem ainda matéria orgânica e bactérias, que normalmente colmatam as actuais membranas. Assim, a energia necessária para fazer passar a água pelas membranas é menor, implicando maior eficiência energética e sendo potencialmente menos dispendioso. Estudos recentes apontam para uma redução em 50% da energia consumida, reduzindo assim o custo de dessalinizar a água em 25%. Prevê-se que estarão no mercado no próximo ano ou daqui a dois anos (Nanotechwire, 2006).

Etapas da osmose inversa

A osmose inversa compreende as seguintes etapas:

- **Pré-tratamento**, onde a água bruta é tratada de forma proteger as membranas e facilitar a permeabilização. Nesta fase são removidos os sólidos suspensos, por filtração e é ajustado o pH, para proteger as membranas e controlar a precipitação de sais. De referir que a utilização de um inibidor de pH contribui para impedir a precipitação de sais, assim como iões de ferro, manganésio e orgânicos que podem colmatar as membranas. É adicionado um desinfectante para impedir a formação de biofilmes na membrana. A desinfecção pode ser realizada

recorrendo a espécies de cloro, ozono ou radiação UV.³ No quadro A1.5, em anexo, apresentam-se as doses típicas para os reagentes do pré-tratamento.

- **Pressurização**, com auxílio de uma bomba de alta pressão é estabelecida uma pressão na água pré-tratada, estabelecida de acordo com a membrana e com a salinidade da água. Geralmente, as pressões utilizadas estão compreendidas entre 17 a 68 atm (Cotruvo, 2006). A pressão operacional na osmose inversa é proporcional à salinidade da água a tratar, o que implica que águas salobras requeiram menos pressão operacional do que água do mar. Tal constitui uma vantagem da osmose inversa em relação aos processos térmicos/destilação (Tsiourtis, 2001a).
- **Separação**, onde as membranas permeáveis inibem a passagem dos sais dissolvidos e permitem que a água dessalinizada as atravesse. Desta separação resulta uma água pura e uma água concentrada em sais. Uma vez que não existe uma eficiência de 100% das membranas, na rejeição dos sais dissolvidos, uma reduzida percentagem de sais atravessa a membrana.
- **Pós-tratamento**, a água resultante do processo de dessalinização é agressiva e tende a corroer as tubagens e dissolver as camadas protectoras que contêm cálcio e outros sais no interior das tubagens, daí que deve sofrer um pós-tratamento, em que se efectua a estabilização e se torna compatível o produto final com a distribuição da água nas tubagens. Na estabilização, o produto final obtido sofre um ajuste de pH (passando de um valor de pH de 5 para um valor de pH próximo de 8), pela adição de carbonato de cálcio, para prevenir a corrosão metálica das tubagens e equipamentos. Também pode ser necessário adicionar inibidores de corrosão tais como polifosfatos. Em geral, realiza-se também uma mistura com a água da fonte, para aumentar os sólidos dissolvidos totais, estabilizando a água. O pós-tratamento é também necessário para controlar o crescimento de microrganismos, durante a distribuição, assim como eliminar agentes patogénicos do processo de mistura. Também pode ser necessário realizar uma desgaseificação.

Não obstante ser realizado o pré-tratamento, as membranas devem ser alvo de limpezas periódicas: mecanicamente (recorrendo a escovas); com aplicação de permeado sob pressão (*flushing*); quimicamente, através de reagentes adequados aos constituintes das membranas. Como indicadores da necessidade de limpeza têm-se: aumento da salinidade do permeado; aumento do caudal da salmoura e largos períodos de paragem. Se a qualidade da água bruta for boa, a limpeza pode ser anual. Se a qualidade da água bruta for má, independentemente do pré-tratamento, deverão ser efectuadas limpezas, uma a duas vezes por mês.

³ No caso da aplicação de agentes com cloro, a eliminação de compostos orgânicos, organismos marinhos e algas, deve ser realizada totalmente antes da aplicação do cloro, de forma a prevenir a formação dos compostos organoclorados que, reagindo com substâncias húmicas e fúlvicas (existentes preferencialmente em águas superficiais), podem dar origem a compostos com potencial cancerígeno, como por exemplo os Trihalometanos (Alegria *et al.*, 1998).

Coeficiente de conversão

O coeficiente de recuperação de água é normalmente expresso em consumo de energia por tonelada de água tratada. Assim, se este coeficiente é elevado, implica que o consumo de energia é reduzido. Actualmente, o coeficiente típico ronda os 30-40% para a tecnologia de osmose inversa na dessalinização de água do mar (Yun *et al.*, 2006). De facto, a osmose inversa é altamente recomendável no caso de dessalinização de águas salobras (Valero *et al.*, 2001).

Deste modo, tentar aumentar o coeficiente de reconversão de água salina em água tratada terá de ser o alvo principal dos estudos desta tecnologia de dessalinização. No entanto, a dificuldade reside no facto de, quanto maior é este coeficiente, maior a pressão osmótica da água do mar, o que pode acarretar danos na membrana. Existem alguns métodos para aumentar este coeficiente na osmose inversa, salientando-se: aumento da pressão de operação; aumento da temperatura de operação ou adicionar equipamento de pré-tratamento.

Principais vantagens e desvantagens

Devido ao seu reduzido consumo de energia, condições de rápido funcionamento e simples manutenção, a osmose inversa tornou-se na tecnologia mais barata de dessalinizar a água do mar. No entanto existem algumas desvantagens associadas ao seu processo. No quadro 3 resumem-se as principais vantagens e desvantagens da osmose inversa.

Quadro 3 – Vantagens e desvantagens da dessalinização de água do mar por osmose inversa (OAS, 2006)

Vantagens	Desvantagens
Matéria-prima sem limitação em zonas costeiras	Elevado custo da tecnologia
O processo é simples, sendo relevante optar por uma origem de água o mais limpa possível, para minimizar a frequência da limpeza da membrana	A água a tratar exige um pré-tratamento rigoroso de forma a aumentar durabilidade da membrana
Custos reduzidos de instalação	Podem ocorrer interrupções no serviço durante períodos de tempestade, pois aumenta o número de partículas e sólidos em suspensão na água do mar
Facilidade de instalação e mobilidade	A operação da OI requer uma elevada qualidade de materiais e equipamento
Baixa manutenção, são usados materiais não metálicos na construção	Potencial impacto ambiental negativo relativo à descarga do efluente gerado não tratado, sendo que a sua intensidade depende das condições do local da descarga
A tecnologia requer um uso mínimo de produtos químicos	Existe um risco de contaminação bacteriológica das membranas, que pode contaminar a água final (sabor e cheiro)
Mais eficiente energeticamente do que as tecnologias de destilação	OI requer uma fonte de energia fiável e tem elevado consumo energético.
Remoção em 99% de todos os iões presentes na água bruta. O <i>double-pass membrane method</i> ⁴ possibilita uma remoção ainda superior	As instalações possuem elevada razão de área ocupada/produção (que vão de 25000 a 60000 l/dia/m ²)

É de referir que esta tecnologia é adequada apenas para regiões onde a água do mar ou água salobra subterrânea se encontra muito disponível.

⁴ O designado *double-pass membrane method* consiste na passagem dupla da água bruta pela membrana. Neste processo atinge-se os 99,9% de rejeição de vírus e bactérias, sendo cumpridos os mais exigentes limites de remoção (Osmonics, 1997).

Outros aspectos relevantes

A osmose inversa também pode ser realizada utilizando electricidade produzida a partir de **energias renováveis**, pela aplicação, por exemplo, de painéis fotovoltaicos ou pela utilização de energia eólica.

A tecnologia de osmose inversa pode ser integrada facilmente em tecnologias térmicas, constituindo os sistemas híbridos. Actualmente, sistemas triplamente híbridos: electricidade-MSF-OI, apresentam inúmeras vantagens em relação aos outros sistemas conhecidos – MSF duplo efeito ou simples OI. De entre as todas vantagens, destacam-se: uma maior flexibilidade, menor energia consumida e menor custo de construção (Hamed, 2005).

Um outro aspecto importante, desenvolvido nos anos 80 e 90, é o uso de **dispositivos de reconversão de energia** (*energy recovery devices*), o que constitui uma vantagem na redução do consumo energético na osmose inversa.

No processo de osmose inversa, o permeado à saída das membranas apresenta uma pressão compreendida entre 100 a 300 kPa, enquanto que o rejeitado, ou seja, a salmoura, sai a uma pressão ligeiramente inferior à pressão que é aplicada à água bruta à entrada nas membranas. Esta pressão no rejeitado ou é eliminada através de um sistema que introduza uma perda de carga ou, esta energia em excesso no rejeitado é aproveitada nestes designados sistemas de reconversão de energia, tais como: turbinas Pelton ou câmaras hiperbáricas.

As turbinas Pelton são accionadas pelo rejeitado e este, sob a forma de jacto a alta pressão acciona o motor de uma bomba de alta pressão que alimenta as membranas ou, em alternativa, um gerador eléctrico. As câmaras hiperbáricas ou conversores hidráulicos dinâmicos permitem recuperações de energia ainda maiores. Nestas, devido ao carácter incompressível dos líquidos e à existência de inúmeras válvulas, transmite-se a pressão da salmoura à água de alimentação (Valero *et al.*, 2001). No anexo A1, a figura A1.7 exemplifica o funcionamento de uma câmara hiperbárica.

Existem **processos de membrana** que podem ser utilizados no pré-tratamento da água a dessalinizar por osmose inversa ou na destilação MSF.

A nano-filtração, é utilizada para reduzir a dureza da água potável. Nos sistemas híbridos, a nano-filtração é capaz de reduzir significativamente a precipitação de iões da água do mar, aumentando a produtividade dos processos subsequentes, OI e MSF (Hamed, 2005). A micro-filtração e ultra-filtração (UF) são utilizadas para remover não só partículas em suspensão, como também bactérias e vírus da água bruta. Sendo que a UF é a que actua sobre um intervalo de diâmetros inferior, cobrindo a maior parte dos vírus. A figura A1.8, em anexo, mostra os intervalos dos diâmetros dos processos de filtração existentes, assim como a sua relação com o tamanho comum das partículas e o seu peso molecular.

3.2.3 Energia eléctrica

3.2.3.1 Electrodialise

O processo de electrodialise depende directamente de energia eléctrica para efectuar a dessalinização.

Este constitui um processo de separação electroquímico em que se dá uma troca de iões electricamente carregados, que atravessam membranas separadas por milímetros, devido à aplicação de uma diferença de potencial eléctrica.

Os processos de electrodiálise utilizam membranas selectivas que contêm grupos catiónicos e aniónicos. A figura 13 esquematiza o processo de electrodiálise.

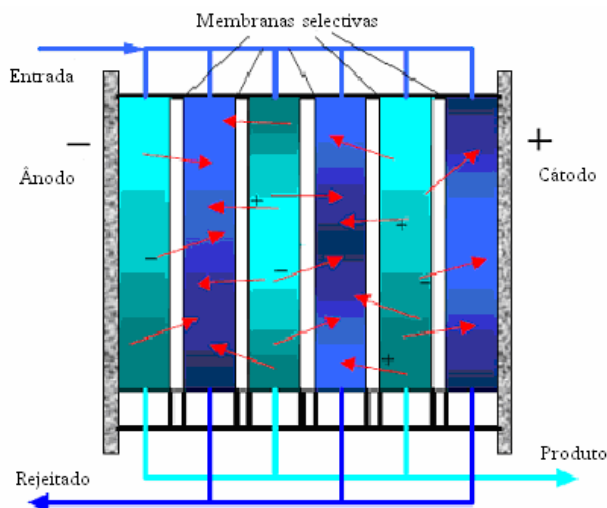


Figura 13 – Esquema do processo de electrodiálise (Valero *et al.*, 2001)

3.2.4 Energia química

3.2.4.1 Permuta iónica

O único processo que utiliza energia química directamente para separar os sais da água é a permuta iónica.

As resinas de permuta iónica são substâncias insolúveis que possuem a capacidade de trocar iões com o sal dissolvido, quando se colocam em contacto. Existem dois tipos de resinas: aniónicas, que substituem os aniões da água por OH^- (permutação básica) e catiónicas, que substituem os catiões por iões H^+ (permutação ácida). A desmineralização por permuta iónica origina água com qualidade elevada, com uma concentração de sais menor do que 1 g/l.

Este processo possui grande aplicação industrial em centrais de tratamento e água para ciclo de vapor de centrais térmicas.

3.2.5 Síntese das tecnologias disponíveis

Uma vez descritos os processos de dessalinização existentes, constata-se que apenas alguns são viáveis à escala industrial, nomeadamente: MSF, MED, CTV, CMV, OI e ED.

No quadro 4 apresenta-se uma comparação proposta por Moya (1998a) de alguns dos processos referidos.

Quadro 4 – Comparação dos processos (Moya, 1998a)

	MSF	MED	CV	OI
Estado comercial	Desenvolvido	Desenvolvido	Em Desenvolvimento	Desenvolvido
Capacidade mundial	8 MM m ³ /d	0,8 MM m ³ /d	0,6 MM m ³ /d	5 MM m ³ /d
Centrais de maior tamanho	45.000 m ³ /d	18.000 m ³ /d	3.000 m ³ /d	9.000 m ³ /d
Fabricantes	Muitos	Poucos	Poucos	Muitos
Consumo de energia: – Vapor – Electricidade	125°C 3–6 kWh/m ³	70°C 1,5–2,5 kWh/m ³	– 8–12 kWh/m ³	– 6–7 kWh/m ³
Temperatura máxima	120°C	75°C	75°C	–
Conversão (produto/água mar bombeada)	10–25%	25–40%	40–50%	35–45%
Flexibilidade de operação	60–100%	30–100%	–	modular
Manutenção (limpezas/ano)	2–4	0,5–2	0,5–2	1–2
Pré-tratamento	Moderado	Muito simples	Muito simples	Exigente
Requisitos de operação	Médio	Baixo	Baixo	Muito alto

Na figura A1.9, em anexo, apresentam-se as combinações possíveis e potenciais das várias tecnologias de dessalinização, incluindo as diferentes fontes de energia.

3.3 Critérios de selecção do processo de dessalinização

Um dos principais aspectos da implementação da dessalinização é a selecção do processo a utilizar. Esta selecção deve ser baseada nos seguintes critérios (Tsiourtis, 2001b; Hajeeh e Al-Othman, 2005):

- **Qualidade da água a dessalinizar**, relativamente ao tipo de água, salobra ou do mar, à concentração de sais e composição da água, no que se refere a partículas dissolvidas, ao pH e à temperatura. A qualidade da água bruta, no caso da água do mar, está intimamente ligada também ao local onde esta é retirada, uma vez que o seu grau de depuração é diferente consoante seja retirada numa zona de mar aberto ou confinada. No caso ainda da água do mar, deve-se extrair o mais longe possível de áreas portuárias, que possuem elevado risco de derrames de petróleo e estão mais sujeitas à poluição dos navios. De referir que a osmose inversa constitui a tecnologia mais barata quando se dispõe de água bruta com menor concentração de sais.
- **Qualidade do produto**. A pureza pretendida para o produto constitui um factor importante, quando se pretende comparar as diferentes tecnologias disponíveis. De referir que para obter um produto com concentração de SDT (sólidos dissolvidos totais) entre 5 a 50 ppm recorre-se a processos térmicos. As tecnologias de membrana produzem água com uma qualidade entre 100 a 1000 ppm de SDT (Hajeeh e Al-Othman, 2005).
- **Rácio de conversão**, em função da fonte de alimentação. Constitui a quantidade de água produzida a partir de uma taxa de fluxo de água bruta que entra na central. Este rácio encontra-se geralmente situado entre 10 a 15% e influencia a quantidade de água que deve

ser tratada para uma determinada capacidade de produção. Deste modo, o rácio também afecta a quantidade de energia necessária.

- **Energia consumida por unidade de água.** A energia mínima necessária para dessalinizar a água é dependente da concentração em sais, no entanto, a taxa de consumo depende da tecnologia escolhida. Escolhida a tecnologia, a sua eficiência é influenciada pelo *design* do sistema, características de engenharia, as perdas de energia e o rácio de reconversão do sistema.
- **Eficiência do equipamento e utilização de energia.** A eficiência da tecnologia constitui um dos principais parâmetros a ter em conta na selecção de um processo de dessalinização. Uma tecnologia eficiente contribui para uma redução de custos e uma maximização do produto.
- **Disponibilidade da tecnologia e *know-how*.** A tecnologia escolhida deve estar disponível no mercado, assim como deve existir o *know-how* necessário à sua implementação.
- **Disponibilidade em energia.** A energia é essencial a qualquer processo de dessalinização e a sua necessidade depende de inúmeros factores, tais como a salinidade da água bruta. No caso de existir excesso de energia numa central termoeléctrica é então preferível optar pelo processo térmico. Centrais de dessalinização duais, com produção simultânea de electricidade, implicam custos menores. Outras fontes de energia tais como sol, vento ou nuclear podem ter influência significativa na localização da central.
- **Custo total.** O custo constitui um parâmetro importante na selecção de um processo de dessalinização. Este custo total inclui o capital de investimento, os custos de operação e manutenção.
- **Localização da central.** A localização da central está dependente da fonte de energia utilizada, do tipo de água a ser dessalinizada e da susceptibilidade ambiental do local.
- **Capacidade da central.** A capacidade da central é escolhida tendo em conta o compromisso entre a procura de água e a possibilidade de operação e manutenção eficazes. A capacidade está associada à dimensão da central, sendo que, por exemplo, a tecnologia de osmose inversa pode ser realizada em centrais móveis de reduzida dimensão.
- **Impactos ambientais.** Devem ser realizados estudos preliminares. Por exemplo, no que diz respeito ao impacto da descarga da salmoura, no caso de tecnologias térmicas, este efluente possui uma concentração 10% superior à da água do mar, enquanto que na osmose inversa a sua concentração atinge o dobro.

3.4 Qualidade da água produzida

A qualidade da água produzida pelas diferentes tecnologias pode variar significativamente. Os processos de destilação podem produzir água contendo 5 a 50 ppm de sólidos dissolvidos totais (SDT). O produto da osmose inversa pode conter 300 a 500 ppm de SDT, basicamente NaCl e pequenas porções de outros sais. Outros microconstituintes, tais como CO₂, sulfato de hidrogénio podem ser removidos no pós-tratamento.

É importante referir que no caso da água a dessalinizar conter compostos orgânicos voláteis, a água dessalinizada será contaminada com esses mesmos componentes, a não ser que se façam análises cuidadosas.

De acordo com a legislação portuguesa, a água dessalinizada para consumo humano deve cumprir os valores paramétricos do Anexo I do Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro.

Em relação a outros usos, tais como o uso para rega ou prática balnear, a água dessalinizada deve cumprir, respectivamente, o Anexo XVI e XV, do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. Em relação à maior parte de usos não potáveis a legislação não especifica os requisitos de qualidade a cumprir.

4. Enquadramento regulamentar

A qualidade da água dessalinizada, se destinada ao consumo humano, é regulada pelo Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro, que transpõe para a legislação nacional a Directiva 98/83/EC e estabelece que “a água destinada ao consumo humano deve ser caracterizada por não conter microrganismos, parasitas, nem quaisquer substâncias em quantidades ou concentrações que constituam um perigo potencial para a saúde humana, bem como por preencher os requisitos mínimos estabelecidos nas partes A) e B) do anexo I e respeitar, genericamente, os valores dos parâmetros da parte C) do anexo I”. Este documento dispõe ainda que, para garantir a qualidade da água fornecida aos consumidores, a entidade gestora do sistema de abastecimento deve (...) “submeter à aprovação da autoridade competente um programa de controlo de qualidade” (...), “efectuar a verificação da qualidade da água, com vista à demonstração da sua conformidade com a norma de qualidade da água” (...), “efectuar amostragens correspondentes à avaliação de conformidade, periodicamente, ao longo do ano, de modo a obter-se uma imagem representativa da qualidade da água distribuída pelos respectivos sistemas nesse período de tempo”.

Como se referiu anteriormente, se a água dessalinizada não se destinar ao consumo humano, os requisitos para rega e prática balnear, por exemplo, estão contemplados na legislação, respectivamente, nos Anexos XVI e XV do Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. Em relação a usos não potáveis, como por exemplo lavagem de ruas, não estão incorporados os requisitos mínimos na legislação actual.

No que diz respeito ao **abastecimento público**, a obtenção de licença, quer para a dessalinização ou métodos convencionais de obtenção de água, requer sempre parecer da entidade competente ARH/CCDR.

No PEASAR II⁵, de acordo com a Estratégia Nacional de Desenvolvimento Sustentável (ENDS), colocam-se como prioridades: “prevenir a poluição e proteger e recuperar as massas de água (...) que constituem reservas de água estratégicas do País, (...) mediante a gestão da procura de água tendo em conta a protecção a longo prazo dos recursos hídricos e o recurso a tecnologias de tratamento de águas residuais, de utilização eficiente da água e de **utilização de origens de água alternativas** (recirculação, reutilização de águas residuais e **dessalinização**) que assegurem outras oportunidades de valorização às actividades geradoras da degradação dessas massas de água” (PEASAR II, 2007).

O processo de implementação, **por via privada**, de uma central de dessalinização de águas (salobra ou água do mar) obriga ao agente interessado a obtenção de uma licença ambiental, a requerer ao licenciador ambiental ARH/CCDR e INAG. Exemplificando com uma situação particular, considere-se, por hipótese, um Hotel que pretenda construir uma central de dessalinização para cobrir os seus picos de consumo na época estival. Em primeiro lugar há que ter em conta que a primeira etapa que

⁵ O Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais para o período 2007-2013 (PEASAR II) foi aprovado através do Despacho 2339/2007 do Ministro do Ambiente, Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional, publicado em Diário da República 2.ª Série a 14 de Fevereiro de 2007.

Ihe compete cumprir, corresponde à justificação de que o sistema de abastecimento, relativo ao seu Município, não consegue cumprir com os valores de consumo que foram requisitados. Na realidade, a empresa em questão deve, em primeiro lugar, solicitar que lhe seja fornecido maior caudal de água à entidade gestora “em baixa”⁶ (neste caso, o Município responsável pela distribuição directa de água às populações) e em segundo lugar, à entidade gestora “em alta” (que pode constituir um sistema multi-municipal de abastecimento de água, como por exemplo, a entidade gestora Águas do Algarve, S. A.). No caso de estas duas entidades afirmarem que não conseguem fornecer mais água, o Hotel pode então partir para o pedido de licença ambiental. É de referir que o Instituto Regulador de Água e Resíduos (IRAR) intervém a partir do momento em que o Hotel obtém licença ambiental para produzir água para consumo humano.

Salienta-se o facto de o utilizador de água ser obrigado a se ligar à rede pública, quando esta se encontra disponível. A não ligação pode acarretar alguns problemas, tais como: problemas de saúde pública se não forem cumpridos os princípios de salvaguarda de saúde pública; no que diz respeito ao saneamento, uma vez que as águas residuais passam a não ser direccionadas para a rede de colectores; pode violar a legislação de licença de captações e pode colocar em risco a sustentação do financiamento de todo o sistema de abastecimento de água, em alta e em baixa, eventualmente prejudicando os outros consumidores, se disso resultar uma tarifa mais cara (já que estão a ser incorporados os custos com a construção da rede de distribuição, tratamento e adução de água).

É de salientar ainda que a distribuição de água privada deve apenas cingir-se ao seu território, se a água dessalinizada for potável, pois as entidades gestoras dos sistemas de abastecimento têm o exclusivo de venda de água. Se a água se destinar a usos que não para consumo humano já não se verifica este conflito. De facto, é de salientar o exemplo da água reutilizada de ETAR's, que tem vindo a ser produzida e utilizada quando não se destina ao consumo humano.

Em termos de regulamentação, verifica-se existirem algumas questões em aberto relativamente à produção, utilização e transacção de água proveniente de fontes alternativas (e.g. dessalinização, reutilização e águas pluviais), em particular se destinada a consumo humano. Adicionalmente, verifica-se a inexistência de orientações concretas em termos de qualidade a exigir à água para usos não potáveis.

⁶ Considera-se conveniente a apresentação das seguintes definições (PEAASAR II, 2007):

- **Sistemas multimunicipais:** “ (...) os que sirvam pelo menos dois municípios e exijam um investimento predominante a efectuar pelo Estado em função de razões de interesse nacional (...)”.
- **Sistemas “em Alta”:** no abastecimento de água são as componentes que respeitam à captação, ao tratamento e à adução e, por vezes, ao armazenamento em reservatórios de entrega;
- **Sistemas “em Baixa”:** no abastecimento de água são as componentes que têm a ver com a distribuição, com os respectivos ramais de ligação, incluindo os reservatórios de entrega nos casos em que eles, por meras razões de acordos estabelecidos, não façam parte do sistema em “alta”;

NOTA: A distinção entre “alta” e “baixa” apenas se justifica no caso de sistemas integrados, onde não existe coincidência total entre ambas as vertentes. No caso de sistemas municipais sem integração geográfica entre municípios, esta distinção carece de sentido, uma vez que a gestão do conjunto é feita pela mesma entidade.

5. Aspectos ambientais

5.1 Considerações gerais

A dessalinização de águas salobras e de água do mar surge pela primeira vez em áreas áridas e semi-áridas, cuja população e indústria necessitavam de outra fonte de obtenção de água para poder realizar eficazmente as suas actividades. Também em áreas remotas, onde a transferência de água era impossibilitada, por ser extremamente oneroso, se optou por desenvolver esta tecnologia. A dessalinização, devido ao seu elevado custo, era assim limitada a aplicações como água potável e água com elevada qualidade para usos industriais. Pode-se dizer que foi nos últimos 30 anos que se verificou uma grande expansão desta tecnologia, associada a uma redução nos custos, no preço do equipamento, no consumo de energia necessária ao processo e no *know-how* do tratamento da água. Assim, a dessalinização passou a constituir uma alternativa viável mesmo em países cuja situação de escassez de água não era extrema, sendo que a água dessalinizada serviria outros fins que não apenas o consumo humano e os processos industriais exigentes. Na realidade, esta expansão da dessalinização pode dever-se ao facto de o custo da água convencional ter aumentado devido a períodos de seca e devido à dificuldade em obter água de aquíferos profundos, de difícil acesso, e com a qualidade de água deteriorada.

Ao mesmo tempo que a tecnologia de dessalinização origina impactos ambientais positivos, fornecendo uma nova fonte de água, melhorando a qualidade dos efluentes, entre outros, também está na origem de potenciais danos para o ambiente, podendo estar na origem de inúmeros impactos ambientais (Einav *et al.*, 2002).

A dessalinização e o ambiente não devem ser competitivos mas complementares, numa situação *win-win* (Tsiourtis, 2001b), sendo que esta tecnologia pode constituir no futuro a única alternativa de obtenção de água em certas regiões. Actualmente, 40% da população mundial sofre de falta de água e em 2025 prevê-se que atinja os 60%, devido ao crescimento populacional, melhoramento global do nível de vida, aumento da actividade económica e intervenção humana incorrecta no ambiente e nos recursos hídricos disponíveis.

No que diz respeito à legislação ambiental, a Avaliação de Impacto Ambiental (AIA) constitui uma excelente ferramenta legal à qual os projectos de dessalinização devem ser submetidos, segundo o Decreto-Lei n.º 197/2005, de 8 de Novembro.⁷ Os estudos de impacto ambiental necessários à realização da AIA devem ser efectuados, sempre que possível, a nível de estudo prévio do projecto, aquando da elaboração do mesmo. De referir que a avaliação ambiental estratégica (AAE), consegue actuar ainda mais cedo, ou seja com carácter ainda mais preventivo, aquando da formulação de políticas.

⁷ Um projecto de dessalinização é sujeito a AIA se se considerar susceptível de provocar um impacto significativo no ambiente em função da sua localização, dimensão ou natureza, de acordo com os critérios estabelecidos no anexo V do Decreto-lei n.º 197/2005, de 8 de Novembro.

Um Estudo de Impacto Ambiental (EIA) de um projecto de dessalinização deve incluir (Tsiourtis, 2001b):

- processo escolhido e *layout* da central (tecnologia escolhida, localização, área, dimensão, fonte de água, estações elevatórias, tubagens);
- avaliação de emissões da central (descarga da salmoura, químicos utilizados, calor no processo térmico);
- avaliação de impactos ambientais, qualitativa e quantitativa (poluição do ar, ruído, saúde pública, riscos químicos, ocupação do solo, perturbação no ecossistema marinho);
- produção/abastecimento de energia;
- análise de benefícios (impacto socio-económico, qualidade do produto final, fiabilidade desta nova fonte de água);
- proposta de mitigação dos impactos.

5.2 Identificação de impactos ambientais

Uma vez que os impactos ambientais dos processos de dessalinização estão intimamente relacionados com a eficiência do sistema, estes têm vindo a ser reduzidos por unidade de água produzida. No entanto, alguns impactos persistem.

Um projecto de dessalinização de água pode estar acompanhado de impactos ambientais negativos, tais como: uso do solo, alterações no ecossistema marinho, poluição sonora, efeitos negativos associados ao uso de energia, entre outros.

Pretende-se, nesta análise ambiental, focar os impactos ambientais negativos e positivos originados pelo processo de dessalinização da água do mar nos dois principais processos: osmose inversa e destilação. Para tal teve-se em conta alguns casos de estudo realizados nas Ilhas Canárias, por Sadhwani *et al.* (2005).

5.2.1 Impactos ambientais negativos da dessalinização da água do mar

5.2.1.1 Impacto indirecto do consumo intensivo de energia

As tecnologias de destilação são as que mais consomem energia primária, logo, são as que mais podem gerar este impacto, se a energia consumida (térmica ou eléctrica) for maioritariamente obtida através da queima de combustíveis fósseis, em centrais termoeléctricas. Quando combustíveis fósseis são queimados, geram emissões de gases poluentes, como por exemplo CO₂ e CH₄, que se dispersam na atmosfera e contribuem para o aquecimento global.

No caso da osmose inversa, não obstante se tratar igualmente de uma tecnologia de consumo intensivo de energia, foi possível diminuir os consumos energéticos (neste caso utiliza energia eléctrica apenas) com os novos avanços nas tecnologias do processo, tais como os *energy recovery systems* e o melhoramento ao nível da eficiência das membranas.

Este impacto indirecto de contribuição para as alterações climáticas influencia, entre outros aspectos: o aumento da temperatura global; o aumento do nível médio do mar, que favorece a intrusão salina de aquíferos, colocando em risco as águas subterrâneas; a maior frequência de fenómenos climáticos

extremos tais como, precipitação intensa, que leva à ocorrência de cheias e maior número de períodos de seca.

De acordo como o Protocolo de Quioto, em relação às alterações climáticas, a maior parte dos países industrializados tem de reduzir as suas emissões, 5% abaixo do nível de emissões em 1990, no período entre 2008 a 2012. A situação concreta de Portugal é alarmante. Sendo um dos países que estava autorizado a aumentar em 27% as suas emissões até 2012, verificou-se que já em 2002, as emissões portuguesas aumentaram 30,5%, ultrapassando o valor permitido.

A verificar-se a implementação de centrais de dessalinização, este impacto relativo às alterações climáticas pode ser minimizado pela utilização de energias renováveis.

5.2.1.2 Impacto no ecossistema marinho devido à descarga da salmoura no mar

O impacto no ecossistema marinho deve-se maioritariamente à descarga da salmoura. A salmoura constitui o subproduto não desejado, resultante do processo de dessalinização, um produto altamente concentrado em sais. A descarga contínua no mar deste subproduto constitui a melhor alternativa, em termos de custo, disponível para o destino final deste resíduo da central dessalinizadora (Purnama *et al.*, 2005).

Na osmose inversa, a descarga da salmoura apresenta uma concentração entre 1,3 a 1,7 vezes superior que a concentração de água do mar (Sadhvani *et al.*, 2005). No caso da destilação, a salmoura apresenta uma concentração 10% superior à da água do mar.

Uma solução possível para minimizar este impacto passa por garantir uma maior dispersão no momento da descarga no mar. Para isso é necessário seleccionar uma tecnologia adequada para este propósito, que pode passar pela descarga da salmoura a uma profundidade adequada (10 a 15m) e pelo número de difusores necessários para atingir a melhor dispersão dos sais. É necessário efectuar monitorização do ecossistema marinho para verificar possíveis alterações e tomar medidas preventivas e de remediação. A magnitude deste impacto (o grau de mistura da salmoura e o alcance geográfico do impacto) depende de alguns factores hidro-geológicos que caracterizam o mar em questão, tais como: batimetria, ondulação, correntes marinhas e profundidade da coluna de água.

A vulnerabilidade do ecossistema marinho à salinidade difere de local para local (cit. por Sadhwani *et al.*, 2005). Sendo esta medida pela natureza do habitat existente (e.g. recifes de coral, rochas existentes, superfícies de areia e pelos organismos existentes na região). Há que ter em conta se o local da descarga constitui um habitat de espécies de peixes ou comunidades de invertebrados. No anexo 2, no quadro A2.1, apresentam-se os habitats marinhos susceptíveis de serem afectados pela descarga da salmoura, ordenados por sensibilidade biológica.

No entanto, a experiência em projectos de dessalinização em Chipre evidenciou que, após 3 anos de operação numa central de dessalinização, os efeitos no ecossistema marinho são negligíveis e limitados a uma área de raio 200m (Tsiourtis, 2001a).

5.2.1.3 Impacto no ecossistema marinho devido à descarga de produtos químicos utilizados na osmose inversa

As águas residuais resultantes do processo, para além da elevada concentração em sais, também contêm produtos químicos utilizados na etapa de pré-tratamento.

Os produtos químicos utilizados no pré-tratamento da água do mar são essencialmente: hipoclorito de sódio (NaOCl) utilizado para cloração, prevenindo o crescimento biológico; cloreto de ferro, usado na floculação e remoção da matéria em suspensão da água; ácido sulfúrico utilizado para ajustamento de pH; hexametáfosfato de sódio e químicos similares, para prevenir a precipitação de iões nas tubagens e nas membranas; NaHSO₃, usado para neutralizar qualquer vestígio de cloro na água bruta.

A limpeza das membranas é feita recorrendo a ácidos, detergentes (ácidos cítricos, polifosfato de sódio e EDTA) ou base cáustica, como o hidróxido de sódio. A água resultante da limpeza das membranas deve ser neutralizada antes da descarga no mar.

De acordo com Semiat (2000), em instalações de pequena dimensão, o risco de afectar a vida marinha é reduzido, enquanto que em instalações de grande dimensão o problema é mais severo, no entanto, pode ser resolvido através da devida dispersão/diluição do efluente.

5.2.1.4 Impacto do ruído

No que diz respeito à poluição sonora, existe sempre ruído associado às centrais dessalinizadoras, o que pode afectar urbanizações vizinhas, assim como espécies animais existentes na região.

Nas centrais de osmose inversa da água do mar podem ocorrer impactos importantes devido ao ruído. A elevada pressão das bombas, assim como os sistemas de recuperação de energia, tais como turbinas, produzem ruído a um nível que pode ascender os 90 dB(A). As centrais devem por isso mesmo estar localizadas longe das áreas populacionais (mapas de ruído devem ser efectuados para determinar a localização ideal, que não afecte as populações vizinhas) e, sempre que for necessário, devem estar equipadas com tecnologia acústica de redução do nível de ruído (barreiras acústicas, vegetação circundante, entre outras soluções) (Sadhwani *et al.*, 2005; Einav *et al.*, 2002).

5.2.1.5 Impacto no uso do solo

As centrais dessalinizadoras localizam-se, frequentemente, nas áreas costeiras. A área necessária para uma central dessalinizadora de osmose inversa ronda os 10 000 m² para uma produção de água entre os 5 000 a 10 000 m³/dia (Sadhwani *et al.*, 2005). Uma central tem ainda infra-estruturas associadas ao transporte de energia eléctrica, tubagens para transporte de água do mar e água tratada e ainda para a descarga da salmoura. Este impacto do uso do solo é mais significativo em locais com faixas costeiras reduzidas, com elevado valor de património natural ou para o turismo. Uma das possíveis soluções para reduzir este impacto está na localização da central o mais longe possível da zona costeira, num local perto de áreas com infraestruturas já criadas, tendo em atenção que se eleva o custo com a bombagem e com as tubagens de água bruta e salmoura (Einav *et al.*, 2002).

5.2.1.6 Impacto nos aquíferos

O transporte da água do mar e da salmoura, através de tubagens localizadas em cima de um aquífero, constitui um risco ambiental pois uma rotura pode originar uma penetração no aquífero, salinizando-o. Uma possível solução pode passar pelas técnicas adequadas de isolamento das tubagens para minimizar este risco (Sadhvani *et al.*, 2005).

5.2.1.7 Impacto na saúde pública

De um ponto de vista das emissões atmosféricas locais, o impacto de uma central de dessalinização é indirecto (aumento das emissões pelo uso de maior energia, quando produzida em centrais termoeléctricas) e já foi referido anteriormente. Como emissões mais significativas associadas às tecnologias de dessalinização, que requerem queima de combustíveis fósseis, têm-se: SO_x, NO_x e CO₂.

O fenómeno de alterações climáticas pode afectar a saúde pública na medida em que a disponibilidade de água potável é reduzida e a ocorrência de fenómenos climáticos extremos é acentuada. Estão associados problemas, tais como: doenças do foro respiratório, alergias, mortes por desidratação, a malária, entre outros problemas de saúde pública.

Em relação aos contaminantes possíveis, a osmose inversa, a título de exemplo, com capacidade de filtração de iões na gama dos 0,0001 µm, consegue remover contaminantes como iões metálicos, sais aquosos, pesticidas e herbicidas, assim como contaminantes biológicos, tais como vírus e algas tóxicas. Também se espera que estes contaminantes sejam removidos nos processos de destilação (MCHD, 2003).

A água constitui uma fonte importante de substâncias. Logo, também a ausência de iões benéficos pode afectar a saúde pública a longo prazo, assim como a presença de substâncias tóxicas (se a sua dieta for pobre e o consumo deste tipo de água for prolongado). Químicos de interesse na água potável: cálcio, magnésio, sódio, potássio, iodo, crómio e manganésio, entre outros. A água do mar é rica em iões tais como: sódio, cloro, magnésio, cálcio, bromo e iodo, mas é pobre em alguns iões essenciais como: zinco, cobre, crómio e manganésio. Os processos de dessalinização reduzem significativamente todos estes iões. A estabilização pela adição de cal e pela mistura com água do mar novamente é assim muito importante para repor alguns desses iões (Cotruvo, 2006).

No entanto, pode-se dizer que, de acordo com a informação existente sobre as tecnologias de dessalinização, quando devidamente implementadas e com uma manutenção e operação adequadas, podem produzir água potável que não põe em risco a saúde pública (MCHD, 2003).

5.2.2 Impactos ambientais positivos da dessalinização

Como impactos positivos do processo de dessalinização, tem-se:

- Redução da captação de água subterrânea e superficial, pela produção de água através de uma fonte alternativa e inesgotável – água do mar, permitindo um aumento dos recursos de água potável disponíveis.
- Diminuição da desertificação em regiões com elevada escassez de água, através do regadio com água dessalinizada e devidamente estabilizada.

- Produção de água com menor risco de conter poluentes, materiais cancerígenos, materiais orgânicos, vírus, ou ainda, cor, cheiro ou sabor.
- Redução da salinidade das águas residuais tratadas. Este aspecto tem como consequências, por exemplo, um menor tratamento na ETAR e uma maior facilidade em se efectuar reutilização destas mesmas águas residuais.

5.3 Avaliação qualitativa de impactos ambientais

Para se proceder a uma avaliação qualitativa de impactos ambientais optou-se por escolher uma tecnologia – a osmose inversa de água do mar, ao invés da avaliação generalizada dos processos de dessalinização, de forma a poder efectuar uma abordagem mais detalhada. Esta avaliação está expressa numa matriz de impactos (quadro 5), em que, para cada descritor, os impactos foram avaliados qualitativamente ao nível da sua natureza, magnitude, significância, extensão, duração, tempo (fase do projecto), reversibilidade e probabilidade de ocorrência (Pinheiro, 2005). Realizou-se esta avaliação tendo como base os impactos mencionados no capítulo anterior e os casos de estudo que constam da bibliografia desta dissertação de mestrado.

Quadro 5 – Matriz de impactos do processo de osmose inversa

Descritor	Impacto	Nat.	Mag.	Signif.	Extens.	Duração	Tempo	Rever.	Prob.
Solo	Ocupação do solo	D; N	E	S	L	P	C; O	R	C
	Salinização do solo	D; N	B	P S	L	P	O	I	P
Água	Contaminação do aquífero	D; N	B	P S	R	P	O	I	P
	Nova fonte de água	D; P	E	S	R	P	O	–	C
Ar e Clima	Consumo de electricidade (Aumento dos GEE)	I; N	E	S	I	P	O	I	C
Fauna e Flora	Descarga de salmoura	D; N	E	S	L	P	O	R	C
	Descarga de produtos químicos	D; N	B	P S	L	P	O	R	C
Paisagem	Implantação da central junto ao mar	D; N	M	S	L	P	C; O	R	C
Ruído	Elevados níveis de ruído	D; N	M	S	L	P	C; O	I	C
População	Aumento do turismo	I; P	M	S	R	P	O	–	P
	Redução do desemprego	I; P	M	P S	N	P	C; O	–	D
	Risco de saúde pública	D; N	B	P S	N	P	O	R	PP

Legenda:

Natureza – N (Negativo); P (Positivo) e D (Directo); I (Indirecto); **Magnitude** – B (Baixa); M (Média); E (Elevada); **Significância** – PS (Pouco Significativo); S (Significativo); **Extensão** – L (Local); R (Regional); N (Nacional); I (Internacional); **Duração** – T (Temporário); P (Permanente); **Tempo** – Fases do projecto – C (Construção); O (Operação); D (Desactivação); **Reversibilidade** – R (Reversível); I (Irreversível); **Probabilidade de ocorrência** – PP (Pouco Provável); P (Provável), C (Certo); D (Desconhecido)

5.4 Medidas de mitigação de impactos

5.4.1 Tipos de medidas

As medidas de mitigação podem ser estruturais ou operacionais. As medidas estruturais são aplicadas durante a construção da central, tais como: profundidade e localização da extracção de água do mar e descarga da salmoura; configuração do edifício de dessalinização; dimensionamento

das tubagens, etc. As medidas operacionais são as que são tomadas durante a operação tais como: proibição do uso de certos químicos, ou uso de certos químicos para protecção do ambiente.

Os capítulos seguintes descrevem possíveis medidas que podem ser implementadas, no sentido de minimizar os principais impactos ambientais dos processos de dessalinização.

5.4.2 Destino da salmoura

Como possíveis destinos para a salmoura, que promovem a mitigação do seu impacto, têm-se:

- injeção da salmoura através de sondas profundas em estruturas subterrâneas, isoladas das estruturas que podem gerar águas de boa qualidade. Há que ter em atenção potenciais desabamentos por dissolução dos sais.
- colocação em aterro sanitário, devidamente impermeabilizado, depois de evaporada a água.
- evaporação natural em tanques. Esta solução acarreta custos a nível da impermeabilização, para impedir a contaminação das águas subterrâneas. Podem ser usados os próprios sais precipitados como barreira impermeável no tanque salino, desde que consigam impermeabilizar eficazmente o solo.
- tratamento de descarga zero – evaporação/secagem da salmoura. Este processo é dispendioso, no entanto, há que ter em conta que são evitados os custos com o transporte da salmoura. Este tratamento foi investigado no projecto AQUASOL, através da participação INETI. Esta participação de Portugal no projecto pretendeu integrar a energia solar num processo de dessalinização, não apenas como fonte de calor, para um processo de destilação multi-efeito, mas também como fonte de energia para o tratamento (secagem) do efluente, salmoura, para posterior obtenção de cloreto de sódio. Procurou-se assim aumentar a viabilidade económica e minimizar os impactos ambientais associados (INETI, 2006). Em Blanco *et al.* (2002) está descrito o projecto assim como os seus principais resultados.
- descarga da salmoura no mar, por gravidade, através de um emissário submarino provido de difusor, de forma a assegurar uma dispersão e mistura rápida com a água do mar. No entanto, deve ser efectuado um modelo de dispersão do efluente no mar, a fim de se identificar a zona ideal para a descarga. É também aconselhada a monitorização do ecossistema marinho, a fim de verificar eventuais impactos.
- fornecer a salmoura a uma central de produção de sal (que efectuará um tratamento rigoroso ao sal, para sua posterior utilização).

No quadro 6 apresenta-se uma estimativa da utilização mundial de alguns métodos para a rejeição da salmoura, baseada nas centrais dos E.U.A.

Quadro 6 – Estimativa da utilização mundial de métodos para a rejeição da salmoura (WHO, 2007)

Destino da salmoura - método	Percentagem de uso (% de centrais)
Descarga no mar, rio, estuário ou lago	45
Descarga na rede de drenagem de águas residuais	42
Injecção em estruturas subterrâneas	9
Tanques de evaporação	2
Rega em spray	2
Tratamento de descarga zero	0

A descarga na rede de drenagem de águas residuais só é possível nos casos de centrais de dessalinização de muito reduzida dimensão quando comparadas com a elevada dimensão ou capacidade de tratamento da ETAR em questão.

A rega em spray de culturas tolerantes a uma concentração elevada de sais, ou de plantas ornamentais, acarreta elevados riscos de contaminação de aquíferos. De referir que esta alternativa não pode, de forma alguma, constituir o único destino para a salmoura, sendo que existe um reduzido número de espécies tolerantes a uma elevada concentração de sais (WHO, 2007).

Estes dois métodos referidos não foram escolhidos enquanto alternativas adequadas para o destino da salmoura, por se considerarem menos adequados para a mitigação de impactos ambientais.

5.4.3 Descentralização da produção

A construção de várias pequenas centrais de dessalinização de água, por região, em vez da existência de uma única central de grande dimensão, pode ser preferível. Novas técnicas de construção permitem uma construção em menor tempo e a custo inferior. Estas pequenas centrais originam uma pegada ecológica menor e fornecem maior segurança e controlo. Também o custo no transporte de água é reduzido. Assim, os impactos ambientais das grandes redes de distribuição, associadas a grandes consumos de energia nas bombagens são eliminados ou reduzidos (Campbell e Jones, 2005).

5.4.4 Uso de energias renováveis na dessalinização

A aplicação de energias renováveis na dessalinização pode constituir o futuro próximo destas tecnologias de obtenção de água, uma vez que o combate às alterações climáticas exige a substituição progressiva dos combustíveis fósseis, que contribuem para o aquecimento global. A destilação solar recorre ao apoio de colectores solares para induzir a evaporação hídrica. A fraca rentabilidade e o acondicionamento climatérico são os maiores obstáculos deste processo. No entanto, os colectores podem ser utilizados em dois dos processos já mencionados, a destilação “flash” e “multi-efeito”, proporcionando assim uma diminuição nos custos operativos.

A grande referência em centrais solares é a Planta Solar de Almeria, em Espanha. Uma das suas funcionalidades reside, precisamente, na dessalinização. Combina o processo de destilação por multi-efeito com a energia solar. Tem capacidade para 3 m³/h e um consumo de 190 kWh (PS, 2005). Também a osmose inversa pode ser acoplada a painéis fotovoltaicos ou qualquer outro tipo de dispositivos de produção de energia eléctrica, com base em energias renováveis, tais como energia eólica, das ondas, entre outras.

Recentemente, a comunidade científica tem trabalhado intensivamente no acoplamento dos sistemas de dessalinização às tecnologias de energias renováveis, em sistemas robustos e autónomos a nível de custos (Papapetrou *et al.*, 2005). Foram criadas instalações piloto onde se obtiveram resultados encorajadores.

No entanto, os verdadeiros desenvolvimentos tecnológicos e as reduções nos custos só se conseguirão através da competição de mercado, pela implementação em grande escala por todo o mundo.

Na secção seguinte é abordada a questão da sustentabilidade da dessalinização, sendo referidos estudos que reforçam a importância da utilização de energias renováveis na dessalinização, se o objectivo for o de caminhar para a sustentabilidade nesta alternativa de produção de água.

No anexo A2.1 apresenta-se a distribuição da capacidade das centrais que recorrem a renováveis, no mundo.

5.5 A sustentabilidade da dessalinização

5.5.1 Considerações gerais

Os recursos hídricos constituem um elemento chave para o desenvolvimento sustentável. Assim, existe a necessidade de uma análise mais complexa que reflecta a sustentabilidade do processo de dessalinização, tendo em consideração os aspectos ambientais, sociais e económicos.

No sentido de satisfazer as necessidades em água e energia das populações, o desenvolvimento de sistemas de produção de energia e dessalinização devem assumir o paradigma da Ecologia Industrial (EI). A EI dispõe de inúmeras ferramentas, tais como a ACV (Análise de Ciclo de Vida), AFM (Análise de Fluxo de Materiais), entre outras.

A EI pode ser definida como a ecologia de uma sociedade industrializada que pretende compreender a interacção entre os sistemas industriais, ecológicos e as necessidades sociais. O fluxo de materiais e energia gerado pela produção humana e consumo são traçados, assim como a economia e as consequências ecológicas são caracterizadas. Pretende-se que as actividades humanas imitem os sistemas biológicos naturais no que diz respeito à sua capacidade de preservação do material e dos recursos.

5.5.2 Estudos de avaliação da sustentabilidade

O estudo *Sustainability assessment of desalination plants for water production* (Afgan *et al.*, 1999) dá particular atenção à avaliação dos diferentes tipos de fontes de energia que são usados nos processos de dessalinização. Os principais tipos de indicadores apresentados para avaliar a sustentabilidade das centrais de dessalinização são as seguintes:

- **Indicadores de recursos.** Fuel - quantidade de fuel por m^3 de água dessalinizada ($\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{m}^3$); Materiais – quantidade de material utilizado na construção da central por m^3 de água dessalinizada ($\text{kg}_{\text{mat}}/\text{m}^3$).
- **Indicadores ambientais.** Compreendem o reflexo dos poluentes ambientais produzidos na central dessalinizadora. Este grupo de indicadores depende fortemente da qualidade do fuel. Neste trabalho consideraram-se 3 gases produzidos pelas centrais: CO_2 - quantidade por m^3 de água dessalinizada, $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3$; SO_2 – quantidade de SO_2 por m^3 de água dessalinizada, $\text{kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3$; e NO_x – quantidade de NO_x por m^3 de água dessalinizada, $\text{kg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$.
- **Indicador económico** é definido como a unidade de custo da água dessalinizada, $\text{US}\$/\text{m}^3$. O custo incluirá o custo de investimento, operação, manutenção e custo do fuel. Uma vez que os dados económicos das centrais individuais são escassos e não são divulgáveis na maior parte dos casos, nesta avaliação utilizou-se apenas a informação disponível publicamente.

Este estudo avalia as seguintes opções de dessalinização:

Opção 1. Central de dessalinização MSF - *single purpose*

Opção 2. Central de dessalinização MSF - *dual purpose*

Opção 3. OI com electricidade da rede local

Opção 4. OI com painéis fotovoltaicos para produção de electricidade

Em anexo apresentam-se os quadros A3.1, A3.2, A3.3 e A3.4, com os valores dos indicadores de sustentabilidade para cada uma das opções consideradas neste estudo. O quadro 7 resume todos esses indicadores de sustentabilidade para cada opção considerada.

Quadro 7 – Resumo dos valores dos indicadores de sustentabilidade para cada opção considerada (Afgan *et al.*, 1999)

Opção	Indicador de recurso (kg/m ³)	Indicador ambiental (kg/m ³)	Indicador económico (Custo/m ³)
1	11,23	37	2,66
2	6,97	21,16	1,47
3	1,88	–	0,66
4	0	0	2,42
Max	0,15	0,47	16
Min	0,002	0,005	4,4
Diferença Max–Min	0,15	0,46	11,6

As tecnologias de dessalinização requerem um consumo de energia elevado. Consequentemente, a carga ambiental associada com a fase de operação é muito mais elevada (mais de 90%) do que a carga associada à construção da central, à manutenção e à eliminação final.

O estudo de Raluy *et al.* (2004) faz uma ACV das tecnologias mais comuns de dessalinização – MSF, MED e OI – quando integradas em sistemas de produção de energia, tendo também em consideração a origem e as fontes da energia usadas. O *software* SimaPro 5.0, desenvolvido por consultores holandeses da *PRé*, foi usado como a ferramenta para a ACV.

A unidade funcional desta análise consiste na produção média de 45 500 m³/dia durante a operação de 8 000 horas/ano. O período de amortização considerado para as centrais de dessalinização corresponde a 25 anos, tendo em consideração que a substituição de membranas, na Osmose Inversa, é realizada de 5 em 5 anos.

Nesta ACV dos processos de dessalinização foram considerados os seguintes aspectos:

- Os dados utilizados relativos ao equipamento e materiais envolvidos na construção de uma central, assim como o seu transporte e manufactura foram retirados de centrais em operação.
- Operação e manutenção de centrais de dessalinização.
- Desmantelamento e fim de vida (sem considerar reutilização) das centrais.
- Cumprimento dos requisitos legais da qualidade da água para consumo humano, estabelecida pela Directiva Europeia 98/83/CEE, assim como a OMS (Organização Mundial de Saúde). A água dessalinizada pode ser utilizada na agricultura e na maioria das aplicações industriais, sem ser necessário efectuar tratamento adicional.
- O consumo de energia considerado foi o seguinte: 333 kJ/m³ para energia térmica e 4 kWh/m³ para o bombeamento de água, no caso da tecnologia de MSF; 263 kJ/m³ de calor

e 2 kWh/m³ para a bombagem de água no caso da tecnologia de MED e cerca de 4 kWh/m³ para as centrais de Osmose Inversa.

Uma vez que as emissões atmosféricas constituem o principal impacto das tecnologias de dessalinização, a ACV foca em detalhe estes aspectos como se mostra de seguida. As emissões estão associadas ao ciclo de vida das diferentes tecnologias de dessalinização, incluindo: captação de recursos, manufactura do processo e energia consumida.

O quadro 8 diz respeito às emissões associadas às tecnologias de dessalinização, em ACV, sem estarem integradas em sistemas de produção de energia.

É de referir que a electricidade consumida pelas tecnologias consideradas corresponde ao **cenário de produção da média europeia**, ou seja, 43,3% de origem térmica, 40,3% de origem nuclear e 16,4% de origem hidroelétrica.

Verifica-se que o consumo de energia primária é mais elevado nas centrais MSF do que nas centrais de MED. A OI, por outro lado, consome 5 vezes menos que a tecnologia de MED. Actualmente a OI utiliza 4 kWh/m³ e mesmo assim constitui a tecnologia menos poluente a nível de emissões atmosféricas.

Quadro 8 – Emissões atmosféricas associadas às tecnologias de dessalinização em ACV (Raluy *et al.*, 2004)

Poluente atmosférico	MSF	MED	OI (4 kWh/m ³)	OI (3 kWh/m ³)	OI (2 kWh/m ³)
kg CO ₂ /m ³ água produzida	23,41	18,05	1,78	1,73	1,20
kg NO _x /m ³ água produzida	28,30	21,43	4,05	3,92	2,74
kg NMVOC/m ³ água produzida	8,20	6,10	1,15	0,76	0,52
kg SO _x /m ³ água produzida	28,1	26,31	11,13	11,86	9,08

Nota:

NMVOC – compostos orgânicos voláteis exclusivé o metano

O quadro 9 diz respeito às emissões atmosféricas, em termos de ACV, das diferentes tecnologias de dessalinização, quando integradas em diferentes sistemas de produção de energia. Neste quadro 9 apresentam-se vários modelos associados à realidade dos países. Em Espanha, 50% da produção de electricidade depende de centrais térmicas, enquanto que França é o país em que existe um domínio da produção nuclear. O terceiro modelo analisa o efeito massivo do uso de energias renováveis, em que se seleccionou o caso do modelo de produção Norueguês. Finalmente, foi analisado o que aconteceria no caso em que a produção de electricidade assentasse basicamente na queima de combustíveis fósseis, que constitui o caso de Portugal.

Através deste estudo pode-se concluir que a OI é mais eficiente do que MSF e MED, e o seu consumo energético é aproximadamente 5 a 6 vezes inferior do que as tecnologias térmicas. Uma vez que o processo de dessalinização é intensivo energeticamente, a carga ambiental associada à etapa de operação é muito superior – 88.6% a 99% - do que as etapas de construção e fim de vida (1% a 11.4%). No entanto, este estudo demonstra que a carga ambiental dos processos de dessalinização, devidamente integrados em sistemas de produção de energia, pode ser consideravelmente reduzida. Nomeadamente, no caso da destilação térmica (MSF e MED), a redução da sua respectiva carga ambiental corresponde a 75%, quando se opera numa central híbrida (OI e destilação) baseada em ciclo combinado. A redução é ainda superior quando as centrais de destilação térmica estão integradas em processos industriais e aproveita-se o calor residual dos

processos – neste caso a carga ambiental iguala a OI, que constitui a tecnologia com menor carga ambiental. Também a OI pode reduzir a sua carga ambiental, em 35%, dependendo da origem da energia eléctrica usada: co-geração, motor de combustão interna ou ciclo combinado. Se se utilizar electricidade baseada essencialmente em energias renováveis, como constitui o caso Norueguês, a redução pode ascender aos 80% a 85%. É de referir que se prevê uma redução no consumo de energia na OI, nos próximos 10 anos, de 40%.

Quadro 9 – Emissões atmosféricas em avaliação de ciclo de vida das tecnologias, em diferentes modelos de produção de electricidade (Raluy *et al.*, 2004)

Modelo	Tecnologia	kg CO ₂ /m ³ água produzida	kg NO _x /m ³ água produzida	kg NMVOC/m ³ água produzida	kg SO _x /m ³ água produzida
Europeu	MSF	1,98	4,27	1,22	14,79
	MED	1,11	2,42	0,59	16,11
	OI	1,78	3,87	1,1	10,68
Espanhol	MSF	2,37	5,32	1,11	16,87
	MED	1,31	2,93	0,54	17,14
	OI	2,18	4,88	0,99	12,73
Francês	MSF	0,71	1,69	0,41	7,92
	MED	0,48	1,21	0,18	12,68
	OI	0,51	1,28	0,29	3,71
Norueguês	MSF	0,28	0,64	0,17	5,86
	MED	0,27	0,6	0,07	11,66
	OI	0,08	0,23	0,06	1,73
Português	MSF	3,27	7,76	4,09	27,52
	MED	1,76	4,16	2,02	22,7
	OI	3,08	7,32	3,97	23,81

Assim, dos resultados obtidos neste estudo, conclui-se que as tecnologias de dessalinização apresentam um grande potencial de redução das suas cargas ambientais, particularmente quando apropriadamente integradas em sistemas de produção de energia (Raluy *et al.*, 2004).

5.5.3 Exemplo de solução sustentável

No Brasil, investigadores da Embrapa (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) e do Ministério do Meio Ambiente estão envolvidos num projecto intitulado “Sistema Integrado de Reuso de Rejeitos da Dessalinização por Osmose Inversa”, que se iniciou em 26 Fevereiro de 2006. O projecto tem como principal objectivo criar um sistema de actividades produtivas e geradoras de rendimento que utilizem as águas residuais concentradas em sais, resultantes do processo de dessalinização. A deposição, deste concentrado em sais, no solo, como tem sido comum nas comunidades nordestinas onde estão instalados equipamentos de dessalinização, contamina as águas subterrâneas, para além do próprio solo.

O projecto avalia o uso do concentrado na criação de tilápia rosa, espécie de peixes, e do camarão branco do Pacífico. A piscicultura de água salobra pode vir a melhorar as condições de vida de regiões semi-áridas, através de uma nova fonte de rendimento pela sua comercialização e representa uma nova fonte de proteína animal de alta qualidade para as comunidades. Depois de o peixe ter crescido (aproximadamente 3 meses) a água fica com grande quantidade de nutrientes (restos de ração e excremento dos peixes) e é usada para irrigação de plantas que toleram elevadas

concentrações de sal (halófitas) – a chamada “erva-sal”. Esta erva pode ser usada para alimentação de ovinos e caprinos uma vez que possui boa qualidade nutricional. A tecnologia constitui assim um exemplo de sustentabilidade e de produtividade num clima semi-árido.

O sistema é assim formado por cinco componentes: produção de água potável, redução do impacto ambiental, produção de peixe, produção de forragem irrigada e engorda de caprinos e bovinos com o feno da erva-sal. É de referir que o sistema é viável economicamente, contudo, o lucro não é o ponto mais importante neste sistema, pois há um ganho muito mais importante quando se reduz o impacto gerado pela deposição do concentrado da dessalinização no solo. Este exemplo constitui uma verdadeira alternativa em pequenas comunidades de clima semi-árido (Embrapa, 2006).

6. Aspectos económicos

6.1 Principais componentes de custo

O custo da dessalinização tem vindo a diminuir nos últimos 20 anos mas, no entanto, pode-se dizer que este processo ainda constitui uma alternativa dispendiosa de obtenção de água (Cooley *et al.*, 2006).

Na planificação de um projecto de dessalinização, seja de água do mar ou salobra, devem ser tidos em consideração os seguintes componentes de custo: captação da água; requisitos do pré-tratamento; custo energético em €/kWh; custos de implantação da central; custos na distribuição e na descarga dos efluentes; armazenamento de água; custos de mão-de-obra; taxa de juro e amortização, taxa de retorno de investimento.

As figuras 14 e 15 mostram a distribuição dos custos da dessalinização de água do mar, por osmose inversa e processo térmico, respectivamente.

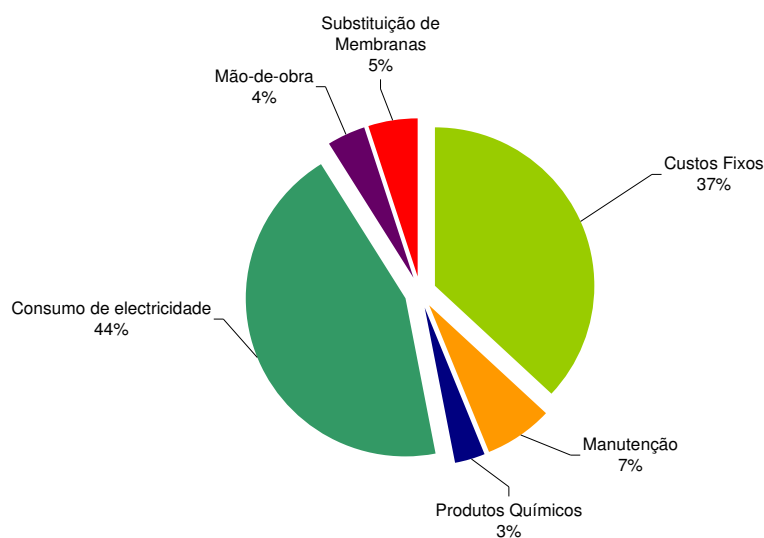


Figura 14 – Distribuição típica dos custos da dessalinização de água do mar por osmose inversa (Semiat, 2000)

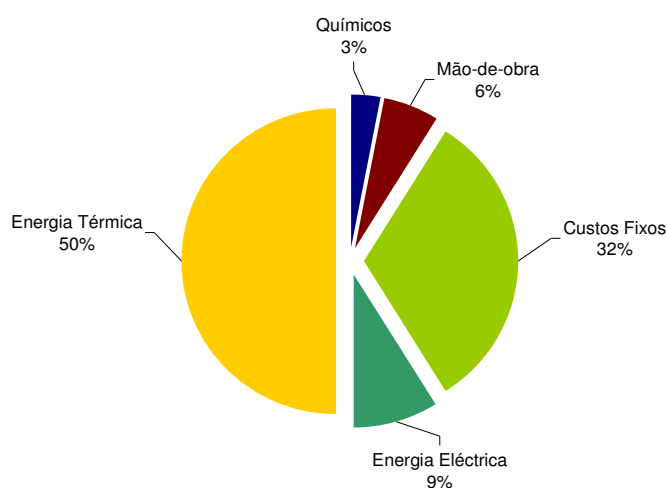


Figura 15 – Distribuição típica dos custos de uma central térmica de dessalinização de água do mar (Wangnick, 2002)

Uma vez não foi possível dispor dos custos da central de dessalinização de Porto Santo, serão apresentados os custos a nível internacional. Os estudos mais fiáveis apresentam os custos em dólares (US \$/m³) ou em pesetas (ptas/m³), por metro cúbico de água produzida⁸ (ESCWA, 2001).

Os custos de investimento e de operação diminuem com o aumento da capacidade de produção da instalação, sendo que os limites superiores para a produção são: 11 000 m³/dia, e 19 000 m³/dia, respectivamente, para a água salobra e para água do mar. Para além destes limites, só se consegue uma redução de custos com um aumento da dimensão da central. É de referir que o aumento da dimensão da central tem maior impacto na redução de custos no caso das tecnologias térmicas.

O **seguro** associado à central situa-se normalmente à volta dos 0,5% de todo o capital de investimento. No que diz respeito à **amortização**, a experiência indica que a amortização em 30 anos é a mais adequada. A **taxa de juro** é, geralmente, em média, 5% (ESCWA, 2001).

6.2 Estimativas de custos

No quadro 10, 11 e 12 apresentam-se estimativas de custos para as tecnologias MSF, MED e OI, respectivamente.

O custo de unidade de produção das centrais de osmose inversa depende grandemente da capacidade de produção da central. Por exemplo, uma unidade dos EUA, na Florida, com capacidade para produzir mais de 113 600 m³/dia, apresenta um custo unitário de 0,42 €/m³, enquanto que, por exemplo no Chipre, existem custos unitários de 0,64 e 0,94 €/m³ para unidades com capacidades de 40 000 e 20 000 m³/dia, respectivamente.

Quadro 10 – Estimativa de custos para uma central MSF com capacidade de 100 000 m³/dia (Van der Mast e May, 1994)

Tipo de custo	Custo (milhares de €)	Percentagem do custo anual total
Capital	146 154	
Custos Fixos	18 693	47,8%
Energia: extracção de vapor	10 414	
Energia: electricidade	4 264	
Energia - Total	14 754	37,6%
Químicos: cloro	32	
Químicos: anti-espuma	5	
Químicos: inibidor de precipitação	1 067	
Outros químicos	803	
Químicos - Total	1 908	4,9%
Mão-de-obra	862	2,2%
Equipamentos extra	2 923	7,5%
Custo anual total	39 067	100%
Custo do produto (€/m ³)		1,19

⁸ Os custos apresentados foram convertidos para euros segundo as seguintes taxas de conversão:

1€ = 1,3 US\$

1€ = 166,386 ptas

Quadro 11 – Estimativa de custos para uma central MED com capacidade de 100 000 m³/dia (Van der Mast e May, 1994)

Tipo de custo	Custo (milhares de €)	Percentagem do custo anual total
Capital	138 462	
Custos Fixos	17 709	44,9%
Energia: extracção de vapor	14 486	
Energia: electricidade	1 695	
Energia – Total	16 182	41,0%
Químicos: cloro	32	
Químicos: anti-espuma	5	
Químicos: inibidor de precipitação	1 067	
Outros químicos	803	
Químicos – Total	1 908	4,8%
Mão-de-obra	865	2,2%
Equipamentos extra	2 769	7,0%
Custo anual total	39 433	100%
Custo do produto (€/m ³)		1,02

Quadro 12 – Estimativa de custos para uma central OI com capacidade de 100 000 m³/dia (Van der Mast e May, 1994)

Tipo de custo	Custo (milhares de €)	Percentagem do custo anual total
Capital	130 769	
Custos Fixos	16 725	53%
Energia: electricidade	5 487	18%
Químicos: cloro	32	
Químicos: coagulante	98	
Químicos: polímero	61	
Químicos: bisulfato de sódio	171	
Químicos: inibidor de precipitação	1 220	
Químicos: ácido sulfúrico	128	
Químicos Pós-tratamento	803	
Químicos - Total	2 512	8%
Membranas	3 134	10%
Mão-de-obra	865	3%
Equipamentos extra	2 615	8%
Custo anual total	31 339	100%
Custo do produto (€/m ³)		0,95

Verifica-se que variações na capacidade de uma central afecta o investimento inicial e os custos de operação. Em geral, as centrais de MSF são preferíveis a partir de produções acima dos 25 000 m³/dia. O processo MED é aconselhável para capacidade da ordem dos 10 000 m³/dia.

6.3 Custo da dessalinização em Espanha

Valero *et al.* (2001) apresentam os valores associados às várias parcelas de custo no caso espanhol. Os custos com o consumo da electricidade são os apresentados no quadro 13. No quadro A4.1, em anexo, apresenta-se a variação dos custos de duas tecnologias de destilação com o tipo de combustível.

Quadro 13 – Custo do consumo energético por tecnologia (Valero *et al.*, 2001)

Tecnologia	Consumo específico (kWh/m ³)	Custo (€/m ³)
MSF	3,5 – 4,0	0,13 – 0,14
MED–CTV	1,5 – 2,0	0,05 – 0,07
CMV	9 – 11	0,43 – 0,53
OI	7 – 10	0,13 – 0,27

No que diz respeito ao custo com o pessoal e manutenção, a dimensão da central pode ser crucial no momento de calcular este tipo de custos. Quando a instalação possui uma capacidade considerável ($> 30\,000\text{ m}^3/\text{dia}$) são necessárias, no mínimo, 20 pessoas para a sua gestão e manutenção, que permita uma produção contínua. O custo médio associado ao pessoal e manutenção de uma central pode estimar-se em $0,05\text{--}0,10\text{ €/m}^3$ (Valero *et al.*, 2001). No quadro A4.2, em anexo, apresenta-se a variação destes custos de manutenção e mão-de-obra para tecnologias de destilação.

Em relação aos produtos químicos, o custo repercutível na água dessalinizada pode atingir os $0,02\text{--}0,05\text{ €/m}^3$, tendo em conta a grande influência da qualidade da água bruta. Geralmente, as pequenas instalações não necessitam um pré-tratamento e pós-tratamento tão complexo, pelo que o custo deve ser proporcional à dimensão da central. Em anexo, no quadro A4.4 apresentam-se os produtos químicos geralmente utilizados numa central de dessalinização e no quadro A4.2, apresentam-se os custos com produtos químicos nas centrais de destilação.

Tendo como critério de amortização de 20 anos e uma taxa de juro de 5%, os custos finais da água dessalinizada variam entre **$0,38$ a $0,78\text{ €/m}^3$** , numa central de dessalinização. No quadro A4.3, em anexo, apresenta-se a percentagem de retorno de investimento total e o período de amortização do equipamento de uma central de dessalinização de água do mar.

O quadro 14 resume os custos por m^3 da dessalinização de água do mar e salobra em Espanha, por cada método.

Quadro 14 – Resumo dos custos de dessalinizar em Espanha (Valero *et al.*, 2001)

Água	Método	Custo (€/m^3)
Mar	MSF	$0,73\text{--}1,07$
	MED-CTV	$0,51\text{--}0,70$
	CV	$0,78\text{--}1,05$
	OI	$0,38\text{--}0,78$
Salobra	OI	$0,17\text{--}0,36$
	ED	$0,19\text{--}0,35$

É de referir que a implementação de centrais híbridas, em que existe produção de energia eléctrica, calor e dessalinizadoras, o calor produzido, seja através do gás rejeitado ou gases quentes pode ser utilizado na dessalinização térmica, enquanto que a electricidade gerada pode servir unidades de osmose inversa. Esta instalação dedicada produz electricidade a custos mais reduzidos e o custo total de produção de água seria reduzido significativamente como já foi referido anteriormente.

No quadro 15 apresenta-se uma estimativa de custos para Espanha, de acordo com a capacidade da central.

Quadro 15 – Custo de produção, em €/m³, de quatro tecnologias, para quatro tipos de centrais (Moya, 1998b)

Tecnologia	Custo de produção de água (€/m³)	Dimensão da instalação (m³/dia)
OI com painéis fotovoltaicos	4.51	100
MED solar	2.70	
MED convencional	2.43	
OI convencional	2.01	
OI com painéis fotovoltaicos	3.43	500
MED solar	2.03	
MED convencional	1.79	
OI convencional	1.68	
OI com painéis fotovoltaicos	3.25	1000
MED solar	1.82	
MED convencional	1.65	
OI convencional	1.50	
OI com painéis fotovoltaicos	2.73	5000
MED solar	1.51	
MED convencional	1.44	
OI convencional	1.23	

No quadro 15 pode-se comparar os custos de dessalinização por OI e MED convencionais e OI e MED com base em energia solar. Verifica-se que à medida que a dimensão da instalação aumenta (aumento do caudal produzido), mais barata é a tecnologia, em todos os casos. O processo que apresenta menor custo de produção é OI convencional, seja qual for a dimensão da instalação. Por outro lado, a OI com painéis fotovoltaicos constitui a tecnologia mais dispendiosa.

7. Aspectos sociais

7.1 Enquadramento

A dessalinização coloca uma questão importante a nível socio-económico: à medida que a população mundial cresce, a oferta de recursos de água potável *per capita* vai diminuindo e as tecnologias de dessalinização podem ir de encontro apenas à necessidade normal ou, antes pelo contrário, podem promover o consumo irracional de água, em prol apenas do crescimento económico, ou seja, alguma “ganância”, ignorando outras medidas de conservação da água e uma eficiente gestão dos recursos hídricos. Pode-se dizer que existe um grande contraste entre situações em que a dessalinização serve para satisfazer necessidades básicas e situações em que a dessalinização resolve, em larga maioria, as necessidades de água sociais e construídas. As necessidades não devem ser confundidas com caprichos/luxos que são definidos pela cultura e personalidade individual. O exemplo de jardins luxuriantes e a abundância de piscinas num clima mediterrâneo podem ser considerados verdadeiros luxos – “*water luxuries*” (WD, 2006). Em países com um clima seco dever-se-ia apostar menos em espécies exóticas consumidoras de água, por exemplo, e mais na vegetação autóctone, que tem menor consumo de água estando adaptada ao clima local. Contudo, a dessalinização de água torna ainda mais atraente a aposta neste tipo de desenvolvimento social e económico, baseado no consumo descontrolado de água.

Pode-se dizer que a intensidade energética necessária desta tecnologia torna questionável o uso da água ao serviço do turismo. Verifica-se muitas vezes que o património tradicional da água, a memória cultural e social, estão a ser negligenciados, enquanto a degradação ambiental e a sustentação de necessidades supérfluas e luxuosas imperam. Na realidade, em países ou regiões, com uma história rica em costumes de poupança de água, a implementação da dessalinização pode contribuir para a anulação dos bons hábitos de gestão da água (WD, 2006). Assim, coloca-se a questão se não se estará, com a proliferação da implementação de dessalinização, a abrir uma nova fronteira para uso de água. Por outro lado, há que ter em conta que, quando a oferta de água potável é inferior à procura, o desenvolvimento económico não deve ser restringido, afectando a componente social, mas antes deve ser feita uma aposta na obtenção de novas fontes de água, em consonância com um modelo de desenvolvimento sustentável.

A problemática da dessalinização ao nível social deve ser assim a de discutir a sustentabilidade da dessalinização, enquanto uma solução para combater a escassez de água, focando a socio-economia, a componente ambiental e cultural desta tecnologia. E é a tentativa de atingir a sustentabilidade o que mais contribui para a aceitabilidade dos projectos de dessalinização, por parte da sociedade.

7.2 Aceitabilidade social dos projectos de dessalinização

A aceitabilidade social dos projectos passa essencialmente pelos seguintes factores: criação de emprego, desenvolvimento da região e preservação do ambiente. A criação de emprego é garantida, sendo que o número de trabalhadores será proporcional à dimensão da central. A origem de uma nova fonte de água está inevitavelmente associada ao desenvolvimento, que se quer sustentável, a

nível ambiental, social e ambiental. A protecção do ambiente constitui uma condição necessária para que o projecto avance, sendo que é sobre este último aspecto que a análise irá recair, pela importância que este assume na aceitabilidade social.

O desenvolvimento de projectos de dessalinização ambientalmente aceitáveis origina os seguintes benefícios: conformidade com a política de ambiente da empresa; conformidade com as indicações da agência financiadora; protecção do ambiente; minimização do tempo de aprovação do projecto (licença); minimização do tempo de construção (Mahi, 2001).

Os projectos devem assim estar de acordo com o desenvolvimento sustentável, beneficiando a componente ambiental, social e económica. No Reino Unido, o governo monitoriza alguns indicadores do desenvolvimento sustentável e que são relacionados com os seguintes objectivos: manutenção de níveis de crescimento económico e emprego elevados e estáveis; protecção efectiva do ambiente; uso prudente dos recursos naturais; progresso social reconhecendo as necessidades de todos.

Estes aspectos devem ser considerados logo numa fase de estudo prévio, por exemplo aquando da selecção do local. A população, num processo de AIA (Avaliação de Impacto Ambiental) deve exercer o seu direito cívico de participação pública no processo. Esta fase do processo de AIA está consagrada na lei e garante à população a sua expressão de opinião, de forma a tornar socialmente mais aceitável o projecto.

Em Portugal, a dessalinização tem vindo cada vez mais a ser abordada pela opinião pública. A comparência no 17º Encontro Nacional das Associações de Defesa do Ambiente (ADA)/Organizações Não Governamentais de Ambiente (ONGA), onde foi abordado o tema da dessalinização de águas, assim como na Conferência Internacional sobre Alterações Climáticas, no dia 10 de Outubro de 2006, na Assembleia da República, permitiu a conclusão de que é notória a aceitabilidade em relação a projectos de dessalinização que recorrem a energias renováveis.

7.3 Percepção do público em relação à água dessalinizada vs água reutilizada

Actualmente, o tratamento das águas residuais permite obter água potável, no entanto, o conceito de ingerir água residual tratada não é incondicionalmente aceite pela opinião pública. Na verdade, a sociedade rejeita frequentemente esta forma de reciclagem da água, à qual se atribui em grande parte ao muitas vezes designado “*Yuck factor*”. No sentido de evitar a não-aceitação por parte da população, alguns países estão a considerar a hipótese de implementar a dessalinização.

Um trabalho desenvolvido na Austrália, *Public perception of desalinated versus recycled water in Australia* (Dolnicar, 2006), é de extrema importância face à ausência de estudos nesta temática da percepção pública relativamente à dessalinização. No entanto, o objectivo principal é avaliar a percepção da sociedade australiana em relação à reutilização de água e dessalinização, comparando a sua aceitabilidade social.

Uma vez que não estão disponíveis estudos desta natureza, apresenta-se este estudo realizado na Austrália, um país que, tal como Portugal continental, ainda não tem implementado o processo de dessalinização, estando previsto o funcionamento da primeira central, em Perth, no ano de 2007.

Este estudo demonstrou que os três principais problemas que preocupam os inquiridos são: saúde pública, ambiente e custo económico.

Da figura 16, conclui-se que 69% dos inquiridos acreditam que a água dessalinizada é saudável, opondo-se a apenas 45% que defende a água reutilizada como saudável. Tendo em conta todas as perguntas relacionadas com a saúde pública, os inquiridos consideram a dessalinização de água como a alternativa mais segura. Há ainda que realçar que existe algum desconhecimento em relação a alguns aspectos, como por exemplo o facto de 24% dos inquiridos considerar que a água dessalinizada resulta da purificação das águas residuais. Este estudo concluiu que a população apresenta maiores reservas em relação à água reutilizada, sendo que 79% dos inquiridos considera a água dessalinizada como potável – apenas metade destes inquiridos considera a água reutilizada potável. Também em relação à água reutilizada, 61% dos inquiridos tem preocupações a nível de saúde pública – face aos 33% que têm essas mesmas preocupações em relação à dessalinização. A água reutilizada é vista como tendo maiores quantidades de químicos, tais como desinfectantes ou microrganismos. A única desvantagem que é reconhecida à dessalinização é o seu elevado custo. Estes resultados colocam a hipótese de que os níveis de aceitabilidade da água reutilizada são inferiores aos da água dessalinizada. No sentido de analisar esta hipótese foram feitas perguntas no que diz respeito à probabilidade de uso.

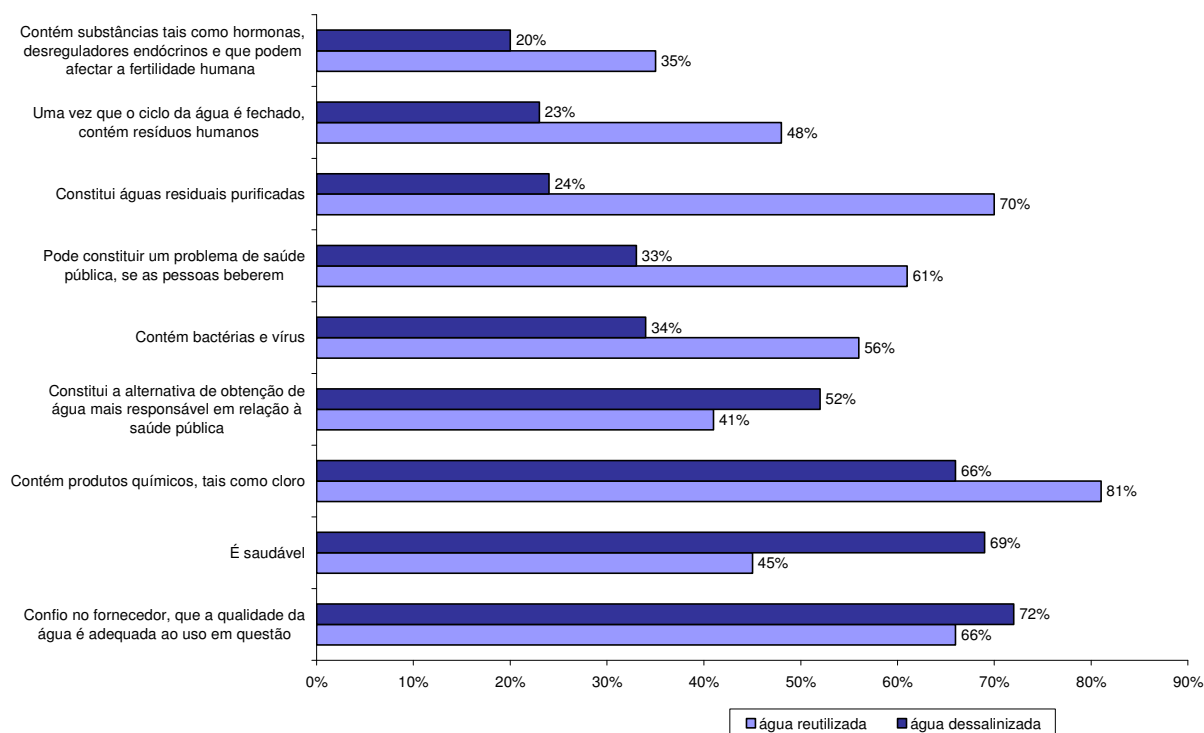


Figura 16 – Questões de saúde pública – comparação de percepções entre os dois tipos de águas (Dolnicar, 2006)

Analisando a percentagem de inquiridos que indicam uma probabilidade de uso para cada tipo de uso da água, verifica-se que a água dessalinizada não apresenta maior aceitabilidade do que a água reutilizada. Para todos os usos que envolvam o contacto com o corpo, a água dessalinizada é preferível a ser utilizada por uma grande porção da população. Para usos que não envolvam o contacto com o corpo, tais como, rega de jardins, lavagem de roupa, dos carros, a água reutilizada é

escolhida. A qualidade da água dessalinizada (elevada) não justifica a sua utilização para este tipo de usos.

Conclui-se assim que a população australiana distingue claramente os processos de reutilização e dessalinização. Os resultados não permitem que se conclua se existe uma preferência em relação a qualquer das duas alternativas de obtenção de água.

8. Análise SWOT da dessalinização

A análise SWOT é uma forma muito difundida de fazer o diagnóstico de uma empresa ou actividade. As siglas constituem os elementos-chave desta análise estratégica: pontos fortes (*Strengths*), pontos fracos (*Weaknesses*), oportunidades (*Opportunities*) e ameaças (*Threats*).

Depois de analisada a dessalinização a vários níveis é apresentada esta análise SWOT (quadro 16), como forma de sistematização da revisão bibliográfica. A análise SWOT realizada à dessalinização apresenta assim: forças – vantagens em relação a outras tecnologias; fraquezas – desvantagens em relação a outras tecnologias; oportunidades – aspectos positivos com potencial de melhoria das tecnologias e ameaças – aspectos negativos com potencial para comprometer a utilização das tecnologias de dessalinização.

Quadro 16 – Síntese da análise SWOT

Pontos fortes	Pontos fracos
▪ Fonte ilimitada de água (em zonas costeiras) ▪ Menor risco associado à qualidade da água ▪ Menor salinidade das águas residuais ▪ Menor gasto com a adução de água (abastecimento de aglomerados populacionais costeiros) ▪ Satisfação da procura de água, mesmo em período de seca ▪ Redução verificada nos custos de produção ▪ Adaptação a variações sazonais do consumo	▪ Processo ainda dispendioso ▪ Impactos ambientais associados ▪ Consumo intensivo de energia ▪ Necessidade de pós-tratamento (risco de saúde pública no caso de ingestão de água desmineralizada)
Oportunidades	Ameaças
▪ Aumento dos preços da água obtida através de fontes tradicionais ▪ Aumento do mercado da dessalinização ▪ Uso de energias renováveis ▪ Investigação associada a maior eficiência e redução de custos ▪ Grandes investimentos em centrais com menores impactos ambientais ▪ Existência de aplicações sustentáveis ▪ Possibilidade de funcionamento da central apenas em períodos de escassez de água ou de aumento/variação do caudal produzido	▪ Contribuição para o aquecimento global ▪ Preços elevados da água que inviabilizam o projecto ▪ Dificuldades colocadas ao sector privado, na implementação de centrais de dessalinização

PONTOS FORTES

- Nova fonte de água ilimitada – água do mar ou salobra, particularmente em zonas costeiras.
- Melhoramento da qualidade da água. A água dessalinizada apresenta menor risco de conter poluentes, materiais cancerígenos, materiais orgânicos, vírus, assim como, cor, cheiro ou sabor.
- Redução da salinidade das águas residuais tratadas. O que implica um menor tratamento na ETAR e maior potencial de reutilização destas mesmas águas residuais tratadas.
- Menor gasto com as tubagens de adução e distribuição de água, uma vez que a maior parte dos aglomerados populacionais se encontram nas zonas costeiras. No caso de Portugal Continental, esta assimetria de população é bem evidente, sendo que muitas vezes as distâncias da rede podem atingir as centenas de quilómetros. Desta forma, a dessalinização

permitiria que a água das zonas de captação superficial e subterrânea ficasse mais disponível para regiões do interior do país.

- Satisfação da sociedade pela maior disponibilidade de uso de água, mesmo em tempo de seca extrema.
- Declínio verificado nos custos de produção. Estudos de empresas espanholas e norte-americanas referem que o custo de produzir 1 m³ de água dessalinizada ronda os 0,40 a 0,45€, valores que se encontram muito longe dos preços para o consumidor que eram praticados em 1970 e em 1980, respectivamente 2,10 €/m³ e 1,80 €/m³. No caso concreto do estudo encomendado para a AdAlg, a empresa consultora *Ambio, S. A.* aponta para um custo de produção médio de 0,45 €/m³ de água dessalinizada, valor muito próximo do custo actual de captação de água em alta, que ascende aos 0,37 €/m³ (Ambienteonline, 2005).

PONTOS FRACOS

- Ainda constitui um processo dispendioso principalmente para países que dependem da importação de combustíveis fósseis para produção de electricidade, o que encarece o preço da electricidade. E ainda países que não possuem capacidade económica para grandes investimentos iniciais em centrais de grande escala, não beneficiando da “economia de escala” que diminui o custo de produção, também encontram dificuldades na implementação desta tecnologia.
- Impactos ambientais associados à descarga da salmoura e à operação do processo.
- Processo de energia intensiva que pode contribuir para as alterações climáticas.
- Risco de saúde pública associados à ingestão prolongada de água desmineralizada, ou seja, é necessário garantir o pós-tratamento adequado. No entanto, este pós-tratamento é simples e tem custos razoáveis.

OPORTUNIDADES

- Inovações na indústria da dessalinização têm vindo a reduzir o custo de produção de água, enquanto que os custos de captar e tratar águas superficiais aumentaram em várias regiões, como resultado da deterioração da qualidade das águas ou de maiores exigências de tratamento.
- O mercado da dessalinização tem vindo a aumentar, prevê-se que ronde os 70 biliões de US\$ num horizonte de 20 anos. Tal constitui uma oportunidade de redução de custos dos equipamentos e tecnologias à medida que vão sendo mais utilizadas mundialmente (Wolf, 2003).
- O uso de energias renováveis nos processos de dessalinização constitui uma verdadeira alternativa sustentável, que resolve os problemas do consumo energético de combustíveis fósseis – que acarretam custos elevados a nível ambiental e monetário.
- Os mecanismos de transferência de água e rejeição de sais nas membranas da osmose inversa ainda não são completamente compreendidos. Uma melhor compreensão a nível

molecular originará um desenvolvimento a nível das membranas, potencialmente permitindo uma maior eficiência.

- Grandes investimentos, em todo o mundo, no desenvolvimento de novas tecnologias, permitem obter soluções cada vez mais eficientes energeticamente e com menos impactos ambientais, tais como centrais triplamente híbridas.
- É possível, a pequena escala, o aproveitamento sustentável das águas residuais salinizadas – caso exemplar brasileiro (ver capítulo 5.5.3).
- Regiões com elevados picos de consumo sazonais (e.g. na época de verão), poderão adoptar a dessalinização como forma de contrariar a escassez de água apenas nestes períodos.

AMEAÇAS

- Contribuição para o aquecimento global, devido ao aumento de emissões de CO₂ equivalente, se a electricidade for gerada em centrais termoeléctricas, que se baseiem na queima de combustíveis fósseis – incumprimento de Quioto e custos avultosos em aquisição de cotas de carbono.
- Preços elevados da água, que podem inviabilizar o processo e gerar contestação da população, devido a incorrecta avaliação da viabilidade da tecnologia de dessalinização.
- Legislação não facilita a utilização por entidades não gestoras de sistemas de abastecimento de água (e.g. grupos hoteleiros) que queiram implementar a tecnologia. A obtenção de licença ainda coloca entraves em Portugal continental – caso do grupo Pestana.

9. Caso de estudo: dessalinização sustentável na região algarvia

9.1 Condições para a implementação de uma central de dessalinização

A dessalinização permite aumentar as reservas de água disponível para consumo sem estar dependente da precipitação ou alterações do clima. No entanto, antes de tomar qualquer decisão no que diz respeito à implementação de uma central de dessalinização há que considerar alguns aspectos que são descritos a seguir.

Na selecção de alternativas para obtenção ou conservação da água, há que ter em conta todas as medidas existentes que possibilitam aumentar a disponibilidade da água, tais como (Tsiourtis, 2001a):

- implementação de medidas de gestão da água, como por exemplo, ao nível da redução das perdas;
- reutilização de águas residuais tratadas;
- desenvolvimento de fontes de água renováveis, tais como a recolha de águas pluviais;
- transferência de água de zonas que possuem excesso de água;
- importação de água de outros países;
- dessalinização de água do mar ou água salobra.

Na sequência das secções anteriores fica evidente que o maior potencial para utilização da dessalinização se verifica quando existe uma verdadeira necessidade de água, atendendo à disponibilidade do recurso e à sua procura. No entanto, vários aspectos devem ser considerados (Tsiourtis, 2001a):

- **existência de falhas periódicas de água**, devidas a períodos de seca, com precipitação mais reduzida do que a média;
- **ocorrência de escassez permanente de água**. Por exemplo, países como o caso do Chipre que apresenta recursos hídricos muito limitados - 1040 m³/capita, vêem na dessalinização uma verdadeira solução;
- **aumento da procura**, que deve ser estudado tendo em conta a disponibilidade de recursos de água e a procura de água a nível doméstico, industrial, agrícola e ambiental;
- **aceitabilidade social** das comunidades afectadas, que constitui um importante requisito, sendo que o projecto não deve afectar as suas perspectivas de desenvolvimento económico e social;
- **localização da central**, que deve estar localizada longe de zonas inabitáveis ou de áreas turísticas; numa costa onde exista boa qualidade de água do mar para ser extraída; perto de uma rede de distribuição de água, de forma ser possível distribuir esta nova água dessalinizada; perto de instalações que necessitem de electricidade e a obtenham a preços razoáveis e ainda perto de acessos rodoviários;
- **gestão dos impactos ambientais**, sendo que o solo, o ar, a água e o ecossistema marinho devem ser protegidos e os impactos negativos devem ser minimizados. Em geral, os principais impactos estão associados ao ecossistema marinho do local onde é feita a

descarga da salmoura, ao ruído e à poluição atmosférica, devido ao aumento das emissões de GEE (gases de efeito de estufa), nas centrais termoeléctricas para produção de electricidade extra;

- **dimensão económica.** Uma vez que a água dessalinizada é mais dispendiosa do que a água convencional, devem ser desenvolvidos estudos no sentido de averiguar se a economia do país/comunidade em questão pode suportar e se os consumidores estariam dispostos a pagar. De um ponto de vista económico, a dessalinização deve ser considerada como uma alternativa viável de obtenção de água, se os efeitos no ambiente, na sociedade e nos custos para a economia, devido a não existir água em volume suficiente para satisfazer a procura a nível doméstico, ambiental e agrícola, forem maiores do que os custos com a dessalinização da água do mar;
- **qualidade da água.** A qualidade da água deve ser equivalente à das *European Standards* para água potável e não corrosiva, com o mínimo de dureza;
- **quadro legislativo.** A legislação portuguesa impõe a obtenção de uma licença ambiental para produção de água dessalinizada.

Neste âmbito, o Algarve apresenta um potencial interessante para a implementação de uma central de dessalinização, sendo que a sua situação, ao nível dos recursos hídricos e abastecimento de água, é analisada na secção seguinte. No entanto, todas as questões acima referidas devem ser tidas em consideração. A avançar a decisão de implementação da central, esta nunca poderia substituir todas as outras fontes de obtenção de água, sob pena de se intensificarem os impactos ambientais associados à dessalinização. A questão que se pretende responder, com recurso à análise de decisão, é se, caso a dessalinização fosse para a frente, como forma de reforço do sistema de abastecimento de água do Algarve, qual seria a alternativa, no que diz respeito à tecnologia a utilizar, mais sustentável, a todos os níveis. É de salientar que a central de dessalinização a ser instalada seria de água do mar, sendo por isso mesmo localizada junto à costa ou mesmo no meio do mar. A figura 17 ilustra uma central localizada perto do mar.



Figura 17 – Instalação de dessalinização Carboneras, em Almeiria. Com capacidade de produção de 120 000 m³/dia (Hidroprojecto, 2005)

9.2 O abastecimento de água na região algarvia – contexto de decisão

A água deixou de constituir, na bacia hidrográfica das ribeiras do Algarve, um recurso abundante e excedentário (PBHRA, 2000). Tal verifica-se pois a região algarvia apresenta acentuada variabilidade pluviométrica anual e caracteriza-se pela ocorrência frequente de períodos de seca⁹, tendo como caso recente de seca no período de 2004-2005 (DO Ó e Monteiro, 2006). A figura 18 mostra a precipitação média mensal, no período de 1941 a 1991, para o mês de Janeiro e o mês de Agosto, em que fica evidente o facto de a região algarvia não apresentar uma média de precipitação favorável neste intervalo de tempo, mesmo no mês mais chuvoso. Por outro lado, há que salientar que existe nesta região, uma distribuição irregular no espaço dos recursos disponíveis conferindo assim à água um carácter de recurso limitante e decisivo para o desenvolvimento.

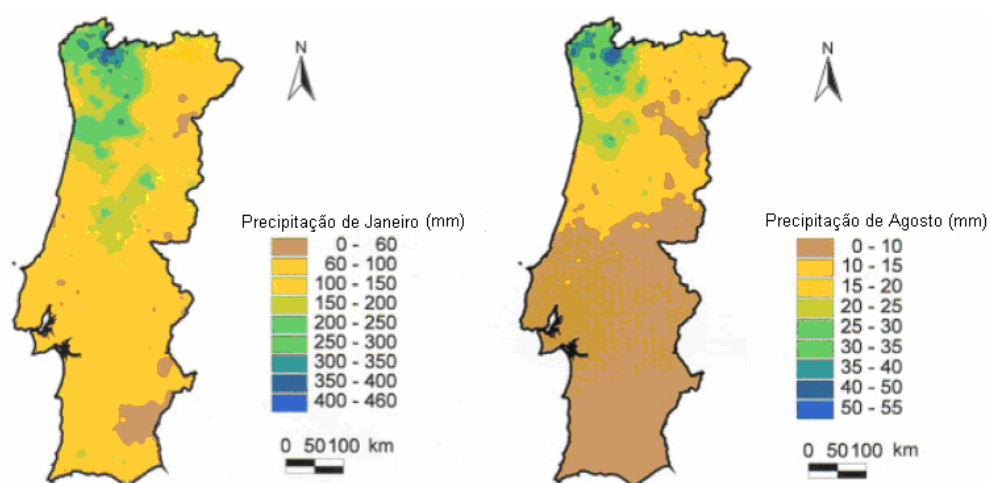


Figura 18 – Média mensal da precipitação observada para um mês chuvoso e um mês seco, no período 1941/42 – 1990/91 (Santos *et al.*, 2002)

O balanço global para a região do Algarve é apresentado no quadro seguinte e constitui uma estimativa da disponibilidade de água e o seu consumo, para os principais sectores: regadio, abastecimento público, indústria e golfe.

Quadro 17 – Balanço estimado entre oferta e procura de água no Algarve em ano médio (DO Ó e Monteiro, 2005)

Oferta	Valor (hm ³)	Procura	Valor (hm ³)
Recarga das albufeiras	170	Extracções para rega	32
		Extracções para abast. público	72
		Extracções para golfe	1
Recarga 17 sist. aquíferos	216	Extracções para rega	48
		Extracções para golfe	14
Recarga aquíferos indiferenciados	—	Extracções para rega	110
Total	386	Total	277

⁹ De acordo com os valores obtidos nos 50 anos hidrológicos analisados, verifica-se que a zona do Barlavento Algarvio é a mais afectada pelas secas meteorológicas (PBHRA, 2000).

As **águas subterrâneas** do Algarve têm tido um papel crucial na região, uma vez que constituem 80% dos consumos de água (PNA, 2002), seja para o abastecimento às populações, às infra-estruturas turísticas, ou para o desenvolvimento de culturas de regadio em muitas áreas. É, no entanto, de referir que a abundância de recursos subterrâneos e a ausência de défices é enganadora uma vez que se tratam de recursos, que embora fisicamente existentes, são de aproveitamento problemático, devido ao elevado custo de exploração e à deficiente qualidade da água em alguns aquíferos.

As formações que dispõem de maiores **recursos hídricos subterrâneos**, quase todas de natureza carbonatada, situam-se numa faixa ocupando parte do Barrocal e Litoral. Todavia, se se excluir o mais importante sistema aquífero, o Querença-Silves, no Barrocal Central e Ocidental, os recursos hídricos subterrâneos são relativamente escassos, pois muitos dos sistemas aquíferos, pelas suas modestas dimensões, são afectados por períodos de seca, podendo verificar-se situações de sobre-exploração temporária. Além disso, é de referir a deficiente qualidade da maior parte da água subterrânea, em especial nos aquíferos que se situam mais perto do litoral. Assim, apesar de possuírem potencial de exceder as necessidades de consumo, os recursos hídricos subterrâneos apresentam, em termos globais, fortes assimetrias na distribuição dos mesmos e na distribuição populacional, existindo áreas com carências, ou com escassa margem de segurança. No entanto, há que referir que a situação melhorou nos últimos anos, com o recurso às águas de superfície e à captação de águas subterrâneas em locais distantes dos de consumo. Também se verifica que, devido à irregularidade das precipitações no sul do país, as recargas anuais dos aquíferos podem sofrer oscilações consideráveis, o que leva, por vezes, a situações de sobre-exploração temporária de alguns sistemas.

No caso da serra algarvia, embora os recursos sejam, em geral, suficientes para as necessidades, atendendo à fraca densidade populacional, a respectiva exploração é problemática, em resultado da pequena produtividade das captações, o que exige uma grande multiplicidade de origens, com os consequentes problemas de controlo e manutenção. Acresce que a qualidade das águas subterrâneas nesta região, é em geral fraca (PBHRA, 2000).

No que diz respeito às **águas superficiais**, existem dezenas de linhas de água que se escoam para o oceano Atlântico, algumas correspondentes a bacias hidrográficas reduzidas. Verifica-se que, como resultado da variabilidade sazonal e interanual das precipitações, a variabilidade do escoamento superficial é bastante acentuada. Apesar de, em termos potenciais, os recursos hídricos superficiais sejam relativamente abundantes, estes apresentam, na situação actual, reduzido aproveitamento, em consequência da dependência das albufeiras existentes. Da totalidade do escoamento existente, em cada sub-bacia, apenas o escoamento que afluí mensalmente às grandes albufeiras constitui uma disponibilidade superficial pois o restante, ou é retido em pequenas albufeiras, sendo insignificante na totalidade da bacia, ou não é retido, escoando para o mar. Pode-se dizer que apenas o rio Alvor (albufeira da Bravura) e o rio Arade (albufeiras do Arade e do Funcho) são considerados recursos superficiais aproveitáveis (PBHRA, 2000).

O **abastecimento de água na região do Algarve**, incluindo a região do barlavento e sotavento, é gerido pela Águas do Algarve, S. A. (AdAlg) e é feito, “em alta”, pelo designado Sistema Multi-

municipal de Abastecimento de Água do Algarve. Concessionado pelo Estado Português, através do Ministério do Ambiente, o Sistema Multi-municipal de Abastecimento de Água do Algarve fornece, em época alta 200 mil m³/dia. A população servida actualmente é da ordem dos 500 mil habitantes, em época baixa, e mais de 1 milhão de habitantes, em época alta (AdAlg, 2006).

Porém este sistema de abastecimento público vê-se confrontado com alguns problemas, dos quais se destacam (PBHRA, 2000; DO Ó e Monteiro, 2006):

- elevadas perdas de água, incluindo as perdas reais e os consumos não facturados. Chegando a atingir os 60% em alguns concelhos, sendo a média estimada para a bacia hidrográfica das ribeiras do Algarve, de 37%;
- reservas de água insuficientes, verificando-se que, para os meses do Verão, as reservas existentes não garantem as necessidades de água em caso de falhas na adução, na quase totalidade dos sistemas, existindo mesmo alguns sistemas com reserva insuficiente em situação normal;
- deficiente qualidade da água na rede de distribuição. Actualmente, em muitos sistemas, o único tratamento a que a água é sujeita consiste numa cloragem, tendo-se verificado, em cerca de metade dos concelhos, violações para o cloro residual acima dos 25%;
- rigidez do sistema de abastecimento, que assenta essencialmente na exploração exclusiva de recursos superficiais apenas podendo receber volumes adicionais de água a partir das Estações de Tratamento de Fontainhas, Alcantarilha e Tavira. Com apenas 3 entradas possíveis para mais de 50 saídas de água (pontos de entrega), o sistema dificilmente incorpora recursos complementares, como por exemplo, origem subterrânea. Este problema ficou demonstrado no mais recente período de carência – a seca de 2004-2005. Assim, esta rigidez constitui uma dificuldade estrutural na integração a longo prazo da gestão dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, conforme preconizado actualmente pelas principais políticas nacionais e europeias de gestão da água (DQA, 2000; PNUEA, 2001).

No sentido de aplicar o princípio da precaução, actualmente consignado na Lei da Água¹⁰, a empresa AdAlg, responsável pela exploração dos Sistemas Multi-municipais de Abastecimento de Água e de Saneamento no Algarve, face aos períodos de seca recentes, vê-se interessada na implementação de medidas extraordinárias, de modo a precaver eventuais cortes no abastecimento, tais como: implementação de reutilização de águas residuais; estudos encomendados, no que diz respeito a novas formas de obtenção de água, como é o caso do estudo da empresa consultora *Hidroprojecto, Engenharia e Gestão, S. A.* sobre a dessalinização. Na verdade, durante os períodos de seca, a disponibilidade de água para consumo é substancialmente reduzida, limitando ou mesmo impedindo

¹⁰ Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro, que transpõe para a ordem jurídica nacional a Directiva n.º 2000/60/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de Outubro, e estabeleceu as bases e o quadro institucional para a gestão sustentável das águas. De referir que os impactos desta legislação deverão fazer-se sentir de forma gradual, uma vez que é ainda necessário aprovar cerca de doze disposições legais e de treze diplomas de legislação complementar para operacionalizar a lei-quadro (Baptista *et al.*, 2006).

a satisfação das necessidades instaladas. Ou seja, verifica-se uma redução da oferta que deixa de ser suficiente para cobrir a procura, o que se reflecte no custo médio de produção, por m^3 de águas de abastecimento, que pode ser superior, em períodos de escassez de água, ao seu valor actual (PBHRA, 2000).

De acordo com o IRAR, o custo de produção de água na região do Algarve pela entidade gestora AdAlg, que já se encontra regulado e definido, corresponde a **0,422 €/m³ de água produzida**. A este custo, os Municípios do Algarve, responsáveis pela distribuição *em baixa*, acrescentam os custos com os seus gastos com a distribuição de água, manutenção da rede de distribuição, entre outros gastos. Em muitas situações, verifica-se que o preço de venda ao público é reduzido por motivos políticos. Assim, atingem-se diversos preços de venda de água, tais como: 82,44 €/120 m³, ou seja, 0,69 €/m³ para o Município de Faro, 0,47 €/m³ para Albufeira e 0,65 €/m³ para Portimão, a título de exemplo.

Assim, pretende-se, neste caso de estudo, averiguar, numa situação em que se pretenda reforçar o sistema de abastecimento de água já existente, qual a tecnologia mais sustentável de dessalinização. Para tal proceder-se-á à aplicação de uma metodologia de uma análise de decisão multi-critério em que o decisor será um representante da empresa AdAlg.

9.3 Introdução teórica à análise de decisão

9.3.1 Enquadramento

Num processo de decisão muitas vezes interessa considerar múltiplos pontos de vista, relativos a vários actores, com sistemas de valores diferentes, como por exemplo: técnicos, população afectada, grupos de interesse ou responsáveis políticos. Uma vez que não é possível encontrar uma solução que seja a melhor em todos os aspectos considerados, deve-se recorrer a instrumentos de apoio, tais como os modelos multi-critério de apoio à decisão, no sentido de se encontrar uma boa solução de compromisso, que reflecta o balanço desses múltiplos pontos de vista. Na realidade, o ser humano apresenta uma limitação cognitiva para poder lidar simultaneamente com a multiplicidade de pontos de vista de um problema (Lourenço, 2006).

Na presente dissertação de mestrado optou-se pela metodologia MMAD (metodologia multi-critério de apoio à decisão) para a avaliação e comparação de alternativas de tecnologias de dessalinização para a região algarvia. A alternativa que se pretende determinar é aquela que o decisor considera ser a mais sustentável a todos os níveis, de acordo com o seu sistema de valores.

A metodologia multi-critério de apoio à decisão não procura modelar uma realidade exterior e preexistente. Ela insere-se no processo de decisão e visa a construção duma estrutura partilhada pelos intervenientes nesse processo - **fase de estruturação** - partindo depois para a elaboração de um modelo de avaliação - **fase de avaliação** - seguindo uma abordagem interactiva, construtiva e de aprendizagem, sem assumir um posicionamento optimizante e normativo (Bana e Costa, 1993). Por fim, a **análise de sensibilidade e robustez** dos resultados do modelo são componentes essenciais da elaboração de recomendações sobre a atractividade de diferentes alternativas.

Como “actores” do processo têm-se: o **decisor**, que toma a decisão e avalia as alternativas, respondendo às questões que lhe vão sendo colocadas; o **facilitador**, que tem como principal função a elaboração do modelo de apoio à decisão, colocando-se à margem do problema, mas ajudando na sua resolução e os **especialistas** que vão fornecendo a informação necessária para cada componente do problema de decisão.

O **modelo aditivo** é o modelo mais utilizado de todos os modelos multi-critério e só pode ser utilizado se todos os critérios forem independentes entre si, sendo representado pela seguinte expressão:

$$V(A) = \sum_{i=1}^n k_i v_i(a_i) \text{ com } \sum_{i=1}^n k_i = 1 \text{ e } k_i > 0$$

onde

$V(A)$ – valor global da alternativa A

$v_i(a_i)$ – valor do impacto da alternativa A no critério i

k_i – coeficiente de ponderação do critério i

n – número de critérios

A operacionalidade desta metodologia, como foi anteriormente referido, é realizada através de três fases sequenciais e independentes: **estruturação** (identificação e caracterização do contexto decisório), **avaliação** (medida do desempenho das acções potenciais) e **recomendações** (aborda as possíveis melhorias de desempenho das alternativas avaliadas).

As etapas mais detalhadas a efectuar são as seguintes (Lourenço, 2006):

- estruturação do problema;
- construção das funções de valor;
- apuramento dos valores parciais das alternativas;
- determinação dos coeficientes de ponderação;
- apuramento dos valores globais das alternativas;
- validação dos resultados.

9.3.2 Estruturação

Na fase de estruturação deve ser construída uma árvore de pontos de vista (ou critérios). Segundo Keeney e Raiffa (1976) cit. por Lourenço (2006), a árvore deve cumprir as seguintes cinco propriedades:

- **exaustividade**, incorporando todos os pontos de vista relevantes para o decisor;
- **operacionalidade**, sendo que os pontos de vista de nível inferior devem ser suficientemente específicos para permitirem ao decisor avaliar e comparar alternativas;
- **isolabilidade**, podendo ser avaliado o desempenho de uma alternativa segundo um ponto de vista, independentemente do seu desempenho noutros pontos de vista;
- **ausência de redundância**, não podendo existir mais do que um critério a representar a mesma coisa, evitando assim uma situação de contagem dupla;
- **dimensão mínima**, uma vez que uma árvore com muitos critérios torna muito difícil a obtenção de resultados substantivos, o que se consegue, por exemplo, omitindo os critérios que não distingam as alternativas.

9.3.3 Metodologia MACBETH

A metodologia MACBETH (*Measuring Attractiveness by a Categorical Based Evaluation Technique*) consiste na análise de decisão multi-critério, baseada no modelo aditivo simples, que introduz a inovação de se poderem gerar escalas numéricas de preferências, baseadas em comparações qualitativas, em termos de diferenças de atractividade. Deste modo, em vez de se pedir ao decisor para expressar juízos quantitativos, pede-se somente para este se expressar em termos qualitativos, o que é substancialmente mais fácil para o agente de decisão, sem que se perca o rigor e consistência científica.

A avaliação qualitativa do decisor é traduzida pelas suas respostas a um questionário interactivo, sendo-lhe pedidos juízos absolutos sobre diferenças de atractividade entre cada par de níveis de impacto (ou de alternativas) e, caso as respostas do decisor sejam consideradas consistentes, através de formas de validação integrantes do método, obtêm-se valores para esses níveis de impacto (ou alternativas), pela resolução de um problema de optimização linear. De uma forma mais precisa, é pedido ao decisor para escolher, do conjunto de afirmações semânticas que se apresentam de seguida, aquela que este considera como a mais ajustada:

- 1 – a diferença de atractividade entre x e y é **nula**;
- 2 – a diferença de atractividade entre x e y é **positiva**;
- 3 – a diferença de atractividade entre x e y é **muito fraca**;
- 4 – a diferença de atractividade entre x e y é **fraca**;
- 5 – a diferença de atractividade entre x e y é **moderada**;
- 6 – a diferença de atractividade entre x e y é **forte**;
- 7 – a diferença de atractividade entre x e y é **muito forte**;
- 8 – a diferença de atractividade entre x e y é **extrema**.

Onde x e y constituem dois níveis de impacto (ou alternativas).

Para anotar as respostas do decisor, preenche-se uma matriz triangular superior, como a da figura 20, onde as linhas e colunas correspondem aos níveis de impacto (colocados por ordem de atractividade decrescente). À medida que vão sendo introduzidas as respostas no software de apoio à decisão – M-MACBETH, este automaticamente verifica se os julgamentos efectuados foram consistentes. Se os julgamentos forem consistentes (em que cada linha da matriz preenchida apresenta ordem crescente de diferenças de atractividade, da esquerda para a direita ou cada coluna apresenta ordem decrescente de diferenças de atractividade, de cima para baixo), o *software* sugere uma escala de valor, como mostram as figuras 19 e 20.

	Muito Boa	Boa	Suficiente	Neutra	Fraca	
Muito Boa	nula	fraca	moderada	mt. forte	extrema	extrema
Boa		nula	fraca	moderada	extrema	mt. forte
Suficiente			nula	moderada	mt. forte	forte
Neutra				nula	forte	moderada
Fraca					nula	fraca
Julgamentos consistentes						mt. fraca
						nula

Figura 19 – Matriz de julgamentos do M-MACBETH (Lourenço, 2006)



Figura 20 – Escala de valor sugerida pelo M-MACBETH (Lourenço, 2006)

De acordo com um processo semelhante este programa permite a criação de uma escala de ponderação para os critérios ou pontos de vista fundamentais. Além disso, este *software* fornece ferramentas de análise de sensibilidade e robustez.

Esta metodologia MACBETH é seguida no caso de estudo desta dissertação uma vez que se considera particularmente adequada a problemas em que se pretende atingir a sustentabilidade a todos os níveis, social, económica e ambiental. Recorre-se assim, neste caso de estudo, ao *software* M-MACBETH para auxiliar o decisor da AdAlg, a escolher a tecnologia de dessalinização de águas mais sustentável, como forma de reforço do sistema de abastecimento de água desta região. De referir que, nesta análise de apoio à decisão, também é avaliada a alternativa de se reforçar o sistema de abastecimento de água com as tecnologias convencionais de obtenção de água. Há que realçar que este reforço do sistema de abastecimento de água é de extrema importância face ao acréscimo no consumo de água na época estival, que se verifica nesta região algarvia.

9.3.4 Determinação de coeficientes de ponderação

Os coeficientes de ponderação, ou constantes de escala, permitem harmonizar as escalas de valores parciais dos impactos obtidos de uma alternativa nos diversos critérios, tornando-as adicionáveis. Estes não podem, de forma alguma, ser entendidos como indicadores directos de importância, uma vez que estão intrinsecamente relacionados com o poder discriminatório das escalas dos pontos de vista. Para obter os coeficientes de ponderação aconselham-se os seguintes métodos: *Swing weighting*, *Trade-off procedure* ou MACBETH (Lourenço, 2006).

9.3.5 Validação dos resultados

9.3.5.1 Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade constitui o procedimento utilizado tradicionalmente para validar os resultados obtidos. Nesta análise, examinam-se as implicações nos resultados globais resultantes da variação individual dos coeficientes de ponderação dos pontos de vista (mantendo as relações de proporcionalidade entre estes coeficientes de ponderação).

9.3.5.2 Análise de robustez

A análise de robustez permite validar os resultados obtidos de uma forma muito mais segura do que na análise de sensibilidade, permitindo analisar que conclusões robustas se podem extrair do modelo

para variados níveis de escassez, imprecisão ou incerteza na informação. O M-MACBETH possui esta função e apresenta os seguintes símbolos (Bana e Costa *et. al.*, 2005):

- ▲ – designa uma situação de “dominância clássica”: em que uma alternativa domina outra se for pelo menos tão atractiva quanto a outra em todos os critérios e se for mais atractiva do que a outra em pelo menos um dos critérios.
- + – designa uma situação de “dominância aditiva”: uma alternativa domina aditivamente outra alternativa se, para um determinado conjunto de restrições na informação, resultar sempre globalmente mais atractiva do que a outra alternativa da aplicação do modelo aditivo.

Os resultados da análise de robustez devem estar sempre "próximos" (ou "não-contraditórios") da solução obtida no modelo, qualquer que seja a variação dos valores dos parâmetros do modelo. Pode-se dizer que um método robusto é aquele que, para a mesma informação, nunca se chega a soluções "contraditórias", qualquer que sejam os valores dos parâmetros do método.

9.4 Definição do modelo multi-critério de apoio à decisão

9.4.1 Alternativas consideradas

Neste caso de estudo, as alternativas foram definidas no início da elaboração do modelo de análise de decisão. Dispondo da revisão bibliográfica efectuada, assim como das informações com os especialistas de diversas áreas, as alternativas foram escolhidas tendo em conta a relevância da sua comparação. O facto de se considerarem tecnologias de dessalinização que recorrem a energias renováveis e outras que se baseiam em energias não-renováveis assume especial interesse na comparação das alternativas. De referir que as tecnologias de dessalinização consideradas neste caso de estudo estão disponíveis actualmente no mercado - MED e OI, apresentando ambas grande expansão. As alternativas que recorrem a energias renováveis ainda não são competitivas economicamente, sendo de esperar uma grande utilização no futuro, face à intenção de substituição progressiva do uso de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis.

Salienta-se o facto das alternativas 1, 2, 3 e 4, constituírem sistemas duais de produção (produção conjunta de energia e de água dessalinizada). De facto, estudos de análise de ciclo de vida demonstram que os impactos associados a estes sistemas integrados são menores, assim como os seus custos associados (ver capítulo 5.5.2).

Pode-se dizer que a alternativa 5 foi incluída com o objectivo de se averiguar em que posição fica a opção de se reforçar o sistema de abastecimento do Algarve com os métodos convencionais de obtenção de água, em vez de se recorrer aos processos de dessalinização de água do mar. No quadro 18 estão descritas as cinco alternativas consideradas neste modelo multi-critério de apoio à decisão.

Quadro 18 – Alternativas consideradas no modelo multi-critério de apoio à decisão

Alternativas	Descrição das alternativas
1	Osmose inversa com produção de electricidade através da queima de combustíveis fósseis – sistema dual
2	Osmose inversa com produção de energia renovável (produção de electricidade com painéis fotovoltaicos) – sistema dual
3	MED – com queima de combustíveis fósseis (fonte de energia térmica e produção de electricidade) – sistema dual
4	MED solar (colectores solares para obtenção de energia térmica e produção de electricidade) – sistema dual
5	Reforço do sistema de abastecimento da região algarvia com tecnologias tradicionais de obtenção de água

9.4.2 Estruturação do modelo

O processo de construção do modelo multi-critério de apoio à decisão (MMAD) inicia-se com a definição dos pontos de vista que se consideram importantes para avaliar as diferentes alternativas. Esta fase designa-se por estruturação do problema e constitui, para muitos autores, a fase crucial da metodologia. Para a estruturação contou-se com a participação de especialistas das diversas componentes inerentes ao problema, sendo que, para a criação da árvore dos pontos de vista deste caso de estudo, contou-se com a colaboração dos seguintes especialistas¹¹:

- Prof. Dr. Eng.º António Gonçalves Henriques, Director-Geral da Agência Portuguesa do Ambiente (APA) – contribuição para toda a estruturação do modelo;
- Dra. Eng.ª Maria do Céu Almeida, Investigadora Auxiliar do Núcleo de Engenharia Sanitária (NES), do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) – contribuição para toda a estruturação do modelo;
- Eng.º Jaime de Melo Baptista, Presidente do Conselho Directivo do Instituto Regulador da Água e Resíduos (IRAR) – contribuição para a construção do descritor do ponto de vista “aceitabilidade social e regulamentar”;
- Eng.ª Helena Lucas, Directora de operações – Água, da empresa Águas do Algarve, S. A. – contribuição para a aplicação do modelo enquanto decisor do modelo multi-critério.
- Eng.ª Fátima Carapuça, responsável pelo Sistema de Gestão Ambiental, da empresa Águas do Algarve, S. A. – contribuição para a aplicação do modelo, enquanto auxiliar na decisão;
- Eng.º Pedro Horta, do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologias de Inovação (INETI), especialista envolvido no Projecto AQUASOL, de dessalinização por destilação híbrida (solar e a gás natural) – contribuição para a construção do descritor do ponto de vista “impacto nos ecossistemas hídricos”;
- Associações de Defesa do Ambiente (ADA) e Organizações Não Governamentais de Ambiente (ONGA) presentes no 17º Encontro Nacional das Associações de Defesa do Ambiente, assim como os especialistas e deputados da Assembleia da República presentes

¹¹ É de salientar que foram realizadas reuniões, em separado, com cada um dos especialistas, nos seus locais de trabalho. De salientar que a reunião de aplicação do modelo foi realizada na ETA de Alcantarilha, no Algarve, com a participação da Eng.ª Helena Lucas (decisor) e da Eng.ª Fátima Carapuça (auxiliar de decisão).

na Conferência Internacional sobre Alterações Climáticas, na Assembleia da República, que abordaram o tema da dessalinização de águas. Estes eventos contribuíram para a construção do descritor do ponto de vista “aceitabilidade social e regulamentar”;

Nesta análise de decisão o facilitador intervém também como especialista, uma vez que elaborou o modelo, tendo em conta a informação fornecida pelos vários especialistas, pelo decisor assim como toda a revisão bibliográfica efectuada.

9.4.3 Pontos de vista fundamentais (PVF)

A árvore criada no *software* de apoio à decisão (M-MACBETH) apresenta-se na figura 21.

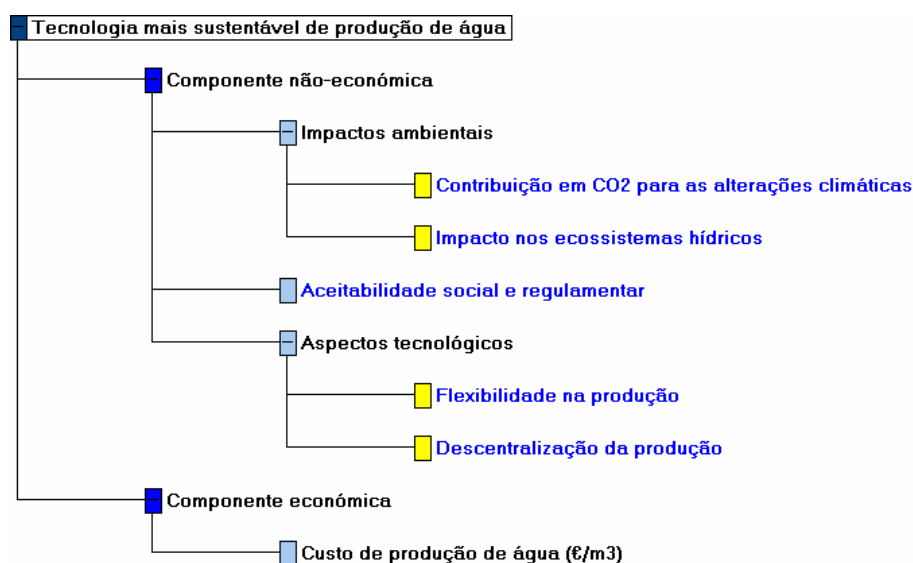


Figura 21 – Árvore dos pontos de vista, criada no M-MACBETH

No quadro 19 apresentam-se os pontos de vista fundamentais. Apenas estes pontos de vista, assinalados a azul na figura 21, contribuem para avaliar as alternativas.

Quadro 19 – Pontos de vista fundamentais (PVF) de cada componente do modelo

Componente	PVF
Ambiental	Contribuição em CO ₂ para as Alterações Climáticas
	Impacto nos ecossistemas hídricos
Social	Aceitabilidade social e regulamentar
Tecnológica	Flexibilidade na produção
	Descentralização da produção
Económica	Custo de produção de água (€/m ³)

No que se refere à **componente ambiental**, consideraram-se os impactos negativos mais significativos nos processos de produção de água potável (que constituíssem os impactos mais significativos nos processos de dessalinização e nos métodos convencionais de produção de água).

A **componente social** apresenta alguma incerteza associada, uma vez que a temática da dessalinização em Portugal ainda não é conhecida por todos (apresentando apenas um caso de implementação em Portugal, na central de Osmose Inversa em Porto Santo). As performances das alternativas consideradas neste modelo tiveram em conta não só a percepção dos especialistas

(como por exemplo o IRAR) como também uma fracção da opinião pública mais informada no tema (incluindo organizações e associações de defesa do ambiente).¹²

A **componente tecnológica** apresenta os pontos de vista fundamentais considerados com maior relevância para o decisor e para a comparação das várias alternativas. Foram estudados outros PVF, tais como: o pré-tratamento, o rácio de conversão, a eficiência do equipamento, a capacidade de produção e a qualidade do produto. É de salientar que a não inclusão dos PVF: rácio de conversão e eficiência do equipamento deve-se ao facto de não terem sido encontrados dados relativos a sistemas duais de produção, assim como de sistemas que recorram à energia solar. No que diz respeito à capacidade de produção, este critério não se mostrou importante para a análise de decisão, atendendo a que o objectivo principal deste caso de estudo consiste no reforço do sistema de abastecimento de água do Algarve, recorrendo a uma tecnologia que não produza mais água potável do que as tecnologias já implementadas no sistema multi-municipal. Também a qualidade do produto não foi tida em consideração, por se ter considerado que, uma vez implementada eficazmente a tecnologia escolhida, a água produzida obteria aproximadamente a mesma qualidade. O pré-tratamento também foi excluído deste modelo multi-critério por se considerar que dependia grandemente do seu custo associado, estando por isso mesmo já incluído na componente económica.

Finalmente, a **componente económica** diz respeito aos custos de produção de água, na unidade de euros por metro cúbico de água produzida, constituindo o custo final de produção (incluindo todos os custos associados a cada tecnologia). Para as alternativas de dessalinização os custos considerados baseiam-se em estimativas de um estudo de investigação espanhol.

Todos estes PVF, testados ao nível da sua exaustividade, isolabilidade e não-redundância (ver secção 9.3.2), com o auxílio dos especialistas, foram operacionalizados através da construção dos descritores. Na secção seguinte são descritos os descritores de cada PVF considerado.

9.4.4 Descritores dos PVF

9.4.4.1 Descritores seleccionados

Dispondo dos PVF, estes podem ser avaliados por comparação directa de alternativas ou pela construção de um descritor. Um descritor constitui um conjunto de níveis de impacto (qualitativos ou quantitativos, directos ou indirectos) associado a um PVF. É de salientar que, da comparação de quaisquer dois níveis do descritor deve resultar sempre uma diferenciação clara (Lourenço, 2006), sendo que, para tal ser atingido, os descritores não devem ser ambíguos. No quadro 20 apresentam-se todos os descritores elaborados para cada PVF.

¹² A hipótese de realização de um inquérito social foi descartada devido à ausência de conhecimento da maior parte da população sobre este tema, sendo de recomendar em futuras investigações.

Quadro 20 – Descritores dos pontos de vista fundamentais

Componente	PVF	Descritor
Componente ambiental	Contribuição em CO ₂ para as alterações climáticas	Descritor directo e quantitativo – emissões de CO ₂ em ACV (kg CO ₂ /m ³)
	Impacto nos ecossistemas hídricos	Descritor indirecto e qualitativo – número de medidas de mitigação de impactos nos ecossistemas hídricos (1, 2 ou mais do 2 medidas)
Componente social	Aceitabilidade social e regulamentar	Descritor construído, directo e qualitativo – nível qualitativo de aceitação dos projectos (barreiras regulamentares conjugadas com contestação pública)
Componente tecnológica	Flexibilidade da produção	Descritor directo e qualitativo (Sim/Não)
	Descentralização da produção	Descritor directo e qualitativo (Sim/Não)
Componente económica	Custo de produção de água dessalinizada (€/m ³)	Análise Custo – Benefício

9.4.4.2 Contribuição em CO₂ para as Alterações Climáticas

Os GEE mais importantes na atmosfera incluem: vapor de água (H₂O), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), ácido nitroso (N₂O), clorofluorcarbonetos (CFC's), perfluorcarbonetos (PFC's), hexafluoreto de enxofre (SF₆) e ozono (O₃). Estima-se que os primeiros três gases contribuam para 50%, 18% e 6%, respectivamente, do efeito de estufa global consequente das actividades humanas.

Uma das fontes antropogénicas de GEE constitui a queima de combustíveis fósseis (como o carvão e o petróleo), sendo responsável por cerca de 75% das emissões antropogénicas de CO₂ para a atmosfera.

Para este PVF, escolheu-se como descritor as **emissões de CO₂ em ACV**, que constitui um descritor directo, quantitativo e contínuo. Trata-se de um GEE e um excelente indicador da contribuição das tecnologias de produção de água para as alterações climáticas. Este descritor é apresentado na unidade de kg CO₂/m³ de água produzida. A selecção deste GEE, emitido em ACV pelas diferentes tecnologias consideradas, foi baseada na importância de se poder avaliar este impacto ambiental. Há que referir que na dessalinização ocorrem elevadas emissões de SO_x e NO_x, contudo, estes gases não permitiam a comparação com a alternativa 5. Os valores utilizados relativamente a este descritor apresentam-se no quadro seguinte.

Quadro 21 – Emissões de CO₂, em ACV, para cada uma das alternativas de produção de água

Alternativas	Descrição das alternativas	kg CO ₂ /m ³ de água produzida	País modelo
1	Osmose inversa com produção de electricidade através da queima de combustíveis fósseis – sistema dual	3,08	Portugal
2	Osmose inversa com produção de energia renovável (produção de electricidade com painéis fotovoltaicos) – sistema dual	0,08	Noruega
3	MED – com queima de combustíveis fósseis (como fonte de energia térmica e produção de electricidade) – sistema dual	1,76	Portugal
4	MED solar (colectores solares para obtenção de energia térmica e produção de electricidade) – sistema dual	0,27	Noruega
5	Reforçar o sistema de abastecimento da região algarvia com tecnologias tradicionais de obtenção de água	0,91	África do Sul

Os valores de emissões de CO₂, relativos às tecnologias de dessalinização (alternativas 1, 2, 3 e 4), encontram-se presentes na secção 5.5.2, sendo relativos ao estudo de ACV de Raluy *et al.* (2004).

Para a alternativa 5, uma vez que não existem estudos de ACV de Estações de Tratamento de Água da AdAlg, ou de outra ETA nacional, recorreu-se a um estudo realizado na África do Sul (Landu e

Brent, 2006). Este estudo apresenta um valor de emissões de **0,9105 kg CO₂ eq/m³ de água potável produzida**. Há, no entanto, que fazer a ressalva de que este valor constitui o CO₂ equivalente¹³, ou seja, inclui também outros GEE tais como o metano (CH₄) e o óxido nitroso (N₂O). Contudo, uma vez que o consumo de energia na África do Sul é maioritariamente baseado em combustíveis fósseis (figura 22) e que a grande maioria do consumo de carvão se destina à produção de electricidade, considera-se adequada a extrapolação para o caso de estudo do Algarve.

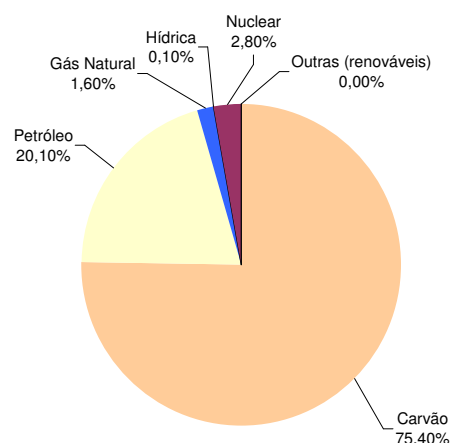


Figura 22 – Distribuição percentual do total de energia consumida na África do Sul, em 2004 (EIA, 2007)

No sentido de se estabelecerem os níveis de impacto necessários à elaboração da função de valor, aplicou-se o **método da bissecção** (Lourenço, 2006). A escolha deste método recai no facto de este ser especialmente indicado para descritores contínuos, tal como constitui este descritor. O procedimento efectuado foi o seguinte:

- O decisor fixou a alternativa que considera com melhor nível de performance neste descritor, ou seja, o valor mais baixo associado às emissões de CO₂ (correspondente a 100 pontos). De seguida seleccionou o valor de emissões de CO₂ que considera com pior nível de performance (correspondente a 0 pontos).

V (emissões de 0,08 kg CO₂/m³ de água produzida) = 100 pontos

V (emissões de 3,08 kg CO₂/m³ de água produzida) = 0 pontos

- Finalmente, solicitou-se ao decisor para identificar o nível de performance que, segundo o agente de decisão, tem um valor “a meio caminho” entre a melhor e a pior performance. É de salientar que este valor de emissões não tem de corresponder a nenhuma das alternativas existentes, pretendendo-se apenas determinar a preferência do decisor relativamente a emissões de CO₂ em ACV, de uma forma geral.

V(X) = 50 pontos X = 0,91 kg de CO₂/m³ de água produzida

O decisor optou assim pelo valor de emissões de CO₂ em ACV associados a uma ETA (valor correspondente à alternativa 5).

¹³ O CO₂ equivalente é o resultado da multiplicação das toneladas emitidas do GEE pelo seu potencial de aquecimento global. O PAG do CO₂ foi estipulado como 1. Por exemplo, o PAG do CH₄ é 21 vezes maior do que o potencial do CO₂.

Poder-se-ia continuar o método da bissecção determinando pontos intermédios entre cada dois pontos já determinados, até ao nível de precisão desejado, de forma a construir a função de valor. Contudo, este método da bissecção não é utilizado, neste caso de estudo, para construir a função de valor, mas é antes utilizado apenas no sentido de se determinar os níveis de impacto necessários à aplicação da metodologia MACBETH (quadro 22). A função de valor é assim construída pelo modelo M-MACBETH, depois de efectuados os julgamentos de diferenças de atractividade entre os pares de níveis de impacto determinados.

Quadro 22 – Níveis quantitativos de performance do PVF – contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

Nível 1	0,08
Nível 2	0,91
Nível 3	3,08

Durante a reunião de aplicação do modelo foram tidos em conta os dados de emissões de CO₂, fornecidos pela AdAlg, assim como os valores de emissões de CO₂, da empresa Águas do Douro e Paiva, S. A., com o objectivo de se facilitar a percepção dos valores de emissões utilizados no modelo. Contudo, teve-se sempre em consideração que estes dados (quadro 23 e 24) constituem apenas valores de emissões (directas e indirectas) relativas a um ano de funcionamento, não dizendo respeito a uma ACV.

Relativamente à AdAlg, teve-se em conta a maior Estação de Tratamento de Água da empresa – a ETA de Alcantarilha (no anexo A5.1 encontram-se fotografias da ETA de Alcantarilha tiradas aquando da reunião com o decisor).

Quadro 23 – Emissões de CO₂ da ETA de Alcantarilha, da AdAlg, no ano de 2006 (cortesia da AdAlg)

Água tratada	Emissões indirectas – Consumo de electricidade	Emissões directas – Veículos e equipamentos (geradores de emergência, motobombas, retro escavadora) a gasóleo	Total de emissões de CO ₂ da ETA de Alcantarilha
25 020 200 m ³	0,116 kg CO ₂ /m ³ de água produzida	0,013 kg CO ₂ /m ³ de água produzida	0,129 kg CO ₂ /m ³ de água produzida

Quadro 24 – Emissões de CO₂ da Águas do Douro e Paiva, S. A., no ano de 2006 (AdDP, 2007)

Água tratada	Total de emissões de CO ₂ , directas (transporte de veículos) e indirectas (consumo de electricidade)
113 000 000 m ³	0,39 kg CO ₂ /m ³ de água produzida

9.4.4.3 Impacto nos ecossistemas hídricos

O impacto nos ecossistemas hídricos pode constituir outro impacto ambiental significativo das tecnologias de produção de água.

O objectivo inicial da elaboração deste descritor seria recorrer a um descritor indirecto quantitativo, nomeadamente os custos associados às medidas de mitigação dos impactos nos ecossistemas hídricos. Uma vez que não foi possível obter estes custos, utilizou-se um descritor indirecto e qualitativo, nomeadamente, o número de medidas de mitigação de impactos nos ecossistemas hídricos. Partiu-se, assim, do pressuposto de que quanto maior o número de medidas de mitigação a implementar maior o impacto da tecnologia.

No que diz respeito às tecnologias de dessalinização salienta-se a descarga da salmoura, enquanto impacto mais significativo nos ecossistemas marinhos. Como medidas de mitigação mais utilizadas

tem-se: a **construção de emissário submarino com difusor** com comprimento e profundidade adequadas e a implementação de um plano de **monitorização do ecossistema marinho**. Estas medidas de mitigação para as tecnologias de dessalinização constituem as medidas mais utilizadas para o destino da salmoura e mitigação do impacto ambiental a ela associado (ver capítulo 5.4.2).

Em relação à produção de água numa ETA, por via de captação de água superficial e subterrânea, o impacto no equilíbrio do ecossistema hídrico é devido, essencialmente, à redução do caudal nas linhas de água/albufeiras ou nos aquíferos. Como **medidas de mitigação da depleção dos recursos hídricos** têm-se (IRAR, 2006): gestão da albufeira e da bacia hidrográfica; monitorização; custos com recuperação de linhas de água, com a remodelação de caudais ou com a reserva absoluta de caudais ecológicos, custos com a fiscalização e gestão do domínio hídrico; **mitigação dos efeitos da seca** (presentes no Relatório de Balanço à Seca 2005) – construção de infra-estruturas que permitam a retenção em anos mais chuvosos, abertura de novos furos, reforço da fiscalização de captações particulares ilegais, reforço da fiscalização nas áreas de protecção às captações, agravamentos tarifários, reutilização de águas para usos compatíveis. Como **medidas estruturais** têm-se ainda (a implementar em barragens): a construção de passagens para peixes (ascensores, por exemplo) e dispositivos para manutenção de caudais ecológicos.

O quadro seguinte apresenta o descritor do PVF - Impacto nos recursos hídricos, com os respectivos níveis de impacto.

Quadro 25 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

Nível 1	Impacto nulo – sem medidas de mitigação de impacto
Nível 2	Impacto da descarga da salmoura no ecossistema marinho (concentração 10% superior à concentração da água do mar) – medida de mitigação: emissário com comprimento reduzido
Nível 3	Impacto da descarga da salmoura no ecossistema marinho (o dobro da concentração da água do mar) – medida de mitigação: emissário com elevado comprimento e monitorização do ecossistema
Nível 4	Impacto da captação de água no ecossistema hídrico – medida de mitigação: elevado número de medidas de mitigação

9.4.4.4 Aceitabilidade social e regulamentar

No que diz à aceitabilidade dos projectos, é notório que a aceitabilidade social se reflecte na elaboração da legislação. Assim, neste descritor construído, directo e qualitativo, conjugam-se a contestação pública e as barreiras regulamentares, elaborando assim níveis qualitativos de aceitação dos projectos de produção de água.

O quadro 26 apresenta o descritor do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar, com os respectivos níveis de impacto.

Quadro 26 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

Nível 1	Sem contestação pública e sem barreiras regulamentares
Nível 2	Sem contestação pública e com barreiras regulamentares
Nível 3	Com contestação pública e com barreiras regulamentares

A aceitabilidade social dos projectos de dessalinização diz respeito ao risco do projecto não avançar devido a má imagem associada essencialmente às emissões de GEE, gerando assim **contestação**

pública. De facto, pode-se considerar, atendendo à consulta de especialistas, que um projecto de dessalinização não apresenta contestação se se recorrer a energias renováveis (ver capítulo 4).

Por outro lado, são notórias ainda as **barreiras regulamentares** associadas à implementação de centrais de dessalinização, face aos métodos convencionais de obtenção de água. O facto de a dessalinização se encontrar ainda em fase de investigação faz com que se coloquem mais entraves à obtenção de licença ambiental.¹⁴

9.4.4.5 Flexibilidade da produção

Segundo o decisor deste modelo multi-critério, a Eng.^a Helena Lucas, a AdAlg pretende, no futuro, recorrer a novas fontes de obtenção de água, de forma a compensar os elevados picos de consumo da região, apesar de não se considerar, por enquanto, a dessalinização.¹⁵

De referir, no entanto, que está em curso um projecto de destilação para obtenção de energia, por iniciativa privada, no Município de Tavira. Tudo indica que, caso este processo tenha sucesso, a dessalinização por destilação poderá ser integrada neste projecto.

Segundo o decisor, caso fosse instalada uma central de produção de água não-convencional, esta produção nunca seria interrompida, produzindo sempre um caudal mínimo que poderia ser aumentado de acordo com as necessidades.

Assim, este PVF diz respeito à flexibilidade de um sistema de produção de água, ou seja, à possibilidade de se produzir um menor caudal de água e aumentá-lo apenas em situações como, por exemplo, as seguintes: picos de maior consumo, normalmente da época estival, ou em caso de contingência (avarias, terrorismo ou fenómeno de seca extrema).

Na verdade, as tecnologias de dessalinização são apropriadas à oscilação da produção (sazonalmente ou diariamente).

Por outro lado, existem tecnologias, como, por exemplo, os métodos convencionais de produção de água numa ETA, em que não há possibilidade de flexibilização da produção, devido aos seguintes factores: o investimento na construção da central não compensa a produção de um caudal mínimo, como se pretende na AdAlg, na maior parte do tempo de vida da central, ou a produção de água exige um processo de tratamento de tal forma complexo que não compensa a produção temporária.

É de realçar o facto de as tecnologias de dessalinização fornecerem uma água fiável (reduzidos riscos de má qualidade para consumo), através de uma fonte ilimitada de água bruta e com processos de tratamento relativamente rápidos e simples, quando comparadas com as tecnologias convencionais de obtenção de água.

¹⁴ Actualmente, o Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território coloca de parte, por enquanto, a opção da implementação de centrais de dessalinização por via pública, dando autorização às entidades privadas.

¹⁵ Actualmente, a AdAlg encontra-se a desenvolver estudos para integração de antigas captações de água subterrânea no sistema multimunicipal. Também estão a ser desenvolvidos estudos para reutilização de água para rega.

O quadro 27 apresenta o descritor do PVF – Flexibilidade da produção, com os respectivos níveis de impacto.

Quadro 27 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Flexibilidade da produção

Nível 1	Existe a possibilidade de oscilação da produção (sazonalmente ou diariamente)
Nível 2	Não há possibilidade de oscilação da produção – o investimento na central não compensa produções de água reduzidas

9.4.4.6 Descentralização da produção

A produção descentralizada, ou seja, a construção de centrais de produção de água de menor dimensão (por cidade, por exemplo), podem ser benéficas em termos de impactos ambientais (ver secção 5.4.3). Contudo, nem todas as tecnologias têm esta possibilidade.

O investimento na construção de um sistema integrado de produção de água e electricidade pode apenas compensar, em termos económicos, quanto maior for a central, devido à “economia de escala”.

No quadro 28 apresenta-se o descritor do PVF – Descentralização da produção, com os respectivos níveis de impacto.

Quadro 28 – Níveis qualitativos de performance do PVF – Descentralização da produção

Nível 1	Existe a possibilidade de produção descentralizada (por região)
Nível 2	Não há possibilidade de produção descentralizada

9.4.4.7 Custo de produção de água

Embora o custo de produção de água pudesse ter sido incluído na árvore como qualquer outro PVF, não foi essa a abordagem seguida pois existe, neste caso de estudo, uma falta de independência entre o custo de produção de água e os outros pontos de vista fundamentais. Por outro lado, torna-se difícil para o decisor comparar “dinheiro” com benefícios de outro tipo (através da atribuição de diferenças de atractividade).

O M-MACBETH dispõe de uma funcionalidade que permite considerar o custo na análise de decisão, através de uma confrontação das pontuações globais das alternativas (resultantes do modelo aditivo) com o “custo de produção de água”. Esta análise custo-benefício resulta num gráfico que indica as alternativas não-dominadas (as que definem a fronteira eficiente) e as alternativas dominadas (que se encontram abaixo da fronteira eficiente). Assim, a escolha da tecnologia mais sustentável de reforço do sistema de abastecimento de água do Algarve deverá recair numa alternativa que se situe na fronteira eficiente.

É de referir que os custos considerados para as alternativas 1, 2, 3 e 4 constituem estimativas de centrais com produção de 5000 m³/dia, com base na realidade espanhola (Moya, 1998b), que se podem considerar, face aos estudos encontrados na revisão bibliográfica, as estimativas mais próximas da realidade portuguesa. Há ainda que salientar que os custos estimados para estas tecnologias de dessalinização (alternativas 1, 2, 3 e 4) correspondem a sistemas não duais de produção de água.

Para os sistemas convencionais de obtenção de água, o valor considerado corresponde ao valor apresentado pelo IRAR (ver secção 9.2). Estes custos de produção de água utilizados no modelo multi-critério de apoio à decisão são apresentados na figura 23.

-	+	Nome	Nome abreviado	Custo
1		Osmose Inversa com combustíveis fósseis	OI combfóssil	1.23
2		Osmose inversa com painéis fotovoltaicos	OI solar	2.73
3		MED combustíveis fósseis	MED combfóssil	1.44
4		MED com colectores solares	MED solar	1.51
5		Sistemas convencionais de obtenção de água	Convencionais	0.42

Inserir Remover Propriedades Performances

Figura 23 – Custos de produção de água (€/m³ de água produzida) das cinco alternativas consideradas no modelo multi-critério de apoio à decisão

9.5 Apresentação e discussão dos resultados

Nesta secção procurar-se-á apresentar e discutir os resultados, à medida que vão sendo descritos todos os passos realizados na aplicação do modelo, durante a reunião com o decisor.

Como já foi referido na secção 9.4.1, as alternativas foram definidas antes da aplicação do modelo, e a sua inserção no *software* constitui o primeiro passo da aplicação do modelo, aquando da definição dos custos de produção associados a cada alternativa (figura 23).

A reunião com o decisor e auxiliar de decisão iniciou-se com uma apresentação de slides em *Microsoft PowerPoint*, no sentido de se apresentar o caso de estudo e o modelo multi-critério elaborado. Nesta fase inicial da reunião, de troca de impressões e fornecimento de informações, confirmou-se a adequação do modelo com a vontade do decisor, tendo sido feitos apenas alguns ajustes.¹⁶

A aplicação do modelo iniciou-se com a finalização da árvore dos PVF (figura 21). De seguida, estabeleceram-se as pontuações de referência do modelo (figura 24), em que 100 pontos corresponde ao nível de referência máximo – [bom em tudo], e 0 pontos corresponde à pontuação que não é positiva nem negativa, ou seja, é neutra – [neutro em tudo].¹⁷ O estabelecimento destes níveis de ancoragem da escala de pontuações é essencial para construir as funções de valor dos PVF no modelo e avaliar as alternativas.

Pontuações de referência

[Bom em tudo] 100 OK

[Neutro em tudo] 0 Cancelar

Figura 24 – Pontuações de referência do modelo

Como segundo passo, preencheram-se as matrizes de julgamentos de diferenças de atractividade do modelo M-MACBETH, linha a linha, relativas a cada PVF. De referir, que o preenchimento das matrizes foi sempre antecedido da ordenação dos níveis de impacto de cada descritor, por ordem

¹⁶ Idealmente, o modelo seria elaborado numa reunião conjunta com os especialistas e decisor. Contudo, só foi viável efectuar as reuniões em separado, sendo o modelo elaborado pelo facilitador e só depois apresentado ao decisor, numa fase quase finalizada.

¹⁷ Foi enfatizada ao decisor o facto da pontuação de zero pontos não implicar ausência de valor (atractividade).

decrecente de atractividade (de cima para baixo), assim como foram sempre definidos, pelo decisor, os níveis de referência BOM (assinalado a cor verde) e NEUTRO (assinalado a cor azul) para cada descritor. Após o preenchimento das matrizes, é feita a verificação no modelo da consistência dos julgamentos atribuídos.

O PVF – **Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas**, o seu descritor, a matriz de julgamentos, assim como a respectiva função de valor apresentam-se nas figuras 25 e 26 (ver a descrição da construção do descritor no capítulo 9.4.4.2).

Propriedades de Contribuição em CO₂ para as Alterações Climáticas

Nome: Contribuição em CO₂ para as Alterações Climáticas

Nome abreviado: Contrib.AC

Comentários: kg CO₂ /m³ de água produzida

Base de comparação:

- ☐ as opções
- ☐ as opções + 2 referências
- ☐ níveis qualitativos de performance:
- ☒ níveis quantitativos de performance:

Níveis de performance:

	+	Nível quantitativo
1		0.08
2		0.91
3		3.08

Indicador: Emissão de CO₂ por m³ de água pr

Abreviado: Emissão de CC Unidade: kg CO₂/

☒ critério

Figura 25 – Propriedades do PVF – Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

Contribuição em CO₂ para as Alterações Climáticas

	0.08	0.91	3.08	Escala actual
0.08	nula	fort-mfort	positiva	100.00
0.91		nula	extrema	50.01
3.08			nula	0.00

Julgamentos consistentes

extrema
mt. forte
forte
moderada
fraca
mt. fraca
nula

Figura 26 – Matriz de julgamentos do PVF – Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

É de realçar que o decisor ajustou a função de valor até onde considerou mais adequada a pontuação para o nível de impacto 2 – 0,91 kg CO₂/m³ de água produzida. Este procedimento foi realizado ao longo da aplicação do modelo, sempre que o decisor entendeu que a escala sugerida do M-MACBETH não correspondia à sua preferência. É de salientar contudo, que o modelo apresenta sempre os limites até onde podem ser alteradas as pontuações, de forma a manter a consistência dos julgamentos previamente dados, como mostra a figura 27 (Bana e Costa e Chagas, 2004).

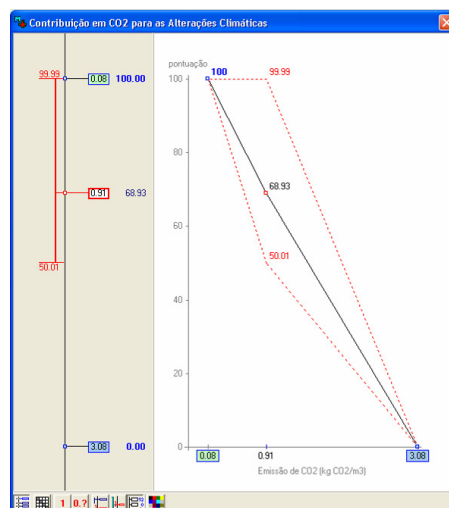


Figura 27 – Função de valor do PVF – Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas e ajustamento da pontuação do nível de impacto 0,91 kg CO₂/m³ de água produzida

O PVF – **Impacto nos ecossistemas hídricos**, o seu descritor e a matriz de julgamentos, com a escala de valor, construída apresentam-se nas figuras 28 e 29 (ver descrição da construção do descritor na secção 9.4.4.3).

Propriedades de Impacto nos ecossistemas hídricos

Nome: Impacto nos ecossistemas hídricos

Nome abreviado: Impacto.EcoHid

Comentários: Descarga da salmoura na dessalinização (emissário submarino com difusor com maior comprimento, monitorização do ecossistema marinho)

Base de comparação:

- ☐ as opções
- ☐ as opções + 2 referências
- ☒ níveis qualitativos de performance
- ☐ níveis quantitativos de performance

☒ critério

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Impacto nulo no ecossistema - sem medidas de mitigação	Sem medidas
2		Impacto da descarga da salmoura no ecossistema marinho (concentra 1 medida)	
3		Impacto da descarga da salmoura no ecossistema marinho (o dobro de 2 medidas)	
4		Impacto da captação de água no ecossistema hídrico - muitas medidas + q 2 medidas	

Figura 28 – Propriedades do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

	Sem medidas	1 medida	2 medidas	+ q 2 medidas	Escala actual	extrema
Sem medidas	nula	moderada	forte	fort-fort	100.00	mt. forte
1 medida		nula	mod-fort	forte	50.00	forte
2 medidas			nula	mod-fort	0.00	moderada
+ q 2 medidas				nula	-10.00	mt. fraca

Julgamentos consistentes

Figura 29 – Matriz de julgamentos do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

O PVF – **Aceitabilidade social e regulamentar**, o seu descritor e a matriz de julgamentos, com a escala de valor construída, apresentam-se nas figuras 30 e 31 (ver descrição da construção do descritor na secção 9.4.4.4).

Propriedades de Aceitabilidade social e regulamentar

Nome: Aceitabilidade social e regulamentar Nome abreviado: Aceitabilidade

Comentários: A aceitabilidade social reflete-se na elaboração da legislação

Base de comparação:

☐ as opções

☐ as opções + 2 referências

☒ níveis qualitativos de performance:

☐ níveis quantitativos de performance:

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Sem contestação pública nem barreiras regulamentares	s/B e s/C
2		Sem contestação pública e com barreiras regulamentares	s/C e c/B
3		Com contestação pública e com barreiras regulamentares	c/C e c/B

Figura 30 – Propriedades do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

Aceitabilidade social e regulamentar

	s/B e s/C	s/C e c/B	c/C e c/B	Escala actual	
s/B e s/C	nula	positiva	mt. forte	100.00	extrema
s/C e c/B		nula	forte	0.00	mt. forte
c/C e c/B			nula	-50.00	forte
					moderada
					fraca
					mt. fraca
					nula

Julgamentos consistentes

Figura 31 – Matriz de julgamentos do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

O PVF – **Flexibilidade na produção**, o seu descritor e a matriz de julgamentos, com a escala de valor, apresentam-se nas figuras 32 e 33 (ver a construção do descritor na secção 9.4.4.5).

Propriedades de Flexibilidade na produção

Nome: Flexibilidade na produção Nome abreviado: Flexib.Prod

Comentários: Possibilidade de oscilação da produção de água. Por exemplo, maior produção nos picos de maior consumo (época estival).

Base de comparação:

☐ as opções

☐ as opções + 2 referências

☒ níveis qualitativos de performance:

☐ níveis quantitativos de performance:

Níveis de performance:

-	+	Nível qualitativo	Abreviado
1		Existe a possibilidade de oscilação da produção (sazonalmente ou die Sazonal+diaria	
2		Não há possibilidade de oscilação da produção - o investimento na c Sem Oscilação	

Figura 32 – Propriedades do PVF – Flexibilidade na produção

Flexibilidade na produção

	Sazonal+diaria	Sem Oscilação	Escala actual	
Sazonal+diaria	nula	positiva	100.00	extrema
Sem Oscilação		nula	0.00	mt. forte
				forte
				moderada
				fraca
				mt. fraca
				nula

Julgamentos consistentes

Figura 33 – Matriz de julgamentos do PVF – Flexibilidade na produção

O PVF – **Descentralização da produção**, o seu descritor e a matriz de julgamentos, com a escala de valor construída, apresentam-se nas figuras 34 e 35 (ver descrição da construção do descritor na secção 9.4.4.6).

Figura 34 – Propriedades do PVF – Descentralização da produção

	Há Possib.P.D.	Não Possib.P.D.	Escala actual
Há Possib.P.D.	1	positiva	100.00
Não Possib.P.D.	nula	0.00	

Julgamentos consistentes

Figura 35 – Matriz de julgamentos do PVF – Descentralização da produção

O próximo passo consistiu na ponderação dos PVF, de forma a se calcular, pelo modelo aditivo, as pontuações globais de cada alternativa.

A ponderação com o método MACBETH – *Qualitative Swing Weighting*, inicia-se com a ordenação, pelo decisor, de **alternativas fictícias** por ordem decrescente de atractividade (de cima para baixo ou da esquerda para a direita). Uma alternativa fictícia que tenha a designação [xpto] corresponde a uma alternativa que está no nível BOM no PVF “xpto” e no nível NEUTRO nos restantes PVF.

O preenchimento da matriz de julgamentos (figura 36) é realizada efectuando em primeiro lugar a seguinte pergunta: “Imagine uma alternativa fictícia que é neutra em todos os PVF, qual a diferença de atractividade entre passar de neutro para bom neste PVF?” (Bana e Costa e Chagas, 2004). É iniciada assim a comparação de todas as alternativas com a alternativa [Neutro em tudo], na última coluna da matriz.

De seguida inserem-se os julgamentos de diferenças de atractividade entre os pares de alternativas fictícias, respondendo a uma pergunta como por exemplo a seguinte: “Qual a diferença de atractividade entre a passagem de neutro para bom no **PVF Contrib.AC** e a passagem de neutro para bom no **PVF Impacto.EcoHid**?” O esquema da figura 37 ajuda na percepção da pergunta formulada.

Ponderação (Tecnologia mais sustentável de produção de água)							
	[Contrib.AC]	[Impacto.EcoHid]	[Flexib.Prod]	[Descentr.Prod.]	[Aceitabilidade]	[Neutro em tudo]	Escala actual
[Contrib.AC]	nula	frac-mod	mod-fort	moderada	moderada	mt. forte	27.00
[Impacto.EcoHid]		nula	mod-fort	mod-fort	mod-fort	fort-mfort	24.00
[Flexib.Prod]			nula	mod-fort	mod-fort	forte	21.00
[Descentr.Prod.]				nula	mod-fort	forte	17.00
[Aceitabilidade]					nula	moderada	11.00
[Neutro em tudo]						nula	0.00

Julgamentos consistentes

Figura 36 – Matriz de julgamentos de ponderação

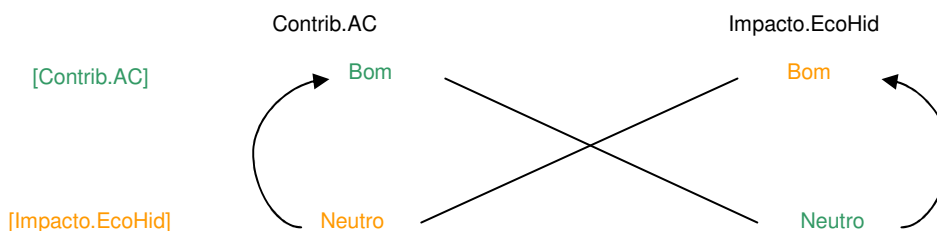


Figura 37 – Esquema auxiliar das perguntas de aplicação do método de ponderação

É de realçar os valores de ponderação sugeridos pelo M-MACBETH foram ajustados pelo decisor, nomeadamente, foi reduzida a percentagem do PVF Aceitabilidade social e regulamentar, obtendo-se a distribuição dos pesos como mostra a figura 38.

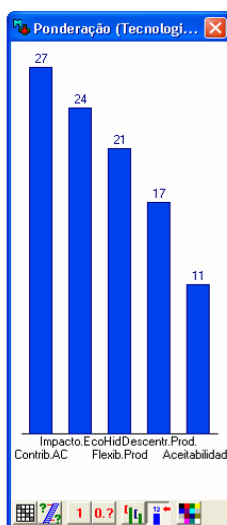


Figura 38 – Ponderação dos PVF

É de referir que, no sentido de facilitar a aplicação deste método de ponderação, de forma a ser explícito o que estava a ser comparado, foram sempre mostrados ao decisor os níveis de impacto de referência BOM e NEUTRO (figura 39).

Uma vez que em todos os PVF não houve uma comparação directa de alternativas, mediram-se os impactos das alternativas recorrendo aos descritores anteriormente definidos, ou seja, às funções de valor construídas. A tabela de *performances* (figura 40) mostra os níveis de impacto que foram

inseridos para cada alternativa considerada no modelo.¹⁸ A tabela de ordenações apresenta, para cada PVF, a ordenação das alternativas do modelo (figura 41).

Referências de ponderação					
Referências globais	Contrib.AC	Impacto.EcoHid	Aceitabilidade	Flexib.Prod	Descentr.Prod.
[Contrib.AC]	0.08	Sem medidas	s/B e s/C	Sazonal+diária	Há Possib.P.D.
[Impacto.EcoHid]	0.91	1 medida	s/C e c/B	Sem Oscilação	Não Possib.P.D.
[Flexib.Prod]	3.08	2 medidas	c/C e c/B		
[Descentr.Prod.]		+ q 2 medidas			
[Aceitabilidade]					
[Neutro em tudo]					

Figura 39 – Referências de ponderação

Tabela de performances					
Opções	Contrib.AC	Impacto.EcoHid	Aceitabilidade	OscilacaoProd	Prod.Descentr.
OI combóssil	3.08	2 medidas	c/C e c/B	Sazonal+diária	Não Possib.P.D.
OI solar	0.08	2 medidas	s/C e c/B	Sazonal+diária	Há Possib.P.D.
MED combóssil	1.76	1 medida	c/C e c/B	Sazonal+diária	Não Possib.P.D.
MED solar	0.27	1 medida	s/C e c/B	Sazonal+diária	Há Possib.P.D.
Convencionais	0.91	+ q 2 medidas	s/B e s/C	Sem Oscilação	Não Possib.P.D.

Figura 40 – Tabela de performances

Tabela de ordenações					
Contrib.AC	Impacto.EcoHid	Aceitabilidade	Flexib.Prod	Descentr.Prod.	
0.08	Sem medidas	s/B e s/C	Sazonal+diária	Há Possib.P.D.	
OI solar	MED combóssil	Convencionais	OI combóssil	OI solar	
MED solar	MED solar	s/C e c/B	OI solar	MED solar	
Convencionais	2 medidas	OI solar	MED combóssil	Não Possib.P.D.	
MED combóssil	OI combóssil	MED solar	MED solar	OI combóssil	
3.08	OI solar	OI combóssil	Sem Oscilação	MED combóssil	
OI combóssil	Convencionais	MED combóssil	Convencionais	Convencionais	

Figura 41 – Tabela de ordenações

O passo seguinte consiste na obtenção dos valores globais das alternativas. A tabela da figura 42 mostra as pontuações obtidas para cada alternativa.

Tabela de pontuações						
Opções	Global	Contrib.AC	Impacto.EcoHid	Aceitabilidade	OscilacaoProd	Prod.Descentr.
[Bom em tudo]	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
MED solar	73.91	88.56	50.00	0.00	100.00	100.00
OI solar	65.00	100.00	0.00	0.00	100.00	100.00
MED combóssil	35.71	30.42	50.00	-50.00	100.00	0.00
Convencionais	22.10	50.01	-10.00	100.00	0.00	0.00
OI combóssil	15.50	0.00	0.00	-50.00	100.00	0.00
[Neutro em tudo]	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Pesos :		0.2700	0.2400	0.1100	0.2100	0.1700

Figura 42 – Tabela de pontuações

Analisando a figura 42, verifica-se que todas as alternativas são positivas, obtendo todas pontuações acima de zero pontos, ou seja, acima da alternativa [Neutro em tudo]. Por outro lado, não existe nenhuma alternativa que seja superior à alternativa [Bom em tudo]. É de realçar a posição mais

¹⁸ Inseriram-se os valores, quando se tratava de um descritor contínuo (caso do PVF Contrib.AC) e nos restantes PVF, por tratarem de descritores de nível discreto, seleccionou-se, para cada alternativa, o respectivo impacto da lista de níveis de impacto criados.

elevada das alternativas de dessalinização com energia solar, seguida da MED com combustível fóssil. A alternativa dos métodos convencionais de obtenção de água ficou em penúltimo lugar de entre as cinco alternativas do modelo, restando em último lugar a alternativa de OI com combustível fóssil.

É de realçar que a tecnologia de Osmose Inversa com base em electricidade da rede local (sendo que a produção de electricidade se baseia maioritariamente, em Portugal, na queima de combustíveis fósseis), portanto correspondente à alternativa que ficou classificada em último lugar, constituiu a solução proposta por um estudo de viabilidade da implementação da dessalinização no Algarve, encomendado pela Águas do Algarve, S. A. à consultora Hidroprojecto, S. A..

O último passo na reunião de aplicação do modelo consistiu na **Análise Custo-Benefício** (ver secção 9.4.4.7). O gráfico obtido para a avaliação da alternativa de produção de água mais sustentável foi o que se apresenta na figura 43.

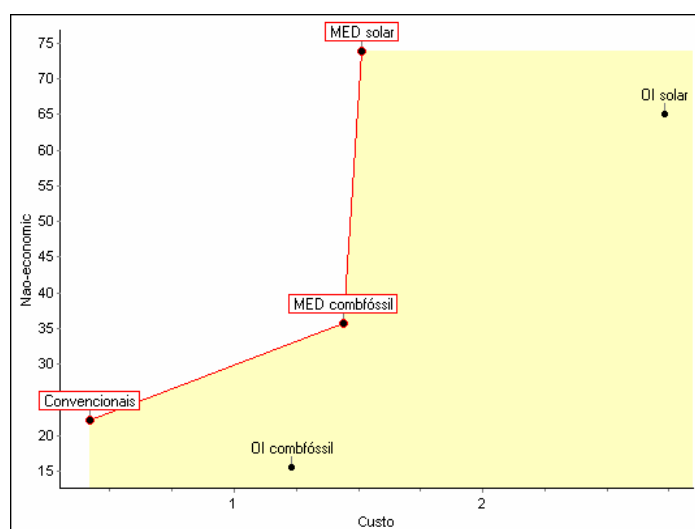


Figura 43 – Resultado da análise custo-benefício

A figura 43 apresenta a análise custo-benefício, em que o eixo dos yy diz respeito a todos os benefícios não-económicos, ou seja, corresponde a todos os PVF, e o eixo dos xx corresponde ao custo de produção de água, em €/m³ de água produzida. Pode afirmar-se que a Osmose Inversa, tanto com combustível fóssil como recorrendo a painéis fotovoltaicos, são claramente dominadas.

Perante a questão: “Será que está disposto a pagar o acréscimo de X no preço, para ter o acréscimo de Y nos benefícios?” e face às alternativas passíveis de serem escolhidas (as não-dominadas), o decisor apresentou as seguintes escolhas:

- Entre as duas alternativas não-dominadas de dessalinização: **MED combfóssil** e a **MED solar**, a escolha recairia na alternativa 4 – MED solar;
- Entre a alternativa **MED solar** e a alternativa **Convencionais**, a alternativa 5 – Métodos convencionais de obtenção de água, é escolhida para reforçar o abastecimento de água no Algarve, devido ao seu reduzido custo, apesar de ter substancialmente menos benefícios, mais precisamente menos 51,81 pontos do que a alternativa 4 – MED solar.

Pode-se dizer que as alternativas A4 (MED solar) e A5 (Convencionais) são alternativas eficientes pois não apresentam nenhuma alternativa com o mesmo custo, que as ultrapasse em termos de benefícios. No caso da MED solar, este facto é notório, quando comparado com a alternativa de MED comb.fóssil.

Assim, se a componente económica pesar mais na decisão final, a A5 deve ser a escolhida. Por outro lado, se se atribuir igualmente importância às componentes não económicas, como as componentes tecnológica, ambiental e social, a AdAlg deve estar disposta a pagar mais pela mais-valia sócio-tecnológico-ambiental que a A4 – MED solar representa (numa perspectiva de sustentabilidade a médio ou longo prazo).

É de salientar também que a passagem da alternativa A5 para a A4 representa uma diferença de 51,81 pontos e em termos de custo de 1,09 €/m³.

Verifica-se uma elevada discrepância entre os benefícios associados à alternativa 4 – MED solar e as duas alternativas não-dominadas, A5 e A3. A alternativa MED com combustível fóssil não deve ser a escolhida uma vez que apresenta um custo muito superior às tecnologias convencionais (mais 1,02 €/m³ do que os métodos convencionais) e apresenta apenas mais 13,61 pontos em termos de benefícios, do que as tecnologias convencionais.

9.6 Análise de sensibilidade

Nesta análise de sensibilidade procura-se averiguar quais as variações do peso de cada PVF que alterariam a ordenação final das alternativas. Na realidade, pretende-se, com a análise da variação dos pesos, validar os julgamentos de ponderação dados pelo decisor e, conseqüentemente, os resultados obtidos, antes de ser feita qualquer recomendação final.

Os resultados correspondentes à alteração no peso do PVF – **Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas** apresentam-se na figura 44.

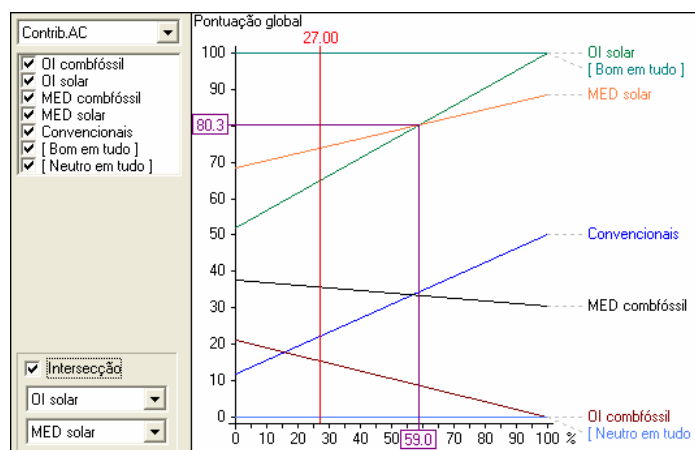


Figura 44 – Alteração no peso do PVF – Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

Realça-se que nesta análise o peso de cada PVF será indicado com a letra k e as alternativas serão apresentadas com a numeração previamente atribuída A1, A2, A3, A4 e A5 (ver quadro 18).

Para $k < 15,9\%$, a A1 (OI combfóssil) ficaria acima da A5 (convencionais) (ver figura A5.2.1 em anexo). Contudo esta alteração no peso é absurda pois alteraria a ordenação dos pesos definida pelo decisor no método MACBETH – *Qualitative Swing Weighting* (figura 38).

Verifica-se que para $15,9 < k < 56,9$, a ordenação das alternativas se mantém. Por outro lado, se o peso variar no intervalo reduzido $[56,9 ; 59]$, a A5 (Convencionais) passaria a superar a pontuação da A3 (MED combfóssil) (ver figura A5.2.2 em anexo). Também para $k > 59\%$, a ordenação das alternativas passaria a ser a seguinte, por ordem decrescente de pontuação: $A2 < A4 < A5 < A3 < A1$ (OI solar < MED solar < Convencionais < MED combfóssil < OI combfóssil), como mostra a figura 44. Ou seja, a partir de 59%, ocorreriam duas trocas de posição e a A1 (OI combfóssil) permaneceria em último lugar.

Assim se conclui que o peso atribuído ao PVF – Contribuição em CO_2 para as alterações climáticas é robusto, sendo que a alteração da ordenação das alternativas só se verificaria se o peso fosse reduzido para menos de metade do seu valor ou se fosse aumentado para cerca de mais do dobro do seu valor. Assim, todas estas modificações não são possíveis, uma vez que a ordenação dos pesos teria que ser diferente da atribuída pelo decisor.

Os resultados correspondentes à alteração no peso do PVF – **Impacto nos ecossistemas hídricos** apresentam-se na figura 45 e nas figuras A5.2.3 a A5.2.5, em anexo.

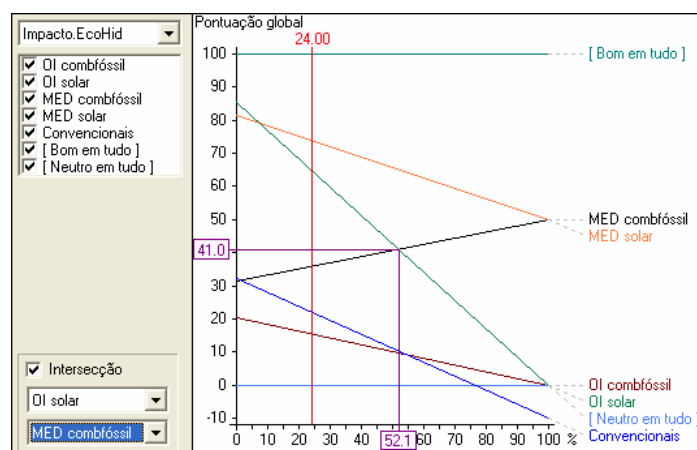


Figura 45 – Alteração no peso do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

Relativamente à análise de sensibilidade do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos, foram determinadas quatro intersecções que se consideraram relevantes das rectas de variação da pontuação em função da variação do peso¹⁹.

Pode-se concluir que para ocorrer alteração da ordenação final das alternativas ter-se-ia que reduzir o peso deste PVF para menos de um terço do seu valor (passando a ganhar a A2 - OI solar, em vez da A4 – MED solar). Por outro lado, se o peso aumentasse para mais do dobro ou do triplo do seu valor também se alteraria a ordem final das alternativas. É de salientar que a A5 (Convencionais)

¹⁹ O ponto de intersecção (1,7 ; 31,5) não foi considerado por se considerar ser um valor de peso muito reduzido e pouco relevante para a análise de sensibilidade, uma vez que não poderia ser escolhido.

apenas passaria a obter pontuação negativa, ou seja, situando-se abaixo da alternativa [Neutro em tudo], se o peso fosse superior a 76,3%.

Conclui-se que estas alterações nunca poderiam ser implementadas uma vez que alterariam a ordenação das alternativas fictícias, definidas aquando da implementação do método de ponderação.

Os resultados correspondentes à alteração no peso do PVF – **Aceitabilidade social e regulamentar** apresentam-se nas figuras 46 e 47 e nas figuras A5.2.6 e A5.2.7, em anexo.

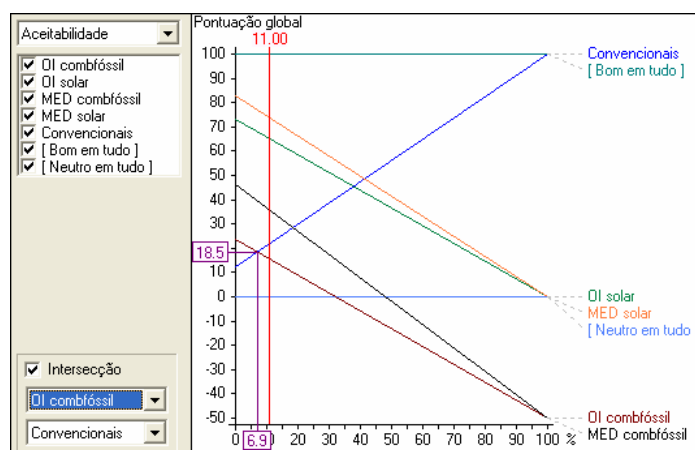


Figura 46 – Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

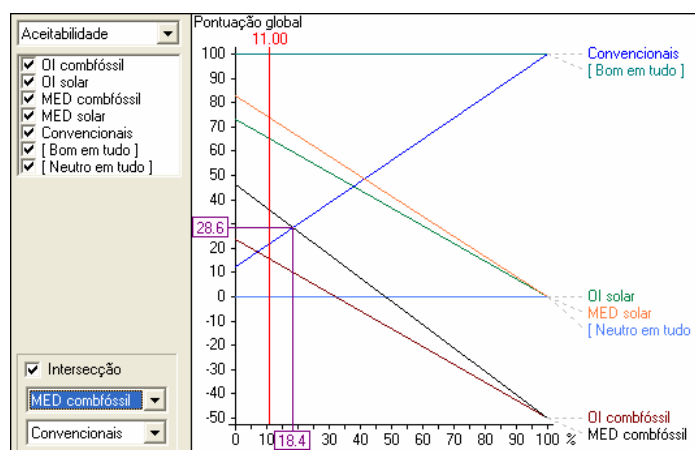


Figura 47 – Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

Para a análise de sensibilidade ao peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar, apresentam-se quatro intersecções. Quando $k < 6,9\%$, a A5 (Convencionais) passa a ser a alternativa com pior pontuação, ultrapassando a A1 (OI combóssil). Assim, para se verificar esta alteração na ordenação deve ser efectuado um decréscimo de mais de 37,3% no peso deste PVF. Esta alteração seria possível uma vez que não altera a ordenação dos pesos dos PVF e deveria ser discutida com o decisor (figura 48).

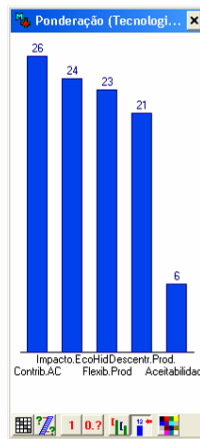


Figura 48 – Ponderação se fosse alterado o peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar para 6%

Para $18,4 < k < 37,7$ a ordem decrescente de pontuação das alternativas passa a ser a seguinte: A4 (MED solar) > A2 (OI solar) > **A5 (Convencionais)** > **A3 (MED combfóssil)** > A1 (OI combfóssil), ou seja, ocorre apenas a troca da posição da alternativa A3 (MED combfóssil) com a A5 (Convencionais). Ora, para esta alteração na ordenação final das alternativas ocorrer ter-se-ia que aumentar para cerca do dobro o peso deste PVF, tendo como valor limite de peso – 19,97%, imposto pelo modelo para não se alterar a ordenação dos pesos. Assim, considera-se excessiva esta modificação, uma vez que tornava muito próximos todos os pesos dos PVF, como mostra a figura 49, não indo de encontro com a preferência do decisor, que expressou que a aceitabilidade social e regulamentar constituiria o PVF com significativamente menos peso em relação aos restantes PVF.

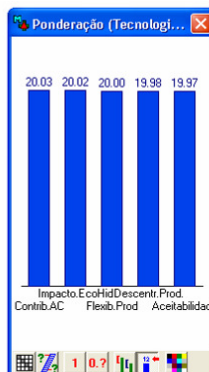


Figura 49 – Ponderação se fosse alterado o peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar para 19,97%

Considerando o intervalo $37,7 < k < 41,4$, pode-se verificar que a ordenação final das alternativas passaria a ser a seguinte: A4 (MED solar) > **A5 (Convencionais)** > **A2 (OI solar)** > **A3 (MED combfóssil)** > A1 (OI combfóssil), o que implica uma reordenação de três alternativas. Contudo, estes valores de peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar, já correspondem a mais do triplo do valor do peso considerado – 11%, o que já não é possível uma vez que implica uma alteração da ordem dos pesos dos PVF, estabelecida pelo decisor no método da ponderação.

O mesmo acontece para $k > 41,4\%$, que colocava a A5 (Convencionais) na liderança, mas cuja alteração da ordenação final das alternativas colide com a ordenação dos pesos estabelecida pelo decisor para os cinco PVF.

Os resultados correspondentes à alteração do peso no PVF – **Flexibilidade na produção** apresentam-se na figura 50.

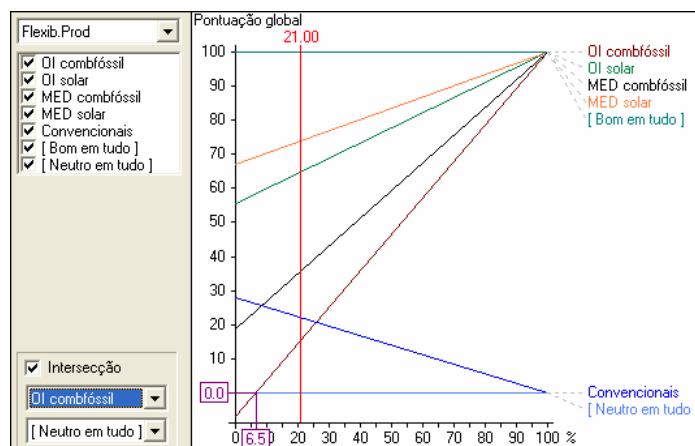


Figura 50 – Alteração no peso do PVF – Flexibilidade na produção

Como mostra a figura 50, verifica-se que a ordenação final das alternativas é alterada nos seguintes intervalos:

- para $k < 6,5$ é obtida a seguinte ordenação nas pontuações finais das alternativas: A4 (MED solar) > A2 (OI solar) > **A5 (Convencionais)** > **A3 (MED combóssil)** > [Neutro em tudo] > A1 (OI combóssil);
- para $6,5 < k < 8,6$ origina: A4 (MED solar) > A2 (OI solar) > **A5 (Convencionais)** > **A3 (MED combóssil)** > A1 (OI combóssil);
- e finalmente, quando $k > 25,9$ a alternativa A5 (Convencionais) passa a ser a última alternativa, em termos de pontuação, trocando com a A1 (OI combóssil).

Contudo, estas reordenações não são possíveis pela simples alteração do peso deste PVF, uma vez que o modelo admite apenas como possíveis valores de peso os valores pertencentes ao intervalo [14,32; 24,97], que não implicam uma alteração da ordenação dos pesos definidos pelo decisor.

Os resultados correspondentes à alteração do peso no PVF – **Descentralização da produção** apresentam-se na figura 51.

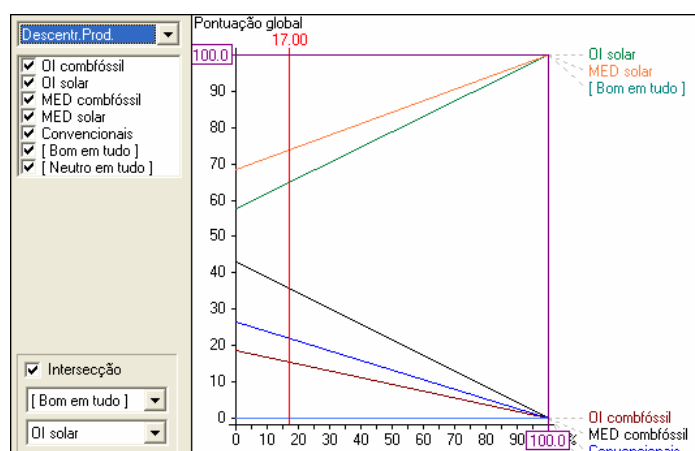


Figura 51 – Alteração no peso do PVF – Descentralização da produção

Pela análise da figura anterior verifica-se que, qualquer que seja o peso do PVF – Descentralização da produção (numa escala de 0 a 100%), o desempenho final das alternativas (ordenação final) permanecerá sempre a mesma, o que demonstra a robustez do peso obtido para este PVF. Conclui-se assim, que neste caso de estudo, para o conjunto das alternativas consideradas, o modelo mostrou ser robusto, assim como a ordenação final das alternativas.

Pode-se dizer que, de uma forma geral, todas as alternativas mostraram ser pouco sensíveis à alteração do valor do peso. Em todos os PVF foi apenas verificada uma única mudança razoável, nomeadamente no PVF – Aceitabilidade social e regulamentar. Neste PVF poder-se-ia alterar a ordenação das alternativas, nomeadamente, a A5 (Convencionais) poderia passar a ser a alternativa com pior pontuação, ultrapassando a A1 (OI combfóssil). Contudo, há que salientar que inclusivamente nesta alteração, que se verificou ser possível pela não alteração da ordem dos pesos dos PVF, só seria conseguida com uma redução do peso deste PVF em mais de 37,3%. O decisor teria que considerar se tal iria de encontro com as suas preferências (figura 48).

Há que referir que poder-se-ia utilizar outro software, como por exemplo o V. I. S. A. – *Visual Interactive Sensitivity Analysis*, que é específico da análise de sensibilidade, contudo não se dispunha da sua licença e considerou-se bastante razoável a análise de sensibilidade disponível no M-MACBETH.²⁰

9.7 Análise de robustez

Para a análise de robustez também se recorreu ao M-MACBETH, sabendo que existem no mercado outros instrumentos mais específicos deste tipo de análise, tais como o PROBE (desenvolvido pelo Prof. João Lourenço do Departamento de Engenharia e Gestão do IST).

Na figura 52 apresenta-se uma das análises de robustez efectuadas. Nesta análise contemplou-se toda a informação local e global, considerando uma variação na informação cardinal de 5% nas pontuações (informação local) e de 10% nos pesos (informação global). Obteve-se, assim, a seguinte ordenação das alternativas: A4 (MED solar) > A2 (OI solar) > A3 (MED combfóssil) = A5 (Convencionais) > A5 (Convencionais) = A1 (OI combfóssil), verificando-se que o modelo não é robusto para as posições das alternativas A3, A1 e A5, com estes valores de incerteza considerados. Contudo, é de salientar que se obtém sempre o mesmo resultado de análise de robustez, aumentado todos os valores de incerteza (informação cardinal), mesmo com valores já não considerados razoáveis (para além dos 30%). Assim, a ordenação das alternativas definida pelo modelo para as alternativas A4 (MED solar) e A2 (OI solar) é sempre válida e robusta. Pela análise da figura 52, relativamente à dominância clássica (Δ), verifica-se que: a A4 (MED solar) domina as alternativas A3 (MED comb.fóssil) e A1 (OI comb.fóssil); a A2 (OI solar) domina a A1 (OI comb.fóssil) e a A3 (MED comb.fóssil) domina a A1 (OI comb.fóssil). No que diz respeito à dominância aditiva (+): a A4 (MED

²⁰ A obtenção de licença do software M-MACBETH deveu-se à frequência das aulas da cadeira de MMAD (Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão) do IST (Instituto Superior Técnico), no 1º semestre do ano lectivo 2006/2007, como cadeira extra ao curso.

solar) domina aditivamente a A2 (OI solar); a A2 (OI solar) domina aditivamente a A3 (MED combustível) fóssil e tanto a A4 (MED solar) como a A2 (OI solar) dominam aditivamente a A5 (Convencionais).

	[Bom em tudo]	MED solar	OI solar	MED combfóssil	Convencionais	OI combfóssil	[Neutro em tudo]
[Bom em tudo]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲
MED solar		=	+	▲	+	▲	▲
OI solar			=	+	+	▲	▲
MED combfóssil				=	?	▲	+
Convencionais				?	=	?	+
OI combfóssil					?	=	+
[Neutro em tudo]							=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Contrib.AC	✓	✓	✓ ±5%
Impacto.EcoHid	✓	✓	✓ ±5%
Aceitabilidade	✓	✓	✓ ±5%
OscilaçãoProd	✓		✓ ±5%
Prod.Descentr.	✓		✓ ±5%

Informação global		
ordinal	MACBETH	cardinal
✓	✓	✓ ±10%

Nota: Tipos de informação variável na análise de robustez:

- informação ordinal – relativa somente à ordenação (excluindo intensidade de preferência – diferença de atractividade);
- informação MACBETH – inclui os julgamentos semânticos introduzidos no modelo, mas ignora qualquer escala de pontuação ou ponderação compatível com esses julgamentos.
- informação cardinal – denota uma escala específica e validada pelo avaliador.
- informação local – diz respeito à informação específica num determinado critério.
- informação global – diz respeito à informação de ponderação dos critérios.

Figura 52 – Análise de robustez: resultado predominante

	[Bom em tudo]	MED solar	OI solar	MED combfóssil	Convencionais	OI combfóssil	[Neutro em tudo]
[Bom em tudo]	=	▲	▲	▲	▲	▲	▲
MED solar		=	+	▲	+	▲	▲
OI solar			=	+	+	▲	▲
MED combfóssil				=	+	▲	+
Convencionais					=	+	+
OI combfóssil						=	+
[Neutro em tudo]							=

Informação local			
	ordinal	MACBETH	cardinal
Contrib.AC	✓	✓	✓ ±0%
Impacto.EcoHid	✓	✓	✓ ±0%
Aceitabilidade	✓	✓	✓ ±0%
Flexib.Prod	✓		✓ ±0%
Descentr.Prod.	✓		✓ ±0%

Informação global		
ordinal	MACBETH	cardinal
✓	✓	✓ ±2%

Figura 53 – Análise de robustez: resultado para máxima variação da informação cardinal global

Uma vez que a incerteza associada aos julgamentos de ponderação constitui a componente com maior incerteza associada, fez-se variar a incerteza dos valores de ponderação (informação global) e verificou-se que até 2% de incerteza, confirma-se a ordenação das alternativas obtida pelo modelo, nos dois tipos de dominância, não se obtendo nenhuma solução contraditória com os resultados do modelo (como mostra a figura 53).

Concluindo, pode-se dizer que o modelo é, globalmente, robusto, sendo que a análise de robustez valida os resultados obtidos para as alternativas que obtiveram a primeira e segunda posições, enquanto soluções com mais benefícios não económicos.

10. Conclusões e recomendações

Da revisão da informação disponível, conclui-se que as tecnologias de dessalinização, por destilação térmica ou por osmose inversa, constituem tecnologias de produção de água fiáveis, que possibilitam a produção de água com elevada qualidade e quantidade.

Pode-se dizer que o conhecimento ambiental, socio-económico, cultural e de saúde pública sobre as tecnologias de dessalinização de águas ainda é limitado. Porém, esta análise da aplicabilidade da dessalinização permitiu concluir sobre os pontos fortes, pontos fracos, ameaças e oportunidades (SWOT) associados à implementação deste processo de obtenção de água. Por outro lado, a ferramenta utilizada no caso de estudo – modelo multi-critério de apoio à decisão, também permitiu analisar os critérios fundamentais na escolha de uma tecnologia de reforço de um sistema de abastecimento de água. Conclui-se que é possível a aplicação da dessalinização quando todas as componentes, social, económica, tecnológica e ambiental, forem tidas em consideração e quando os custos forem reduzidos. Assim, estas tecnologias de dessalinização poderão reduzir os *deficits* de água, estando devidamente integradas num sistema de abastecimento de água com várias fontes de água possíveis.

Na análise de decisão, pode-se concluir que a abordagem MACBETH seguida demonstrou ser bastante adequada a este tipo de avaliação multi-critério. Na verdade, a eficácia desta análise depende da qualidade da estruturação do problema e, conseqüentemente, da informação de base disponível. Neste caso de estudo, a maior parte da informação baseou-se na revisão bibliográfica efectuada e nas entrevistas realizadas a especialistas. Quanto mais específica e precisa for a informação disponível, mais facilmente se determinam os pontos de vista relevantes para a análise de decisão. É de realçar que, numa análise de decisão futura, alguns dos pontos de vista fundamentais considerados poderão ser aperfeiçoados, no sentido de se tornarem mais operacionais e de mais fácil mensuração. Por exemplo, a não obtenção de custos e dados necessários a este modelo, constituíram obstáculos que foram sendo descritos ao longo da descrição da aplicação do modelo multi-critério.

Recomenda-se a realização de uma Análise de Ciclo de Vida do processo de produção de água potável de uma ETA nacional, como forma de se averiguar quais os impactos inerentes à produção de água, por via de métodos convencionais de obtenção de água potável.

No que diz respeito ao desempenho das várias alternativas consideradas no modelo multi-critério de apoio à decisão, em cada ponto de vista fundamental, conclui-se que a avaliação global das alternativas é positiva, sendo que as alternativas se situam entre os níveis “Bom” e “Neutro”. O modelo também apresentou ser robusto, tal como evidenciam as análises de sensibilidade e robustez.

Este caso de estudo permitiu conhecer alguns aspectos importantes: a ordenação dos pontos de vista fundamentais para um decisor (neste caso, o representante da empresa responsável pelo abastecimento de água da região algarvia); a ordenação final das alternativas de dessalinização em termos de benefícios não-económicos e, mais concretamente, a pontuação obtida pela alternativa 5 – métodos convencionais de obtenção de água. Conclui-se que as tecnologias de dessalinização, quando integradas com a produção de energia renovável, superam as restantes tecnologias

baseadas na queima de combustíveis fósseis. Este facto evidencia que mesmo em Análise de Ciclo de Vida, as energias renováveis constituem as verdadeiras tecnologias sustentáveis a implementar num futuro próximo, quando o custo final for reduzido, pela entrada destas tecnologias no mercado de forma massiva. Nessa altura, a alternativa 4 – MED solar deverá então ser a alternativa escolhida, como demonstrou o modelo multi-critério.

Salienta-se ainda o facto de a alternativa correspondente aos métodos convencionais de obtenção de água ter ficado em penúltimo lugar, em termos de benefícios não-económicos, antes da análise custo-benefício. Por outro lado, a alternativa de Osmose Inversa com combustível fóssil obteve a pior posição, não obstante constituir a tecnologia mais recomendada por estudos realizados nos últimos anos.

Na região algarvia, o processo de dessalinização da água do mar – MED solar, poderá constituir uma alternativa de produção de água, que permitirá a médio prazo (uma vez que os custos ainda não são competitivos), de forma fiável e sustentável, reforçar o abastecimento de água do seu sistema multi-municipal. De facto, esta solução é aceitável do ponto de vista social e possibilitaria, em situações de carência de água, aumentar a disponibilidade hídrica, com reduzidos impactos ambientais. A produção de água através desta tecnologia permitiria obter uma qualidade de água fiável e com extrema facilidade, aproveitando a elevada exposição solar que esta região do país possui. Demonstrou-se que a tecnologia de destilação MED, quando acoplada a um sistema de colectores parabólicos solares, constitui uma alternativa de elevada produção de água com elevada fiabilidade (Blanco *et al.*, 2002).

No que diz respeito aos impactos ambientais mais significativos desta tecnologia, tem-se o uso do solo e a rejeição da salmoura. Considera-se assim que o ruído, essencialmente durante a fase de construção (sendo menos significativo o ruído durante a fase de operação, relativamente às tecnologias por membranas), e o consumo de energia não renovável, em Análise de Ciclo de Vida dos equipamentos relativos à tecnologia em questão, são impactos menos relevantes.

Em relação ao uso do solo, a implementação da central num local onde exista *a priori* uma infra-estrutura de produção de água pode reduzir este impacto (Einav *et al.*, 2002). Contudo, há que ter em conta que a instalação da central dual de produção num local muito distante da costa marítima acarreta elevados custos no transporte de água e da salmoura, aumentando o comprimento das tubagens e a bombagem da água do mar. Assim, há que estabelecer um compromisso entre a não ocupação excessiva da zona costeira e a distância razoável ao nível de tubagens a implementar.

Como principais medidas de mitigação de impactos ambientais relativas à salmoura, considerando adequada a sua descarga no mar enquanto destino final, salienta-se a implementação de um emissário submarino com difusor, com comprimento e profundidade estudadas, que deve estar associado a um plano de monitorização do ecossistema marinho e de um modelo de dispersão da descarga da salmoura no mar. Uma vez instalada esta tecnologia de dessalinização sugerida, recomenda-se ainda a monitorização da sua *performance*, assim como da qualidade da água na rede de distribuição (análise química e microbiológica).

Referências bibliográficas

- AdAlg (2006). *Sistema Multimunicipal de Abastecimento de Água do Algarve*. Águas do Algarve, S. A. <www.aguasdoalgarve.pt>
- AdP (2006). Grupo Águas de Portugal. Empresa Águas do Algarve, S. A. <<http://www.adp.pt/frontend/portugues/section.asp?ids=1&ida=26&idc=38>>
- AdDP (2007). Relatório de Sustentabilidade 2006, Águas do Douro e Paiva. <<http://www.addp.pt/dados.php?id=downloads>>
- Afgan, N. H., Darwish, M., Carvalho, M. G. (1999). Sustainability assessment of desalination plants for water production. *Desalination Journal* 124, 19-31. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Akkad, A. A. (1990). Conservation in the Arabian Gulf countries. Management and Operations, *Journal of the American Water Works Association*, 40–50.
- Alegria, A., Jorge de Sousa, I., Almeida Santos, S., Cavaco, M. A., Coimbra, M. F., Cruz, V., Hespanhol, I., Mateus, I., Santos, E. P. (1998). Trihalometanos – Análise da situação em Portugal, *Congresso da Água*. <<http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/065.pdf>>
- Almeida, M. C. (2006). Fotografias retiradas na central de Osmose Inversa de Eilat, Israel.
- Ambienteonline (2005). “Água dessalinizada pode custar 0,45 euros por metro cúbico”. <<http://www.ambienteonline.pt/noticias/detalhes.php?id=2671>>
- Bana e Costa, C. A. (1993). *Processo de apoio à decisão: actores e acções; estruturação e avaliação*. Artigo disponibilizado na cadeira de Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão (MMAD) no IST, no ano lectivo 2006/2007.
- Bana e Costa, C. A e Chagas, M. P. (2004). A career choice problem: an example of how to use MACBETH to build a quantitative value model based on qualitative value judgments. *European Journal of Operational Research* 153, 323-331. Artigo disponibilizado na cadeira de Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão (MMAD), do Instituto Superior Técnico, no ano lectivo 2006/2007.
- Bana e Costa, C. A., De Corte, J-M, Vansnick, J-C. (2005). *Guião do utilizador do M-Macbeth (versão 1.1)*. Material de apoio ao software disponibilizado na instalação do M-MACBETH, tendo sido fornecida a licença na cadeira de Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão, do Instituto Superior Técnico. <<http://www.deg.ist.utl.pt/ensino/mmad.apdp/>>
- Baptista, J. M., Pássaro, Dulce Álvaro, Santos, R. F. (2006). *A nova Lei da Água e os serviços de abastecimento público de água e de saneamento de águas residuais urbanas*. Instituto Regulador de Água e Resíduos (IRAR). <http://www.irar.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/docum/textreg1_2006.pdf>
- Blanco, J., Zarza, E., Alarcón, D., Malato, S., León, J. (2002). *Advanced Multi-Effect Solar Desalination Technology: the PSA Experience*. CIEMAT- PSA. Spain. <[http://www.psa.es/webeng/aquasol/files/Congresos/Paper%20Zurich%202002%20Final%20Version%20\(Rev%20Final\).pdf](http://www.psa.es/webeng/aquasol/files/Congresos/Paper%20Zurich%202002%20Final%20Version%20(Rev%20Final).pdf)>
- Campbell, R. L. e Jones, A. T. (2005). Appropriate disposal of effluent from coastal desalination facilities. *Desalination Journal* 182, 365–372. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Cotruvo, J. (2006). *Desalination guidelines development for drinking water: background*. World Health Organization. <http://www.who.int/water_sanitation_health/dwg/nutrientschap2.pdf>
- Cooley, H., Gleick, P. H., Wolff, G. (2006). *Desalination, with a grain of salt*. A California perspective, Pacific Institute, USA, Junho. <<http://www.pacinst.org/reports/desalination/index.htm>>
- DN (2005). “Em Alvor vai retirar-se o sal da água do mar”. Diário de Notícias on-line, 17 de Julho. <http://dn.sapo.pt/2005/07/17/tema/em_alvor_retirarse_o_da_agua_mar.html>

- DO Ó, A. e Monteiro, J.P. (2005). *Diagnóstico do Risco de Secas no Algarve – uma abordagem geográfica*, X Colóquio Ibérico de Geografia, Évora, Associação Portuguesa de Geografia. (cit. por. DO Ó e Monteiro, 2006).
- DO Ó, A. e Monteiro, J. P. (2006). *Estimação da procura real de água no Algarve por sectores*. e-GEO – Centro de Estudos de Geografia e Planeamento Regional, FCSH-UNL, Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente, Universidade do Algarve.
- Dolnicar, S. (2006). *Public perception of desalinated versus recycled water in Australia*. Faculty of Commerce – Papers, University of Wollongong, Australia.
<<http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1145&context=commpapers>>
- EIA (2007). *South Africa energy data, statistics, and analysis – oil, gas, electricity, coal*. Energy Information Agency, Official Statistics from the U. S. Government.
<http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/South_Africa/Background.html>
- Einav, R., Harussi, K., Perry, D. (2002). The footprint of the desalination processes on the environment. *Desalination Journal* 152, 141-154. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Embrapa (2006). Banco de Notícias da Embrapa Semi-Árido - Tecnologia de convivência com o semi-árido integra produção de água potável, criação de peixe e de caprinos/ovinos.
<<http://www.cpatia.embrapa.br/noticias/noticia41.html>>
- ESCWA (2001). *Water Desalination Technologies in the ESCWA Member Countries*. Economic and Social Commission for Western Asia, United Nations, New York.
<<http://www.escwa.org.lb/information/publications/edit/upload/tech-01-3-e.pdf>>
- Ettouney, H. (2006). Design of single-effect mechanical vapor compression, *Desalination Journal* 190, 1-15.
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Furukawa, D. H. (1997). *A Review of Seawater Reverse Osmosis*. IDA Desalination Seminar, Cairo, Egypt, September (cit. por Semiat, 2000).
- Geta, J. A. L., Moreno, M. M. (2000). *Las aguas salobres, una alternativa al abastecimiento en regiones semiaridas*. Instituto Geológico y Minero España.
<http://www.igme.es/internet/web_aguas/igme/publica/pdfs/artcon21.pdf>
- Gleick, P.H. (1993). *Water in Crisis: A Guide to the World's Fresh Water Resources*. New York: Oxford University Press. cit. por (Cooley, H. et al., 2006).
- Hajeeh, M. e Al-Othman, A. (2005). Application of the analytical hierarchy process in the selection of desalination plants. *Desalination Journal* 174, 97-108. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Hamed, O. (2005). Overview of hybrid desalination systems – current status and future prospects. *Desalination Journal* 186, 207-214. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Hidroprojecto (2005). *Estudo técnico-económico do reforço de abastecimento de água do Algarve*. Estudo encomendado pela Águas do Algarve S. A. à consultora HIDROPROJECTO, Engenharia e Gestão, S. A.
- Hispagua (2001). Sistema Español de Información sobre el Agua.
<<http://hispagua.cedex.es/documentacion/especiales/desalacion.php?localizacion=Desalaci%F3n>>
- INETI (2006). *Projecto AQUASOL – Dessalinização com tecnologia solar híbrida e descarga zero*. Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação, L.P.
<http://www.ineti.pt/projectos/projectos_frameset.aspx?id=282&t=>>
- IRAR (2006). *Intervenções Públicas de 1999 a 2003*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Coordenação: Jaime Melo Baptista e João Almeida, Junho de 2006.
<http://www.irar.pt/PresentationLayer/ResourcesUser/docum/IntPub_1999_2003.pdf>
- JN (2005a). “Dessalinização no Algarve só por via privada”. *Jornal de Notícias*.
<http://jn.sapo.pt/2005/08/22/sociedade/dessalinizacao_algarve_por_privada.html>

- JN (2005b). "Porto Santo tira do mar água que falta na ilha". *Jornal de Notícias*.
<http://jn.sapo.pt/2005/08/22/sociedade/porto_santo_tira_mar_agua_falta_ilha.html>
- Keeney, R. L., Raiffa, H. (1976). *Decisions with Multiple objectives: Preferences and Value Trade-off*. John Wiley.
(cit. por Lourenço, 2006).
- Kita, H., Lau, W., Milonas, J., Wright, R. (2005). *Desalination: the future of fresh water*. Desalination Report, Program on the Environment, University of Washington, USA.
<<http://depts.washington.edu/poeweb/gradprograms/envmgt/2005symposium/DesalinationReport.pdf>>
- Landu, L., Brent, A. C. (2006). *Environmental life cycle assessment of water supply in South Africa: The Rosslyn industrial area as a case study*. Department of Engineering and Technology Management, University of Pretoria, South Africa. South African Water Research Commission.
<<http://www.wrc.org.za/downloads/watersa/2006/April%2006/1929.pdf>>
- Lourenço, J. (2006). *Uma introdução à metodologia multi-critério*. Departamento de Engenharia e Gestão. Aparentamentos disponibilizados na cadeira de Modelos Multi-critério de Apoio à Decisão (MMAD) no IST, no ano lectivo 2006/2007.
- Mahi, P. (2001). Developing environmental acceptable desalination projects. *Desalination Journal* 138, 167-172.
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- MCHD (2003). *Desalination and Public Health*. MCH - Monterey County Health Department, Division of Environmental Health. California Department of Health Services.
- Medina, J. A. (2000). *Desalación de Aguas Salobres y de Mar, ósmosis Inversa*. Ed. Mundi-Prensa (cit. por Valero, A. et al., 2001).
- Moya, E. Z. (1998a). *Desalación*. Plataforma Solar de Almería. Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
<<http://www.gem.es/materiales/document/document/g01/d01105/d01105.htm>>
- Moya, E. Z. (1998b). *Desalación del agua mediante energías renovables*. Plataforma Solar de Almería. Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
<<http://www.gem.es/materiales/document/document/g01/d01204/d01204.htm>>
- OAS (2006). *Desalination by reverse osmosis*. Organización dos Estados Americanos.
<<http://www.oas.org/dsd/publications/Unit/oea59e/ch20.htm>>
- Osmonics (1997). *Osmonics Pure Water Handbook*. Osmonics, Inc. Minesota, USA.
<<http://www.osmonics.com/Library/1154273-%20Lit-%20Pure%20Water%20Handbook.pdf>>
- OTV (1999). *Desalinating seawater*. Memotechnique, Planete Technical Section, 31 (February 1999):1. (cit. por Cooley, H. et al., 2006).
- Papapetrou, M, Epp, C, Teksoy, S., Sözen, S., Ortín, V. S., Seibert, U., Vogt, G. (2005). Market analysis for Autonomous Desalination Systems powered by renewable energy in southern Mediterranean countries. Case study on Turkey. *Desalination Journal* 183, 29-40. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- PBHRA (2000). *Plano de Bacia Hidrográfica das Ribeiras do Algarve*. Instituto da Água e Direcção Regional do Ambiente do Algarve. Comissão de Coordenação e Desenvolvimento Regional do Algarve (CCDR-Algarve). Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
<<http://www.ccdr-alg.pt/ccr/index.php?module=ContentExpress&func=display&ceid=287>>
- PEAASAR II (2007). *O Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais para o período 2007-2013 (PEAASAR II)*, aprovado através do Despacho 2339/2007 do Ministro do Ambiente, Ordenamento do Território e Desenvolvimento Regional, publicado em Diário da República 2.ª Série a 14 de Fevereiro de 2007. <<http://www.dre.pt/pdf2sdip/2007/02/032000000/0392203964.pdf>>

- Pinheiro, M. (2005). Acetatos da cadeira de Estudos de Impacto Ambiental, 5º ano, 1º semestre da Licenciatura em Engenharia do Ambiente, IST.
- PNA (2002). Plano Nacional da Água – Volumes I e II. Usos, Consumos e Necessidades de Água. Ministério do Ambiente e Ordenamento do Território, Lisboa.).
<http://www.inag.pt/inag2004/port/a_intervencao/planeamento/pna/pdf_pna_v1/v1_c2_t04.pdf>
- PRPA (2000). *Plano Regional da Política de Ambiente, Região Autónoma da Madeira 2000*. 101-108.
<<http://www.arem.pt/download/prpa/PRPA2.pdf>>
- PS (2005). Destaque nº 2 - Carência nos Recursos Hídricos: a dessalinização como alternativa, Raplus, Soluções Térmicas, SA. <<http://www.raplus.pt/destaque2.htm>>
- Purnama, A., Al-Barwani, H. H., Smith, R. (2005). *Desalination Journal* 185, Calculating the environmental cost of seawater desalination in the Arabian marginal seas, 79-86.
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Raluy, R. G., Serra, L., Uche, J., Valero, A. (2004). Life-cycle assessment of desalination technologies integrated with energy production systems. *Desalination Journal* 167, 445-458.
<<http://www.desline.com/articoli/5673.pdf>>
- Rjoub, A. (1999). *Water Resources in UAE*. (cit. por ESCWA, 2001).
- Sadhwani, J. J., Veza, J. M., Santana, C. (2005). Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination Journal* 185, 1–8. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Santos, F. D., Forbes, K., Moita, R. (2002). *Climate Change in Portugal: Scenarios, Impacts and Adaptation measures* – SIAM. Editora Gradiva, Lisboa, Portugal.
<<http://www.siam.fc.ul.pt/index.html>> e <http://www.siam.fc.ul.pt/SIAM_Book/>
- Semiati, R. (2000). *Desalination: Present and Future*, Water Research Institute, Technion City, Haifa, Israel, *Water International*, 25 (1), 54 – 65.
- Shiklomanov, I. (1999). *World Water Resources: Modern Assessment and Outlook for 21-st Century*. Hidrological Institute, San Petersburgo. (cit. por Valero *et al.*, 2001).
- Swartz, C.D., Plessis, J.A., Burger, A.J. e Offringa, G. (2006). *A desalination guide for South African municipal engineers*. South African Water Research Commission.
<<http://www.wrc.org.za/downloads/watersa/2006/WISA%20special%20ed/4.pdf>>
- Tchobanoglous, G., Burton, F. L. (1991). *Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse*. Metcalf & Eddy, Inc., McGraw-Hill.
- Torres, M. (1999). *La desalación de agua de mar*. Tecnologías de vanguardia. (cit. por Valero *et al.*, 2001).
- Thomas, J-S. e Durham, B. (2003). Integrated Water Resource Management: looking at the whole picture. *Desalination Journal* 156, 21-28. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Tsiourtis, N. X. (2001a). Seawater desalination projects. The Cyprus experience. *Desalination Journal* 139, 139-147. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Tsiourtis, N. X. (2001b). Desalination and the environment. *Desalination Journal* 141, 223-236.
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- UA (2006). Universidade da água - Dicionário Ambiental.
<<http://www.uniagua.org.br/website/default.asp?tp=3&pag=dicionario.htm#topo>>
- Valero, A., Uche, J., Serra, L. (2001). *La desalación como alternativa al Plan Hidrológico Nacional*. CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos), Universidad de Zaragoza, Gobierno de Aragon. <<http://circe.cps.unizar.es/spanish/isgwes/spain/desala.pdf>>
- Van der Mast, V. e May, S. (1994). *Comparison of desalination processes*, a presentation by Saudi Arabian Bechtel Company (Riyadh, 1994). (cit. por ESCWA, 2001).

- Yun, Y., Ma, R., Zhang, W., Fane, A. G., Li, J. (2006). Direct contact membrane distillation mechanism for high concentration NaCl solutions. *Desalination Journal* 188, 251–252.
<<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Wangnick, K. (2000). 2000 IDA worldwide desalting plants inventory: report No. 16. Wangnick Consulting, May. (cit. por ESCWA, 2001).
- Wangnick, K. (2002). *IDA Worldwide Desalting Plants Inventory*. Gnarrenburg, Germany: Produced by Wangnick, Consulting for the International Desalination Association. (cit. por Cooley *et al.*, 2006).
- Wateruse; Nanotechwire (2006). UCLA Engineers Develop Nanotech Water Desalination Membrane. Water Reuse Association. *Nanotechwire.com*. <<http://nanotechwire.com/news.asp?nid=3992>>
<http://www.watereuse.org/news/wrnews_111606.htm>
- Watkins, K. (2006). *Escassez de água, riscos e vulnerabilidade associados*. Relatório do Desenvolvimento Humano 2006, United Nations Development Programme.
<http://hdr.undp.org/hdr2006/pdfs/report/portuguese/05-Chapter4_PT.pdf>
- WD (2006). Desalination: Meeting Need or Greed? *World Development Journal*, Janeiro.
<http://antalya.uab.es/~c_ceambientals/activitats/doc_activitats_2006/seminari_greg_1.doc>
- Wolf, P. (2003). Innovations help shift water management policies. *Water & Wastewater*.
- WHO (2007). *Desalination for Safe Water Supply - Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination*. Public Health and the Environment, World Health Organization, Geneva.
<http://www.who.int/water_sanitation_health/gdwgrevision/desalination/en/>

Bibliografia consultada

- Andrienne, J., Alardin, F., (2004). Desalination site selection on North-African coasts. *Desalination Journal* 165, 231-239. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Aravossis, K., Vliamos, S., Anagnostopoulos, P., Kungolos, A. (2003). *An Innovative cost-benefit-analysis decision support system for the evaluation of alternative scenarios of water resources management*. Fresenius Environment bulletin, Parlar Scientific Publications, volume 12.
<http://www.arvis.gr/library/Downloads/docs/Water%20Resources%20FEB_4.pdf>
- Asociación Española de desalación y reutilización. <<http://www.aedyr.com/>>
- Aybar, H. S., (2005). An experimental study on an inclined solar water distillation system. *Desalination Journal* 180, 285-289. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Baalousha, H., (2006). Desalination status in the Gaza Strip and its environmental impact. *Desalination Journal* 196, 1-12. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- CCC (2004). *Seawater Desalination and the California Coastal Act*. California Coastal Commission.
<<http://www.coastal.ca.gov/energy/14a-3-2004-desalination.pdf>>
- CETC-Varennes (2003). *Pinch Analysis: For the Efficient Use of energy, water & hydrogen*. Natural Resources of Canada. <<http://cetc-varennes.nrcan.gc.ca>>
- Charalambous, C., Setford, M. (2001). Maximizing the benefits of desalination. *Desalination Journal* 138, 41-46.
<<http://www.desline.com/articoli/4130.pdf>>
- Dreizin, Y. (2006). Ashkelon seawater desalination project – off-taker's self costs, supplied water costs, total costs and benefits. *Desalination Journal* 190, 104-116. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- DWC (2003). *Water Desalination – Findings and Recommendations*. Department of Water Resources, State of California, USA. <<http://www.owue.water.ca.gov/recycle/desal/Docs/Findings-Recommendations.pdf>>

- Fath, H. E. S. (2005). A stand alone complex for the production of water, food, electrical power and salts for the sustainable development of small communities in remote areas. *Desalination Journal* 183, 13-22. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Grafakos, S., Diakoulaki, D. (2004). *Multicriteria Analysis*, Novembro. <<http://www.externe.info/expolwp4.pdf>>
- Jaber, J. O., Mohsen, M. S. (2001). Evaluation of non-convencional water resources supply in Jordan. *Desalination Journal* 136. 83-92. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- JN (2005c). "Dessalinização não é solução para Portugal". *Jornal de Notícias*. <http://jn.sapo.pt/2005/08/22/sociedade/dessalinizacao_e_solucao_para_portug.html>
- Joshi, S. V., Ghosh, P. K., Shah, V. J., Devmurari, C. V., Trivedi, J. J., Rao, P. (2004). CSMCRI experience with reverse osmosis membranes and desalination: case studies. *Desalination Journal* 165, 201-208. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Koning, J. (2005). Aqua Solaris – an optimized small scale desalination system with 40 litres output per square meter based upon solar-thermal distillation. *Desalination Journal* 182, 503-509. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- Liberman, B. (2006). *The importance of energy recovery devices in reverse osmosis. The future of desalination in Texas*. <<http://www.twdb.state.tx.us/Desalination/The%20Future%20of%20Desalination%20in%20Texas%20-%20Volume%202/documents/C8.pdf>>
- Lindemann, J. (2004). Wind and solar powered seawater desalination – applied solutions for the Mediterranean, the Middle East and the Gulf Countries. *Desalination Journal* 168, 73-80. <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/00119164>>
- LNEC (1987). Tradução de publicação T 836 - *Dessalinização solar de água do mar, Porto Santo*. Relatório final do projecto por V. Janisch, H. Drechsei e H. Volz, Lisboa.
- Niang-Diop, I., Bosch, H. (2004) *Formulating an Adaptation Strategy*. United Nations Development Programme. <http://www.undp.org/gef/undp-gef_publications/publications/apf%20technical%20paper08.pdf> <http://www.undp.org/gef/undp-gef_publications/undp-gef_publications.html>
- PNUEA (2001). Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água. <<http://www.inag.pt/inag2004/port/divulga/publicas.html>>
- RMI (2004). *Valuing Decentralized Wastewater Technologies - A catalog of Benefits, Costs, and Economic Analysis Techniques*. Prepared by Rocky Mountain Institute for U. S. Environmental Protection Agency, November.
- Silva, P. (1996). Dissertação de Mestrado – *Avaliação Multi-critério de medidas de controlo de cheias de um ponto de vista ambiental*, LNEC, IST, Engenharia Civil, Julho.
- Torres, M., Medina, J. A. (1999), *Desalination in Spain, a Race for Lowering Power Consumption*. IDA World Congress on Desalination and Water Reuse. San Diego, USA. (cit. por Valero *et al.*, 2001).
- Urban Water (2002). *Sustainable urban water management*, Programme Plan Phase 2, May 2002, Sweden. <<http://www.urbanwater.org/file/dyn/00000m/2800m/2805i/ProgramplanMay2002.pdf>>

Legislação consultada

- Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de Agosto. <www.diram.gov.pt>
- Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de Setembro. <www.diram.gov.pt>
- Decreto-Lei n.º 197/2005, de 8 de Novembro. <www.diram.gov.pt>
- DQA (2000). Directiva-Quadro da Água, Directiva n.º 2000/60/CE. <http://dqa.inag.pt/dqa2002/pdf/D_Q.pdf>
- LA (2005). Lei da Água, Lei n.º 58/2005, de 29 de Dezembro. <http://www.inag.pt/inag2004/port/divulga/legisla/pdf_nac/Lei%2058_2005.pdf>

Anexos

Índice

A1. Tecnologias de dessalinização	1
A2. Aspectos ambientais	7
A2.1 Uso de energias renováveis na dessalinização.....	8
A3. A sustentabilidade na dessalinização	9
A4. Aspectos económicos	10
A5. Caso de Estudo	11
A5.1 ETA de Alcantarilha	11
A5.2 Análise de sensibilidade	13

A1. Tecnologias de dessalinização

Quadro A1. 1 - Principais vantagens e desvantagens em dessalinizar Águas salobras *Versus* Água do mar (Geta e Moreno, 2000)

Vantagens de dessalinizar água salobra em relação a água do mar	Desvantagens da dessalinização de águas salobras subterrâneas
Promove a melhoria da qualidade da água do aquífero.	Disponibilidade limitada, devido aos condicionantes hidrogeológicos. Potencial presença de componentes perigosos para as membranas, tais como sulfatos, ferro ou estrôncio, que requerem um pré-tratamento que encarece o custo final da água produzida.
A utilização de água salobra dessalinizada para regadio melhora a produtividade agrícola, promove uma melhor conservação do solo do que água do mar dessalinizada.	Variabilidade na concentração dos sais dissolvidos, em função da evolução hidroquímica, nos aquíferos interiores, ou a variação em função da penetração da intrusão marinha, nos aquíferos costeiros. Assim, é necessário uma monitorização da qualidade da água a dessalinizar e um controlo da qualidade química das águas residuais geradas, de forma a ser possível modificar com rapidez as condições do processo.
Menor custo energético, podendo-se recorrer a uma tecnologia com menor pressão a nível das membranas, devido ao menor teor de sais dissolvidos a remover. Existem membranas que operam a uma pressão de 1,05 MPa, o que reduz consideravelmente os custos de operação. Com esta tecnologia é necessário 0,7 a 1 kWh/m ³ para dessalinizar águas salobras, enquanto que a água do mar necessita de 3,5 a 4,5 kWh/m ³ .	O aproveitamento das águas salobras de aquíferos, se não for efectuada com conhecimento suficiente, pode modificar a sua qualidade e as condições de fluxo natural da água do aquífero. Extracções que sejam mal planificadas podem acelerar os processos de dissolução de formações salinas ou contribuir para o avanço descontrolado da interface salina, contaminando as águas de boa qualidade. Existe uma certa dificuldade científica e técnica quando se trata de avaliar a quantidade e qualidade destes recursos, dificuldade esta que é acrescida no caso de aquíferos costeiros em contacto directo com o mar.

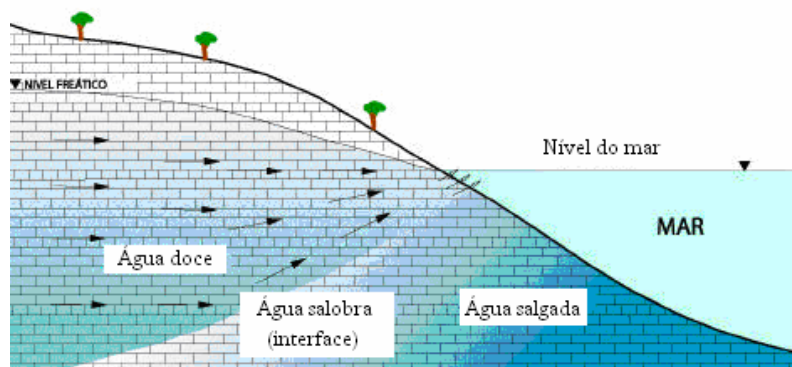


Figura A1. 1 - Esquema simplificado de um aquífero costeiro em contacto directo com o mar (Geta e Moreno, 2000)

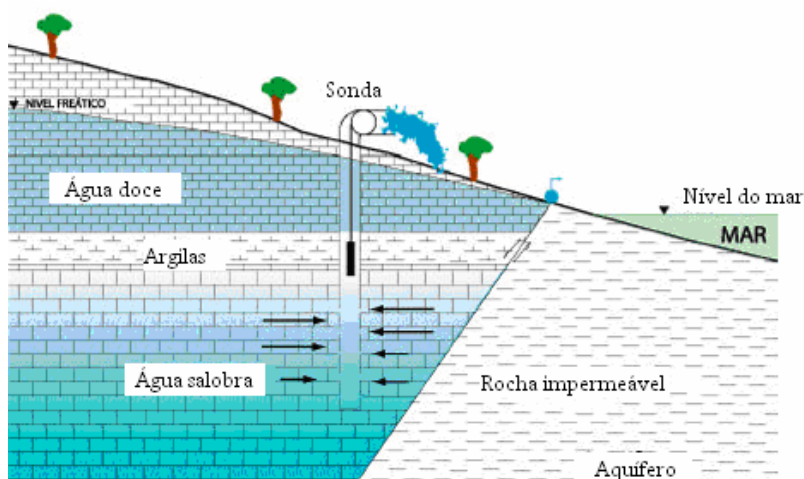


Figura A1. 2 - Esquema simplificado de uma exploração de um aquífero costeiro em contacto directo com o mar (Geta e Moreno, 2000)

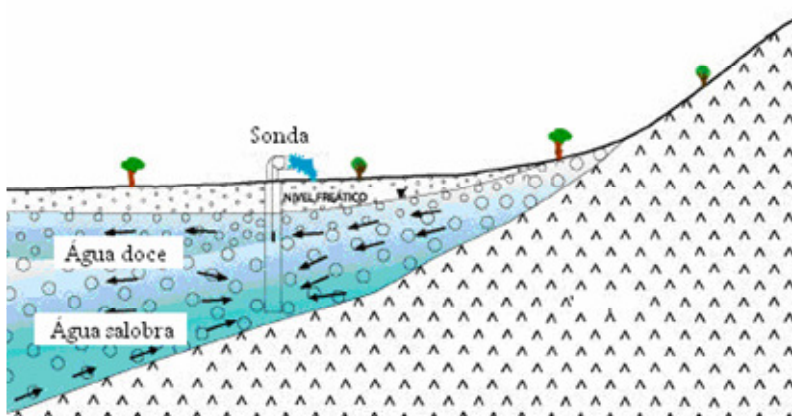


Figura A1. 3 - Esquema simplificado de uma exploração de um aquífero salinizado, localizado no interior (Geta e Moreno, 2000)

Quadro A1. 2 – Concentração típica de íons presentes na água do mar (Cotruvo, 2006)

Constituinte	Concentração (mg/l)
Cloro (Cl^-)	18 980
Sódio (Na^+)	10 556
Sulfato (SO_4^{2-})	2 649
Magnésio (Mg^{+2})	1 262
Cálcio (Ca^{+2})	400
Potássio (K^+)	380
Bicarbonato (HCO_3^-)	140
Estrôncio (Sr^{2+})	13
Bromo (Br^-)	65
Ácido Bórico (H_3BO_3)	26
Flúor (F^-)	1
Silicato (SiO_3^{2-})	1
Iodo (I^-)	<1
Outros	1
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	34 483

Quadro A1. 3 - Concentração típica de sais presentes na água do mar (Rjoub, 1999)

Composto	Concentração (ppm)	Porcentagem (%)
NaCl	23 476	68,08
MgCl_2	4 981	14,44
Na_2SO_4	3 917	11,36
CaCl_2	1 102	3,20
KCl	664	1,92
NaHCO_3	192	0,56
KBr	96	0,28
H_3BO_3	26	0,08
SrCl_2	24	0,07
NaF	3	0,01
Total	34 481	100

Quadro A1. 4 - Resumo das características dos desinfetantes mais utilizados (ESCWA, 2001)

Características	Cloro	Cloraminas	Dióxido de cloro	Ozono	Rad. UV
Desinfecção Bacteriológica	Excelente	Moderada	Excelente	Excelente	Boa
Desinfecção Viral	Excelente	Fraca	Excelente	Excelente	Boa
Influência do pH	Eficiência diminui com o aumento de pH	Relativamente independente do pH	Ligeiramente mais eficiente a pH alto	Residual dura mais a pH baixo	Insensível
Residual no Sistema de Distribuição	Sim	Sim	Sim	Não	Não
Sub-produto: Trihalometanos	Sim	Pouco provável	Pouco provável	Pouco provável	Pouco provável
Outros sub-produtos	Cloraminas, clorofenóis	Desconhecidos	Compostos clorados aromáticos, clorato, clorite	Aldeídos, ácidos carboxílicos aromáticos	Desconhecidos

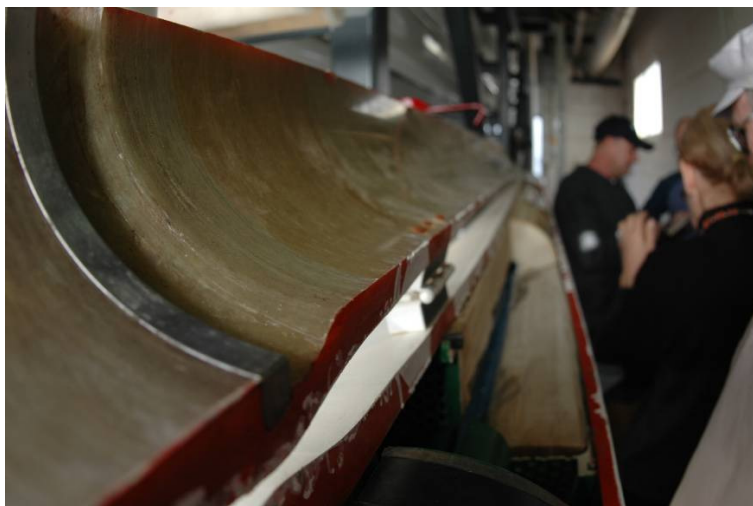


Figura A1. 4 - Corte de membranas em espiral (Almeida, 2006)



Figura A1. 5 – Central de osmose inversa em Eilat, Israel (Almeida, 2006)



Figura A1. 6 - Central de osmose inversa em Eilat, Israel (Almeida, 2006)

Quadro A1. 5 - Doses típicas dos reagentes necessários ao pré-tratamento em osmose inversa, de uma água a dessalinizar de boa qualidade (Hidroprojecto, 2005)

Reagente	Dose (g/m^3)
Ácido sulfúrico a 98%	45 a 55
Hipoclorito de sódio a 120 g/l	20 a 35
Cloreto de ferro a 40%	12,5 a 20
Polielectrólito a 100%	1 a 2
Bissulfito de sódio a 100%	10 a 20
Dispersante a 100%	1 a 4

Sistema de reconversão de energia - câmara hiperbárica

O sistema funciona do seguinte modo: as bombas de alta pressão, que alimentam os módulos de OI, são dimensionadas para um caudal igual ao permeado a produzir (Q_p). Um caudal igual ao do rejeitado (Q_r) é introduzido na câmara hiperbárica na qual, com a pressão do rejeitado dos módulos de OI e com um “booster”, confere-se pressão ao caudal Q_r que é introduzido na alimentação dos módulos, conjuntamente com o caudal das bombas de alta pressão Q_p .

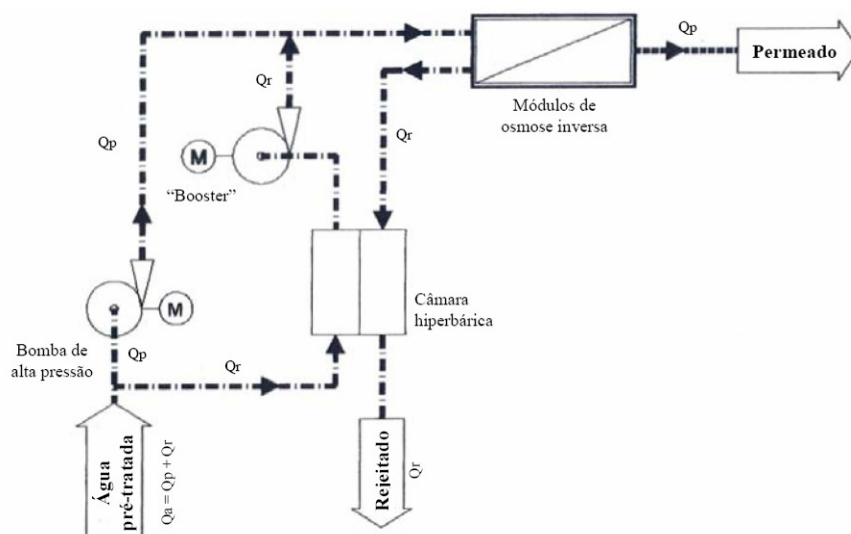


Figura A1. 7 – Sistema de reconversão de energia – Câmara hiperbárica (Hidroprojecto, 2005)

Nota: Câmara hiperbárica – compartimento selado para onde é bombeado ar comprimido, ou mistura respiratória, por meio de compressores.

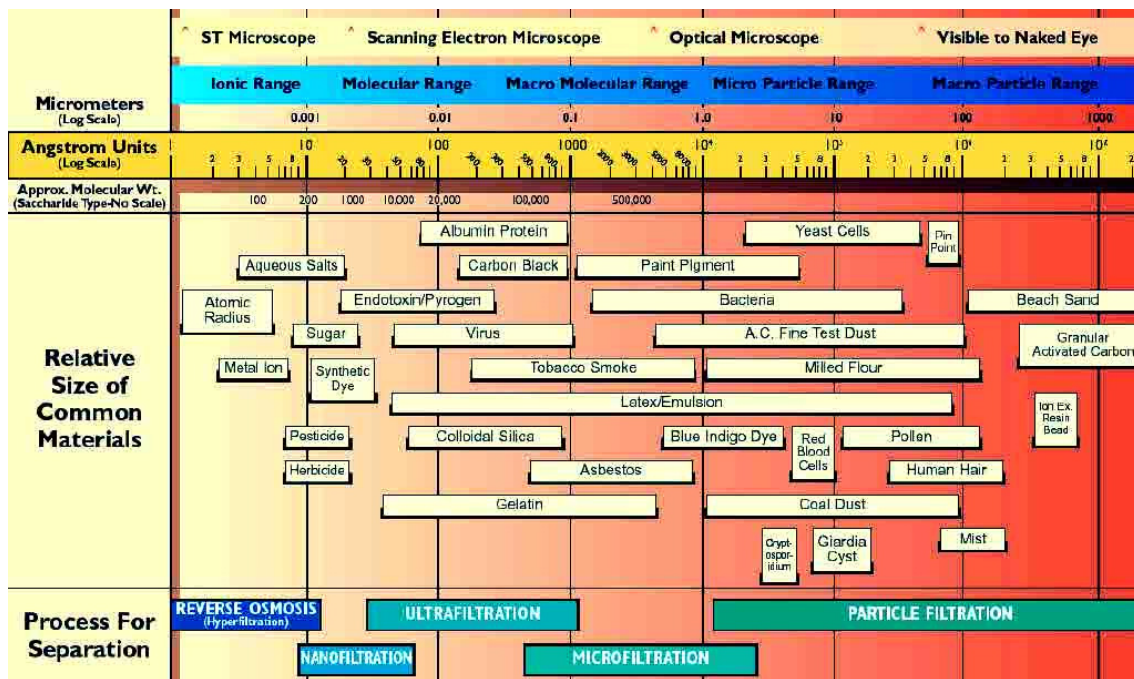
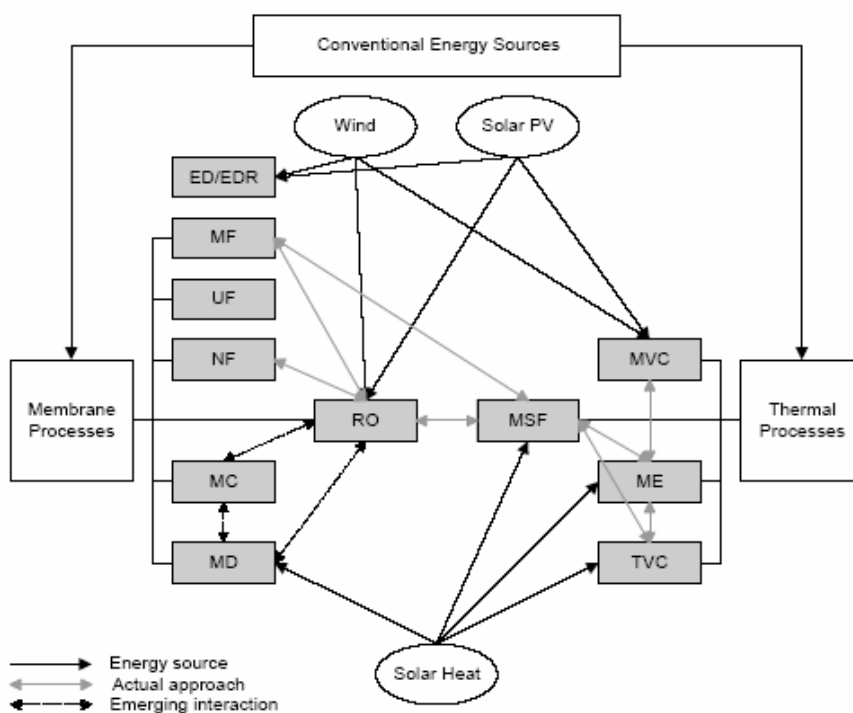


Figura A1. 8 – Processos de separação, intervalos de diâmetro e peso molecular das partículas (Osmonics, 1997)



Source: E. Drioli and E. Curcio, "A study on modern water desalination technologies in the Gulf ESCWA member countries", prepared for ESCWA in July 2001.

Note: ED = electrodialysis; EDR = electrodialysis reversal; PV = photovoltaic; MF = microfiltration; UF = ultrafiltration; NF = nanofiltration; MC = membrane contactor; MD = membrane distillation; RO = reverse osmosis; MSF = multistage flash; MVC = mechanical vapour compression; ME = multiple effect; TVC = thermal vapour compression.

Figura A1. 9 – Combinações viáveis das tecnologias de dessalinização (ESCWA, 2001)

A2. Aspectos ambientais

Quadro A2. 1 - Habitats marinhos sensíveis às centrais de dessalinização (Einav *et al.*, 2002)

Sensitivities of marine habitats to desalination plants [7]

-
1. High-energy oceanic coasts, rocky or sandy, with coast-parallel current
 2. Exposed rocky coast
 3. Mature shoreline (sediment mobility)
 4. Coastal upwelling
 5. High-energy soft tidal coast
 6. Estuaries and estuary-similar
 7. Low energy sand-, mud- and beach rocks-flats
 8. Coastal sabkhas
 9. Fjords
 10. Shallow low-energy bay and semi-enclosed lagoon
 11. Algal (cyanobacterial) mats
 12. Seaweed bay and shallows
 13. Coral reefs
 14. Salt marsh
 15. Mangal (mangrove flats)

Nota: Os habitats marinhos estão escritos por ordem decrescente de sensibilidade às centrais de dessalinização. O habitat menos sensível é o número 1 – a costa oceânica, e o mangal encontra-se na última posição, constituindo o habitat mais sensível, devido à elevada diversidade de espécies associadas.

A2.1 Uso de energias renováveis na dessalinização

Quadro A2.1. 1 - Distribuição da capacidade de produção, em m³/dia, de acordo com a fonte de energia renovável, tipo de água bruta e aplicação (ESCWA, 2001)

		Capacidade Nacional, número de unidades e custo			Capacidade de acordo com o tipo de energia renovável		Capacidade de acordo com a água bruta			Capacidade de acordo com a aplicação			
		Capacida de total	Unid.	Custo (milhões US\$)	Sol	Vento	Salobra	Mar	Rio	Municipal	População	Militar	Rega
Membros ESCWA	Emirados Árabes Unidos	580	2	10,22	580		500	80		500	80		
	Arábia Saudita	500	5	1,34	500			500			500		
	Egipto	425	4	1,14		425		425			125	300	
	Koweit	77	4	0,14	77		45	32			77		
	Katar	44	2	0,11	44			44			44		
	Jordânia	5	1	0,01	5			5			5		
Outros países Árabes	Líbia	3500	3	4,30	1500		3000						
	Tunísia	10	3	0,01	10	2000	10	500		3500	5		5
Países não árabes	Espanha	124	3	0,25	74	50	50	74			124		
	EUA	123	7	0,22	123		60	44	19		123		
	Japão	73	6	0,20	73			73			53		20
	França	72	2	0,09	60	12	60	12			72		
	Grécia	68	11	0,18	68			68		37	31		
	México	62	5	0,16	62		2	60		58	4		
	Alemanha	26	2	0,07	20	6		26			26		
	Paquistão	24	2	0,07	24			24			24		
	Itália	22	3	0,05	22			22		5	17		
	Canadá	17	4	0,06	7	10		17			17		
	Chile	17	2	0,03	17		15	2			17		
	Austrália	16	6	0,04	16		10	6			16		
	Índia	13	5	0,01	13		9	2	2	4	9		
	Indonésia	12	1	0,01	12		12				12		
	China	7	2	0,02	7			7			7		
	Rússia	4	2	0,00	4		4				4		
	Bulgária	2	1	0,01	2			2			2		
	Cabo Verde	2	1	0,01	2			2			2		
	Grenada	2	1	0,01	2			2			2		
	Haiti	2	1	0,01	2			2			2		
	Total	5829	91	18,77	3326	2503	3777	2031	21	4104	1400	300	25

A3. A sustentabilidade na dessalinização

O estudo *Sustainability assessment of desalination plants for water production* de Afgan *et al.* (1999) apresenta os seguintes quadros com indicadores de sustentabilidade para cada opção considerada.

Quadro A3. 1 - **Opção 1.** Central de dessalinização MSF *single purpose* (Afgan *et al.*, 1999)

Indicador de recurso - Fuel $\text{kg}_{\text{Fuel}}/\text{m}^3$	11
Indicador ambiental para CO_2 , $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3$	37
Indicador ambiental para SO_2 , $\text{kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3$	0,09
Indicador ambiental para NO_x , $\text{kg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$	0,06
Indicador económico, $\text{US}\$/\text{m}^3$	2,66

Quadro A3. 2 - **Opção 2.** Central de dessalinização MSF *dual purpose* (Afgan *et al.*, 1999)

Indicador de recurso - Fuel $\text{kg}_{\text{Fuel}}/\text{m}^3$	6,9
Indicador ambiental para CO_2 , $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3$	21,1
Indicador ambiental para SO_2 , $\text{kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3$	0,06
Indicador ambiental para NO_x , $\text{kg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$	0,04
Indicador económico, $\text{US}\$/\text{m}^3$	1,5

Quadro A3. 3 - **Opção 3.** Osmose Inversa com electricidade da rede local (Afgan *et al.*, 1999)

Indicador de recurso - Fuel $\text{kg}_{\text{Fuel}}/\text{m}^3$	1,8
Indicador ambiental para CO_2 , $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3$	6
Indicador ambiental para SO_2 , $\text{kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3$	0,005
Indicador ambiental para NO_x , $\text{kg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$	0,009
Indicador económico, $\text{US}\$/\text{m}^3$	0,7

Quadro A3. 4 - **Opção 4.** Osmose Inversa com painéis fotovoltaicos para produção de electricidade (Afgan *et al.*, 1999)

Indicador de recurso - Fuel $\text{kg}_{\text{Fuel}}/\text{m}^3$	0
Indicador ambiental para CO_2 , $\text{kg}_{\text{CO}_2}/\text{m}^3$	0
Indicador ambiental para SO_2 , $\text{kg}_{\text{SO}_2}/\text{m}^3$	0
Indicador ambiental para NO_x , $\text{kg}_{\text{NO}_x}/\text{m}^3$	0
Indicador económico, $\text{US}\$/\text{m}^3$	2,4

A4. Aspectos económicos

Quadro A4. 1 - Custo do combustível para dessalinizar água do mar (€/m³) em função da sua natureza (Valero *et al.*, 2001)

Combustível	Preço (€/GJ)	MSF	MED
Gás Natural	3,46	0,93-1,39	0,70-0,93
Petróleo	2,92	0,79-1,18	0,59-0,79
Carvão	0,92	0,25-0,37	0,19-0,25

Quadro A4. 2 - Custo por m³ da mão de obra e manutenção e produtos químicos das tecnologias de destilação (Valero *et al.*, 2001)

Tecnologia destilação	Custo produtos químicos (€/m ³)	Custo mão-de-obra e manutenção (€/m ³)
MSF	0,02-0,04	0,05-0,07
MED-TVC	0,02-0,03	0,04-0,07
CV	0,02-0,04	0,05-0,08

Quadro A4. 3 - Percentagem de retorno de investimento total e período de amortização do equipamento de uma central de dessalinização de água do mar (Valero *et al.*, 2001)

	% retorno de investimento total	Período de amortização (anos)
Edificação e urbanização	8-12	20
Tubagens	12-16	15
Membranas (incluindo limpeza)	25-32	8
Bombagem	15-20	12
Pré-tratamento (filtros, aditivos)	8-10	15
Equipamentos eléctricos	9-13	15
Instrumentação e controlo	2-4	12
Outros (Pós-tratamento, etc.)	3-5	15

Quadro A4. 4 - Produtos químicos utilizados numa central de dessalinização (Valero *et al.*, 2001)

Fase do processo	Produto	Função
Pré-tratamento	Hipoclorito de sódio	Desinfecção
	Coagulantes	Apoio na filtração
	Ácido sulfúrico	Regulação de pH
	Poliectrolitos	Floculação
	Dispersantes	Controlo da precipitação
	Bisulfitos	Eliminação cloro
Limpeza das membranas	Diversos	Lavagem química
Pós-tratamento	Hidróxido de cálcio	Controlo pH e acidificação
	Anidrido carbónico	Carbonatação
	Hipoclorito de sódio	Desinfecção

A5. Caso de Estudo

A5.1 ETA de Alcantarilha



Figura A5.1. 1 - Fotografia aérea da ETA de Alcantarilha (cortesia da AdAlg)



Figura A5.1. 2 - ETA de Alcantarilha (cortesia da AdAlg)



Figura A5.1. 3 - ETA de Alcantarilha



Figura A5.1. 4 - ETA de Alcantarilha



Figura A5.1. 5 - ETA de Alcantarilha - Edifício do Ozono



Figura A5.1. 6 - ETA de Alcantarilha – Laboratórios

A5.2 Análise de sensibilidade

PVF - Contribuição em CO₂ para as Alterações Climáticas:

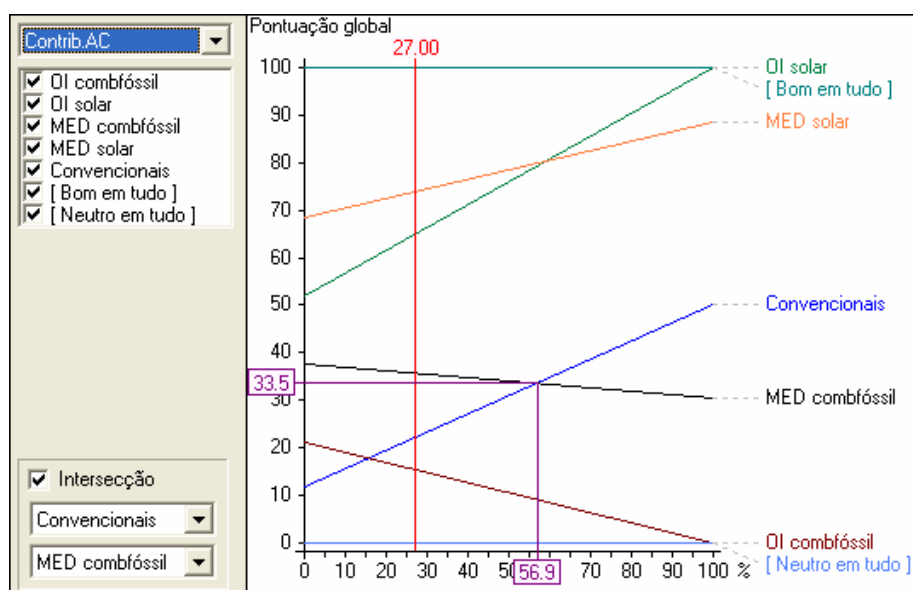


Figura A5.2. 1 - Alteração no peso do PVF - Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

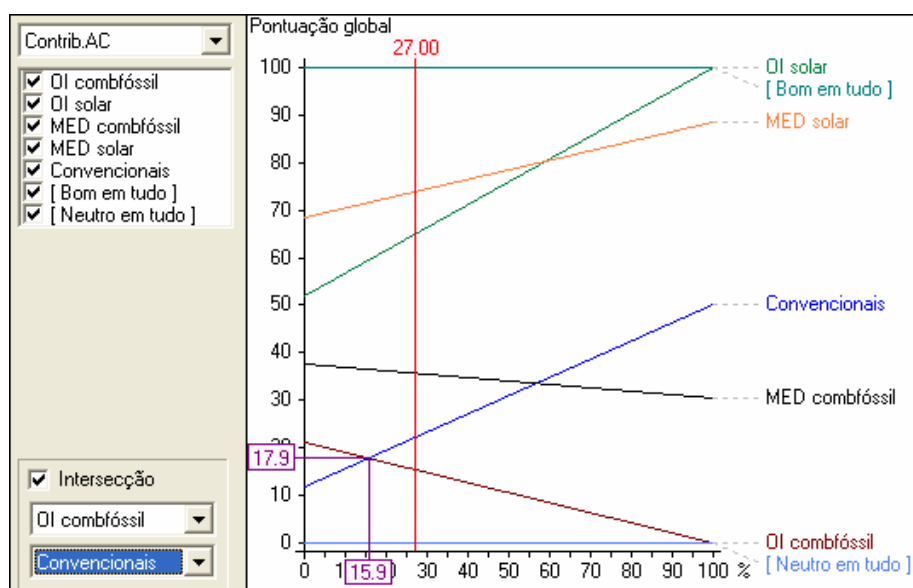


Figura A5.2. 2 - Alteração no peso do PVF - Contribuição em CO₂ para as alterações climáticas

PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos:

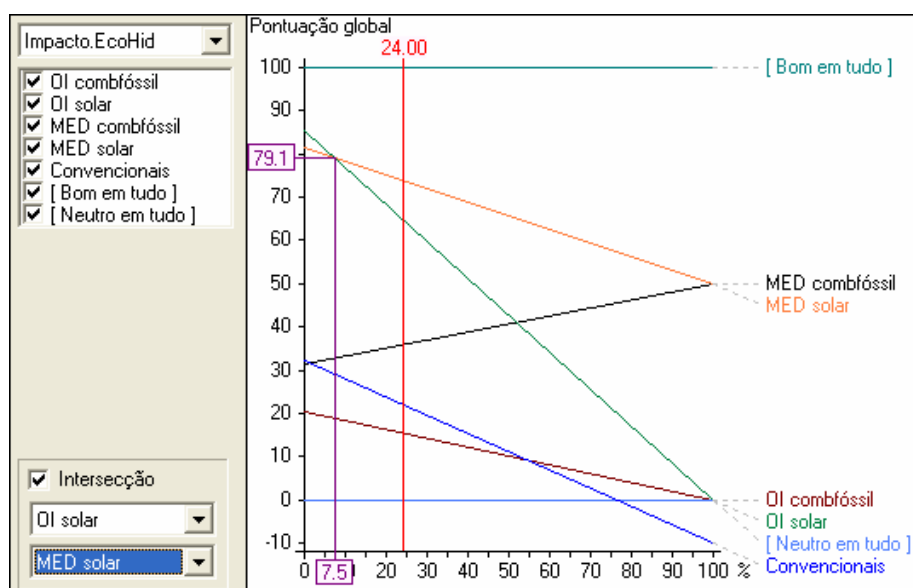


Figura A5.2. 3 - Alteração no peso do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

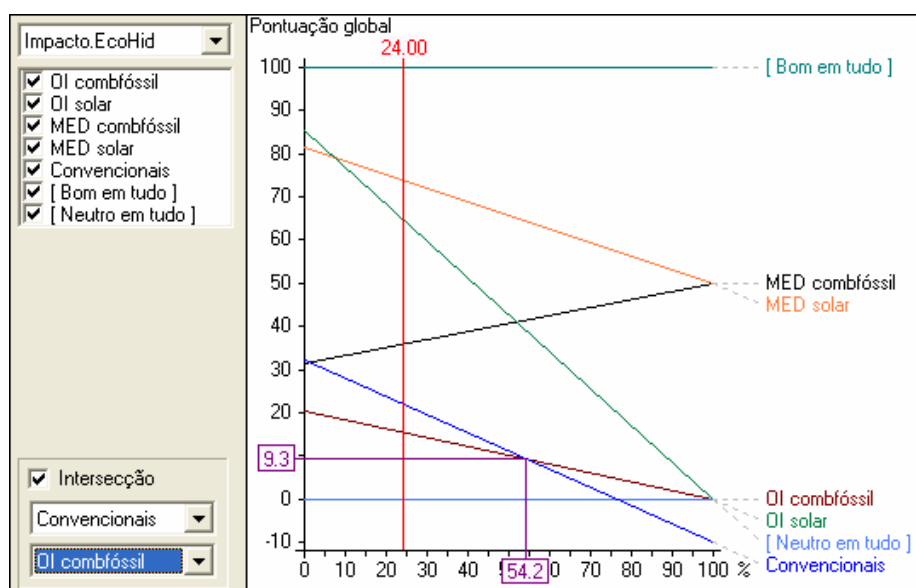


Figura A5.2. 4 - Alteração no peso do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

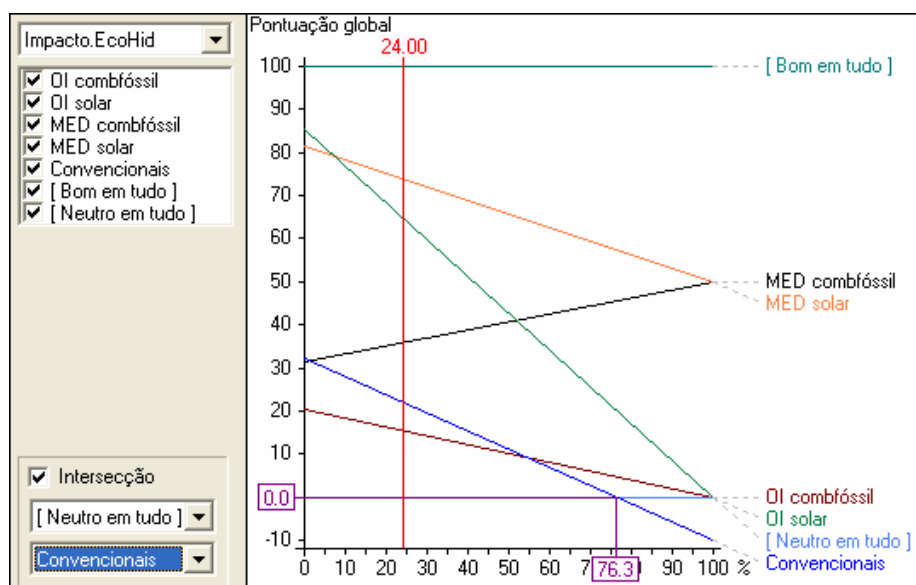


Figura A5.2. 5 - Alteração no peso do PVF – Impacto nos ecossistemas hídricos

PVF - Aceitabilidade social e regulamentar:

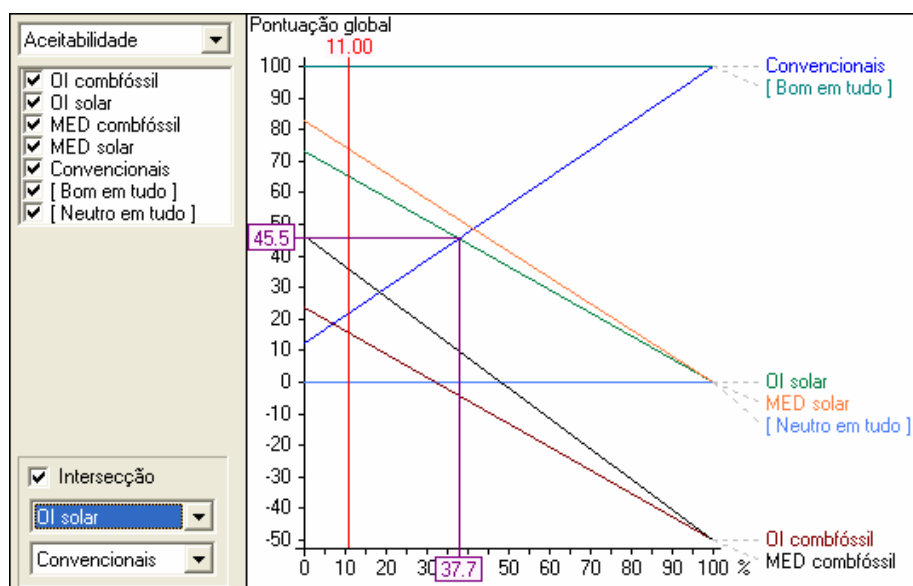


Figura A5.2. 6 - Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar

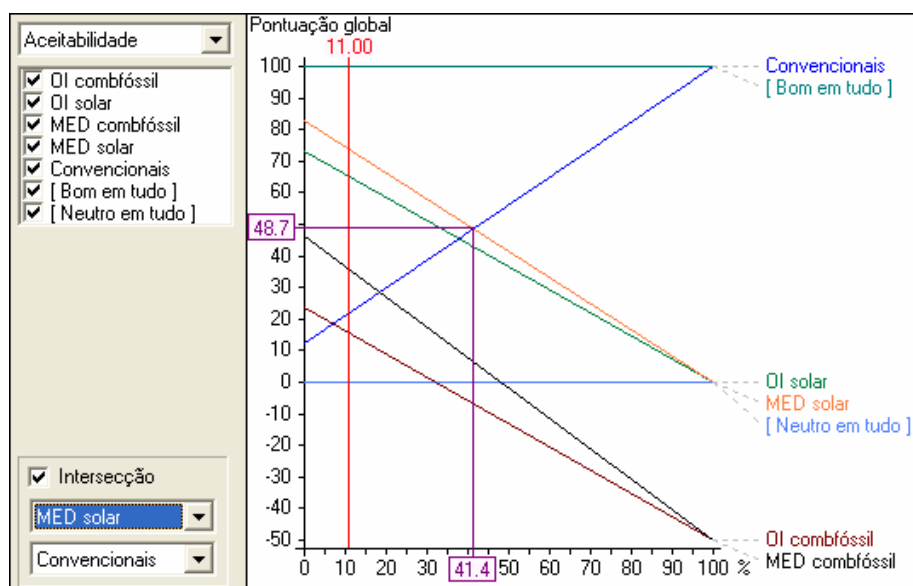


Figura A5.2. 7 - Alteração no peso do PVF – Aceitabilidade social e regulamentar