



QUADRANTE
COMPASS GROUP



ÁGUA PARA O ALGARVE - INIMA, AQUAPOR E LUSÁGUA, A.C.E.

ESTAÇÃO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR DO ALGARVE

PROJECTO DE EXECUÇÃO RELATÓRIO DE CONFORMIDADE AMBIENTAL DO PROJETO DE EXECUÇÃO (RECAPE)

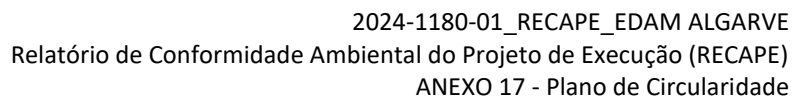
ANEXO 17 - PLANO DE CIRCULARIDADE

Revisão 00

Lisboa, 24 de fevereiro de 2025



Esta página foi deixada propositadamente em branco

[illegible]

Esta página foi deixada propositadamente em branco

ÁGUA PARA O ALGARVE - INIMA, AQUAPOR E LUSÁGUA, A.C.E. ESTAÇÃO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR DO ALGARVE

PROJECTO DE EXECUÇÃO

RELATÓRIO DE CONFORMIDADE AMBIENTAL DO PROJETO DE EXECUÇÃO (RECAPE)

VOLUME I – RESUMO NÃO TÉCNICO

VOLUME II – RELATÓRIO BASE

VOLUME III – PEÇAS DESENHADAS

VOLUME IV – ANEXOS

ANEXO 17 - PLANO DE CIRCULARIDADE

ÍNDICE GERAL

<u>1</u>	<u>INTRODUÇÃO</u>	<u>1</u>
1.1	IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO, DO PROPONENTE E DA ENTIDADE LICENCIADORA.....	1
1.2	LOCALIZAÇÃO DO PROJETO E ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO	1
<u>2</u>	<u>ENQUADRAMENTO DO PLANO DE CIRCULARIDADE</u>	<u>3</u>
<u>3</u>	<u>OBJETIVOS E METODOLOGIA</u>	<u>4</u>
3.1	ÂMBITO E OBJETIVOS.....	4
3.2	ABORDAGEM METODOLÓGICA.....	4
<u>4</u>	<u>BENCHMARK DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE APLICADAS À DESSALINIZAÇÃO</u>	<u>6</u>
4.1	INTRODUÇÃO.....	6
4.2	LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE MEDIDAS	8
4.2.1	OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA.....	9
4.2.2	EFICIÊNCIA DE RECURSOS	15
4.2.3	VALORIZAÇÃO DE EFLUENTES E SUBPRODUTOS	19
4.2.4	INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL.....	21
4.3	ESPANHA COMO REFERÊNCIA NO SETOR	22
4.4	ANÁLISE DA APLICABILIDADE DAS MEDIDAS IDENTIFICADAS	24
<u>5</u>	<u>CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO PROJETO DA EDAM DO ALGARVE</u>	<u>28</u>

<u>6</u>	<u>OBJETIVOS ESTRATÉGICOS E LINHAS DE AÇÃO DO PLANO DE CIRCULARIDADE</u>	<u>31</u>
6.1	EIXO 1: OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E GESTÃO DE FIM DE VIDA DAS MEMBRANAS	31
6.2	EIXO 2: VALORIZAÇÃO E GESTÃO EFICIENTE DA SALMOURA	33
6.3	EIXO 3: MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS.....	34
<u>7</u>	<u>MONITORIZAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO</u>	<u>36</u>
<u>8</u>	<u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	<u>45</u>
	<u>NOMENCLATURA</u>	<u>47</u>
	<u>REFERÊNCIAS</u>	<u>48</u>

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1. ESCALA APLICADA A CADA CRITÉRIO E RESPETIVOS DESCRITIVOS, UTILIZADA NA AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE DE IMPLEMENTAÇÃO DAS MEDIDAS NA EDAM DO ALGARVE	25
TABELA 2. ANÁLISE DE VIABILIDADE DA IMPLEMENTAÇÃO DE MEDIDAS DE CIRCULARIDADE NA EDAM DO ALGARVE	26
TABELA 3. ESTIMATIVA DOS VOLUMES DOS FLUXOS DE ÁGUA BRUTA CAPTADA, ÁGUA TRATADA E SALMOURA QUE SERÃO PROCESSADOS PELA EDAM DO ALGARVE (FASE 1, ANO 0)	29
TABELA 4. QUANTIDADES DE MATERIAIS CONSUMÍVEIS DO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO DA EDAM DO ALGARVE, FASES DE APLICAÇÃO E DETALHES TÉCNICOS RELEVANTES.....	29
TABELA 5. EIXOS ESTRATÉGICOS, LINHAS DE AÇÃO E INDICADORES DE MONITORIZAÇÃO PROPOSTOS PARA O PLANO DE CIRCULARIDADE PARA A FASE DE EXPLORAÇÃO DA EDAM DO ALGARVE.....	36
TABELA 6. EMPRESAS E PROJETOS DEDICADOS À REGENERAÇÃO E REUTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS DE OSMOSE INVERSA.....	39
TABELA 7. PROJETOS RELEVANTES NO CONTEXTO DA OTIMIZAÇÃO DA GESTÃO DA SALMOURA GERADA NO PROCESSO DE DESSALINIZAÇÃO E DA SUA VALORIZAÇÃO EM APLICAÇÕES ALTERNATIVAS	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 - Enquadramento administrativo da EDAM Algarve	2
Figura 1. Objetivos estratégicos do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve	4
Figura 2. Abordagem metodológica para desenvolvimento do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve	5
Figura 3. Esquema representativo dos processos de Osmose e Osmose Inversa	7
Figura 4. Configuração típica de uma unidade de dessalinização por Osmose Inversa	8
Figura 5. Principais medidas de circularidade identificadas na análise de <i>benchmark</i>	9
Figura 6. Exemplos comuns de sistemas de osmose inversa de passagem única e dupla passagem	11
Figura 7. Perspetivas futuras para reduzir o consumo de energia na dessalinização por osmose inversa	14
Figura 8. Fatores que afetam o <i>fouling</i> nas membranas de osmose inversa	15
Figura 9. Modelo de economia circular para membranas de osmose inversa	16
Figura 10. Alternativas para o fim de vida das membranas de osmose inversa: reutilização, reciclagem e valorização energética	17
Figura 11. Ecodesign de membranas e módulos de osmose inversa	18
Figura 12. Oportunidades de valorização da salmoura resultante do processo de dessalinização	20
Figura 13. Estado de desenvolvimento e capacidade de diferentes tecnologias de dessalinização operadas com fontes de energia renovável	22
Figura 14. Esquema dos processos da EDAM do Algarve	28
Figura 15. Eixos estratégicos do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve	31

ÁGUA PARA O ALGARVE - INIMA, AQUAPOR E LUSÁGUA, A.C.E. ESTAÇÃO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR DO ALGARVE

PROJECTO DE EXECUÇÃO

RELATÓRIO DE CONFORMIDADE AMBIENTAL DO PROJETO DE EXECUÇÃO (RECAPE)

ANEXO 17 - PLANO DE CIRCULARIDADE

1 INTRODUÇÃO

1.1 IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO, DO PROPONENTE E DA ENTIDADE LICENCIADORA

O presente documento refere-se ao **Anexo 17 – Plano de Circularidade** que integra o **Relatório de Conformidade Ambiental do Projeto de Execução (RECAPE)**, relativo ao **Projeto da Estação de Dessalinização de Água do Mar (EDAM) do Algarve** que se encontra em fase de Projeto de Execução e abrange os concelhos de Albufeira e Loulé.

O presente RECAPE decorre do procedimento de Avaliação de Impacte Ambiental (AIA) nº 3667, no âmbito do qual foi emitido o Título Único Ambiental n.º TUA 20240403001056, onde foram avaliados os impactos do projeto em fase de Estudo Prévio.

O **proponente** do projeto da Estação de Dessalinização da Água do Mar do Algarve, são as Águas do Algarve (AdA), com o NIPC 505176300, com sede em Rua do Repouso, nº 10, 8000-302 Faro.

Face ao enquadramento constante do Decreto-Lei n.º 11/2023, de 10 de fevereiro, que procedeu à reforma e simplificação dos licenciamentos ambientais, alterando e republicando o disposto no Decreto-Lei n.º 151-B/2013, de 31 de outubro, e no Decreto-Lei 152-B/2017, de 11 de dezembro, a **entidade competente para licenciamento** das diversas componentes do projeto é a Agência Portuguesa do Ambiente, I.P. (APA, I.P.), dado que se trata de um projeto que se desenvolve em espaço marítimo.

1.2 LOCALIZAÇÃO DO PROJETO E ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO

O Projeto, na sua totalidade, abrange o distrito de Faro, freguesia de Albufeira e Olhos de Água, no concelho de Albufeira.

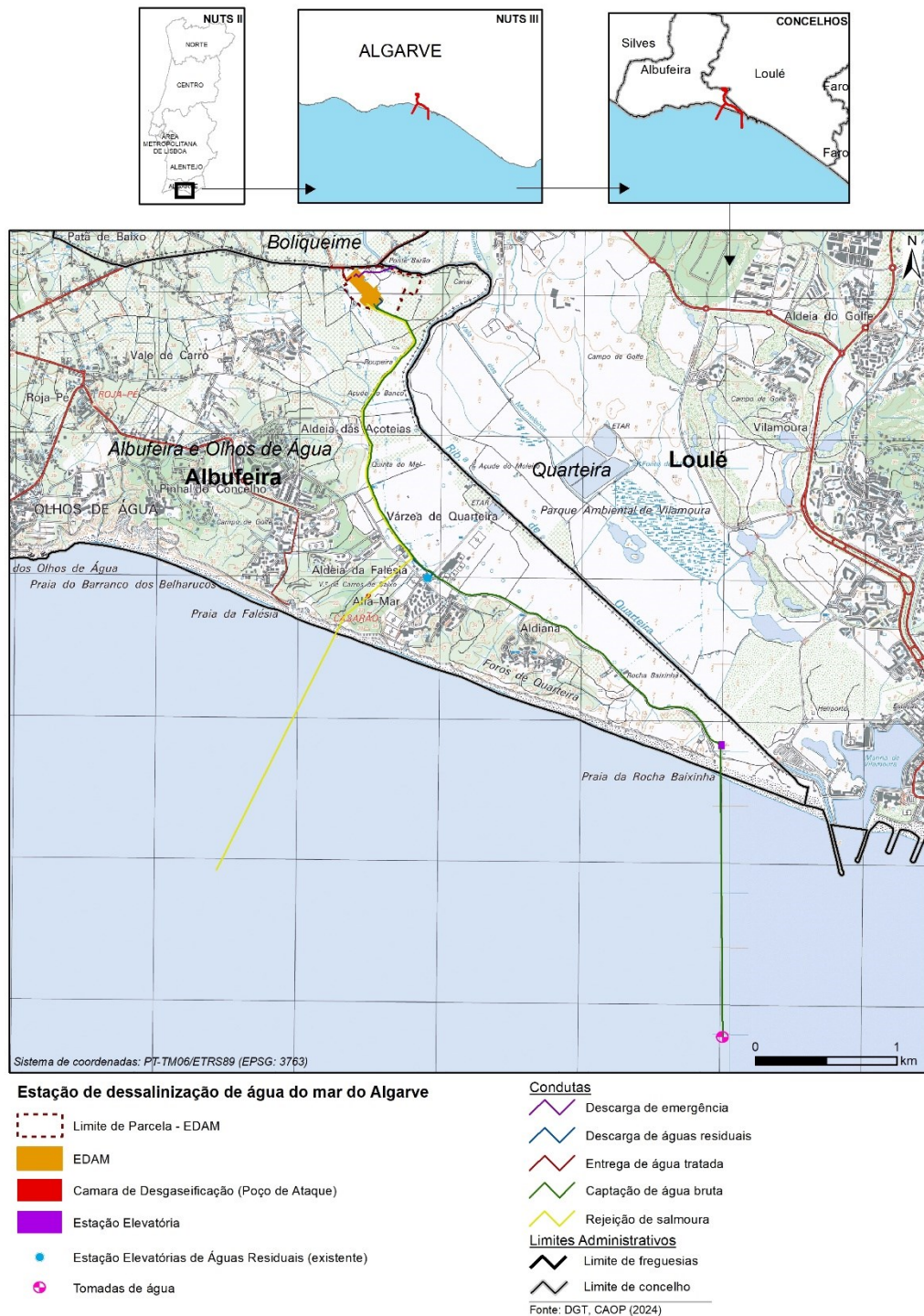


Figura 1.1 - Enquadramento administrativo da EDAM Algarve

2 ENQUADRAMENTO DO PLANO DE CIRCULARIDADE

A crescente escassez de água na região do Algarve, intensificada por períodos de seca prolongada e desafios na gestão dos recursos hídricos, tem impulsionado a procura de soluções que garantam um abastecimento de água seguro e eficiente. Diversos estudos apontam para o recurso à dessalinização de água do mar como uma das medidas estruturais possíveis para o reforço da capacidade de produção de água, de forma a minimizar esta situação. Este foi o ímpeto para o projeto da Estação de Dessalinização de Água do Mar (EDAM) do Algarve, enquadrado no Plano Regional de Eficiência Hídrica do Algarve, que visa reforçar a resiliência hídrica da região e garantir o abastecimento público de água atual e futuro à população da região do Algarve, mesmo em períodos de seca prolongada.

No entanto, o processo de dessalinização apresenta desafios ambientais relevantes, principalmente associados ao elevado consumo energético, à gestão dos resíduos salinos e ao impacto potencial nos ecossistemas marinhos. Nesse sentido, importa assegurar a promoção da eficiência no uso de recursos, a diminuição dos impactos ambientais associados e a maximização da reutilização de matérias-primas e subprodutos na exploração da EDAM do Algarve, propondo-se para esse fim, um Plano de Circularidade.

3 OBJETIVOS E METODOLOGIA

3.1 ÂMBITO E OBJETIVOS

O Plano de Circularidade para a fase de exploração da EDAM do Algarve tem como objetivo maximizar o desempenho ambiental e a sustentabilidade do projeto, designadamente promovendo a otimização energética, a valorização de subprodutos e o controlo das emissões (efluentes). Neste sentido, foram consolidados os objetivos estratégicos que moldam o presente Plano de Circularidade, e que se apresentam na Figura 2.



Figura 2. Objetivos estratégicos do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve

3.2 ABORDAGEM METODOLÓGICA

A metodologia seguida para o desenvolvimento do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve (Figura 3) teve como base o levantamento e análise das melhores práticas ligadas à promoção da sustentabilidade e circularidade de estações de dessalinização, assim como a caracterização e análise dos processos associados à EDAM para identificação de áreas prioritárias de atuação.

Estas atividades permitem sustentar a definição de eixos estratégicos e linhas de ação para promoção da circularidade na fase de exploração do Projeto, acompanhadas de

indicadores de monitorização, de forma a assegurar o controlo da implementação do Plano e a medição dos impactes resultantes.

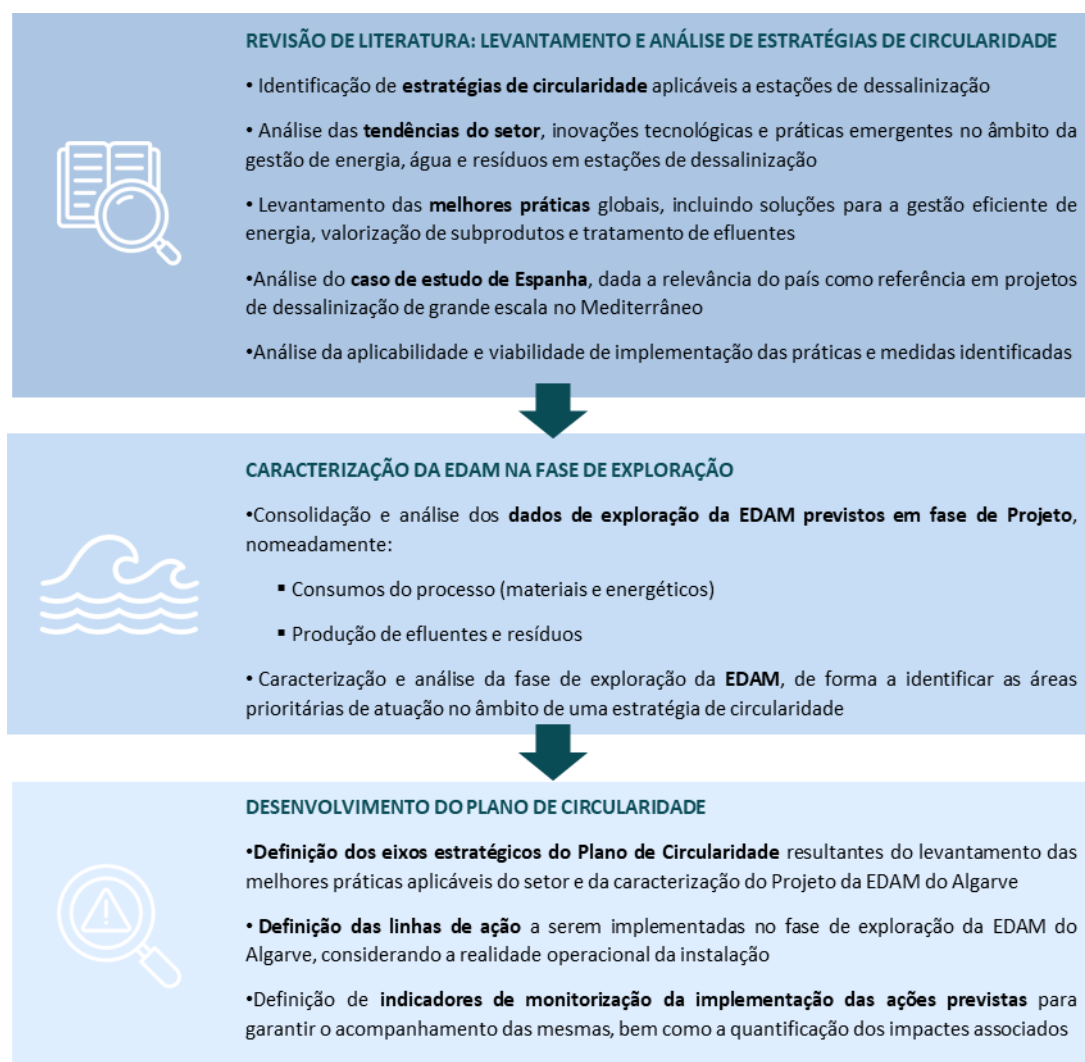


Figura 3. Abordagem metodológica para desenvolvimento do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve

4 BENCHMARK DE ESTRATÉGIAS DE CIRCULARIDADE APLICADAS À DESSALINIZAÇÃO

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo consolida a análise de *benchmark* focada nas tecnologias e melhores práticas que promovam a sustentabilidade e economia circular associadas ao processo de dessalinização.

Importa apresentar uma descrição dos processos envolvidos na dessalinização de forma a melhor enquadrar os conceitos e medidas apresentadas no seguinte capítulo.

Dessalinização da água: conceitos, tecnologias e o papel da osmose inversa

A dessalinização apresenta-se como solução prontamente disponível para dar resposta à crise global da escassez de água. Este processo requer energia para a produção de um fluxo de água limpa a partir de água do mar ou água salobra, através da separação da corrente salina em dois fluxos distintos: um com baixa concentração de sais dissolvidos (água limpa) e outro com elevada concentração de sais e minerais (salmoura). A água tratada obtida pode posteriormente ser utilizada para diversos fins, tais como consumo humano, irrigação ou aplicações industriais.^{1,2}

Atualmente, os processos de dessalinização são realizados principalmente por tecnologias de membranas (63,7%) e térmicas (34,2%). Nos processos de membranas, a separação ocorre por meio de membranas semipermeáveis, enquanto os processos térmicos envolvem o aquecimento da água para produzir vapor, que é posteriormente condensado e recolhido como água limpa. Dentro das tecnologias de membranas, a osmose inversa é a mais amplamente utilizada, representando 80% da capacidade global de dessalinização. O processo de osmose inversa baseia-se no fenómeno natural de pressão osmótica, que ocorre quando uma membrana semipermeável separa duas soluções com concentrações iónicas distintas. Neste processo, a água tende a deslocar-se da solução mais diluída para a mais concentrada, impulsionada pelo gradiente de concentração, até atingir um estado de equilíbrio. No entanto, este fluxo pode ser invertido mediante a aplicação de uma pressão externa superior à pressão osmótica, forçando a passagem da água no sentido oposto e permitindo a separação dos solutos (Figura 4). Outros métodos, como a eletrodíálise, também são utilizados, embora em menor escala.^{1,2,3}

¹ Lee, C. H., Ho, H. J., Chen, W. S., & Iizuka, A. (2024). Total Resource Circulation of Desalination Brine: A Review. *Advanced Sustainable Systems*, 2300460.

² Liang, Y., & Knauer, K. M. (2023). Trends and future outlooks in circularity of desalination membrane materials. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 2, 1169158.

³ Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104.

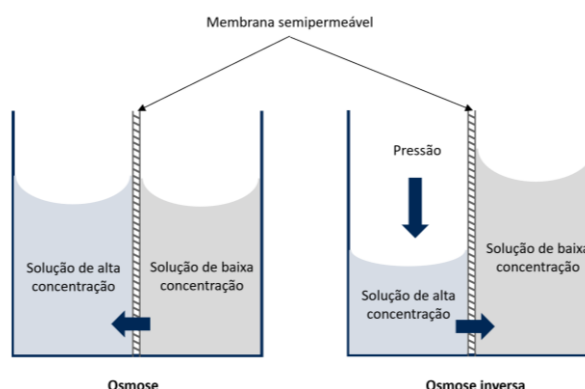


Figura 4. Esquema representativo dos processos de Osmose e Osmose Inversa
Fonte: Adaptado de Qasim et al. (2019)

Desafios da dessalinização por osmose inversa

Na Europa, a capacidade de dessalinização é de cerca de 8,7 milhões de metros cúbicos por dia, o que equivale a aproximadamente 9% da capacidade global instalada. A Espanha destaca-se como o país da União Europeia (UE) com maior capacidade instalada, concentrando mais de 60% da capacidade da UE e 5,7% da capacidade global. Segundo o relatório do JRC de 2021, existem mais de 1 500 estações de dessalinização na Europa, distribuídas principalmente ao longo do Mar Mediterrâneo. A osmose inversa é a tecnologia predominante na Europa, representando 85,5% da capacidade total (Figura 5).^{4,2}

As membranas utilizadas na osmose inversa possuem uma vida útil estimada entre cinco e sete anos, embora alguns estudos considerem um intervalo de cinco a dez anos. Isto implica que, em média, as membranas necessitem de ser substituídas quatro a cinco vezes durante o tempo operacional de uma estação de dessalinização. Por outro lado, equipamentos como bombas de alta pressão ou dispositivos de recuperação energética necessitam geralmente de substituição apenas uma ou duas vezes no mesmo período.^{4,2}

Embora a dessalinização ajude a mitigar a escassez de água, o processo enfrenta alguns desafios significativos. O elevado consumo de energia e o *fouling* (incrustação das membranas) são as principais preocupações associadas às tecnologias de membranas, pois aumentam os custos por metro cúbico de água tratada. O *fouling*, em particular, contribui para a diminuição da vida útil das membranas, razão pela qual esta geralmente não ultrapassa os cinco a dez anos. A economia global, ainda baseada num modelo linear de “take-make-consume and dispose”, agrava os problemas ambientais associados a processos industriais que utilizam tecnologia de membranas. Muitas membranas em fim de vida são descartadas em aterros, devido à perda de eficiência na qualidade da água tratada. Este descarte, não só representa um desperdício de recursos como também constitui um perigo ambiental significativo. Além disso, também o impacto ambiental

⁴ JRC. (2021). Smart Specialisation in the Context of Blue Economy – Analysis of Desalination Sector.

do descarte da salmoura é identificado como um dos pontos críticos associados aos processos de dessalinização.^{5,4}

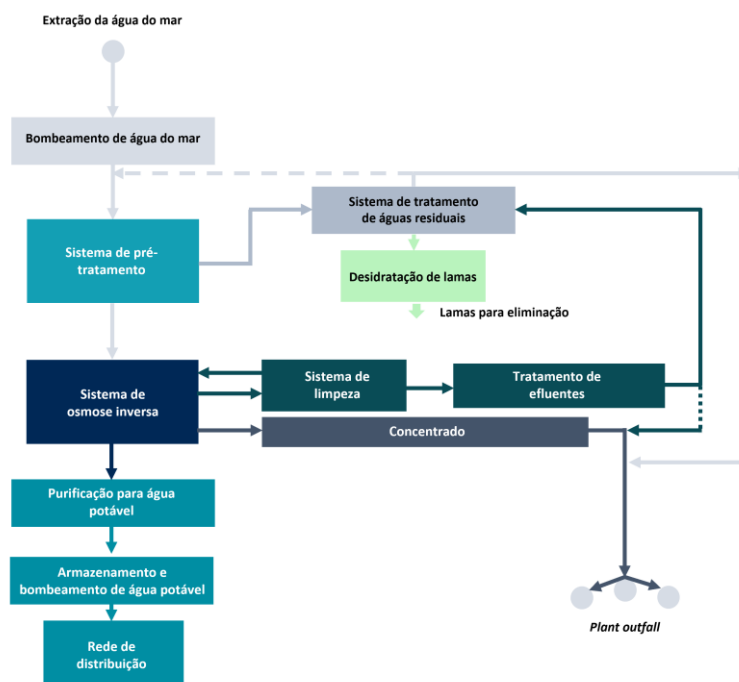


Figura 5. Configuração típica de uma unidade de dessalinização por Osmose Inversa
Fonte: Adaptado de Ludwig et al. (2019)

4.2 LEVANTAMENTO E ANÁLISE DE MEDIDAS

A revisão da literatura sobre estratégias circulares aplicadas à dessalinização permitiu identificar as melhores práticas e tendências neste domínio, servindo de base para a definição das medidas propostas para a fase de exploração da EDAM do Algarve. As estratégias foram consolidadas em quatro categorias principais, representadas na Figura 6, que são exploradas em detalhe nas secções seguintes do presente relatório.

⁵ Landaburu-Aguirre, J., García-Pacheco, R., Molina, S., Rodríguez-Sáez, L., Rabadán, J., & García-Calvo, E. (2016). Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*, 393, 16-30.



Figura 6. Principais medidas de circularidade identificadas na análise de *benchmark*

4.2.1 OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA

ERD para a otimização energética na dessalinização

A osmose inversa da água do mar apresenta diversas vantagens em relação a outros métodos de dessalinização, destacando-se pela sua elevada eficiência, facilidade de controlo, escalabilidade e flexibilidade. No entanto, este processo exige um consumo de energia consideravelmente superior em comparação com outros métodos de dessalinização, devido à elevada pressão necessária para superar a pressão osmótica da água de alimentação e garantir o caudal de permeado. Atualmente, o consumo energético total numa estação de dessalinização e na etapa de osmose inversa é, respetivamente, de 4 kWh/m³ e 2-3 kWh/m³. Apesar da redução significativa do consumo energético nos últimos 40 anos, continuam a ser necessários avanços nas tecnologias de membranas para reduzir ainda mais este consumo e atender à crescente procura por água.^{6,7}

⁶ Schunke, A. J., Hernandez Herrera, G. A., Padhye, L., & Berry, T. A. (2020). Energy recovery in SWRO desalination: current status and new possibilities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 9.

⁷ Kurihara, M., Sasaki, T., Nakatsuji, K., Kimura, M., & Henmi, M. (2015). Low pressure SWRO membrane for desalination in the Mega-ton Water System. *Desalination*, 368, 135-139.

Para mitigar esta limitação, têm sido investigadas várias estratégias, de entre as quais se destacam os dispositivos de recuperação energética (ERD). O bombeamento de alta pressão necessário para superar a pressão osmótica no processo de dessalinização gera um fluxo de concentrado salino altamente pressurizado. Os ERD desempenham um papel fundamental ao recuperar a energia hidráulica dessa corrente e transferi-la para a corrente de alimentação, reduzindo assim a quantidade de energia necessária para o bombeamento. Os ERD convertem a energia hidráulica do concentrado em energia mecânica, utilizada para acionar pistões ou bombas que transferem a energia de volta para a alimentação.⁶

No estudo de Kim et al. (2019) é feita uma análise para identificar os pontos de uma instalação de dessalinização por osmose inversa onde é possível reduzir consumos energéticos, destacando a utilização de ERD. O estudo também analisa outros fatores, como as condições da água de alimentação e as eficiências dos equipamentos utilizados. Kim et al. (2019) destacam que a salinidade elevada requer maior consumo de energia, enquanto o impacto da temperatura da água no consumo energético não é claramente definido. O autor conclui que equipamentos de alta eficiência, como ERD isobáricos e bombas, conseguem reduzir a quantidade de energia necessária ao processo. No entanto, salienta que este consumo será sempre influenciado pela qualidade e quantidade de água tratada.⁸

O estudo de Schunke et al. (2020) destaca os avanços alcançados nos ERD em estações de dessalinização por osmose inversa da água do mar, incluindo dispositivos isobáricos capazes de operar com uma eficiência de 97%, superando outras tecnologias como turbinas e rodas Pelton (*Pelton Wheel*). O uso de ERD pode reduzir o consumo energético em 25-40%, comparativamente a sistemas de dessalinização sem esta tecnologia. A partir de 2000, os ERD isobáricos tornaram-se os mais utilizados nas estações de dessalinização por osmose inversa, devido à sua eficiência significativamente superior. Entre os ERD isobáricos, os permutadores de pressão (*pressure Exchange, PX*) destacam-se como os mais usados nas estações de dessalinização modernas, devido ao seu tamanho compacto, durabilidade, modularidade, eficiência, pouca necessidade de manutenção e à redução dos requisitos da bomba de alta pressão. Os PX permitem que a salmoura pressurizada transfira energia para a alimentação de baixa pressão, assegurando uma elevada eficiência nesse processo.^{6,9}

Tipologias de sistemas de osmose inversa: passagem única e dupla passagem

Segundo o estudo de Schunke et al. (2020), os processos de dessalinização por osmose inversa com passagem única geralmente consomem menos energia do que aqueles com duas passagens. No entanto, quando são exigidos padrões mais elevados de qualidade da água, é necessário recorrer a uma segunda passagem. Dentro destes processos de dupla passagem, a configuração conhecida como *Split Partial Second Pass* é a que apresenta o menor consumo de energia. Ainda assim, neste contexto, o

⁸ Kim, J., Park, K., Yang, D. R., & Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied Energy*, 254, 113652.

⁹ Ahmed, F. E., Hashaikh, R., & Hilal, N. (2019). Solar powered desalination—Technology, energy and future outlook. *Desalination*, 453, 54-76.

desenvolvimento de membranas altamente seletivas surge como uma alternativa mais económica comparativamente aos processos de dupla passagem.⁶

Apresentam-se três tipologias exemplares de sistemas de osmose inversa de dupla passagem (Figura 7). A osmose inversa de duas passagens parciais (*partial two pass RO*) consiste em submeter parte do permeado da primeira passagem a uma segunda unidade de osmose inversa, enquanto o restante permeado é encaminhado diretamente para mistura posterior com o permeado da segunda passagem. Por outro lado, as configurações de osmose inversa parcial dividida (*split partial RO*) extraem o permeado de diferentes pontos ao longo do módulo de membranas. Nesta abordagem, o permeado de menor salinidade é direcionado diretamente para o fluxo do produto, enquanto o permeado de maior salinidade é tratado adicionalmente, sendo diluído com água de alimentação e reciclado para a unidade de osmose inversa (*split partial single pass*) ou sujeito a um segundo sistema de osmose inversa (*split partial second pass*).⁶

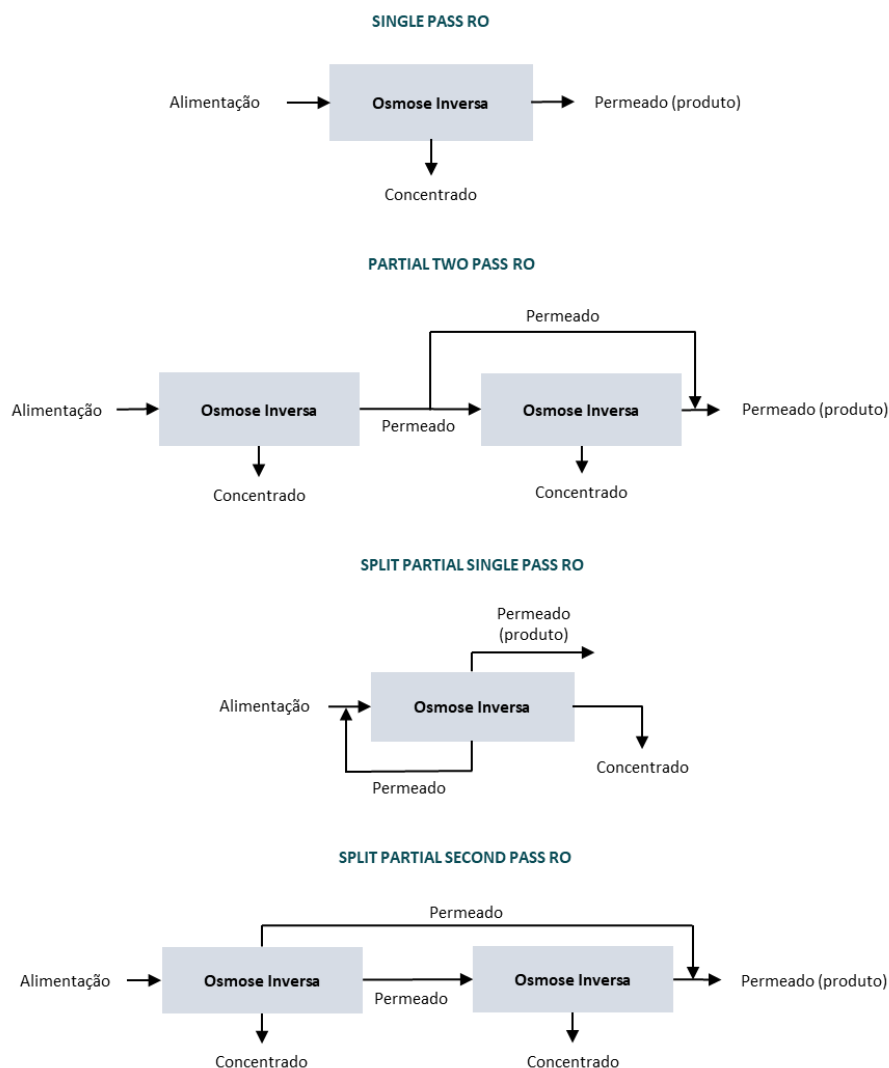


Figura 7. Exemplos comuns de sistemas de osmose inversa de passagem única e dupla passagem

Fonte: Adaptado de Schunke et al. (2020)

Outras estratégias de circularidade para a otimização energética na dessalinização

Para além dos ERD, que desempenham um papel importante para a otimização energética do processo de dessalinização, e das diferentes configurações possíveis do sistema, existem outras estratégias para mitigar o elevado consumo energético. Entre estas estratégias destacam-se a eficiência das bombas de alta pressão, o desempenho das membranas de osmose inversa e o desenvolvimento de tecnologias de baixa e ultrabaixa pressão, sendo cada uma delas detalhada de seguida.

As bombas de alta pressão desempenham um papel chave na dessalinização por osmose inversa da água do mar, sendo as principais responsáveis pelo consumo de energia no processo. Segundo Ye et al. (2009), a eficiência das bombas de alta pressão pode variar entre os 50% e 85%, destacando a importância de estudos que explorem melhorias na eficiência destas bombas. Por seu lado, Ludwig et al. (2010) reportam bombas de alta pressão com eficiências entre 82 a 88%. Já Ahmed et al. (2019) destacam que tanto a escolha como o posicionamento adequado das bombas de alta pressão são fatores críticos para a eficiência dos sistemas de osmose inversa. No entanto, de acordo com os autores, a literatura sobre osmose inversa alimentada por energia solar tende a focar-se mais nos EDR para a otimização energética dos processos do que nas bombas de alta pressão.^{9,10,11}

A melhoria contínua no desempenho das membranas de osmose inversa tem proporcionado avanços significativos na eficiência da separação, na tolerância e resistência ao cloro, bem como na redução do *fouling* nas membranas, contribuindo para a redução do consumo de energético e dos custos nos processos de dessalinização. No entanto, existe ainda muito espaço para melhorias na eficiência energética da dessalinização por osmose inversa. O desenvolvimento de membranas de alto desempenho à base de polímeros é uma das prioridades neste domínio. Além disso, as membranas de matriz mista, que incorporam outros materiais na matriz polimérica, também oferecem oportunidades promissoras para melhorar o desempenho. Em particular, a adição de nanocristais de zeólito (tipo A), com propriedades favoráveis ao nível da separação e estabilidade química, térmica e mecânica, demonstra grande potencial. O estudo de Li et al. (2010) também destaca as membranas proteico-poliméricas, que apresentam excelente rejeição do soluto e elevada permeabilidade à água, abrindo novos caminhos para o desenvolvimento de membranas. Além disso, os nanotubos de carbono apresentam potencial para aplicação em membranas de dessalinização por osmose inversa, devido ao tamanho reduzido dos seus canais, que favorecem a rejeição de sal, apesar do seu fabrico para esta finalidade ser de difícil execução.¹²

¹⁰ Ye, X. Y., Yang, S. S., Hu, J. N., Xiao, X. P., & Zhou, G. F. (2009, January). Research on improving efficiency of high pressure pump in seawater reverse osmosis desalination. In Fluids Engineering Division Summer Meeting (Vol. 43727, pp. 181-189).

¹¹ Ludwig, H. (2010). Energy consumption of reverse osmosis seawater desalination-possibilities for its optimisation in design and operation of SWRO plants. *Desalination and Water Treatment*, 13(1-3), 13-25.

¹² Li, D., & Wang, H. (2010). Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20(22), 4551-4566.

O estudo de Kurihara et al. (2015) aborda o uso de membranas de osmose inversa de baixa pressão para a dessalinização de água do mar, visando reduzir o consumo energético em comparação com membranas convencionais. Foi desenvolvido um novo *design* de membranas para alcançar um desempenho eficaz em condições de baixa pressão. Os resultados demonstram que, num processo de osmose inversa com dupla passagem, a utilização de membranas de baixa pressão permitiu uma redução de 20% no consumo de energia em relação a um processo de dessalinização convencional de passagem única com membranas convencionais.⁷

A procura por tecnologias de dessalinização mais económicas e energeticamente eficientes para a obtenção de água limpa impulsionou também o desenvolvimento de processos de osmose inversa de pressão ultrabaixa (*ultra low-pressure reverse osmosis*, ULPRO). Este processo permite produzir fluxos de água limpa de elevada pureza a pressões operacionais reduzidas, mantendo uma elevada rejeição de sal e compostos orgânicos. Aryanti et al. (2023) apresentam uma revisão abrangente sobre membranas ULPRO, explorando estratégias para otimizar o seu desempenho nos processos de dessalinização. A crescente procura por estas membranas deve-se ao aumento do interesse por tecnologias mais eficientes, que reduzam os custos de operação e minimizem os impactos ambientais. Até à data, poucos estudos se focam especificamente no desenvolvimento de membranas ULPRO, sendo que a maioria dos artigos ainda se concentra no desenvolvimento de membranas de osmose inversa convencionais ou membranas de baixa pressão (*brackish water RO/BWRO*).¹³

Também o pré-tratamento da água antes do processo de osmose inversa é altamente eficaz na mitigação do *fouling* nas membranas, que, por sua vez, contribui para a redução do consumo energético e prolonga a vida útil das membranas.¹⁴ O pré-tratamento é geralmente classificado como químico, físico ou biológico, sendo essencial para a remoção de partículas e *fouling* orgânico, inorgânico e *biofouling*. Um pré-tratamento eficiente deve garantir a remoção de potenciais incrustantes da água de alimentação da osmose inversa, prevenindo problemas operacionais e contribuindo para o prolongamento da vida útil das membranas de osmose inversa. Neste contexto, os sistemas convencionais de pré-tratamento utilizados em instalações de osmose inversa, utilizam filtros de cartucho (*cartridge filters*) como a última barreira antes do bombeamento da água pelas bombas de alta pressão para as membranas de osmose inversa.¹⁵ Os filtros de cartucho são, geralmente, fabricados a partir de materiais poliméricos, como o polipropileno. O uso de materiais que possam libertar fibras, como

¹³ Aryanti, P. T. P., Afred, M. Y., Wardani, A. K., Lugito, G., Kadja, G. T. M., Wenten, I. G., & Khoiruddin, K. (2023). Ultra low-pressure reverse osmosis (ULPRO) membrane for desalination: current challenges and future directions. *Desalination*, 560, 116650.

¹⁴ Gao, Q., Duan, L., Liu, J., Zhang, H., & Zhao, Y. (2023). Evaluation and optimization of reverse osmosis pretreatment technology using the modified intermediate blocking model. *Journal of Cleaner Production*, 417, 138029.

¹⁵ Farhat, N. M., Christodoulou, C., Placotas, P., Blankert, B., Sallangos, O., & Vrouwenvelder, J. S. (2020). Cartridge filter selection and replacement: optimization of produced water quantity, quality, and cost. *Desalination*, 473, 114172.

o algodão, não é recomendado.¹⁶ Destaca-se ainda que a literatura atual não aborda a gestão do fim de vida destas unidades.

Por último, o estudo de Kim et al. (2019) destaca três perspectivas futuras para reduzir o consumo de energia em estações de dessalinização por osmose inversa: diluir a salinidade de entrada, reduzir o trabalho irreversível e aproveitar a energia osmótica (Figura 8).



Figura 8. Perspetivas futuras para reduzir o consumo de energia na dessalinização por osmose inversa

Fonte: Adaptado de Kim et al. (2019)

As condições de entrada, como a salinidade e temperatura, influenciam diretamente o consumo de energia, sendo que o aumento da salinidade contribui para o aumento da necessidade de energia. Os autores sugerem que métodos de diluição, como a osmose direta, podem ser utilizados para reduzir a salinidade da água de alimentação. Quanto à redução do trabalho irreversível, este está associado às bombas do processo. A energia consumida pelas bombas pode ser diminuída ao aumentar a sua eficiência e reduzir o seu trabalho irreversível, que não contribui diretamente para a separação na dessalinização. Assim, estratégias que visem minimizar este tipo de trabalho são fundamentais para reduzir o consumo energético. Por fim, o aproveitamento da energia osmótica está relacionado com o facto de que, atualmente, o foco está na produção de permeado, enquanto a energia osmótica abundante no concentrado é subaproveitada. Esta energia poderia ser utilizada para reduzir o consumo energético global, tornando necessário o desenvolvimento de tecnologias que permitam capturá-la, como a *Pressure Retarded Osmosis* (PRO) e a *Reverse Electrodialysis* (RED).⁸

¹⁶ El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. Fundamentals of salt water desalination. 2002.

4.2.2 EFICIÊNCIA DE RECURSOS

Prevenção e otimização para maior durabilidade das membranas de osmose inversa

Nos processos de dessalinização por membranas, têm sido registados progressos significativos no desenvolvimento de membranas mais avançadas, como as membranas *antifouling*, na implementação de processos de pré-tratamento e limpeza de membranas, bem como no desenvolvimento de soluções de reciclagem para estes equipamentos.⁵

O *fouling* é o principal fator responsável pela redução da vida útil das membranas (Figura 9), o que tem impulsionado avanços consideráveis no desenvolvimento de membranas *antifouling* nos últimos anos. Além disso, a otimização durante o período de utilização das membranas é essencial para prolongar o seu desempenho, sendo importante garantir que a água de alimentação do processo de dessalinização seja de elevada qualidade, bem como implementar processos de limpeza eficazes que preservem a eficiência e a longevidade das membranas. Nos processos de osmose inversa, os pré-tratamentos são essenciais para preparar a água de alimentação, seja água do mar ou água salobra, ajustando as propriedades físico-químicas e biológicas da água para o processo de osmose inversa. O pré-tratamento adequado contribui para prevenir a corrosão, danos prematuros nos equipamentos e o efeito de *fouling*. Entre os processos de pré-tratamento mais convencionais destacam-se a floculação, coagulação, filtração, ultrafiltração, microfiltração e nanofiltração. Apesar do desenvolvimento de membranas *antifouling* e da implementação de pré-tratamentos, o efeito de *fouling* ocorre inevitavelmente a algum nível, tornando essencial a limpeza periódica das membranas. Esta limpeza pode ser física, química ou físico-química, sendo recomendada quando a pressão, o caudal de permeado e/ou a qualidade do mesmo se alteram entre 10-15% dos valores iniciais.⁵



Figura 9. Fatores que afetam o *fouling* nas membranas de osmose inversa

Fonte: Adaptado de Zhao et al. (2021)¹⁷

¹⁷ Zhao, S., Liao, Z., Fane, A., Li, J., Tang, C., Zheng, C., ... & Kong, L. (2021). Engineering antifouling reverse osmosis membranes: A review. *Desalination*, 499, 114857.

Fim de vida de membranas de osmose inversa: impactes e oportunidades

Atualmente, estima-se que, a nível mundial, aproximadamente 840 000 módulos de membranas de osmose inversa, equivalentes a mais de 14 000 toneladas de materiais por ano, alcancem o fim da sua vida útil e sejam descartados anualmente. Quando as membranas atingem o seu fim de vida útil, seja por *fouling* das membranas, oxidação, danos físicos ou recomendação do fabricante, tornam-se resíduos, sendo geralmente descartadas em aterros. Esta prática tem incentivado a investigação de tratamentos alternativos devido ao seu impacto ambiental (Figura 10). Landaburu-Aguirre et al. (2016) destaca estudos de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) que analisam diferentes métodos de tratamento no fim de vida das membranas, como aterro, incineração, gaseificação, valorização energética, reutilização direta e reciclagem. Entre estas opções, a reutilização direta apresenta os menores impactes ambientais, enquanto o aterro é a opção menos favorável. Segundo o estudo de Liang et al. (2023), uma membrana de osmose inversa (com cerca de 13,5 kg) descartada em aterro pode gerar 78 kg de materiais abióticos, 2 500 kg de contaminação hídrica e 40 kg de contaminação atmosférica.^{5,2}

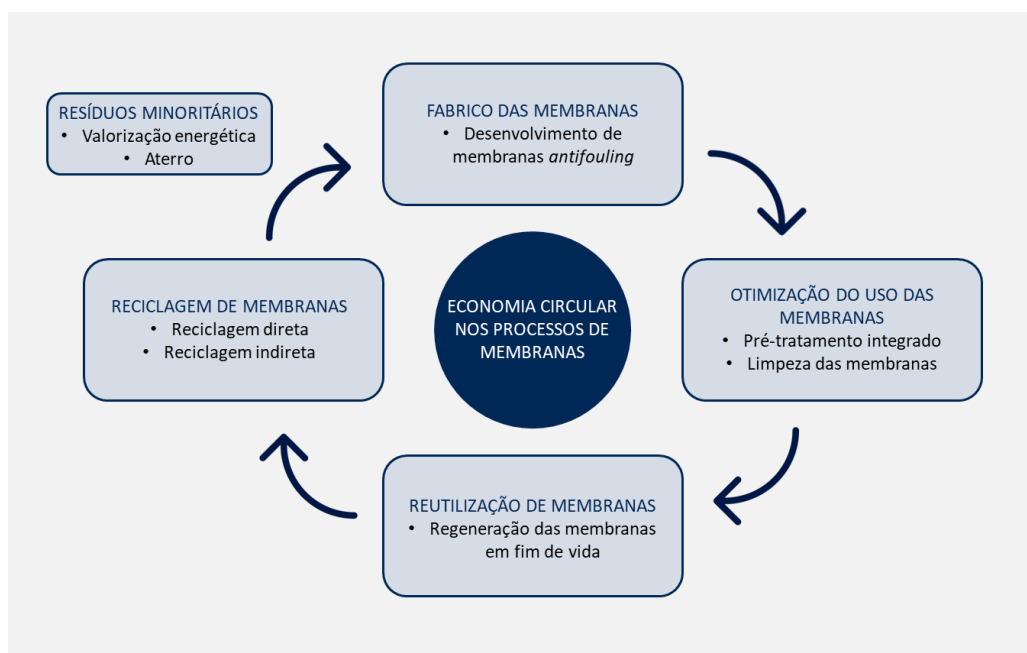


Figura 10. Modelo de economia circular para membranas de osmose inversa
Fonte: Adaptado de Landaburu-Aguirre et al. (2016)

Gestão de fim de vida das membranas de osmose inversa: reutilização e reciclagem

A reutilização direta das membranas de osmose inversa deve ser priorizada nos casos em que estas ainda apresentam elevados coeficientes de rejeição de sal ($R > 99\%$). O objetivo nestes casos é restaurar o desempenho das membranas em termos de permeabilidade e capacidade de rejeição de sal, recorrendo a processos de limpeza química. Por outro lado, a reciclagem direta é recomendada para membranas cuja capacidade de rejeição de sal está comprometida ($R < 99\%$), desde que não apresentem

fouling em excesso. Esta abordagem consiste na modificação das propriedades das membranas de osmose inversa em fim de vida para a produção de membranas de nanofiltração e ultrafiltração. Tanto a reutilização como a reciclagem direta de membranas de osmose inversa já demonstraram ser técnica, económica e ambientalmente viáveis, prevendo-se a sua consolidação a nível industrial. No caso das membranas que apresentarem *fouling* irreversível e/ou danos físicos, a reciclagem indireta permite a gestão individualizada dos componentes do módulo. Os primeiros estudos sobre esta abordagem foram realizados em 2019 e, até à data, a reciclagem indireta tem sido validada à escala laboratorial para a recuperação de materiais das membranas em novas aplicações, tais como materiais de suporte para reatores de biofilme ou membranas de permuta aniónica. Lejarazu-Larrañaga et al. (2022) destacam as estratégias emergentes de reciclagem indireta que possibilitam a separação e reciclagem tanto das membranas individuais como dos componentes plásticos do módulo. No entanto, este processo apresenta desafios devido à complexidade da desmontagem dos módulos convencionais, que possuem revestimento de fibra de vidro e componentes plásticos de baixa reciclabilidade (como borracha e peças coladas). Avanços tecnológicos nas tecnologias de reciclagem de plásticos, nomeadamente avanços nos processos de reciclagem química, podem contribuir para viabilizar a reciclagem indireta, permitindo a recuperação eficiente de materiais atualmente difíceis de reciclar. Contudo, são necessários mais estudos para avaliar a escalabilidade da reciclagem indireta em termos de competitividade económica e impacto ambiental.^{2,18}

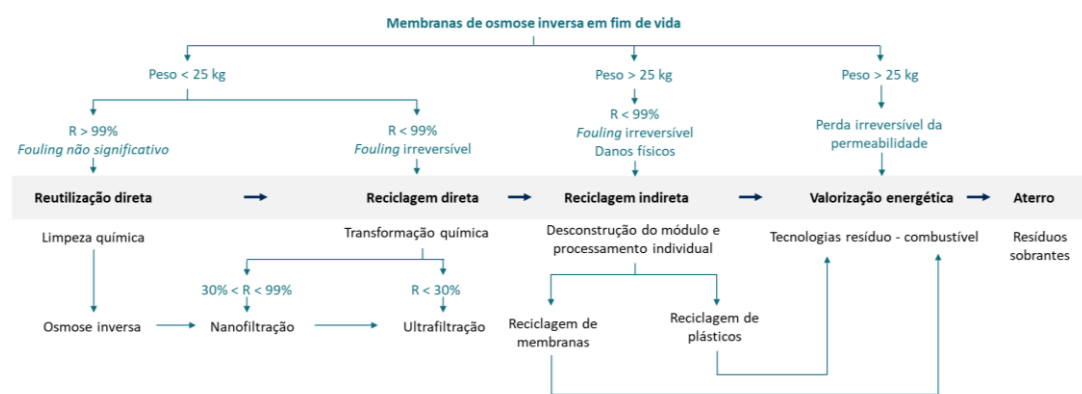


Figura 11. Alternativas para o fim de vida das membranas de osmose inversa: reutilização, reciclagem e valorização energética
Fonte: Adaptado de Lejarazu-Larrañaga et al. (2022)

Fabrico e composição de membranas: biopolímeros, solventes verdes e *antifouling*

Atualmente, o fabrico de membranas enfrenta desafios significativos, como a utilização de materiais de origem fóssil (plásticos), a dependência de solventes orgânicos e a falta de uma gestão adequada dos resíduos no fim de vida. Assim, a transição para um

¹⁸ Lejarazu-Larrañaga, A., Landaburu-Aguirre, J., Senán-Salinas, J., Ortiz, J. M., & Molina, S. (2022). Thin film composite polyamide reverse osmosis membrane technology towards a circular economy. *Membranes*, 12(9), 864.

modelo circular nas tecnologias de membranas exige mudanças que incluem a integração de processos de fabrico sustentáveis e o estabelecimento de uma economia em *loop* para membranas (Figura 12).²

O estudo de Liang et al. (2023) foca-se em processos de fabrico sustentáveis e de reciclagem para membranas em fim de vida. Os autores sugerem a utilização de materiais renováveis e biodegradáveis no fabrico das membranas, destacando polímeros e solventes verdes e não tóxicos que têm sido amplamente estudados. Além disso, melhorar a resistência das membranas ao *fouling* também é essencial para a sua sustentabilidade, uma vez que o *fouling* reduz a eficiência do tratamento da água, aumenta o consumo de energia dos processos e diminui o tempo de vida das membranas. Assim, o desenvolvimento de membranas com maior estabilidade mecânica, química e térmica é fundamental para aumentar a sua durabilidade.²

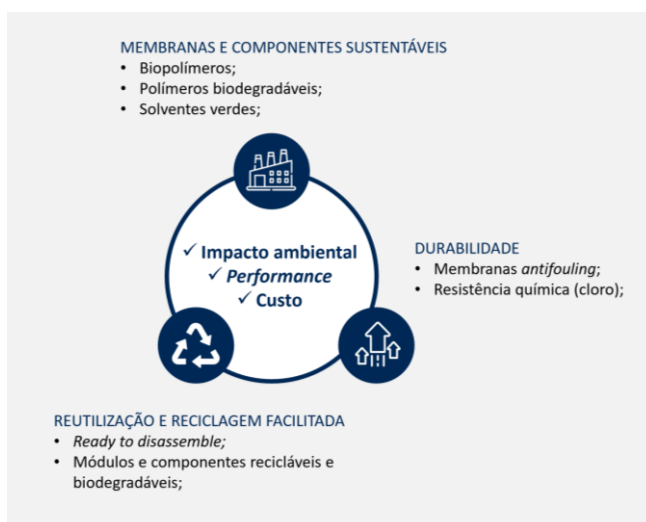


Figura 12. Ecodesign de membranas e módulos de osmose inversa
Fonte: Adaptado de Lejarazu-Larrañaga et al. (2022)

O estudo de Jiang et al. (2017) destaca técnicas para mitigar o *fouling* em membranas, nomeadamente a modificação da superfície das mesmas, que pode retardar a formação de incrustações ao alterar as propriedades como a *surface smoothness* e a hidrofília. Membranas com superfícies lisas e hidrofílicas demonstram menor tendência para o *fouling* em comparação com aquelas que possuem superfícies rugosas e hidrofóbicas. Assim, a modificação da superfície das membranas, que envolve a otimização de propriedades como carga superficial, morfologia, hidrofília e grupos químicos, pode aumentar significativamente a resistência ao *fouling*. No entanto, esta abordagem apresenta desafios, como a possível redução do fluxo de água e a utilização de diversos químicos para a sua modificação. O desenvolvimento de membranas de osmose inversa que combinem propriedades *antifouling* com alta eficiência na rejeição de sal e bom fluxo de permeado continua a ser desafiante, mas essencial, exigindo avanços nas tecnologias de membranas. Estas tecnologias são fundamentais para aumentar a vida

útil das membranas, melhorando assim a eficiência material e reduzindo a geração de resíduos.¹⁹

4.2.3 VALORIZAÇÃO DE EFLUENTES E SUBPRODUTOS

Estratégias para a minimização da salmoura na dessalinização

A salmoura resultante dos processos de dessalinização consiste numa solução de água saturada com sal, predominantemente cloreto de sódio, e cuja composição e características variam em função da qualidade da água de alimentação, do processo de pré-tratamento e do processo de dessalinização utilizado. Um dos principais desafios associados à gestão da salmoura gerada por processos de dessalinização é a sua descarga no mar, que impacta negativamente o ambiente marinho e reduz a capacidade de renovação dos ecossistemas naturais. Por esta razão, a minimização e a reciclagem deste fluxo concentrado têm sido tópicos de grande interesse e estudo, embora um número reduzido de instalações faça uma gestão sustentável das salmouras produzidas.^{1,20}

Entre os casos reportados, destacam-se plantas de dessalinização de água do mar que utilizam sistemas híbridos de tecnologias, aumentando a eficiência energética e recuperando uma maior quantidade de água em comparação com processos tradicionais. O estudo de Son et al. (2021) explora a integração de processos como destilação por membrana, osmose direta e nanofiltração em sistemas híbridos de dessalinização por osmose inversa. O estudo faz uma análise particular a um sistema experimental híbrido SWRO-MD-FO (*Sea Water Reverse Osmosis - Membrane Distillation - Forward Osmosis*), que visa minimizar a eliminação de salmoura, maximizar a recuperação de água e integrar a salmoura num ciclo circular de dessalinização, através de processos sucessivos de concentração e diluição. Neste sistema, o processo MD concentra ainda mais a salmoura proveniente do SWRO, e o concentrado de salmoura resultante é subsequentemente diluída no processo FO antes de retornar ao SWRO, confirmando-se o potencial do sistema proposto.²⁰

De acordo com Lee et al. (2024), os métodos de tratamento da salmoura podem ser classificados em três categorias principais: eliminação, minimização e reutilização, sendo que a escolha do método depende das características específicas da salmoura. Entre os métodos de eliminação estão incluídas as descargas superficiais, descargas em esgotos, injeções em poços e evaporação em lagoas. No entanto, devido aos impactos ambientais significativos destes métodos, têm sido reconhecidas e implementadas alternativas para reduzir a produção de salmoura. Métodos como *Zero Liquid Discharge* (ZLD) e *Minimal Liquid Discharge* (MLD) têm demonstrado potencial para a recuperação de água, minerais, sal, metais e energia. O sistema ZLD, composto por quatro fases principais - pré-tratamento, pré-concentração, evaporação e cristalização – produz água

¹⁹ Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of the total environment*, 595, 567-583.

²⁰ Son, H. S., Soukane, S., Lee, J., Kim, Y., Kim, Y. D., & Ghaffour, N. (2021). Towards sustainable circular brine reclamation using seawater reverse osmosis, membrane distillation and forward osmosis hybrids: An experimental investigation. *Journal of Environmental Management*, 293, 112836.

limpa de elevada pureza para aplicações domésticas e industriais, sendo que neste processo nenhum resíduo líquido é obtido, através da recuperação máxima de água e da conversão dos resíduos remanescentes em sólidos. O sal sólido comprimido obtido no final do processo pode ser comercializado, reutilizado noutros processos industriais, ou eliminado. Por outro lado, o sistema MLD, com apenas duas fases - pré-tratamento e a pré-concentração – permite recuperar 95% da água, reduzindo significativamente a descarga de líquido, mas sem eliminá-la completamente.¹

Oportunidades de valorização da salmoura: aplicações sustentáveis e inovadoras

Apesar dos métodos de minimização, a formação de salmoura é inevitável. Neste contexto, a reutilização da mesma e a extração de elementos críticos são consideradas abordagens promissoras no âmbito da economia circular. Quando reutilizada, a salmoura deixa de ser tratada como resíduo, passando a constituir um recurso. Entre as aplicações destacam-se a captura e utilização de carbono, irrigação, aquacultura, ativação de carvão ativado e a extração de elementos críticos (Figura 13).¹

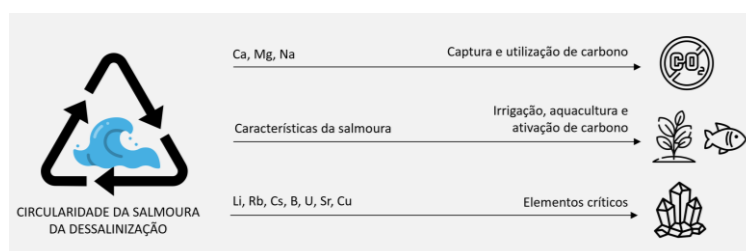


Figura 13. Oportunidades de valorização da salmoura resultante do processo de dessalinização

Fonte: Adaptado de Lee et al. (2024)

No que diz respeito à captura e utilização de carbono, a salmoura contém cátions metálicos que reagem com o CO₂, formando bicarbonatos ou carbonatos. Este processo oferece um duplo benefício: a remoção de CO₂ da atmosfera e utilização da salmoura para um fim específico. Para além disso, os sais metálicos resultantes destas reações podem ser utilizados em diversas indústrias, tais como cimento e materiais de revestimento. Outras aplicações incluem a irrigação, aquacultura e ativação de adsorventes. Na irrigação, a salmoura pode ser pulverizada (sem necessidade de pré-tratamento significativo) em plantas tolerantes ao sal, tais como as encontradas em parques, relvados e campos de golfe, desde que respeitadas as tolerâncias das plantas à salinidade. Na aquacultura, pode ser utilizada no cultivo de algas para alimentação humana e animal, bem como para a produção de biodiesel, sendo que esta solução apresenta menos riscos para os solos e para os aquíferos do que a irrigação. Além disso, a salmoura pode ser usada para a ativação de carvão ativado, aumentando a sua capacidade de adsorção para a remoção de substâncias nocivas, como corantes sintéticos, solventes orgânicos e metais pesados. Também tem despertado interesse a recuperação de materiais críticos da salmoura, como o lítio (Li), rubídio (Rb), cério (Cs), boro (B), urânio (U) e cobre (Cu). Diversas técnicas, incluindo precipitação, troca iónica, adsorção e separação por membranas, têm sido exploradas para esse fim, embora ainda precisem de ser superados alguns desafios como a seletividade limitada e a composição

complexa da salmoura. Ainda assim, a comercialização dos elementos recuperados e a redução dos impactos ambientais tornam esta abordagem uma solução promissora para a gestão da salmoura.¹

4.2.4 INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL

Fontes de energia renovável na dessalinização: soluções atuais e potenciais futuras

A energia solar fotovoltaica é, atualmente, uma das fontes de energia mais competitivas e a sua integração em sistemas de dessalinização apresenta-se como uma alternativa atrativa à energia derivada de combustíveis fósseis. A viabilidade económica é um fator determinante para a implementação em larga escala de energias renováveis na dessalinização. Outros desafios incluem a eficiência da conversão de energia útil para alimentar o processo de dessalinização, uma vez que as tecnologias baseadas em energia solar podem apresentar perdas de aproximadamente 40%. De acordo com Bhagwati et al. (2023), o desenvolvimento de sistemas híbridos, que combinam dessalinização solar com outras fontes de energia elétrica, é um ponto de partida para tornar o processo mais sustentável.^{21,22}

Gude et al. (2010) discutem várias alternativas renováveis e sustentáveis para a dessalinização incluindo o uso de fontes de energia renovável, o desenvolvimento de novos processos híbridos, tecnologias de dessalinização de baixo custo e baixo consumo energético, bem como a reutilização de água. Para selecionar a tecnologia de dessalinização mais adequada com base em energia renovável, é necessário considerar fatores como a dimensão da instalação, a salinidade da água, a disponibilidade de eletricidade da rede e tipo e potencial do recurso renovável a utilizar. As fontes solar e eólica têm sido amplamente exploradas neste contexto e demonstram viabilidade económica e técnica. Além disso, outras fontes renováveis, como a energia geotérmica e das ondas, também apresentam potencial para substituir os combustíveis fósseis. A energia geotérmica destaca-se especialmente, por ser uma fonte contínua e previsível, o que contribui para a redução dos custos de dessalinização.²³

²¹ Martínez-Medina, M. À., Pérez-Martín, M. Á., & Estrela, T. (2024). Desalination in Spain and the Role of Solar Photovoltaic Energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 859.

²² Bhagwati, A., Shah, M., & Prajapati, M. (2023). Emerging technologies to sustainability: A comprehensive study on solar desalination for sustainable development. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100007.

²³ Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2641-2654.

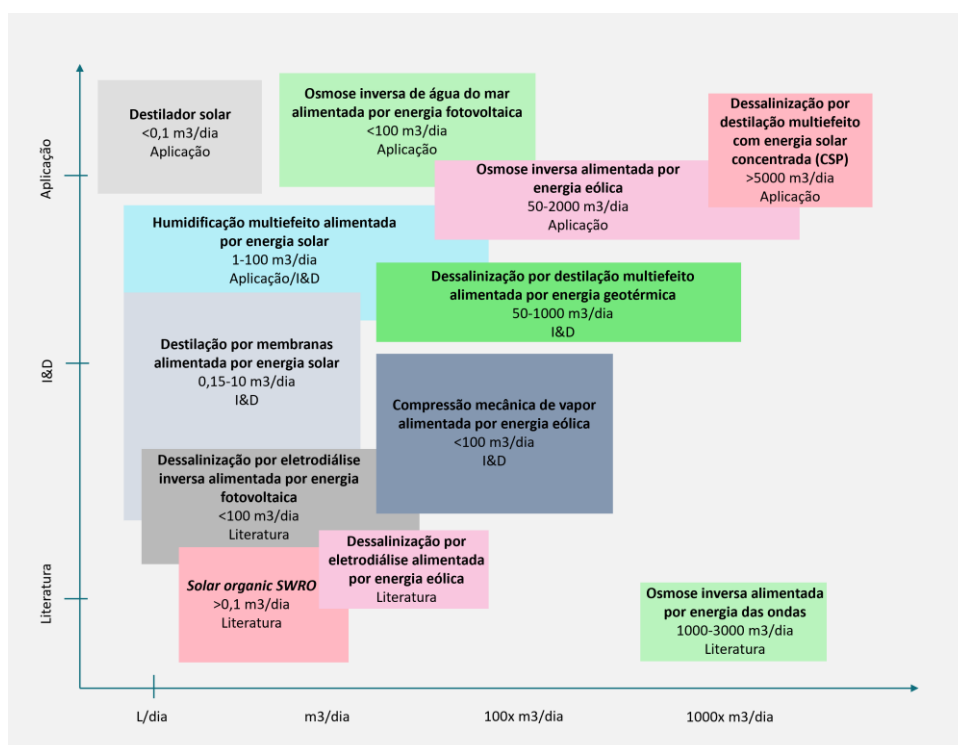


Figura 14. Estado de desenvolvimento e capacidade de diferentes tecnologias de dessalinização operadas com fontes de energia renovável
Fonte: Adaptado de Shahzad et al. (2017)²⁴

4.3 ESPANHA COMO REFERÊNCIA NO SETOR

Espanha é um país de referência na Europa no domínio da dessalinização, destacando-se como o Estado-Membro da UE com maior capacidade instalada. O processo de dessalinização no país teve início em 1964, nas Ilhas Canárias, e expandiu-se nos anos seguintes para as Ilhas Baleares e para a costa mediterrânica da Península Ibérica. Atualmente, a capacidade instalada ultrapassa os 2 000 000 m³/dia, com o volume de água produzido a concentrar-se maioritariamente na bacia mediterrânica e nas ilhas, regiões particularmente afetadas pela escassez e irregularidade na disponibilidade hídrica. Nos últimos anos, a produção anual tem-se mantido relativamente estável, situando-se ligeiramente acima dos 500 hm³/ano. Embora a dessalinização represente apenas 2% da procura total de água em Espanha, o seu contributo é bastante significativo nalgumas regiões, nomeadamente: 51% em Melilla, 88% em Ceuta, 33% nas Ilhas Canárias, 7% nas Ilhas Baleares e 15% na bacia do Segura.²¹

Atualmente, em Espanha, dois terços da produção de água dessalinizada provêm de infraestruturas públicas, que correspondem, em geral, a grandes instalações de dessalinização que requerem investimentos significativos. No entanto, as infraestruturas privadas, compostas por unidades de menor dimensão destinadas ao

²⁴ Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52-64.

autoconsumo, para hotéis ou grandes indústrias, e, nalguns casos para a agricultura, também desempenham um papel relevante. No geral, a taxa de utilização das infraestruturas, tanto públicas como privadas, situa-se entre os 60% e os 70% da capacidade total instalada de dessalinização.²¹

A maior parte da água dessalinizada em Espanha destina-se ao consumo humano, sendo também utilizada para a irrigação agrícola e para uso industrial. Mais de 20% já tenha como destino a irrigação agrícola, que tem registado um crescimento no consumo de água dessalinizada nos últimos anos, particularmente nas províncias do sudeste de Espanha, como Almería, Múrcia e Alicante.²⁵ Uma das principais barreiras à utilização da água dessalinizada para fins agrícolas tem sido o seu elevado custo, principalmente devido aos custos energéticos associados. Neste contexto, a integração da energia solar fotovoltaica nas estações de dessalinização tem despertado interesse crescente, uma vez que pode reduzir o custo da água dessalinizada até 24%, tornando-a economicamente viável para o setor agrícola. Esta abordagem é particularmente relevante em bacias hidrográficas como a do Segura, onde a disponibilidade de recursos hídricos é limitada, mas a atividade agrícola é altamente produtiva. A adoção desta solução na bacia do Segura representa um passo importante na aproximação desta tecnologia ao setor agrícola, devido à significativa redução de custos.²¹

Dada a elevada capacidade de dessalinização em Espanha, este país enfrenta desafios significativos relacionados com a gestão do fim de vida das membranas de osmose inversa. Um estudo de Landaburu-Aguirre et al. (2016) apresenta uma estimativa do número de membranas descartadas anualmente em Espanha, com base no peso médio das mesmas e na respetiva taxa de substituição, apontando para um valor estimado de 81 425 membranas descartadas por ano, correspondendo a aproximadamente 1 000 toneladas de resíduos. A nível global, com base nestes dados, estima-se que cerca de 840 000 membranas em fim de vida sejam anualmente descartadas, totalizando aproximadamente 14 000 toneladas de resíduos.⁵

Atendendo à relevância de Espanha no setor da dessalinização, têm sido desenvolvidos diversos projetos e iniciativas orientados para a gestão sustentável das membranas em fim de vida, nomeadamente através da promoção da sua reutilização. Neste contexto, têm surgido também empresas especializadas na valorização e reaproveitamento destas membranas, contribuindo para a implementação de soluções circulares no setor. Entre estes projetos e entidades destacam-se: Ecomemb, Remark e LIFE TRANSFOMEM.^{26,27,28}

²⁵ Moeve Global. (2024). Plantas desaladoras: una gestión hídrica más eficiente a través de la innovación. <https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/plantas-desaladoras-gestion-agua-espana>. [acedido em fevereiro de 2025].

²⁶ Ecomemb. (n.d.) REGENERATION OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANES. Disponível em <https://www.ecomemb.com/#inicio> [acedido em fevereiro de 2025].

²⁷ CETAQUA. (n.d.) Remark, la solución líder en reutilización de membranas de ósmosis inversa. Disponível em <https://www.cetaqua.com/remark/> [acedido em fevereiro de 2025].

²⁸ EUROPEAN COMMISSION. (n.d.) LIFE TRANSFOMEM on LIFE Public Database. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE13-ENV-ES-000751/transformation-of-disposed-reverse-osmosis-membranes-into-recycled-ultra-and-nanofiltration-membranes> [acedido em fevereiro de 2025].

4.4 ANÁLISE DA APLICABILIDADE DAS MEDIDAS IDENTIFICADAS

Após o levantamento e caracterização das medidas de circularidade apresentadas na literatura, e tendo em consideração as características do Projeto (consolidadas no capítulo 5), foi necessário realizar uma análise da adequabilidade e viabilidade da sua implementação no contexto da EDAM do Algarve, tendo sido, para tal, definido um conjunto de critérios de avaliação:

- **TRL (*Technology Readiness Level*):** Mede o nível de maturidade tecnológica de uma inovação ou solução. Quanto maior o TRL (entre 1 a 9), maior a probabilidade de sucesso na aplicação da tecnologia em estações de dessalinização.
- **Custo-eficiência:** Avalia a relação entre os custos associados à implementação de uma medida e os benefícios obtidos. A análise de custo-eficiência considera tanto os custos iniciais quanto os custos operacionais e de manutenção ao longo do tempo, comparando-os com as melhorias no desempenho ambiental e operacional da estação.
- **Impacte esperado:** Avalia os benefícios ambientais, sociais e económicos que se esperam alcançar com a implementação das medidas na EDAM do Algarve. O impacte esperado é essencial para justificar os investimentos e o sucesso da implementação.
- **Viabilidade técnica:** Avalia se a solução proposta é tecnologicamente possível de ser implementada no contexto da EDAM do Algarve, tendo em consideração fatores como a infraestrutura existente, a compatibilidade com sistemas já em operação, a complexidade da tecnologia envolvida e a capacidade da equipa técnica para lidar com a inovação. Este indicador é crucial para avaliar que as soluções são práticas e executáveis no contexto específico da instalação.

Cada critério foi avaliado de acordo com um conjunto de níveis pré-definidos na Tabela 1, refletindo o grau de maturidade tecnológica, os benefícios económicos, o impacte esperado e a viabilidade de implementação na EDAM do Algarve. A atribuição dos níveis seguiu uma abordagem qualitativa e quantitativa, permitindo diferenciar as medidas analisadas. Complementariamente à escala definida, foi utilizado um código de cores de forma a facilitar a interpretação dos resultados, melhorar a visualização das classificações e permitir uma comparação rápida entre as medidas.

A escala utilizada para cada critério foi definida de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1. Escala aplicada a cada critério e respectivos descritivos, utilizada na avaliação da viabilidade de implementação das medidas na EDAM do Algarve

Critério	Escala	Descritivo
TRL	1-3	Investigação e Desenvolvimento (I&D), fase inicial e testes laboratoriais
	4-6	Testes experimentais e projetos piloto em ambiente relevante
	7-8	Demonstração em ambiente operacional e início de implementação em escala real
	9	Tecnologia comercialmente disponível e amplamente implementada no setor
Custo-Eficiência	Baixo	Elevado investimento inicial, retorno financeiro lento, custos operacionais elevados
	Médio-Baixo	Investimento significativo com potencial de retorno moderado
	Médio	Investimento razoável com benefícios económicos a médio prazo
	Médio-Alto	Retorno favorável com investimento controlado e custos operacionais otimizados
	Alto	Implementação acessível com forte retorno financeiro
Impacte esperado	Baixo	Impacte limitado na eficiência e redução de impactes ambientais
	Médio-Baixo	Algum benefício, mas sem redução de impactes significativa
	Médio	Melhorias operacionais e ambientais relevantes
	Médio-Alto	Impacte expressivo na redução de custos e sustentabilidade
	Alto	Contribuição significativa para a eficiência energética, redução de resíduos e economia circular
Viabilidade técnica	Baixa	Necessidade de ajustes complexos à EDAM do Algarve
	Média	Potencial para ser implementada na EDAM do Algarve, mas requer a otimização de processos
	Alta	Aplicação viável e compatível com a EDAM do Algarve

Os resultados desta análise são consolidados na Tabela 2, e permitem uma visão abrangente sobre a viabilidade de adotar medidas de sustentabilidade e circularidade em sistemas de dessalinização, particularmente no contexto da EDAM do Algarve.

Tabela 2. Análise de viabilidade da implementação de medidas de circularidade na EDAM do Algarve

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA				
Medidas	TRL	Custo-eficiência	Impacte esperado	Viabilidade técnica
Utilização de dispositivos de recuperação energética ^{29,30}	9	Alto	Alto	Alta
Melhoria da eficiência das bombas de alta pressão	7-8	Médio	Alto	Média
Utilização de membranas de alta eficiência ²⁹	4-6	Médio-Alto	Médio-Alto	Alta
Implementação de tecnologias de dessalinização de baixa pressão	1-3	Médio-Alto	Médio	Baixa
Otimização do pré-tratamento ³¹	7-8	Alto	Médio-Alto	Média
EFICIÊNCIA DE RECURSOS				
Medidas	TRL	Custo-eficiência	Impacte esperado	Viabilidade técnica
Utilização de membranas <i>antifouling</i> ^{32,17}	1-3	Médio-Baixo	Médio-Alto	Média
Utilização de membranas com maior durabilidade ³³	7-8	Alto	Alto	Alta
Reutilização de membranas ³⁴	7-8	Alto	Médio	Alta
Utilização de materiais sustentáveis para o fabrico de membranas ⁵	1-3	Médio-Baixo	Alto	Alta
VALORIZAÇÃO DE EFLUENTES E SUBPRODUTOS				
Medidas	TRL	Custo-eficiência	Impacte esperado	Viabilidade técnica
Integração de processos híbridos ^{29,35}	4-6	Médio-Alto	Médio	Baixa
Maximização da recuperação de água e sais	4-6	Médio-Alto	Médio-Alto	Baixa

²⁹ Lienhard, J. H., Thiel, G. P., Warsinger, D. M., & Banchik, L. D. (2016). Low carbon desalination: status and research, development, and demonstration needs, report of a workshop conducted at the Massachusetts Institute of Technology in association with the Global Clean Water Desalination Alliance.

³⁰ Ali, H., Siddiqui, M. U., Aswani, M. A., Umer, M., & Khan, M. I. (2024). Techno-economic analysis of various configurations of stand-alone PV-RO systems for Pakistan. *Renewable Energy*, 225, 120262.

³¹ Henthorne, L., & Boysen, B. (2015). State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination*, 356, 129-139.

³² Kang, G. D., & Cao, Y. M. (2012). Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review. *Water research*, 46(3), 584-600.

³³ Gilabert-Oriol, G., Alomar, H., Maciá, M. Á. P., & Molina, V. G. (2023). Innovation beyond product specifications: the advantage of superior membrane durability in reverse osmosis installations worldwide. *Desalination and Water Treatment*, 309, 66-72.

³⁴ EUROPEAN COMMISSION. (n.d.) REMEMBRANE on LIFE Public Database. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE11-ENV-ES-000626/recovery-of-reverse-osmosis-membranes-at-its-end-of-life> [acedido em fevereiro de 2025].

³⁵ Moon, J., Kim, J. H., & Park, K. (2024). Cost-based optimization, feasibility study, and sensitivity analysis of forward osmosis/crystallization/reverse osmosis with high-temperature operation for high-salinity seawater desalination. *Desalination*, 580, 117531.

Captura e utilização de carbono ³⁶	1-3	Médio	Alto	Média
Irrigação agrícola	4-6	Médio	Médio	Média
Aquacultura ³⁷	1-3	Médio-Baixo	Médio-Baixo	Baixa
Ativação de absorventes	1-3	Médio-Baixo	Médio	Baixa
Recuperação de materiais críticos ^{38,39}	4-6	Médio	Médio	Média
INTEGRAÇÃO DE FONTES DE ENERGIA RENOVÁVEL				
Medidas	TRL	Custo-eficiência	Impacte esperado	Viabilidade técnica
Integração de fontes de energia renováveis, tais como solar ou eólica ⁴⁰	9	Alto	Alto	Alta

³⁶ Ho, H. J., & Iizuka, A. (2023). Mineral carbonation using seawater for CO2 sequestration and utilization: A review. Separation and Purification Technology, 307, 122855.

³⁷ Oron, G., Appelbaum, S., & Guy, O. (2023). Reuse of brine from inland desalination plants with duckweed, fish and halophytes toward increased food production and improved environmental control. Desalination, 549, 116317.

³⁸ ACCIONA. (2024). ACCIONA leads a project for the extraction of high-value elements from seawater brine. Disponível em <https://www.acciona.com/updates/articles/acciona-leads-project-extraction-highvalue-elements-seawater-brine> [acedido em fevereiro de 2025].

³⁹ Ihsanullah, I., Mustafa, J., Zafar, A. M., Obaid, M., Atieh, M. A., & Ghaffour, N. (2022). Waste to wealth: A critical analysis of resource recovery from desalination brine. Desalination, 543, 116093.

⁴⁰ Mito, M. T., Ma, X., Albuflasa, H., & Davies, P. A. (2019). Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 112, 669-685.

5 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DO PROJETO DA EDAM DO ALGARVE

O processo de dessalinização de água do mar da EDAM do Algarve é constituído por cinco fases principais, representadas na Figura 15.

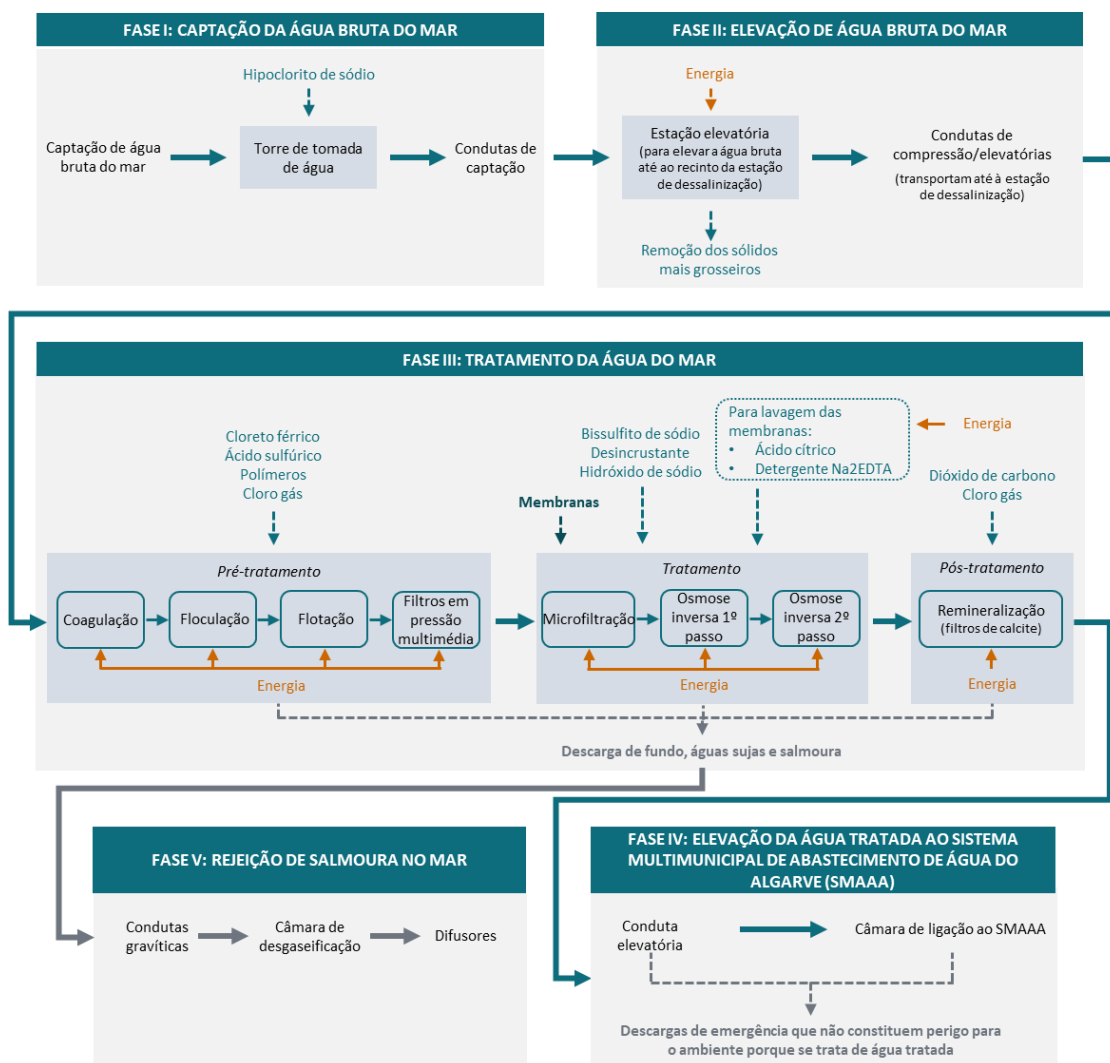


Figura 15. Esquema dos processos da EDAM do Algarve

Na Figura 15 estão também ilustrados os principais processos associados a cada fase, bem como os principais fluxos de entradas e saídas, incluindo consumíveis, água, efluentes e energia.

O tempo de operação da EDAM do Algarve está previsto que seja cerca de 8 500 h/ano. Na Tabela 3, estão esquematizadas as gamas de caudais esperados para a quantidade de água bruta captada, água tratada e salmoura gerada pela operação da EDAM do Algarve.

Tabela 3. Estimativa dos volumes dos fluxos de água bruta captada, água tratada e salmoura que serão processados pela EDAM do Algarve (Fase 1, Ano 0)

Fluxos	Quantidades (m³/dia)
Água bruta	101 654 - 104 485
Água tratada	43 000
Salmoura	58 454 - 61 285

Relativamente ao consumo energético anual para a operação da EDAM do Algarve, o mesmo está estimado em 48,5 GWh. Importa destacar que a maior parte deste consumo está associado à etapa de osmose inversa, particularmente à primeira passagem.

Os inputs materiais necessários para o funcionamento do processo, estão apresentados na Tabela 4, incluindo o ponto de injeção e o consumo anual associado. Destaca-se ainda que a limpeza das membranas é realizada com ácido cítrico e detergente (Na_2EDTA ou equivalente), em conformidade com as recomendações do fabricante, estando previstas quatro limpezas anuais.

Tabela 4. Quantidades de materiais consumíveis do processo de dessalinização da EDAM do Algarve, fases de aplicação e detalhes técnicos relevantes

Inputs materiais	Ponto de injeção	Quantidades consumidas (kg/ano)
Hipoclorito de sódio (solução a 13%)	Torre de captação de água bruta	231 714
Cloreto férrico (solução a 40%)	Pré-tratamento	264 853 (coagulação) 232 746 (filtração)
Ácido sulfúrico (solução a 98%)	Pré-tratamento	252 241
Floculante (polímero aniónico)	Pré-tratamento	7 063
Bissulfito de sódio	Tratamento OI	40 108
Desincrustante	Tratamento OI	88 840
Hidróxido de sódio (soda cáustica)	Tratamento OI	529 402
Dióxido de carbono	Pós-tratamento	213 743
Calcite/brita calcária	Pós-tratamento	489 674
Hidróxido de sódio (soda cáustica)	Pós-tratamento	158 328
Cloro gás	Pós-tratamento	158 328
Polímeros para linha de lamas	Tratamento lamas	480 (espessamento) 2 031 (desidratação)
Cal viva	Tratamento lamas	16 924

As membranas de osmose inversa destacam-se como um dos consumíveis mais relevantes do processo, dada a sua vida útil limitada e os impactos ambientais associados ao seu fim de vida. No caso da EDAM do Algarve, estima-se que serão necessárias 3 752 membranas do modelo LG SW 400 R G2 para a entrada em operação da unidade. Adicionalmente, ao terceiro ano de funcionamento, prevê-se a substituição de cerca de 537 membranas, correspondendo a uma taxa de substituição de 14,3%, com taxas semelhantes para os anos posteriores.

No âmbito do processo, prevê-se ainda o consumo de cartuchos associados tanto à osmose inversa como ao processo de limpeza (CIP - *Cleaning in Place*). Para a osmose inversa, na fase de início de operação, a instalação requer um total de 1 120 cartuchos, sendo estes substituídos quatro vezes por ano, resultando num total anual de 4 480 unidades. Relativamente ao CIP, estima-se um consumo de 238 cartuchos para a fase de início de operação, igualmente substituídos quatro vezes por ano, totalizando 952 unidades anuais.

Relativamente aos efluentes e resíduos gerados no processo, destaca-se a dificuldade em quantificar os mesmos, uma vez que dependem diretamente do caudal tratado e da qualidade da água à entrada. Estima-se, com base nos dados de projeto para a fase de exploração, a produção de um efluente de águas residuais urbanas provenientes dos edifícios da EDAM do Algarve na ordem dos 4 m³/dia. Quanto às lamas produzidas, prevê-se uma produção de 4 273 kg/dia de lama desidratada, considerando uma operação de cinco dias por semana. Relativamente aos resíduos gradados (sólidos grosseiros da estação elevatória), a concentração estimada é de 4 mg/L, correspondendo a um valor médio. Adicionalmente, prevê-se a produção de 0,7 kg/pessoa/dia de resíduos equiparáveis a resíduos sólidos urbanos, incluindo materiais de escritório e resíduos de cantina.

Após a análise dos processos e fluxos operacionais associados à exploração da EDAM do Algarve, é possível identificar as principais áreas de atuação onde o Plano de Circularidade deverá incidir. Destacam-se três desafios principais associados à operação da EDAM do Algarve: o elevado consumo energético, uma característica inerente a todas as instalações de dessalinização; o impacte ambiental da descarga da salmoura no ecossistema marinho; e o consumo e descarte de membranas de osmose inversa, resultando numa quantidade significativa de resíduos gerados anualmente devido à sua vida útil limitada.

Importa destacar que o Projeto prevê a instalação das melhores tecnologias e práticas no setor, tendo já implementado em sede de Projeto medidas relevantes para a persecução dos objetivos de circularidade.

Na fase de tratamento da água do mar, que ocorre em três etapas: pré-tratamento, tratamento e pós-tratamento, a osmose inversa é realizada com dupla passagem (*Double Stage Reverse Osmosis*), com o objetivo de obter água de elevada qualidade e aumentar, de maneira eficiente, a taxa de conversão da instalação.

O projeto também contempla a instalação de dispositivos de recuperação energética (ERD), que permitem reaproveitar a energia do escoamento da salmoura a jusante das membranas de osmose inversa. Estes dispositivos, tal como mencionado anteriormente, oferecem recuperações de energia bastante significativas. O projeto prevê a instalação de seis conjuntos de 14 permutadores de pressão.

6 OBJETIVOS ESTRATÉGICOS E LINHAS DE AÇÃO DO PLANO DE CIRCULARIDADE

A definição do Plano de Circularidade para a EDAM do Algarve teve como base a análise das melhores práticas do setor anteriormente apresentadas e a caracterização da estação em fase de projeto. A Figura 16 apresenta as principais áreas de atuação identificadas com foco na otimização de recursos, minimização de impactos ambientais e alinhamento com os princípios de economia circular.

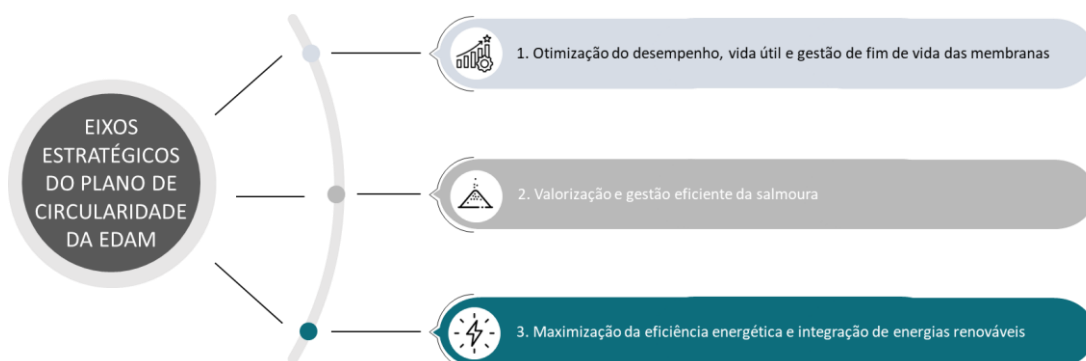


Figura 16. Eixos estratégicos do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve

Para cada eixo de atuação foram definidas ações a serem implementadas pela EDAM do Algarve, com vista a promover a circularidade nas áreas prioritárias identificadas. Por forma a avaliar a eficácia das ações propostas, foram definidos indicadores de monitorização, que permitirão acompanhar a implementação das ações e quantificação dos seus impactos.

6.1 EIXO 1: OTIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO, VIDA ÚTIL E GESTÃO DE FIM DE VIDA DAS MEMBRANAS

Linha de Ação 1.1. Implementação de procedimentos otimizados de limpeza periódica das membranas

A implementação de procedimentos otimizados de limpeza periódica das membranas é fundamental para garantir a eficiência do processo da EDAM do Algarve. A manutenção adequada das membranas de osmose inversa contribui para o aumento da sua vida útil e reduz a frequência de substituição das membranas. A EDAM do Algarve prevê a utilização de ácido cítrico e do detergente Na2EDTA (ou equivalente) no processo de limpeza (CIP – *Cleaning in Place*), estando previstas quatro operações de limpeza por ano.

A presente ação propõe:

- Monitorização contínua do desempenho das membranas;
- Ajustes na periodicidade da limpeza com base nos dados operacionais, por forma a evitar limpezas desnecessárias que possam acelerar o desgaste prematuro das membranas;
- Revisão periódica dos produtos químicos utilizados para a limpeza das membranas, com o objetivo de identificar alternativas mais sustentáveis,

promovendo uma abordagem mais sustentável para a gestão dos efluentes resultantes da limpeza.

Linha de Ação 1.2. Utilização de membranas fabricadas com materiais sustentáveis

A utilização de membranas de osmose inversa mais eficientes e sustentáveis propõe-se como uma das linhas de ação da EDAM do Algarve. Na fase inicial da operação, está prevista a instalação das membranas do modelo LG SW 400 R G2. No entanto, dado que o setor da dessalinização tem avançado progressivamente no sentido de soluções mais sustentáveis, incluindo o desenvolvimento de membranas compostas por materiais com menor impacto ambiental, esta ação tem como objetivo assegurar que a EDAM do Algarve esteja alinhada com as melhores práticas e inovações tecnológicas no que diz respeito ao *design* e à sustentabilidade das membranas utilizadas.

A ação visa a utilização futura de membranas fabricadas com materiais de base biológica, como biopolímeros, materiais reciclados e fabricadas com recursos a solventes verdes, com o intuito de diminuir o impacto ambiental das mesmas, melhorar a resistência a fatores que afetam o seu desempenho, como o cloro, e também de facilitar a reciclabilidade das membranas em fim de vida, adotando soluções de *ecodesign* que possibilitem uma reutilização/reciclagem mais eficiente no final da vida útil.

Esta ação prevê as seguintes etapas:

- Reavaliação periódica do modelo das membranas, com a EDAM do Algarve a acompanhar os desenvolvimentos e inovações do setor, com particular atenção aos avanços na utilização de materiais mais sustentáveis no fabrico de membranas;
- Apoio ao desenvolvimento de membranas mais sustentáveis, estabelecendo parcerias com fabricantes e centros de investigação, com a EDAM do Algarve a poder servir como unidade de teste para membranas mais eficientes e com menor impacto ambiental.

Linha de Ação 1.3. Encaminhamento das membranas em fim de vida para processos de reutilização

As membranas de osmose inversa representam um dos desafios principais da dessalinização devido à sua gestão em fim de vida, uma vez que uma quantidade significativa é encaminhada para aterro. Dada esta realidade, torna-se fundamental encontrar alternativas para o seu reaproveitamento e reintrodução em processos industriais. A EDAM do Algarve prevê a instalação de cerca de 3 752 membranas de osmose inversa para o primeiro ano de operação. As membranas, tal como referido anteriormente, possuem um tempo de vida limitado, sendo estimado que ao terceiro ano de operação, cerca de 537 membranas sejam substituídas, correspondendo a uma taxa de substituição de 14,3%. A mesma taxa será mantida para o quarto ano de operação. Desta forma, identifica-se uma oportunidade de reaproveitamento e reutilização de aproximadamente meio milhar de membranas em fim de vida, todos os anos, a partir do terceiro ano de operação da EDAM do Algarve.

A presente ação prevê:

- Assegurar a possibilidade de uma segunda vida para as membranas substituídas, através da sua reutilização nos processos de pré-tratamento da EDAM do Algarve ou da exploração de sinergias com empresas especializadas na reutilização de membranas em fim de vida em processos de tratamento de água menos exigentes, como nanofiltração e ultrafiltração;
- Prolongamento da vida útil das membranas.

Linha de Ação 1.4. Encaminhamento das membranas em fim de vida para processos de reciclagem

A reciclagem indireta das membranas de osmose inversa, que envolve a recuperação individual dos componentes plásticos do módulo, é uma abordagem de fim de vida ainda numa fase inicial de desenvolvimento. Embora já tenham sido validadas várias técnicas de reciclagem indireta ao nível laboratorial, a sua implementação à escala industrial ainda enfrenta desafios, e neste contexto são necessários desenvolvimentos ao nível dos processos de reciclagem mecânica e química.

Ainda assim, propõe-se à EDAM do Algarve:

- Acompanhamento das inovações e avanços nas tecnologias de reciclagem de membranas, com especial foco na reciclagem mecânica e química de componentes;
- Monitorizar ativamente oportunidades para o estabelecimento de parcerias estratégicas com empresas recicladoras que demonstrem interesse em desenvolver soluções para a gestão e reciclagem das membranas em fim de vida.

6.2 EIXO 2: VALORIZAÇÃO E GESTÃO EFICIENTE DA SALMOURA

Linha de Ação 2.1. Utilização da salmoura para fins de irrigação

Esta ação propõe a valorização da salmoura resultante do processo de dessalinização da EDAM do Algarve através da sua aplicação controlada na irrigação de culturas com elevada tolerância à salinidade. Com base em casos de estudo, como os desenvolvidos nas Ilhas Canárias, sugere-se a avaliação da viabilidade do seu uso na produção de culturas selecionadas, como o tomate e sistemas hidropónicos adaptados a condições salinas. Também a sua utilização em culturas halófitas (culturas naturalmente adaptadas a elevados níveis de salinidade) se destaca como uma possibilidade, e, neste contexto sugere-se a exploração de sinergias com o Instituto Superior de Agronomia e do Centro de Ciências do Mar, da Universidade do Algarve, que em 2019 participou num projeto dedicado ao cultivo de plantas halófitas.⁴¹

⁴¹ Agroportal (2019). Cultivo de plantas halófitas comestíveis como alternativa à agricultura convencional. Disponível em <https://www.agroportal.pt/cultivo-de-plantas-halofitas-comestiveis-como-alternativa-a-agricultura-convencional/> [acedido em fevereiro de 2025].

Linha de Ação 2.2. Extração de elementos críticos e minerais valiosos da salmoura

Esta ação propõe que a EDAM do Algarve explore e se envolva ativamente em projetos de I&D focados na extração de elementos críticos e minerais da salmoura resultante do processo de dessalinização. Atualmente, a União Europeia promove diversos projetos que visam a recuperação de metais e minerais a partir deste efluente. Ao integrar estas iniciativas, a EDAM do Algarve tem a possibilidade de contribuir para uma gestão mais sustentável da salmoura produzida e poderá explorar possíveis novas fontes de rendimento.⁴²

Linha de Ação 2.3. Exploração do potencial da salmoura para captura e utilização de carbono

Esta ação propõe a valorização da salmoura gerada pela EDAM do Algarve através da sua utilização em processos de captura e utilização de carbono. A elevada concentração de cátions na salmoura permite a reação com CO₂, resultando na formação de bicarbonatos e carbonatos. Esta abordagem apresenta um duplo benefício: a remoção de CO₂ da atmosfera e a transformação da salmoura num recurso útil. Os carbonatos resultantes podem ser aplicados em indústrias, como cimento e revestimentos. Para operacionalizar esta ação, é necessário que a EDAM do Algarve explore parcerias com centros de investigação e/ou empresas especializadas nestes processos. A realização de estudos-piloto permitirá avaliar a viabilidade técnica e económica do processo, bem como a sua escalabilidade para implementação na EDAM do Algarve.⁴³

6.3 EIXO 3: MAXIMIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E INTEGRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS

Linha de Ação 3.1. Utilização de dispositivos de recuperação energética (ERD)

Esta ação visa a implementação de dispositivos de recuperação energética (ERD) na EDAM do Algarve, com o objetivo de maximizar o reaproveitamento da energia contida na corrente de salmoura para a alimentação do sistema. Neste contexto, propõe-se que esta ação inclua:

- Instalação de ERD na EDAM do Algarve, assegurando a integração destes dispositivos na infraestrutura existente para otimização da eficiência energética do processo;
- Monitorização da eficiência energética dos ERD, através da medição e análise do seu desempenho.

É importante destacar que o projeto de execução da EDAM do Algarve já prevê a instalação de ERD para recuperação de energia do processo, contemplando a implementação de seis conjuntos de 14 permutadores de pressão. No entanto, a presente ação reforça a necessidade de um acompanhamento técnico e de uma

⁴² Engie (2024). Mineral Recovery from Brine. Disponível em <https://innovation.engie.com/en/news/interview/emerging-sustainable-technologies/mineral-recovery-from-brine/29556> [acedido em fevereiro de 2025].

⁴³ Grist (2024). Can carbon capture solve desalination's waste problem? Disponível em <https://grist.org/technology/desalination-carbon-capture-brine/> [acedido em fevereiro de 2025].

avaliação periódica da eficiência destes dispositivos, assegurando o seu bom funcionamento ao longo do tempo.

Linha de Ação 3.2. Integração de fontes de energia renovável

A ação prevê a integração de fontes de energia renovável para alimentar parte das necessidades energéticas do processo, tais como solar ou eólica, que são as que atualmente possuem maior grau de implementação. A importância desta ação reside não apenas na capacidade de atender às exigentes necessidades energéticas do processo, mas também na contribuição para a descarbonização da energia consumida. Neste contexto, propõe-se:

- A instalação de um parque solar ou eólico adjacente à EDAM do Algarve, com o objetivo de suprir uma parte das suas necessidades energéticas.

Destaca-se que está previsto um parque de energia renovável fotovoltaica com uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC), cuja implementação está excluída do presente RECAPE. Este parque será capaz de suprir, em média, cerca de 22% das necessidades energéticas da EDAM, com a energia não coberta pela UPAC a ser adquirida da rede pública de média tensão.

7 MONITORIZAÇÃO DA IMPLEMENTAÇÃO DO PLANO

De forma a permitir a monitorização da implementação do Plano de Circularidade e a avaliação do impacto das ações previstas, foi definido um conjunto de indicadores que deverão ser calculados e analisados ao longo da fase de exploração da EDAM do Algarve (Tabela 5).

Tabela 5. Eixos estratégicos, linhas de ação e indicadores de monitorização propostos para o Plano de Circularidade para a fase de exploração da EDAM do Algarve

Eixos estratégicos	Linhas de ação	Indicadores de monitorização
1. Otimização do desempenho, vida útil e gestão de fim de vida das membranas	1.1. Implementação de procedimentos otimizados de limpeza periódica das membranas	Taxa de recuperação de água tratada (%)
	1.2. Utilização de membranas fabricadas com materiais sustentáveis	N.º de membranas com materiais sustentáveis utilizadas
	1.3. Encaminhamento das membranas em fim de vida para processos de reutilização	Taxa de reutilização de membranas (%)
	1.4. Encaminhamento das membranas em fim de vida para processos de reciclagem	Taxa de reciclagem de membranas (%)
2. Valorização e gestão eficiente da salmoura	2.1. Utilização da salmoura para fins de irrigação	- Número de projetos relacionados com a valorização da salmoura produzida - Taxa de valorização da salmoura (%)
	2.2. Extração de elementos críticos e minerais valiosos da salmoura	
	2.3. Exploração do potencial da salmoura para captura e utilização de carbono	
3. Maximização da eficiência energética e integração de energias renováveis	3.1. Utilização de dispositivos de recuperação energética (ERD)	Consumo de energia específica (kWh/m³)
	3.2. Integração de fontes de energia renovável	Taxa de utilização de energia renovável (%)

A definição dos indicadores de monitorização do Plano de Circularidade da EDAM do Algarve foi suportada com uma revisão de literatura, com o objetivo de selecionar parâmetros de controlo relevantes para cada ação proposta. A metodologia adotada permitiu identificar indicadores que melhor caracterizam a eficiência e a sustentabilidade das operações de osmose inversa, considerando a sua pertinência no contexto operacional da EDAM, a existência de estudos e projetos que os validem e a

sua aplicação em plantas de osmose inversa de referência. Seguidamente apresenta-se a metodologia para a definição de cada uma das ações do Plano.

Taxa de recuperação de água tratada

No âmbito da implementação de procedimentos otimizados de limpeza das membranas, definiu-se como indicador de controlo a taxa de recuperação. A taxa de recuperação é um dos principais indicadores de desempenho em plantas de dessalinização por osmose inversa, variando tipicamente entre 50% e 85%.⁴⁴ Este indicador expressa a proporção de água permeada recuperada em relação ao volume total de água tratada e é calculado através da seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de recuperação (\%)} = \frac{\text{Volume de água permeada}}{\text{Volume total de água tratada}}$$

Esta taxa é influenciada por diversos fatores, incluindo:⁴⁵

- Composição e temperatura da água de alimentação – influenciam a solubilidade dos sais e o potencial de formação de incrustações;
- Tecnologias de pré-tratamento – minimizam a acumulação de incrustações nas membranas;
- Pressão de operação – impacta diretamente a eficiência da separação;
- Tipo de membrana – determina a capacidade de retenção de sal.

A taxa de recuperação deve ser cuidadosamente controlada para equilibrar a eficiência hídrica e a prevenção de problemas operacionais. Quando não há risco significativo de incrustação, uma taxa de recuperação elevada é preferível para minimizar a descarga de efluentes e otimizar o aproveitamento da água. Caso haja potencial de formação de incrustações, a taxa deve ser reduzida para evitar perdas de desempenho e danos nas membranas.⁴⁶ No entanto, o *fouling* nas membranas é inevitável, o que torna necessários procedimentos de limpeza periódica adequados capazes de restabelecer a taxa de recuperação aos níveis anteriores à formação do *fouling*. A limpeza química das membranas deve ser feita periodicamente, a cada poucos meses, sendo a sua frequência determinada com base no desempenho das membranas. A limpeza é normalmente feita quando o fluxo de permeado ou a rejeição de sal diminuem em mais de 10%, ou quando a perda de pressão no lado da alimentação aumenta em 15%. Uma frequência de limpeza química superior a uma vez a cada três meses indica, geralmente, um desempenho inadequado do processo de pré-tratamento. Relativamente aos produtos químicos utilizados, estes variam consoante o tipo de incrustação: ácidos são

⁴⁴ Ansari, M., Al-Obaidi, M. A., Hadadian, Z., Moradi, M., Haghighi, A., & Mujtaba, I. M. (2021). Performance evaluation of a brackish water reverse osmosis pilot-plant desalination process under different operating conditions: Experimental study. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100134.

⁴⁵ Millar, G. J., Couperthwaite, S. J., & Moodliar, C. D. (2016). Strategies for the management and treatment of coal seam gas associated water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 669-691.

⁴⁶ Kim, D., Lee, H., Jeon, J., & Kim, S. (2024). High recovery design of reverse osmosis process with high permeate water quality and low wastewater discharge for ultra-pure water production. *Desalination*, 592, 118149.

habitualmente usados para remover incrustações metálicas, enquanto soluções alcalinas são preferíveis na remoção de contaminantes biológicos e orgânicos.⁴⁷

Número de membranas com materiais sustentáveis utilizadas

No âmbito da ação que visa a utilização de membranas fabricadas com materiais sustentáveis, definiu-se como indicador de monitorização o controlo do número de membranas que incorporam esses materiais na sua composição. Na fase inicial de operação a EDAM do Algarve utilizará o modelo de membrana previamente selecionado, LG SW 400 R G2. No entanto, considerando o elevado número de membranas de osmose inversa previstas para a instalação (cerca de 4 000) e a sua taxa de substituição, recomenda-se que a EDAM do Algarve acompanhe as evoluções de setor, no sentido da adoção progressiva de membranas constituídas por materiais como biopolímeros, materiais reciclados e fabricadas com recursos a solventes verdes. Este indicador permitirá monitorizar e contabilizar a transição para membranas com menor impacto ambiental.

Taxa de reutilização de membranas

Propõe-se que a evolução da ação relativa ao encaminhamento de membranas em fim de vida para processos de reutilização seja monitorizada através do acompanhamento do indicador taxa de reutilização, calculada pelo rácio entre as membranas enviadas para reutilização e o total de membranas em fim de vida no ano X, conforme a seguinte fórmula, com o objetivo de aumentar continuamente esta taxa ao longo dos anos.

$$\text{Taxa de reutilização (\%)} = \frac{\text{Número de membranas para reutilização no ano X}}{\text{Número de membranas em fim de vida no ano X}}$$

As membranas de osmose inversa em fim de vida representam um recurso valioso, com potencial para valorização através de reutilização direta, em aplicações de osmose inversa, ou reciclagem, com a sua conversão para outros tipos de membranas (nanofiltração ou ultrafiltração). Em plantas de dessalinização de água do mar, a taxa de substituição de membranas é, em média, de cerca de 20% ao ano, refletindo a frequência com que estas necessitam de ser substituídas devido ao desgaste.⁴⁷ Considerando este ritmo elevado de substituição, a gestão eficaz das membranas torna-se relevante. A nível europeu, diversas iniciativas estão em curso para fazer frente a esta problemática, envolvendo empresas especializadas e projetos de investigação focados na regeneração e reutilização das membranas. A Tabela 6 apresenta alguns desses exemplos.

⁴⁷ Okamoto, Y., & Lienhard, J. H. (2019). How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review. *Desalination*, 470, 114064.

Tabela 6. Empresas e projetos dedicados à regeneração e reutilização de membranas de osmose inversa

Empresa/projeto	Descrição
Ecomemb 	A Ecomemb é uma empresa espanhola especializada na regeneração de membranas de osmose inversa, permitindo a sua reutilização nos processos de osmose inversa e, assim, prolongando a sua vida útil. Através das suas operações, a empresa consegue reduzir em 60% os custos de substituição das membranas, estendendo a sua durabilidade em pelo menos 50%.²⁶
Remark 	O projeto Remark, liderado pelo Cetaqua (<i>Water Technology Center</i>) em Espanha, tem como foco a reutilização de membranas de osmose inversa que não atendem mais aos requisitos de qualidade para tratamento de água, mas que ainda podem ser aplicadas em processos com requisitos menos rigorosos, como a irrigação.²⁷
MemRe 	A MemRe é uma empresa alemã especializada na recuperação e gestão de membranas de osmose inversa em fim de vida, oferecendo soluções para prolongar a vida útil destes equipamentos. A empresa alcançou uma taxa de recuperação de materiais de membranas de osmose inversa de 85%, contribuindo para a redução de desperdícios e custos operacionais.⁴⁸
LIFE TRANSFOMEM 	O projeto LIFE TRANSFOMEM, concluído em 2018, teve como objetivo aumentar a sustentabilidade dos processos de tratamento de água baseados em membranas, em Espanha. Através da melhoria da durabilidade das membranas e da sua reutilização em processos de menor pressão, como o pré-tratamento e o tratamento terciário de águas residuais, o projeto demonstrou a viabilidade de sistemas de transformação de membranas e confirmou a competitividade económica da tecnologia aplicada.²⁸

No âmbito da gestão do fim de vida das membranas de osmose inversa, destacam-se duas ferramentas de apoio à tomada de decisão: a REMapp e a MemEOL.

A ferramenta REMapp, acessível online, solicita aos utilizadores que possuem membranas em fim de vida o preenchimento de um inquérito. Neste inquérito, são solicitadas informações como a condição das membranas (tipo, configuração, tamanho, peso, danos, tipo de incrustação), método de armazenamento após a substituição, a principal causa da substituição, o tipo de água tratada pelas membranas e valores de produção de água e rejeição de sal. Após o preenchimento de todos os campos, a ferramenta apresenta as opções mais adequadas para o fim de vida das membranas, que podem incluir: reutilização, reciclagem direta, reciclagem indireta, incineração ou descarte em aterro. Além disso, a REMapp oferece exemplos de casos de estudo de

⁴⁸ MEMRE. (n.d.) RO MEMBRANE RECYLING. We are your global partner for your membrane recycling. Disponível em <https://www.memre.de/> [acedido em fevereiro de 2025].

projetos ou empresas que trabalham ou trabalharam com estas soluções para o tratamento de membranas em fim de vida.⁴⁹

A ferramenta MemEOL tem um objetivo semelhante, procurando promover melhores práticas na indústria de dessalinização, ao ajudar os utilizadores a identificar e selecionar a opção mais adequada para o fim de vida das suas membranas de osmose inversa. A ferramenta baseia-se nas informações fornecidas pelos utilizadores sobre a condição das membranas e considera a importância relativa de diversos critérios.⁵⁰

Taxa de reciclagem de membranas

A taxa de reciclagem de membranas foi definida como o indicador para monitorizar o encaminhamento das membranas em fim de vida para processos de reciclagem. Esta taxa pode ser calculada através da seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de reciclagem (\%)} = \frac{\text{Número de membranas para reciclagem no ano } X}{\text{Número de membranas em fim de vida no ano } X}$$

No entanto, no início da operação da EDAM do Algarve, não será possível acompanhar este indicador, uma vez que as tecnologias de reciclagem dos componentes das membranas de osmose inversa ainda se encontram em fase de desenvolvimento. Espera-se que, no futuro, surjam projetos e empresas que disponibilizem este serviço, tanto na Península Ibérica como a nível europeu. Assim, este indicador será acompanhado numa fase mais avançada da operação da EDAM do Algarve, a médio e longo prazo, à medida que se verifiquem avanços tecnológicos nesta área.

Número de projetos relacionados com a valorização da salmoura produzida e taxa de valorização da salmoura

No âmbito das ações previstas para a valorização e gestão eficiente da salmoura, nomeadamente em aplicações como irrigação, extração de elementos críticos e minerais valiosos, bem como na captura e utilização de carbono, recomenda-se o acompanhamento dos seguintes indicadores:

- Número de projetos relacionados com a valorização da salmoura nos quais a EDAM do Algarve esteja envolvida;
- Taxa de valorização da salmoura.

Face ao crescimento do setor da dessalinização e ao aumento das preocupações ambientais associadas à eliminação da salmoura em ecossistemas marinhos, prevê-se um aumento significativo de iniciativas destinadas à sua valorização. A nível europeu, têm sido desenvolvidos diversos projetos focados na otimização da gestão da salmoura nos processos de dessalinização, evidenciando a crescente preocupação com este tema

⁴⁹ REMapp. (n.d.) REMapp decision-making tool. Find your alternative solution for a sustainable end-of-life reverse osmosis membrane management. Disponível em <https://remapp.icra.cat/#/> [acedido em fevereiro de 2025].

⁵⁰ MemEOL Test. (n.d.) Disponível em http://www.desalwiki.che.unsw.edu.au/w/index.php/MemEOL_Test [acedido em fevereiro de 2025].

e a busca por soluções que minimizem os seus impactos ambientais. A Tabela 7 apresenta projetos relevantes nesta área, que podem servir de referência para a EDAM do Algarve.

Tabela 7. Projetos relevantes no contexto da otimização da gestão da salmoura gerada no processo de dessalinização e da sua valorização em aplicações alternativas

Empresa/projeto	Descrição
Sea4Value 	Em curso à data da elaboração do presente relatório, o Sea4Value é um projeto europeu focado na inovação para a valorização da salmoura. Desde junho de 2020, os 16 parceiros do projeto, de 8 países europeus, desenvolveram tecnologias custo-eficientes para a recuperação de minerais e metais das salmouras resultantes da dessalinização, possibilitando a sua utilização noutras aplicações. As matérias-primas recuperadas podem servir indústrias como o setor das baterias, agricultura e indústria química.⁵¹
SOL-BRINE 	O SOL-BRINE foi um projeto financiado pelo programa LIFE da União Europeia entre 2013 e 2016, que demonstrou que a destilação da água pode aumentar a eficiência das unidades de dessalinização, eliminando completamente os efluentes de salmoura. O processo recupera água desmineralizada e sal como materiais secundários.⁵²
LIFE Waste2Coag 	O projeto, que teve início no ano de 2021 e termina em setembro de 2025, visa demonstrar uma solução viável e economicamente eficiente para a valorização de salmouras e resíduos metálicos (originados pelos sais metálicos usados nos processos de coagulação para remoção de poluentes), através da produção de coagulantes sustentáveis como alternativa aos produtos comerciais. Estes coagulantes, baseados em sais férricos e de alumínio, podem ser utilizados em estações de tratamento de água para a remoção de poluentes de águas residuais, garantindo processos eficientes no uso de recursos.⁵³

No seguimento deste aumento de iniciativas e projetos dedicados à valorização da salmoura, o indicador “Número de Projetos de Valorização de Salmoura” tem como objetivo mapear iniciativas de interesse para a economia circular da salmoura gerada pela EDAM do Algarve, identificando estudos e empresas que promovam a sua aplicação prática. A monitorização deste indicador será realizada através do levantamento e acompanhamento de projetos e iniciativas em que a EDAM do Algarve esteja envolvida. Para tal, será relevante identificar potenciais simbioses industriais e colaborações com centros de pesquisa e universidades, nomeadamente com a Universidade do Algarve.

⁵¹ SEA4VALUE. (n.d). THE PROJECT. Disponível em <https://sea4value.eu/the-project/> [acedido em fevereiro de 2025].

⁵² European Commission. (2019). SOL-BRINE Nothing more than salt and water. Disponível em https://cinea.ec.europa.eu/system/files/2023-11/Sol-Brine_final.pdf [acedido em fevereiro de 2025].

⁵³ EUROPEAN COMMISSION. LIFE Waste2Coag on LIFE Public Database. Brine and metal wastes valorisation to produce coagulants for wastewater treatment. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE20-ENV-ES-000430/brine-and-metal-wastes-valorisation-to-produce-coagulants-for-wastewater-treatment> [acedido em fevereiro de 2025].

O segundo indicador, “Taxa de valorização da salmoura”, deverá ser monitorizado a partir do momento em que a EDAM do Algarve inicie ou integre parcerias que permitam a aplicação de parte ou da totalidade da sua salmoura em soluções de valor acrescentado, tais como as propostas pelas ações definidas neste Plano: irrigação, extração de elementos críticos e captura e utilização de carbono. A taxa de valorização da salmoura poderá ser quantificada através da seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de valorização da salmoura (\%)} = \frac{\text{Volume de salmoura valorizada}}{\text{Volume total de salmoura produzida}}$$

Estes indicadores são suportados pela literatura existente sobre a avaliação da sustentabilidade da salmoura proveniente de processos de dessalinização. No entanto, importa destacar que a avaliação da sustentabilidade das estratégias de gestão da salmoura é ainda um campo em desenvolvimento, carecendo de estudos mais aprofundados. Gil-Trujillo et al. (2023) analisam a gestão da salmoura sob uma perspetiva holística e propõem o estabelecimento de estratégias baseadas em objetivos de sustentabilidade. Como resultado, é proposto um quadro com sete objetivos de gestão sustentável da salmoura, 11 metas e 18 indicadores de monitorização. Além disso, o estudo é complementado com um caso de estudo nas Ilhas Canárias, em Espanha, para avaliar a concretização destes objetivos por meio de indicadores. Alguns dos objetivos estabelecidos incluem a “Minimização do impacto da descarga da salmoura em meio marinho”, “Regulação e controlo das descargas”, “Redução de CO₂”, “Economia Circular”, “Inovação”, entre outros.

O objetivo “Economia Circular” é particularmente relevante no contexto do desenvolvimento do presente Plano de Circularidade. Este objetivo está associado à meta de “Valorização da salmoura, transformando-a de resíduo a recurso”. Gil-Trujillo et al. (2023) propõem três indicadores para avaliar a implementação da economia circular na dessalinização:

- **Indicador 1:** Identificação de usos, elementos e aplicabilidade. Este indicador envolve a análise de estudos e projetos realizados na região de estudo, com foco na viabilidade do uso e exploração de elementos presentes na salmoura. Gil-Trujillo et al. (2023) identificam dois projetos relevantes para as Ilhas Canárias. O primeiro é relativo ao uso da salmoura como fonte de nutrientes para o cultivo de tomates e culturas hidropónicas. O segundo é o projeto Sea4Value, anteriormente referido, que utiliza uma planta de dessalinização em Tenerife (Ilhas Canárias) como local para uma de suas demonstrações;
- **Indicador 2:** Volume de compostos da salmoura valorizados e comercializados. Este indicador visa quantificar o volume de salmoura utilizado para fins de economia circular. De acordo com Gil-Trujillo et al. (2023), nas Ilhas Canárias, a recuperação de salmoura ainda está em fase inicial, não havendo, volume de salmoura recuperado industrialmente;
- **Indicador 3:** Gestão de subprodutos gerados. Este indicador destaca a necessidade de gerir os resíduos produzidos durante os processos de valorização da salmoura.

É relevante notar que Gil-Trujillo et al. (2023) classificam os três indicadores de economia circular acima indicados como de baixo grau de maturidade, dado que

envolvem tecnologias inovadoras que ainda estão em processo de integração pela indústria e não atingiram um estágio de maturidade no setor. Além disso, destaca a importância das instituições e empresas do setor realizarem um exercício de transparência e acessibilidade de informações, a fim de se obterem indicadores representativos e baseados em dados confiáveis.

Consumo de energia específica (kWh/m³)

Para a ação que prevê a utilização de ERD, recomenda-se a monitorização do consumo de energia específica (*specific energy consumption*, SEC), expresso em kWh por m³ de água tratada produzida. Este parâmetro é de extrema relevância para avaliar o desempenho dos processos de dessalinização, particularmente do ponto de vista global de sustentabilidade⁵⁴. A fórmula através da qual o SEC pode ser obtido é a seguinte:⁵⁵

$$SEC = \frac{\text{Consumo de energia (kW)}}{\text{Fluxo de água tratada produzida } (\frac{m^3}{h})}$$

Vários fatores afetam a SEC, incluindo as condições da alimentação (salinidade e temperatura), a eficiência dos equipamentos (ERD, bombas, entre outros), as condições alvo (qualidade e quantidade do permeado). A literatura apresenta análises sobre a SEC de plantas de dessalinização de água do mar com diferentes tipos de ERD. Foi observado que⁵⁶:

- Plantas que utilizam turbinas de pressão como ERD apresentam valores de SEC entre 3,5-5,5 kWh/m³;
- Plantas com ERD isobáricos, tais como os permutadores de pressão (PX), consomem menos energia comparativamente às turbinas de pressão, apresentando valores de SEC entre 3,0-5,3 kWh/m³.

É, no entanto, referido que algumas plantas que utilizam PX registam valores elevados de SEC, devido às condições da água de alimentação ou ao desempenho das membranas. Contudo, instalações que combinam PX com tecnologias avançadas de membranas operam com SEC reduzido.⁵⁶

O estudo destaca uma planta com PX que reporta um consumo inferior a 3 kWh/m³ para toda a unidade, justificado pelo baixo consumo energético do sistema de osmose inversa, que consiste num sistema de passagem única, equipado com membranas de alto desempenho e que utiliza PX como ERD.⁵⁶

⁵⁴ Karabelas, A. J., Koutsou, C. P., Kostoglou, M., & Sioutopoulos, D. C. (2018). Analysis of specific energy consumption in reverse osmosis desalination processes. *Desalination*, 431, 15-21.

⁵⁵ Tsai, S. C., Huang, W. Z., Lin, G. S., Wang, Z., Tung, K. L., & Chuang, C. J. (2022). Evaluation of the specific energy consumption of sea water reverse osmosis integrated with membrane distillation and pressure-retarded osmosis processes with theoretical models. *Membranes*, 12(4), 432.

⁵⁶ Hong, S., Park, K., Kim, J., Alayande, A. B., & Kim, Y. (2023). *Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Desalination: Energy consumption in plants, advanced low-energy technologies, and future developments for improving energy efficiency*. IWA Publishing.

O estudo conclui ainda que o SEC do sistema de osmose inversa influencia significativamente o SEC global da planta, e que a sua otimização pode ser alcançada através do desenvolvimento de novas tecnologias de ERD.⁵⁶

Integração de fontes de energia renovável

Por último, a ação que prevê a integração de fontes de energia renovável no fornecimento de energia para o processo de dessalinização pode ser monitorizada através da taxa de utilização de energia renovável, definida pela seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de utilização de energia renovável (\%)} = \frac{\text{Energia renovável consumida (kWh)}}{\text{Energia total consumida (kWh)}}$$

O acompanhamento desta taxa, especialmente do seu aumento ao longo do tempo, refletirá uma maior integração de fontes renováveis, reduzindo a dependência da eletricidade proveniente da rede elétrica convencional. A utilização de energia verde não só contribui para a redução das emissões de carbono, como também reforça a sustentabilidade global da instalação.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente Plano de Circularidade para a fase de exploração da EDAM do Algarve integra o RECAPE e tem como principal objetivo maximizar o desempenho ambiental e a sustentabilidade do projeto. Para tal, foram delineadas estratégias que promovem a otimização energética, a valorização de subprodutos e o controlo de emissões/efluentes.

A metodologia adotada para a elaboração do Plano envolveu uma revisão aprofundada da literatura, com a identificação e análise de estratégias de circularidade aplicáveis a unidades de dessalinização de água do mar. Posteriormente, realizou-se uma caracterização detalhada da EDAM do Algarve na sua fase de operação, com a consolidação de dados sobre fluxos materiais e energéticos, bem como dados de efluentes e resíduos gerados. Esta caracterização permitiu identificar os principais pontos críticos do ponto de vista e circularidade associados à fase de exploração da infraestrutura, apresentados seguidamente:

- Consumo de membranas de osmose inversa – A dessalinização requer um elevado número de membranas de osmose inversa, cuja vida útil é limitada. No início da operação, a EDAM contará com cerca de 4 000 membranas, com uma taxa de substituição anual de aproximadamente 15% a partir do terceiro ano. Esta elevada necessidade de reposição representa um desafio em termos de custos, gestão de resíduos e impacto ambiental, tornando-se um fator crítico para a eficiência e sustentabilidade do processo;
- Produção de salmoura – A salmoura gerada no processo de dessalinização é o principal efluente da EDAM, sendo produzido em grandes volumes. A sua descarga no ecossistema marinho representa riscos ambientais, nomeadamente impactos na biodiversidade e na qualidade da água. A gestão adequada deste resíduo é, portanto, essencial para minimizar efeitos adversos no ecossistema;
- Consumo energético da instalação – A osmose inversa, processo central da EDAM, opera a elevadas pressões e requer uma quantidade significativa de energia.

Com base nestes pontos críticos e na análise das melhores práticas identificadas na literatura para a circularidade na dessalinização, foram definidos três eixos estratégicos de atuação:

- Eixo 1: Otimização do desempenho, vida útil e gestão do fim de vida das membranas;
- Eixo 2: Valorização e gestão eficiente da salmoura;
- Eixo 3: Maximização da eficiência energética e integração de energias renováveis.

Para responder a estes eixos estratégicos, foram propostas diversas ações a implementar no curto, médio e longo prazo da exploração da EDAM do Algarve.

No âmbito do primeiro eixo, as ações incidem na otimização do ciclo de vida das membranas de osmose inversa, desde a seleção de materiais mais sustentáveis e

duráveis até à sua operação eficiente. Prevê-se a implementação de estratégias para a otimização das limpezas das membranas, reduzindo a frequência de intervenções desnecessárias e promovendo o uso de químicos com menor impacto ambiental. Além disso, considera-se a reutilização das membranas em processos menos exigentes, como a microfiltração no pré-tratamento da água, antes do seu descarte final. A reciclagem indireta das membranas, envolvendo a reciclagem individualizada dos componentes que as compõem, é também identificada como uma das ações do Plano. Embora a sua aplicação prática ainda não seja uma realidade, sugere-se o acompanhamento contínuo da evolução das tecnologias, para que, quando o setor estiver preparado, a EDAM do Algarve possa integrar esta abordagem de fim de vida.

Relativamente ao segundo eixo, as ações visam a valorização da salmoura, explorando o seu potencial em aplicações como irrigação, extração de elementos críticos e captura e utilização de carbono. Adicionalmente, prevê-se a promoção de simbioses industriais para o reaproveitamento deste efluente, priorizando colaborações locais que minimizem impactos ambientais adicionais.

O terceiro eixo está focado na redução do consumo energético através da implementação de tecnologias de recuperação de energia e da integração de fontes renováveis, como a energia solar e eólica. Para a fase inicial de operação, já está prevista a instalação de dispositivos de recuperação energética (ERD) e uma Unidade de Produção para Autoconsumo (UPAC) fotovoltaica que cobrirá, em média, cerca de 22% das necessidades energéticas da instalação. Ainda assim, as ações deste eixo permanecem como parte integrante deste Plano, dada a sua relevância estratégica.

A implementação das ações propostas deverá ser acompanhada e monitorizada durante a fase de exploração da EDAM, com base nos indicadores definidos neste Plano. Os indicadores permitirão avaliar a eficácia das medidas adotadas, possibilitando a definição de metas.

NOMENCLATURA

ACV	Avaliação de Ciclo de Vida
APA, I.P.	Agência Portuguesa do Ambiente, I.P.
EDAM	Estação de Dessalinização de Água do Mar
ERD	Dispositivos de recuperação energética
MLD	<i>Minimal Liquid Discharge</i>
PRO	<i>Pressure Retarded Osmosis</i>
RECAPE	Relatório de Conformidade Ambiental do Projeto de Execução
RED	<i>Reverse Electrodialysis</i>
SWRO-MD-FO	<i>Sea Water Reverse Osmosis - Membrane Distillation - Forward Osmosis</i>
TRL	<i>Technology Readiness Level</i>
UE	União Europeia
ULPRO	Ultra Low-Pressure Reverse Osmosis
ZLD	<i>Zero Liquid Discharge</i>

REFERÊNCIAS

- [1] Lee, C. H., Ho, H. J., Chen, W. S., & Iizuka, A. (2024). Total Resource Circulation of Desalination Brine: A Review. *Advanced Sustainable Systems*, 2300460.
- [2] Liang, Y., & Knauer, K. M. (2023). Trends and future outlooks in circularity of desalination membrane materials. *Frontiers in Membrane Science and Technology*, 2, 1169158.
- [3] Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59-104.
- [4] JRC. (2021). Smart Specialisation in the Context of Blue Economy – Analysis of Desalination Sector.
- [5] Landaburu-Aguirre, J., García-Pacheco, R., Molina, S., Rodríguez-Sáez, L., Rabadán, J., & García-Calvo, E. (2016). Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination. *Desalination*, 393, 16-30.
- [6] Schunke, A. J., Hernandez Herrera, G. A., Padhye, L., & Berry, T. A. (2020). Energy recovery in SWRO desalination: current status and new possibilities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 2, 9.
- [7] Kurihara, M., Sasaki, T., Nakatsuji, K., Kimura, M., & Henmi, M. (2015). Low pressure SWRO membrane for desalination in the Mega-ton Water System. *Desalination*, 368, 135-139.
- [8] Kim, J., Park, K., Yang, D. R., & Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. *Applied Energy*, 254, 113652.
- [9] Ahmed, F. E., Hashaikh, R., & Hilal, N. (2019). Solar powered desalination–Technology, energy and future outlook. *Desalination*, 453, 54-76.
- [10] Ye, X. Y., Yang, S. S., Hu, J. N., Xiao, X. P., & Zhou, G. F. (2009, January). Research on improving efficiency of high pressure pump in seawater reverse osmosis desalination. In *Fluids Engineering Division Summer Meeting* (Vol. 43727, pp. 181-189).
- [11] Ludwig, H. (2010). Energy consumption of reverse osmosis seawater desalination-possibilities for its optimisation in design and operation of SWRO plants. *Desalination and Water Treatment*, 13(1-3), 13-25.
- [12] Li, D., & Wang, H. (2010). Recent developments in reverse osmosis desalination membranes. *Journal of Materials Chemistry*, 20(22), 4551-4566.
- [13] Aryanti, P. T. P., Afred, M. Y., Wardani, A. K., Lugito, G., Kadja, G. T. M., Wenten, I. G., & Khoiruddin, K. (2023). Ultra low-pressure reverse osmosis (ULPRO) membrane for desalination: current challenges and future directions. *Desalination*, 560, 116650.

- [14] Gao, Q., Duan, L., Liu, J., Zhang, H., & Zhao, Y. (2023). Evaluation and optimization of reverse osmosis pretreatment technology using the modified intermediate blocking model. *Journal of Cleaner Production*, 417, 138029.
- [15] Farhat, N. M., Christodoulou, C., Placotas, P., Blankert, B., Sallangos, O., & Vrouwenvelder, J. S. (2020). Cartridge filter selection and replacement: optimization of produced water quantity, quality, and cost. *Desalination*, 473, 114172.
- [16] El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. *Fundamentals of salt water desalination*. 2002.
- [17] Zhao, S., Liao, Z., Fane, A., Li, J., Tang, C., Zheng, C., ... & Kong, L. (2021). Engineering antifouling reverse osmosis membranes: A review. *Desalination*, 499, 114857.
- [18] Lejarazu-Larrañaga, A., Landaburu-Aguirre, J., Senán-Salinas, J., Ortiz, J. M., & Molina, S. (2022). Thin film composite polyamide reverse osmosis membrane technology towards a circular economy. *Membranes*, 12(9), 864.
- [19] Jiang, S., Li, Y., & Ladewig, B. P. (2017). A review of reverse osmosis membrane fouling and control strategies. *Science of the total environment*, 595, 567-583.
- [20] Son, H. S., Soukane, S., Lee, J., Kim, Y., Kim, Y. D., & Ghaffour, N. (2021). Towards sustainable circular brine reclamation using seawater reverse osmosis, membrane distillation and forward osmosis hybrids: An experimental investigation. *Journal of Environmental Management*, 293, 112836.
- [21] Martínez-Medina, M. À., Pérez-Martín, M. Á., & Estrela, T. (2024). Desalination in Spain and the Role of Solar Photovoltaic Energy. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(6), 859.
- [22] Bhagwati, A., Shah, M., & Prajapati, M. (2023). Emerging technologies to sustainability: A comprehensive study on solar desalination for sustainable development. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 100007.
- [23] Gude, V. G., Nirmalakhandan, N., & Deng, S. (2010). Renewable and sustainable approaches for desalination. *Renewable and sustainable energy reviews*, 14(9), 2641-2654.
- [24] Shahzad, M. W., Burhan, M., Ang, L., & Ng, K. C. (2017). Energy-water-environment nexus underpinning future desalination sustainability. *Desalination*, 413, 52-64.
- [25] Moeve Global. (2024). Plantas desaladoras: una gestión hídrica más eficiente a través de la innovación. <https://www.moeveglobal.com/es/planet-energy/innovacion-sostenible/plantas-desaladoras-gestion-agua-espana>. [acedido em fevereiro de 2025].
- [26] Ecomemb. (n.d.) REGENERATION OF REVERSE OSMOSIS MEMBRANES. Disponível em <https://www.ecomemb.com/#inicio> [acedido em fevereiro de 2025].

- [27] CETAQUA. (n.d.) Remark, la solución líder en reutilización de membranas de ósmosis inversa. Disponível em <https://www.cetaqua.com/remark/> [acedido em fevereiro de 2025].
- [28] EUROPEAN COMMISSION. (n.d.) LIFE TRANSFOMEM on LIFE Public Database. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE13-ENV-ES-000751/transformation-of-disposed-reverse-osmosis-membranes-into-recycled-ultra-and-nanofiltration-membranes> [acedido em fevereiro de 2025].
- [29] Lienhard, J. H., Thiel, G. P., Warsinger, D. M., & Banchik, L. D. (2016). Low carbon desalination: status and research, development, and demonstration needs, report of a workshop conducted at the Massachusetts Institute of Technology in association with the Global Clean Water Desalination Alliance.
- [30] Ali, H., Siddiqui, M. U., Aswani, M. A., Umer, M., & Khan, M. I. (2024). Techno-economic analysis of various configurations of stand-alone PV-RO systems for Pakistan. *Renewable Energy*, 225, 120262.
- [31] Henthorne, L., & Boysen, B. (2015). State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment. *Desalination*, 356, 129-139.
- [32] Kang, G. D., & Cao, Y. M. (2012). Development of antifouling reverse osmosis membranes for water treatment: A review. *Water research*, 46(3), 584-600.
- [33] Gilabert-Oriol, G., Alomar, H., Maciá, M. Á. P., & Molina, V. G. (2023). Innovation beyond product specifications: the advantage of superior membrane durability in reverse osmosis installations worldwide. *Desalination and Water Treatment*, 309, 66-72.
- [34] EUROPEAN COMMISSION. (n.d.) REMEMBRANE on LIFE Public Database. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE11-ENV-ES-000626/recovery-of-reverse-osmosis-membranes-at-its-end-of-life> [acedido em fevereiro de 2025].
- [35] Moon, J., Kim, J. H., & Park, K. (2024). Cost-based optimization, feasibility study, and sensitivity analysis of forward osmosis/crystallization/reverse osmosis with high-temperature operation for high-salinity seawater desalination. *Desalination*, 580, 117531.
- [36] Ho, H. J., & Iizuka, A. (2023). Mineral carbonation using seawater for CO2 sequestration and utilization: A review. *Separation and Purification Technology*, 307, 122855.
- [37] Oron, G., Appelbaum, S., & Guy, O. (2023). Reuse of brine from inland desalination plants with duckweed, fish and halophytes toward increased food production and improved environmental control. *Desalination*, 549, 116317.
- [38] ACCIONA. (2024). ACCIONA leads a project for the extraction of high-value elements from seawater brine. Disponível em

<https://www.acciona.com/updates/articles/acciona-leads-project-extraction-highvalue-elements-seawater-brine> [acedido em fevereiro de 2025].

[39] Ihsanullah, I., Mustafa, J., Zafar, A. M., Obaid, M., Atieh, M. A., & Ghaffour, N. (2022). Waste to wealth: A critical analysis of resource recovery from desalination brine. *Desalination*, 543, 116093.

[40] Mito, M. T., Ma, X., Albuflasa, H., & Davies, P. A. (2019). Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by wind and solar photovoltaic (PV) energy: State of the art and challenges for large-scale implementation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 669-685.

[41] Agroportal (2019). Cultivo de plantas halófitas comestíveis como alternativa à agricultura convencional. Disponível em <https://www.agroportal.pt/cultivo-de-plantas-halofitas-comestiveis-como-alternativa-a-agricultura-convencional/> [acedido em fevereiro de 2025].

[42] Engie (2024). Mineral Recovery from Brine. Disponível em <https://innovation.engie.com/en/news/interview/emerging-sustainable-technologies/mineral-recovery-from-brine/29556> [acedido em fevereiro de 2025].

[43] Grist (2024). Can carbon capture solve desalination's waste problem? Disponível em <https://grist.org/technology/desalination-carbon-capture-brine/> [acedido em fevereiro de 2025].

[44] Ansari, M., Al-Obaidi, M. A., Hadadian, Z., Moradi, M., Haghighi, A., & Mujtaba, I. M. (2021). Performance evaluation of a brackish water reverse osmosis pilot-plant desalination process under different operating conditions: Experimental study. *Cleaner Engineering and Technology*, 4, 100134.

[45] Millar, G. J., Couperthwaite, S. J., & Moodliar, C. D. (2016). Strategies for the management and treatment of coal seam gas associated water. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 669-691.

[46] Kim, D., Lee, H., Jeon, J., & Kim, S. (2024). High recovery design of reverse osmosis process with high permeate water quality and low wastewater discharge for ultra-pure water production. *Desalination*, 592, 118149.

[47] Okamoto, Y., & Lienhard, J. H. (2019). How RO membrane permeability and other performance factors affect process cost and energy use: A review. *Desalination*, 470, 114064.

[48] MEMRE. (n.d.) RO MEMBRANE RECYCLING. We are your global partner for your membrane recycling. Disponível em <https://www.memre.de/> [acedido em fevereiro de 2025].

[49] REMapp. (n.d.) REMapp decision-making tool. Find your alternative solution for a sustainable end-of-life reverse osmosis membrane management. Disponível em <https://remapp.icra.cat/#/> [acedido em fevereiro de 2025].

- [50] MemEOL Test. (n.d.) Disponível em http://www.desalwiki.cher.unsw.edu.au/w/index.php/MemEOL_Test [acedido em fevereiro de 2025].
- [51] SEA4VALUE. (n.d). THE PROJECT. Disponível em <https://sea4value.eu/the-project/> [acedido em fevereiro de 2025].
- [52] European Comission. (2019). SOL-BRINE Nothing more than salt and water. Disponível em https://cinea.ec.europa.eu/system/files/2023-11/Sol-Brine_final.pdf [acedido em fevereiro de 2025].
- [53] EUROPEAN COMMISSION. LIFE Waste2Coag on LIFE Public Database. Brine and metal wastes valorisation to produce coagulants for wastewater treatment. Disponível em <https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/project/LIFE20-ENV-ES-000430/brine-and-metal-wastes-valorisation-to-produce-coagulants-for-wastewater-treatment> [acedido em fevereiro de 2025].
- [54] Karabelas, A. J., Koutsou, C. P., Kostoglou, M., & Sioutopoulos, D. C. (2018). Analysis of specific energy consumption in reverse osmosis desalination processes. *Desalination*, 431, 15-21.
- [55] Tsai, S. C., Huang, W. Z., Lin, G. S., Wang, Z., Tung, K. L., & Chuang, C. J. (2022). Evaluation of the specific energy consumption of sea water reverse osmosis integrated with membrane distillation and pressure-retarded osmosis processes with theoretical models. *Membranes*, 12(4), 432.
- [56] Hong, S., Park, K., Kim, J., Alayande, A. B., & Kim, Y. (2023). *Seawater Reverse Osmosis (SWRO) Desalination: Energy consumption in plants, advanced low-energy technologies, and future developments for improving energy efficiency*. IWA Publishing.