

GRETA SYMANSKI REY GIL

**DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DA MINA DE SAL-GEMA EM LOULÉ
PARA USOS URBANOS NÃO POTÁVEIS E REUTILIZAÇÃO DE SAL**



2021

GRETA SYMANSKI REY GIL

**DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DA MINA DE SAL-GEMA EM LOULÉ
PARA USOS URBANOS NÃO POTÁVEIS E REUTILIZAÇÃO DE SAL**

Mestrado em Ciclo Urbano da Água

Trabalho efetuado sob orientação de:

Professora Doutora Manuela Moreira da
Silva – ISE/ UAAlg

Professora Doutora Cláudia Dias Sequeira –
ISE / UAAlg



UAAlg

UNIVERSIDADE DO ALGARVE

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA

2021

**DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DA MINA DE SAL-GEMA EM LOULÉ
PARA USOS URBANOS NÃO POTÁVEIS E REUTILIZAÇÃO DE SAL**

Declaração de Autoria de Trabalho

Declaro ser a autora deste trabalho, que é original e inédito. Autores e trabalhos consultados estão devidamente citados no texto e constam da listagem de referências incluída.

Greta Symanski Rey Gil

Copyright © Greta Symanski Rey Gil

A Universidade do Algarve reserva para si o direito, em conformidade com o disposto no Código do Direito de Autor e dos Direitos Conexos, de arquivar, reproduzir e publicar a obra, independentemente do meio utilizado, bem como de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição para fins meramente educacionais ou de investigação e não comerciais, conquanto seja dado o devido crédito ao autor e editor respetivos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente às minhas orientadoras Professora Doutora Manuela Moreira da Silva e Professora Doutora Cláudia Dias Sequeira, sem as quais esse trabalho não seria possível. Obrigada por todo o tempo dedicado a me ajudar, por todo o conhecimento passado e paciência nestes (muitos) meses de trabalho.

Visto que este estudo fez parte de uma candidatura aprovada de um Vale IDT (Portugal 2020), que permitiu financiar o desenvolvimento do Projeto WER – *Water and Energy Recovery*, agradeço imenso a toda a equipa que fez parte desse projeto.

Dedico este trabalho aos meus pais.

RESUMO

O grande crescimento populacional, as alterações climáticas, a industrialização e os atuais padrões de consumo têm gerado uma procura cada vez maior de água em todo o mundo. Cada vez mais pessoas vivem em condições de escassez e a extração de água dos ecossistemas aquáticos naturais tem levado à destruição de habitats e de biodiversidade. Em simultâneo, consome-se muita água tratada para consumo humano para usos urbanos que não requerem água potável. É necessário a adopção de medidas mais sustentáveis, ajustadas a cada realidade e que incluam a integração de origens alternativas de água para estes usos, nomeadamente a dessalinização.

Este estudo pretendeu responder a um desafio lançado por uma empresa que gere uma mina de sal-gema no Algarve, e que pretende encontrar uma solução para grandes volumes acumulados de água salgada. Para isso de janeiro a outubro de 2021 desenvolveu-se e instalou-se um sistema experimental de dessalinização solar *in situ* devidamente monitorizado, de forma a permitir otimizar a produção de água dessalinizada e em simultâneo recolher sal para posterior utilização em atividades locais. Os resultados obtidos até ao momento indicam que nestas condições experimentais o tanque médio com a cobertura de policarbonato foi o que apresentou maior produtividade de 0,62 L/dia.m² e que permitiu a recuperação de 185 g de sal por dia. De acordo com os usos urbanos externos não potáveis identificados nas proximidades da mina confirmou-se um grande potencial de utilização desta água dessalinizada, principalmente para lavagens de espaços exteriores e de contentores de resíduos sólidos urbanos, permitindo a poupança de cerca de 18 m³/mês de água tratada para consumo humano. Também o sal recuperado, por não apresentar evidências de contaminação química, poderá ter múltiplas utilizações na região do Algarve, nomeadamente, desinfecção de águas para usos recreativos em piscinas e parques aquáticos, tratamentos de talassoterapia e em indústrias alimentares, podendo ser um importante contributo para a economia circular.

Palavras-chave: origem alternativa de água não potável; dessalinização solar; sal; economia circular; Loulé

ABSTRACT

Population growth, climate change, heavy industrialization and current consumption patterns have generated an ever-increasing demand for water around the globe. More and more people live in scarcity conditions and the extraction of water from natural aquatic ecosystems has led to the destruction of habitats and biodiversity. At the same time, treated drinking water for human consumption is used for urban uses that do not require water with such quality. It is necessary to adopt more sustainable actions, adjusted to each reality, including the integration of alternative sources of water for these uses, *i.e.*, desalination.

This study aimed to respond to a challenge made by a company that manages a rock salt mine in Algarve region, and intends to find a solution for a large accumulated volume of salt water. From January to October 2021 an experimental solar desalination system *in situ* was developed, installed and properly monitored, in order to optimize the production of desalinated water and at the same time retrieve salt for subsequent use in local activities. The results obtained so far indicate that under these experimental conditions the medium size tank with polycarbonate cover was the one with the highest productivity of 0,62 L/day.m² and allowed a recovery of 185 g of salt per day. According to the non-potable external urban uses identified in the mine region, there is a great potential for this desalinated water use, mainly for washing outdoor spaces and urban solid waste containers, allowing savings of around 18 m³/month of treated water for human consumption. Also the recovered salt, as it does not show evidence of chemical contamination, may have multiple uses in Algarve, such as disinfection of water for recreational uses in swimming pools and water parks, thalassotherapy treatments and in food industries, and may be an important contribution to the circular economy.

Keywords: non-potable alternative source waters; solar desalination; salt; circular economy; Loulé

ÍNDICE

I.	INTRODUÇÃO	19
I.1.	Enquadramento.....	19
I.2.	Economia Circular.....	20
I.3.	Gestão Sustentável da Água e Dessalinização	21
I.3.1.	Dessalinização por Osmose Inversa.....	22
I.3.2.	Dessalinização Térmica.....	25
I.4.	Sistemas de Dessalinização Solar	29
I.4.1.	Material da Cobertura.....	32
I.5.	Caso de Estudo - Mina de Sal-gema, Loulé.....	33
I.6.	Objetivos Geral e Específicos	34
II.	METODOLOGIA	37
II.1.	Caracterização Analítica da Água	37
II.1.1.	Densidade	38
II.1.2.	Sólidos Totais.....	38
II.1.3.	Condutividade Elétrica.....	39
II.1.4.	Salinidade	39
II.2.	Composição do Sal.....	39
II.3.	Local do Estudo.....	40
II.4.	Sistema Experimental.....	40
II.4.1.	Sensores Instalados	44
II.5.	Período Experimental	49
II.5.1.	Etapa 1.....	49
II.5.2.	Etapa 2.....	50
III.	ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS	51

III.1. Caracterização da Água da Mina de Sal-gema.....	51
III.2. Composição do Sal.....	51
III.3. Resultados Experimentais da Dessalinização Solar	53
III.3.1. Etapa 1	53
III.3.2. Etapa 2	54
III.3.3. Influência da Tampa em Policarbonato <i>versus</i> Tampa em Vidro na Evolução da Temperatura no Interior do Tanque Mais Pequeno	58
III.3.4. Influência do Tamanho do Tanque na Evolução da Temperatura no seu Interior Durante a Dessalinização	59
III.3.5. Análise do Efeito na Temperatura Interior da Variação do Tamanho do Tanque em Simultâneo com o Material da Tampa	61
III.4. Usos Urbanos Não Potáveis para a Água Dessalinizada.....	64
III.5. Possíveis Usos para o Sal.....	66
IV. CONCLUSÕES.....	69
V. PERSPETIVAS FUTURAS.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

LISTA DE FIGURAS

Figura I.1. Representação esquemática dos processos de osmose (a), equilíbrio osmótico (b) e RO (c) (Adaptado de Qasim <i>et al.</i> , 2019).	23
Figura I.2. Vista aérea da estação dessalinizadora de Sydney e principais passos durante a dessalinização por osmose inversa (Adaptado de Sydney Desalination Plant, 2021).....	24
Figura I.3. Esquema do processo de dessalinização térmica flash multi-estágio, MSF (Adaptado de Saadat <i>et al.</i> , 2017).	27
Figura I.4. Esquema do processo de dessalinização térmica multiefeito, MED (Adaptado de Araújo, 2013).	28
Figura I.5. Desenho esquemático de um tanque com tampa de inclinação única (Adaptado de Rufuss <i>et al.</i> , 2016).	32
Figura II.1. Cadinhos após a secagem das amostras.....	39
Figura II.2. Localização esquemática da instalação do sistema experimental na empresa TechSalt, Loulé (Google Maps, 2021).	40
Figura II.3. Sistema experimental instalado na empresa TechSalt, Loulé.....	41
Figura II.4. Pormenor do tanque mais pequeno e respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.	41
Figura II.5. Pormenor do tanque médio e o respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.	42
Figura II.6. Pormenor do tanque maior e o respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.	42
Figura II.7. Inclinação de 37° da tampa do tanque maior do sistema experimental, instalado na empresa TechSalt, Loulé.	43
Figura II.8. Pormenor da caleira para recolha de água dessalinizada nos tanques do sistema experimental, na empresa TechSalt, Loulé.	44
Figura II.9. Array de sensores para monitorização da temperatura em diferentes alturas da coluna de água (a) e localização do sensor ultrassónico de distância e do sensor de temperatura interior do ar (b).	45

Figura II.10. Régua com marcações de 5 em 5 cm.....	45
Figura II.11. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque mais pequeno instalado na TechSalt, Loulé.	46
Figura II.12. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque médio instalado na TechSalt, Loulé.	47
Figura II.13. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque maior instalado na TechSalt, Loulé.....	48
Figura III.1. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque pequeno (PEQ1: 33,5 cm, PEQ2: 24 cm, PEQ3: 14,5 cm e PEQ4: 5 cm), durante a Etapa 1.	53
Figura III.2. Sal precipitado no fundo do tanque mais pequeno (a) e pormenor do sal (b) . ..	54
Figura III.3. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque mais pequeno (PEQ2: 24 cm, PEQ3: 14,5 cm e PEQ4: 5 cm), durante a Etapa 2.	55
Figura III.4. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque médio (MED2: 44 cm, MED3: 27 cm e MED4: 10 cm), durante a Etapa 2.....	56
Figura III.5. Sal precipitado no fundo do tanque médio.....	57
Figura III.6. Variações das temperaturas diárias com tampa de policarbonato (cor azul) e com tampa de vidro (cor verde)	59
Figura III.7. Variações das temperaturas diárias entre as 00h do dia 20 e as 23h59 do dia 21 de agosto de 2021, no tanques mais pequeno e médio em simultâneo, com tampa de policarbonato.....	60
Figura III.8. Comparação dos coeficientes de correlação (r^2) entre o tanque de tamanho mais pequeno (a) e o tanque de tamanho médio (b) , cobertos com tampa de policarbonato.	61
Figura III.9. Variações das temperaturas ao longo dos dias 10 e 11 de setembro no sistema (tanque mais pequeno com tampa de vidro e tanque médio com tampa de policarbonato).....	62
Figura III.10. Coeficientes de r^2 para os dias 10 e 11 de setembro, para o tanque mais pequeno com tampa de vidro (a) e para o tanque médio com tampa de policarbonato (b)	63

Figura III.11. Coeficientes de r^2 para o período entre 8 a 20 de setembro, para o tanque mais pequeno com tampa de vidro (a) e para o tanque médio com tampa de policarbonato (b).	63
Figura III.12. Raio de 600 m a partir da localização da Mina de Sal-gema, em Loulé.....	65
Figura III.13. Banho flutuante na Salina de Castro de Marim (Água Mãe, 2021).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela II.1. Metodologia analítica utilizada na caracterização da água.	38
Tabela III.1. Características da água da mina de sal-gema (média \pm desvio padrão).....	51
Tabela III.2. Composição analítica do sal da mina de sal-gema, Loulé (INETI) e do sal marinho do Oceano Atlântico (Galiotto <i>et al.</i> , 2020; Vitao, 2020; Jasmine Alimentos, 2014).	52
Tabela III.3. Diferenciais de temperatura dos quatro dias escolhidos para comparação entre tampas no tanque mais pequeno.....	58
Tabela III.4. Diferenciais de temperatura dos dois dias escolhidos, para quando os dois tanques estavam em simultâneo com tampa de policarbonato.	60
Tabela III.5. Diferencias de temperatura dos dois dias escolhidos, no qual cada tanque estava com uma tampa diferente em simultâneo.....	62
Tabela III.6. Resumo dos resultados de produtividade dos tanques (Etapas 1 e 2).....	64

I. INTRODUÇÃO

I.1. Enquadramento

O crescimento populacional, as alterações climáticas, a industrialização e os atuais padrões de consumo, têm gerado uma procura cada vez maior de água em todo o mundo, enquanto a sua disponibilidade é cada vez mais incerta (UNWWAP, 2020). Cerca de 4 mil milhões de pessoas vivem em condições de grave escassez física de água durante pelo menos um mês por ano (Mekonnen & Hoekstra, 2016) e 2,2 mil milhões não têm acesso a água potável (UNICEF & WHO, 2019).

Para além da adopção de um conjunto de medidas integradas, necessárias para se aumentar a resiliência dos recursos hídricos aos períodos de seca, uma melhor gestão da água abrirá oportunidades para a mitigação e adaptação às alterações climáticas. São necessárias medidas para se encontrar origens alternativas de água (como a dessalinização e a reutilização) para alguns usos, e potenciar a utilização de energias renováveis e não hídricas (solar, eólica, *etc.*), para podermos proteger os recursos hídricos naturais (Wallis *et al.*, 2014). Mais do que nunca é necessário considerarem-se origens alternativas de água, "não convencionais", que frequentemente são subutilizadas, integrando-as com as origens convencionais (águas naturais superficiais e subterrâneas), e ao mesmo tempo definirem-se práticas de uso eficiente e de gestão sustentável, assegurando o fornecimento da água no futuro (Qadir & Smakhtin, 2018).

Na realidade da região do Algarve, como noutras zonas do Mediterrâneo, os episódios de seca têm sido cada vez mais frequentes (Stigter *et al.*, 2017). Atualmente está em curso um Plano de Eficiência Hídrica coordenado pela agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2020), que aposta na eficiência do uso da água e na viabilização de origens alternativas. Cerca de 33,9 % da água que a região consome é em meio urbano, e corresponde quase integralmente a água tratada para consumo humano. No entanto, cerca de 50 % dos usos urbanos são para fins que não requerem água potável, normalmente associados a lavagens de espaços exteriores, de viaturas, bocas de incêndio e rega de espaços verdes. É, portanto, uma prioridade definirem-se origens alternativas de água para usos urbanos não potáveis, diminuindo os consumos de água tratada para consumo humano, reduzindo consumos energéticos na captação, tratamento e distribuição da água, e, portanto, emissões de carbono e aliviando a pressão sobre os recursos hídricos naturais. Neste sentido é prioritário que se encontrem soluções, preferencialmente locais, para responder a

problemas relacionados com a reutilização da água. Para tal, foi apresentado à Universidade do Algarve um desafio, que pretendeu encontrar soluções para uma fuga de água salgada no interior da Mina de Sal-gema em Loulé, que representando grandes volumes e não podendo ser armazenada, é transportada por camiões até uma salina em Faro, representando elevados custos financeiros e ambientais. Desta forma, neste trabalho pretende-se abordar o problema numa lógica de economia circular, estudando a possibilidade de se implementar um sistema de dessalinização solar, através da implementação de um sistema experimental *in situ*, com uma tecnologia de dessalinização térmica solar (sistemas de dessalinização solar), com diferentes tamanhos e materiais de cobertura. Para a concretização deste objetivo foi aprovado um Vale IDT (Portugal 2020), que permitiu financiar o desenho/projeto, o desenvolvimento e o acompanhamento do estudo.

I.2. Economia Circular

Até 1970, a Pegada Ecológica da humanidade era menor do que a taxa de regeneração da Terra. Para suportar os estilos de vida do século XXI, estamos a exceder a biocapacidade da Terra em pelo menos 56 % (Almond *et al.*, 2020). Além disso, as emissões antrópicas de Gases com Efeito Estufa (GEE) aumentaram acentuadamente desde a era pré-industrial, e as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono e metano estão a níveis sem precedentes pelo menos nos últimos 800 000 anos (UNWWAP, 2020).

A Economia Circular inclui-se num quadro de desenvolvimento sustentável baseado no princípio de “fechar o ciclo de vida” dos produtos, permitindo a redução no consumo de matérias-primas, energia e água. Promove o desenvolvimento de novas relações entre as empresas, que passam a ser simultaneamente consumidoras e fornecedoras de materiais que são reincorporados no ciclo produtivo (MacArthur, 2013).

Apesar das vantagens, a economia circular não é ainda o modelo atualmente mais seguido pela nossa sociedade. Mas o modelo de economia linear habitualmente seguido já começa a ser ameaçado pela falta de disponibilidade de recursos naturais. Estudos com projeções futuras indicam incompatibilidade entre os níveis de produção e consumo atuais e a disponibilidade de recursos naturais para as próximas gerações (UNEP, 2011). A contínua

destruição de habitats e de biodiversidade e o aumento da poluição atmosférica, devido aos GEE, são responsáveis pelo aumento de doenças e por mortalidade precoce na União Europeia, e alerta-se a importância de se proteger os recursos naturais, nomeadamente de se desenvolver práticas de economia circular (EEA, 2019).

O planeta não será capaz de sustentar o rápido e contínuo aumento do crescimento económico e a sobre-exploração dos recursos, por isso a economia circular será a solução viável para a emergente crise de escassez de recursos do planeta e para os elevados índices de poluição (Leitão, 2015). O mesmo autor define economia circular como sendo um modelo que permite repensar as práticas económicas da sociedade atual, e que se inspira no funcionamento da própria Natureza, indissociável da inovação e do design de produtos e sistemas. Garantir o abastecimento de água para usos urbanos, industriais e agrícolas, deve exigir inovação tecnológica para apoiar uma economia circular da água, onde origens de água não convencionais (reutilização de água residual tratada e dessalinização) são tratadas de acordo com normas adequadas e reutilizadas localmente (Mauter & Fiske, 2020). Na lógica da economia circular a água é tratada localmente, para se minimizar os consumos de energia associados ao seu transporte, e tratada de acordo com os requisitos que deve cumprir, para poder ser utilizada no uso a que se destina (*fit-for-purpose*), com base numa análise de riscos e na utilização de barreiras múltiplas (Mauter & Fiske, 2020).

I.3. Gestão Sustentável da Água e Dessalinização

As águas subterrâneas doces representam aproximadamente 0,76 % da água total na Terra, e 30 % da água doce total. Infelizmente, cerca de 69 % desta água doce está sob a forma de glaciares e coberturas permanentes de neve (inacessíveis). A água salgada nos oceanos, mares e lagos de água salgada, representa a grande maioria do total na Terra, cerca de 97,5 % (Gleick, 2006).

Devido à pouca disponibilidade de água doce e à necessidade de se preservar os recursos naturais (habitats aquáticos e biodiversidade), a dessalinização da água salgada, para se obter água doce, frequentemente sem poluentes, tornou-se uma potencial solução para o abastecimento de água em muitos países, que não têm acesso ou têm acesso limitado a água doce. A dessalinização pode assim funcionar como uma origem alternativa para inúmeros fins, e em algumas situações de maior escassez, ser mesmo utilizada para

produzir água consumo humano, como acontece por exemplo, em Israel ou nos Emirados Árabes Unidos (Elsaid *et al.*, 2020).

A dessalinização é considerada uma opção fiável e viável para satisfazer a procura crescente de água. Consiste no processo de separação dos sais dissolvidos de uma solução aquosa salobra ou salgada, para se obter água doce (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

Embora a dessalinização seja frequentemente associada à produção de água doce a partir de água do mar, utilizam-se frequentemente tecnologias de dessalinização (ex. osmose inversa) para tratamento de águas residuais urbanas e industriais (Mauter & Fiske, 2020).

Atualmente a dessalinização tornou-se um processo fiável para o abastecimento de água, e desde os últimos 50 anos, apresenta grandes melhorias tecnológicas e económicas (Elsaid *et al.*, 2020). A capacidade global de dessalinização aumentou: de aproximadamente 35 milhões de m³/dia em 2005 (Gleick, 2006) para cerca de 95 milhões de m³/dia em 2018, dos quais 62 % são utilizados para fins municipais, e 30 % para industriais. A dessalinização da água do mar, representa cerca de 61 % do total da água dessalinizada, a partir de 5 328 dessalinizadoras (Jones *et al.*, 2019).

De acordo com os mesmos autores (Jones *et al.*, 2019), em termos de capacidade de dessalinização, a região do Médio Oriente e do Norte de África, incluindo os países do Conselho de Cooperação do Golfo (CCG) representa 47,5 %, a Ásia Oriental e Pacífico 18,4 %, e a América do Norte cerca de e 11,9 %, enquanto, em termos do número de instalações de dessalinização, representam 30,3 %, 22,0 %, e 14,7 %, respetivamente.

A dessalinização pode ser classificada de acordo com a tecnologia utilizada no processo ou com a origem da água (Gleick *et al.*, 2012). De acordo com o tipo de tecnologia de dessalinização, as possibilidades mais comuns são as tecnologias de membrana e a dessalinização térmica (Khawaji *et al.*, 2008).

I.3.1. Dessalinização por Osmose Inversa

A dessalinização com tecnologia de membranas surgiu a partir dos anos 70-80 do século passado. Os sistemas de osmose inversa (normalmente abreviado para RO, de acordo com a expressão em inglês *reverse osmosis*) são os mais comumente utilizados e representam aproximadamente 69 % da capacidade global de dessalinização e cerca de 85 % do número total de instalações no mundo inteiro (Jones *et al.*, 2019). Na União Europeia, os

sistemas RO representam cerca de 91 % da capacidade de dessalinização (Magagna *et al.*, 2019).

O fenómeno físico da osmose é conhecido pela humanidade desde há muitos anos, em muitos quadrantes do conhecimento científico (Qasim *et al.*, 2019). O processo de osmose é um processo natural, em que as moléculas de água passam espontaneamente de uma solução de baixa concentração de soluto (baixa pressão osmótica) para uma solução de alta concentração de soluto (alta pressão osmótica), através de uma membrana semipermeável (Figura I.1a), que impede a passagem dos solutos e só permite a passagem das moléculas de água, até se atingir um estado de equilíbrio osmótico (Figura I.1b). O fluxo das moléculas de água pode ser parado ou invertido pela aplicação de uma pressão externa sobre a solução de maior concentração, forçando as moléculas de água a fluir numa direção oposta à do fenómeno da osmose natural. Neste caso tem-se o processo conhecido como osmose inversa (Figura I.1c). Assim, no processo de osmose inversa, utiliza-se membranas e energia, para a produção da água pura a partir da água salgada (Khawaji *et al.*, 2008).

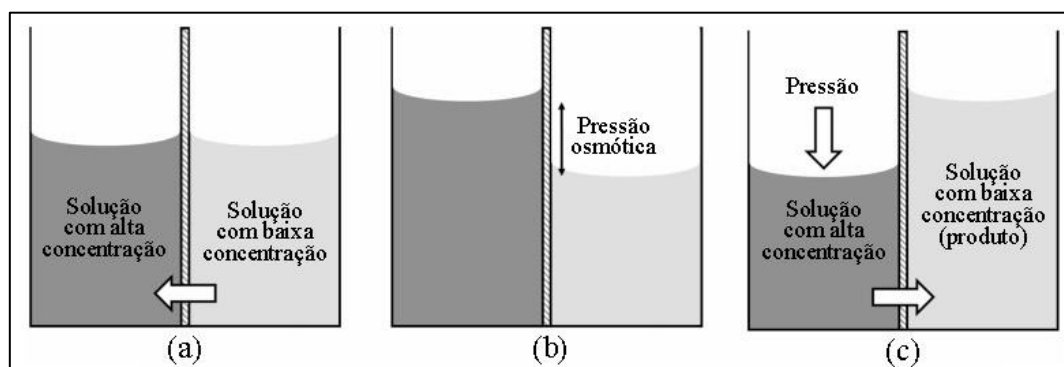


Figura I.1. Representação esquemática dos processos de osmose (a), equilíbrio osmótico (b) e RO (c) (Adaptado de Qasim *et al.*, 2019).

Apesar deste conceito simplificado, em instalações de dessalinização por osmose inversa há muitos outros processos envolvidos, desde a adução da água salgada até à água pura. Numa estação de dessalinização em Sydney, por exemplo (Sydney Desalination Plant, 2021, Figura I.2), a água do mar é retirada do oceano sob gravidade, com entradas no fundo do mar, a cerca de 25-30 metros de profundidade, que podem aduzir à estação cerca de 600 milhões de litros de água do mar por dia. Utiliza-se um sistema de válvulas para assegurar o fluxo de entrada de água salgada na estação. No início há um processo de pré-filtração, onde tambores com grelhas filtram materiais com até 3 milímetros de diâmetro,

como por ex. algas marinhas. Neste processo, utilizam-se ânodos sacrificiais, que impedem a corrosão do crivo metálico, devido à elevada salinidade. Após essa pré-filtração, adiciona-se um floculante e a água segue para um filtro de carvão vegetal e areia. Finalmente, a água pré-tratada entra no sistema de membranas para o processo de osmose inversa. Existem bombas que asseguram o aumento da pressão da água para 50-60 bar, e assim forçam a sua passagem através das membranas. No final do processo, como a água produzida está muito desmineralizada, caso se pretenda utilizar a água para consumo humano, devem ser adicionadas algumas substâncias para equilibrar a sua com-

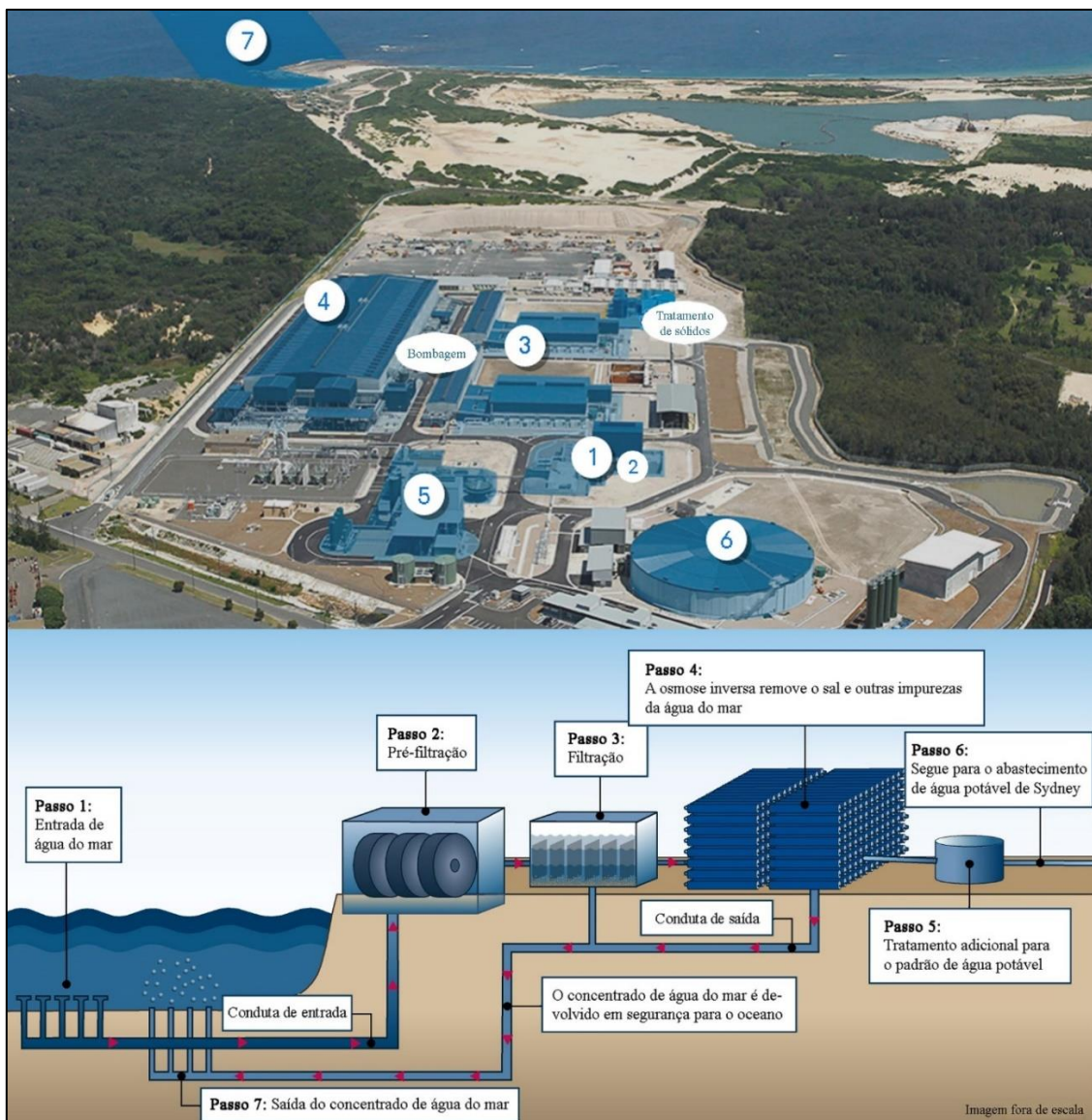


Figura I.2. Vista aérea da estação dessalinizadora de Sydney e principais passos durante a dessalinização por osmose inversa (Adaptado de Sydney Desalination Plant, 2021).

posição. Por exemplo, nesta estação de Sydney, para se cumprir as Diretrizes Australianas para a Água Potável, adicionam-se fluoretos e vários sais minerais antes da água ser direcionada para a rede pública de abastecimento. Cerca de 58 % da água que entra nesta estação de osmose inversa é devolvida ao oceano, na forma de um concentrado, que tem o dobro da salinidade da água do mar, e temperatura mais elevada em aprox. 1 °C. Esta estação de osmose inversa tem uma capacidade de produção até 250 milhões de litros por dia de água, isto é, 15 % da água potável consumida em Sydney.

De acordo com Nassrullah *et al.* (2020), os custos operacionais da dessalinização podem ser divididos em quatro serviços principais: energia, mão de obra, substituições e químicos, sendo que quase 50 % dessas despesas serão gastos em energia. A dessalinização é considerada cara, devido sobretudo ao elevado consumo de energia (Jones *et al.*, 2019). O Programa Mundial de Avaliação da Água das Nações Unidas (UNWWAP, 2014) reportou que a dessalinização é o processo de tratamento de água que mais gasta energia, consumindo cerca de 75,2 TWh por ano.

Pensando nisso, a dessalinização com a utilização de energias renováveis pode apresentar-se como uma alternativa sustentável e menos poluidora (Ayoub & Maleab, 2012). Dada disponibilidade “ilimitada” da água do mar e a diminuição do custo com a utilização de energias renováveis, como por exemplo a solar, a dessalinização tem um grande potencial para aumentar significativamente a sua contribuição para o abastecimento de água no futuro (Sood & Smakhtin, 2014).

Os recursos renováveis como a energia solar e eólica permitem a diversificação energética, apresentam-se disponíveis por períodos previsíveis, e ajudam a evitar a dependência do aprovisionamento energético externo (Garcia-Rodriguez, 2002).

I.3.2. Dessalinização Térmica

As tecnologias de dessalinização térmica foram desenvolvidas no início dos anos 50, e são normalmente aplicadas a instalações de grandes dimensões, para se conseguir obter viabilidade económica, normalmente incluindo a cogeração de energia hídrica. Nessas tecnologias a água é evaporada e, em seguida, sofre condensação e é recuperada (Elsaid *et al.*, 2020).

As tecnologias mais comuns são a destilação *flash* de vários estágios ou multiestágio (*Multi-Stage Flash*, MSF) e o processo de destilação de efeito múltiplo ou multiefeito (*Multi-Effect Distillation*, MED) (Khawaji *et al.*, 2008). As dessalinizações térmicas MSF e MED correspondem respetivamente, a cerca de 18 % e 7 % da capacidade global de dessalinização, e representam apenas, respetivamente 2,1 e 5,6 % do número total de estações dessalinizadoras (Gleick *et al.*, 2012; Jones *et al.*, 2019). Na União Europeia, os processos MSF representam cerca de 7 % da capacidade instalada (Magagna *et al.*, 2019). Estes dois processos térmicos, adaptam-se a qualquer tipo de fonte de calor (Nassrullah *et al.*, 2020).

A MSF (Figura I.3) é um processo de dessalinização que promove a destilação da água do mar, transformando uma parte da água em vapor em vários estágios, que são essencialmente permutadores de calor em contracorrente (Ghaffour *et al.*, 2013). Nesse processo, a água salgada é aquecida e evapora-se, obtendo-se a água pura através da condensação do vapor (Khawaji *et al.*, 2008). Uma unidade de MSF pode conter de 4 a 40 fases. Em um primeiro estágio, aquece-se a água, fazendo a sua temperatura e pressão aumentarem. Essa água aquecida passa para outra câmara, a uma pressão mais baixa, que provoca a formação de vapor. Esse vapor é conduzido e condensado, utilizando a água fria do mar que alimenta a primeira fase de aquecimento para arrefecimento do condensador. A salmoura cada vez mais concentrada passa para uma segunda câmara, a uma pressão ainda mais baixa, onde mais água se evapora, sendo o vapor mais uma vez condensado, como anteriormente. O processo repete-se sucessivamente por diversas câmaras, consideradas como vários estágios do processo, até que se atinge a pressão atmosférica, e que a salmoura atinja concentrações muito elevadas (Clayton, 2015).

água ocorre ao longo das fases quando o vapor já não produz tanto calor, resultando em câmaras com temperaturas mais baixas. Já no processo MSF é a água do mar de entrada do sistema que tem a função de arrefecer e condensar o vapor em cada fase sucessiva, até que a temperatura desça gradualmente ao longo de cada fase do processo. Tal como no caso da evaporação *flash* em várias fases, em dessalinizadoras comerciais utilizam-se diversas fases e câmaras (Clayton, 2015) e existem diferentes possibilidades de design para a sua estrutura (Panagopoulos, 2020).

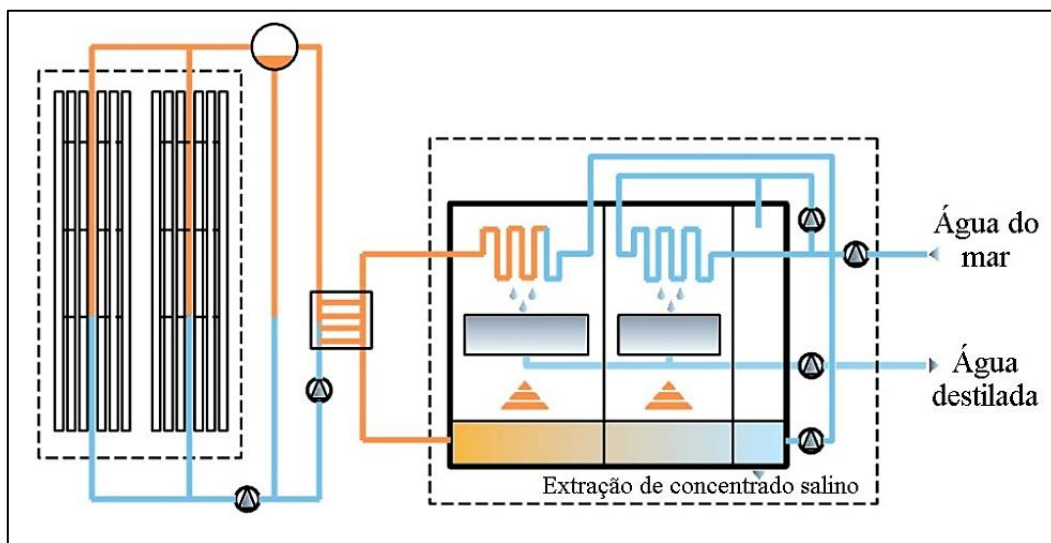


Figura I.4. Esquema do processo de dessalinização térmica multiefeito, MED (Adaptado de Araújo, 2013).

Embora a dessalinização seja um processo valioso para a produção de água doce, uma vez que, numerosas pessoas em muitas partes do mundo dependem dela para suprir as suas necessidades diárias de água, também apresenta desvantagens. Existem alguns impactos ambientais associados à descarga de salmoura, não só pela elevada salinidade, mas também pela eventual presença de produtos químicos utilizados no pré-tratamento da água, como ácidos e produtos anti-incrustantes, potencialmente tóxicos. Outro aspeto relevante são as emissões de GEE associadas aos elevados consumos energéticos, quando a energia tem origem a partir de combustíveis fósseis (Panagopoulos & Haralambous, 2020).

A energia solar térmica é uma das aplicações mais promissoras das energias renováveis para a dessalinização da água do mar, pois é adequada para regiões áridas e ensolaradas,

é sustentável e não poluidora. Dentro das tecnologias que a utilizam, temos os sistemas de dessalinização solar, na sua concepção mais simples utilizam o sol para produzir água doce. Estão classificados entre os métodos de dessalinização térmica mais baratos, particularmente quando utilizados em zonas onde a luz solar é abundante e a água doce é escassa (Mathioulakis *et al.*, 2007), como no Algarve.

I.4. Sistemas de Dessalinização Solar

De acordo com Ayoub & Maleab (2012), no seu desenho mais simples, estes sistemas compreendem bacias pintadas de preto com cobertura transparente, normalmente de vidro, contendo a água a ser dessalinizada. Essas bacias absorvem radiação solar, promovendo a evaporação da água e a sua condensação na superfície interna da cobertura transparente.

Devido à pequena inclinação da cobertura, a água condensada escorre e devido à gravidade é recolhida para uma caleira na borda inferior, que a conduz a um recipiente, onde é armazenada, podendo posteriormente ser retirada do sistema e utilizada (Balan *et al.*, 2011).

Os sistemas de dessalinização solar podem ter várias formas, desenhos e materiais de cobertura, e o seu funcionamento requer pouca manutenção, para além de uma lavagem regular do reservatório, para remover os sais acumulados. Além disso, vários parâmetros afetam seu desempenho, incluindo a utilização ou não de materiais que absorvem energia (corantes, borrachas, placas de alumínio, materiais suspensos como micas e outros), arrefecimento da cobertura, inclinação da cobertura, desenho do tanque, posição geográfica, profundidade da coluna de água, fluxo de entrada de água, e temperatura inicial da salmoura (Ayoub & Maleab, 2012).

Panchal & Patel (2016) realizaram uma revisão sobre diferentes trabalhos publicados sobre os materiais absorventes de energia para melhorar a produtividade dos sistemas de dessalinização solar. Estes materiais podem armazenar o excesso de calor durante as horas de sol e libertá-lo durante as horas sem sol. Alguns exemplos mostrados pelo estudo são de que a adição de uma camada de partículas de carvão no fundo dos tanques pode atuar como um bom material de armazenamento de calor e aumentar em 15 % o rendimento em comparação a um tanque convencional. Além disso, a introdução de placas

absorvedoras de calor no seu interior também se mostrou produtiva, assim como a utilização de materiais como um tapete de borracha preta, tinta preta dissolvida na água e corante preto dissolvido na água (Akash *et al.*, 1998) - estes aumentaram, respetivamente, a produção em 38 %, 45 % e 60 %.

Outros estudos pretendem otimizar as modificações na concepção básica e no desempenho. O ângulo de inclinação da cobertura de condensação igual à latitude do local, por exemplo, é o mais recomendado para todos os tipos de sistemas, para se atingir a máxima produtividade (Kabeel *et al.*, 2012; Singh & Tiwari, 2004).

Phadatare & Verma (2007) estudaram a influência da profundidade da água, fazendo-a variar entre 2 cm e 12 cm e verificaram que a produtividade destes sistemas diminui com o aumento da profundidade da água, dentro de certos limites experimentados. Ou seja, uma maior profundidade de água resulta numa menor produção de água doce e vice-versa.

Em outro estudo, Omara *et al.* (2011) aumentaram a área disponível de contato entre a água e o fundo do tanque, modificando a superfície com aletas ou depressões. Os autores concluíram que, ao aumentar a superfície de contato do tanque com a água, há um aumento na transferência de calor e um aumento na produtividade. O estudo mostrou que a utilização de aletas no fundo do tanque, por exemplo, aumentou em 40 % a produtividade.

Um tanque solar de gradiente de salinidade típico, quando utilizado para tratamento de água do mar, tem três zonas (Mohamed & Bicer, 2019): zona superior de convecção que tem baixa salinidade e temperatura próxima da temperatura ambiente, zona média de não convecção com salinidade crescente e temperatura a variar com a profundidade, e zona inferior de convecção com maior salinidade e temperatura.

Entre os vários métodos de dessalinização solar, estes sistemas têm várias vantagens, incluindo simplicidade, baixo custo, facilidade de manutenção, e baixo impacto ambiental. Como já referido, seus *designs* mais simples funcionam a energia solar, e utilizam processos físicos simples, como a evaporação e a condensação (Rufuss *et al.*, 2016). No entanto, também existem várias limitações na sua utilização. Nomeadamente: a sua baixa produtividade por unidade de área de instalação, em comparação com as tecnologias de dessalinização que funcionam com fontes energéticas externas (à base de combustíveis fósseis); os seus elevados custos iniciais, especialmente se os custos associados aos terrenos ocupados forem elevados, devido à necessidade de grandes áreas

de instalação; a inconstância das fontes energéticas; e a experiência limitada com aplicações em grande escala (Ayoub & Maleab, 2012). Apesar disso, o grande fluxo de água produzida pelos sistemas não contém contaminação química, como é o caso de algumas outras tecnologias de dessalinização. Pelo contrário, a salmoura reflete as características da água bruta, apenas com maior concentração (Fath, 1998). Os cristais de sal acumulados podem ser recolhidos periodicamente e incorporados ou utilizados de forma lucrativa noutros processos, sendo mais uma vantagem destes sistemas (Mavukkandya *et al.*, 2019).

Em algumas realidades geográficas, os sistemas de dessalinização solar podem ser a melhor solução técnica para abastecer aldeias ou povoações remotas com água doce, seguida de desinfecção (*e.g.*, por cloração) sem depender de alta tecnologia e perícia (Eltawil *et al.*, 2009), particularmente onde a luz solar é abundante. Arjunan *et al.* (2009), por exemplo, descreveram sete instalações solares de grandes dimensões na Índia que variam em capacidade de 0,13 a 8 m³/dia, tratando na sua maioria água do mar e, em poucos casos, água salgada de poços. As áreas de evaporação destas instalações variam entre 50 m² e 3 110 m², dependendo da sua capacidade de produção. De acordo com Samee *et al.* (2007) no Paquistão foram implementadas duas instalações com 240 sistemas de dessalinização solar cada, com capacidade para produzir 22,7 m³ de água por dia por instalação, partindo de água do mar.

De acordo com Rufuss *et al.* (2016), o desempenho de um sistema de dessalinização solar deve ser medido pelas suas eficiência e produtividade. Para um tanque com tampa de inclinação única (Figura I.5), a eficiência é definida como a relação entre a energia térmica latente da água condensada e a quantidade total de energia solar incidente sobre o sistema. Considera-se eficiência instantânea quando se refere a um curto período (normalmente 15 minutos) enquanto a eficiência global se refere ao dia inteiro. Produtividade corresponde ao volume de água dessalinizada por área e por dia.

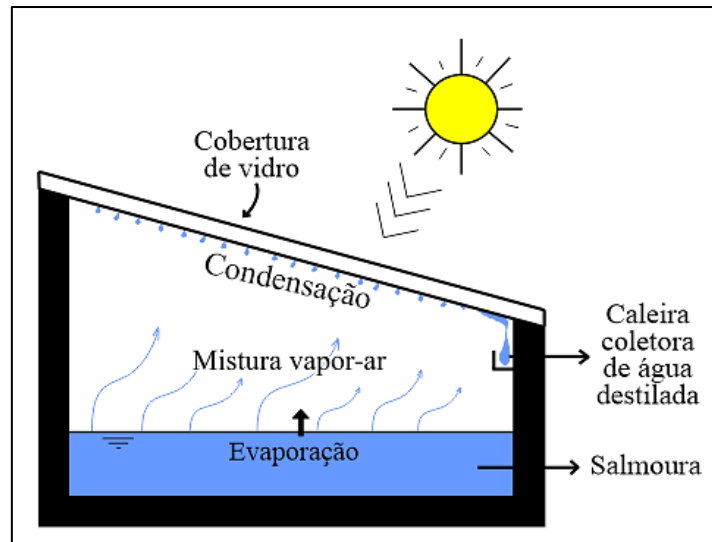


Figura I.5. Desenho esquemático de um tanque com tampa de inclinação única (Adaptado de Rufuss *et al.*, 2016).

Os mesmos autores (Rufuss *et al.*, 2016) demonstraram que a produtividade de um sistema destes varia entre de 2 a 4 L/dia.m², para uma versão básica, aumentando para de 3 a 5 L/dia.m², para versões otimizadas geometricamente ou recorrendo-se a utilização de materiais complementares no revestimento ou de produtos adicionados à água (por exemplo, corantes que a escurecem e que aumentam a absorção da luz solar).

I.4.1. Material da Cobertura

Até hoje o vidro tem sido o material mais utilizado para coberturas de tanques para dessalinização solar (Panchal, 2016), uma vez que é mais resistente às temperaturas elevadas do que os materiais poliméricos. Por outro lado, o vidro, em geral, apresenta custos mais elevados, maior densidade (cerca de 2,5 g/mL) e é mais frágil ao transporte e ao manuseamento (Dual Seal Glass, 2021; Reali & Modica, 2008). Assim sendo, as coberturas de vidro podem ser substituídas por materiais poliméricos, nomeadamente por policarbonato (Tleimat & Howe, 1969; Blaga, 1978; Phadatore & Verma, 2007). Policarbonato é um termoplástico, geralmente utilizado na indústria e na construção civil em coberturas e paredes de áreas externas, sendo um material leve (densidade de 1,2 g/mL), que possui alta resistência ao impacto (cerca de 200 vezes maior que o vidro) e com bom comportamento a temperaturas até 150 °C (Piatti & Rodrigues, 2005; Reali & Modica, 2008).

Trabalhos anteriores apontam para que a produtividade em sistemas de dessalinização solar com coberturas de vidro, excedem em mais de 30 % a produtividade de sistemas de dessalinização solar idênticos, mas com coberturas em materiais poliméricos (Tleimat & Howe, 1969; Phadatare & Verma, 2009). Os autores Phadatare & Verma (2009) verificaram por exemplo que, a temperatura da água num tanque com a cobertura de vidro foi 2 a 4 °C mais elevada do que noutra tanque nas mesmas condições experimentais, mas com cobertura acrílica. A temperatura da cobertura de vidro foi 5 a 6 °C mais elevada do que a cobertura de plástico. Por outro lado, pelo facto de a cobertura de vidro arrefecer mais rapidamente do que a cobertura de plástico, promove uma diferença maior entre a temperatura da água e a da cobertura, contribuindo para facilitar a condensação e, portanto, a produtividade do sistema.

I.5. Caso de Estudo - Mina de Sal-gema, Loulé

A mina Campina de Cima, em Loulé, tem uma história de mais de meio século de atividade, tendo sido adquirida pela empresa TechSalt desde agosto de 2019. Um dos objetivos da nova direção é a reconversão da utilização do espaço mineiro numa unidade de produção mineral de sal-gema de carácter pluridisciplinar, de maneira a integrar o turismo mineiro nas suas atividades e ainda a abertura da mina para a realização de visitas turísticas.

O mineral halita, cloreto de sódio (NaCl), ou sal, tem seu nome mineralógico originário da palavra latina sal, que deriva do grego antigo *alas* ou *alati* no idioma atual. O termo halita, em geral, refere-se às suas ocorrências naturais, tais como sal de rocha, sal-gema ou sal fóssil (Luz & Lins, 2008).

A formação geológica do sal-gema no concelho de Loulé teve início há cerca de 200 milhões de anos, as águas marinhas se alojaram em zonas de depressão, e neste período geológico a Península Ibérica encontrava-se mais próxima a linha do Equador, permitindo que houvesse um grande poder de evaporação (Ramalho *et al.*, 2003 *apud* Martins, 2021). Os primeiros indícios da existência de sal em Loulé deram-se em 1944 após um ano de seca, quando num poço de água doce se apresentaram águas salgadas. Porém, apenas no final de 1960, com a realização de furos de sondagem para a pesquisa de águas

subterrâneas, que se pôde comprovar que sob Loulé havia realmente enormes quantidades de sal (Teixeira, 2017).

Sal-gema é a designação dada à rocha de sal, no caso da mina de Loulé, o principal constituinte do sal-gema é a halite (minério com NaCl). A halite representa cerca de 93,5 % do sal-gema, podendo variar entre 92,6 % e 95 % , dependendo do local. Os outros componentes são sais e alguns materiais argilosos e siliciosos (Teixeira, 2017).

O processo produtivo de extração existente na mina de sal-gema apresenta algumas limitações técnicas. Atualmente, no âmbito da atividade de exploração mineira, a linha de água existente está a corroer o muro de sal, havendo já uma fuga e grande acumulação de água salgada. A causa dessa fuga de água resulta da existência de um furo muito antigo, que abriu uma fissura de 3 m na sub-superfície, entre o aquífero natural que passa junto à mina e a parede de sal. Em cada período de 90 dias são extraídos cerca de 5 500 m³ de água salgada, que precisa de ser transportada através de camiões até um local onde possa ser descarregada sem qualquer valorização, atualmente numa salina na zona de Faro. O custo deste transporte é de aproximadamente 88 000 € a cada 90 dias, configurando grandes encargos financeiros para a empresa. Para além disso, esta situação corresponde a um enorme desperdício de água, de sal e de consumos de combustíveis fósseis para o transporte da água, com as consequentes emissões de carbono.

I.6. Objetivos Geral e Específicos

A Mina de Sal-gema em Loulé, apresentou o desafio à UAlg de se desenvolver uma solução para a fuga de água salgada anteriormente descrita. Desta forma, neste trabalho pretendeu-se fazer uma abordagem do problema numa lógica de economia circular, estudando-se a possibilidade de se implementar um sistema de dessalinização solar, reutilizando-se a água recuperada para usos externos não potáveis na cidade de Loulé, e o sal para atividades económicas locais. Para isso foi submetida e aprovada uma candidatura de um Vale IDT (Portugal 2020), que permitiu financiar o desenvolvimento do Projeto WER – *Water and Energy Recovery*.

Assim, o **objetivo geral** deste trabalho é contribuir para a promoção e utilização de técnicas de dessalinização no Algarve, como origem de água alternativa para usos urbanos

não potáveis, testando a viabilidade de uma solução de dessalinização solar, aplicada a uma empresa da região, numa lógica de economia circular.

Respondendo em específico aos objetivos do Projeto WER, os **objetivos específicos** deste trabalho foram:

1. Caracterização laboratorial da água da mina de sal-gema e da água dessalinizada e recuperada nas diversas etapas da experimentação;
2. Construção e montagem do sistema experimental *in situ*;
 - 2.1. Desenho técnico dos sistemas experimentais de dessalinização solar de inclinação única, aprovado pela equipa WER;
 - 2.2. Fabrico dos tanques experimentais do sistema de dessalinização solar, com diferentes tamanhos, para se comparar os respetivos comportamentos e produtividades;
 - 2.3. Fabrico de diferentes tampas para cobertura dos tanques experimentais, em dois materiais diferentes, policarbonato e vidro.
3. Monitorização durante o período experimental das variáveis necessárias (evolução da temperatura atmosférica e no interior dos tanques a diversas profundidades), através de sensores e *datalogger*, de forma a acompanhar o funcionamento do sistema experimental;
4. Calculo da produtividade de cada tanque testado no sistema experimental no sentido de se definir a melhor solução para se replicar à escala real;
5. Avaliação de possíveis usos externos urbanos não potáveis, da água doce recuperada, em Loulé, o mais próximo possível;
6. Avaliação local de possíveis aplicações do sal recuperado, de acordo com as suas características, e em atividades económicas da região.

II. METODOLOGIA

O Projeto WER iniciou-se em janeiro de 2021, e permitiu que o sistema experimental fosse montado *in situ* no mês de maio seguinte.

O desenvolvimento deste estudo envolveu uma equipa pluridisciplinar, com valências científicas em termos de tecnologias ambientais (água e energia) e na aquisição, tratamento e conectividade de dados. Este estudo numa primeira fase compreendeu a recolha de informação sobre o estado da arte, principalmente no que diz respeito a sistemas de dessalinização solar, seguindo-se os respetivos trabalhos laboratoriais para caracterização da água da mina de sal-gema. Após o início da instalação do sistema experimental, decorreram os trabalhos de campo relacionados com a montagem de sensores e acompanhamento dos tanques experimentais para monitorização da evolução do processo de dessalinização, continuando-se os trabalhos laboratoriais para quantificação da salinidade e da condutividade elétrica da água dessalinizada.

Para a recolha bibliográfica utilizaram-se motores de pesquisa automática, nomeadamente *b-on* e *Scencedirect*.

As análises laboratoriais foram efetuadas no Laboratório de Engenharia Sanitária do ISE/UAlg, nas instalações da Universidade do Algarve (UAlg), localizados no Campus da Penha, de acordo com as respetivas metodologias analíticas, normalizadas internacionalmente (Baird *et al.*, 2017).

Durante o tratamento dos dados recolhidos foi utilizado o software *Microsoft Excel*® para descrever e analisar os dados estatísticos.

II.1. Caracterização Analítica da Água

Antes de se iniciar o período experimental, procedeu-se à quantificação na água da mina de sal-gema dos seguintes parâmetros: Sólidos Totais (ST), densidade, condutividade elétrica e salinidade. Os parâmetros analisados cumpriram as metodologias analíticas de referência (Baird *et al.*, 2017) de acordo com o que se apresenta na Tabela II.1. Começou-se por se executar 10 réplicas de cada ensaio à temperatura ambiente laboratorial (20 ± 2 °C), calculando-se a média e o respetivo desvio padrão.

Sempre que houve recolha de água dessalinizada nos reservatórios foram analisadas a condutividade e a salinidade, utilizando-se os mesmos métodos e realizando-se cinco réplicas de cada amostra.

Tabela II.1. Metodologia analítica utilizada na caracterização da água.

Parâmetro	Unidade	Método	Incerteza Associada (%)
Sólidos Totais (ST)	mg/L	Gravimetria SMEWW 2540 B ⁽¹⁾	20%
Densidade	mg/L	Gravimetria	20%
Condutividade Elétrica	uS/cm	Eletrometria SMEWW 2510B ⁽¹⁾	3%
Salinidade (µS/cm)	mg/L	Refratrometria	NA

⁽¹⁾ Baird *et al.*, 2017; NA - Não determinada.

II.1.1. Densidade

A densidade desta água da mina de sal-gema é diferente da densidade da água do mar, e a composição em termos de sais também deverá ser diferente.

Para medir a densidade da água da mina, foram feitas 10 pesagens de 100 mL da água utilizando-se a balança de precisão *Mettler Toledo XS204* e balões de 100 mL.

II.1.2. Sólidos Totais

A quantificação dos ST foi feita por gravimetria (Figura II.1), utilizando-se 10 réplicas de cada amostra de água da mina de sal-gema. A balança de precisão utilizada é do modelo *Mettler Toledo XS204*.



Figura II.1. Cadinhos após a secagem das amostras.

II.1.3. Condutividade Elétrica

A condutividade elétrica foi quantificada em 10 réplicas de cada amostra de água da mina de sal-gema e cinco réplicas para cada amostra de água dessalinizada, utilizando-se um condutímetro marca *WTW inoLab* modelo *Cond Level 2*.

II.1.4. Salinidade

A salinidade foi determinada em 10 réplicas de cada amostra de água da mina de sal-gema e cinco de cada amostra de água dessalinizada. O refratômetro utilizado é um modelo portátil FG-211 50302010. A gama de leitura deste equipamento é entre 0-100 g/L, pelo que sempre que necessário efetuou-se diluição prévia das amostras de 1:10.

II.2. Composição do Sal

A composição do sal da mina de sal-gema é periodicamente caracterizada num laboratório acreditado para o efeito e apresenta-se na Tabela III.2., na secção dos resultados.

II.3. Local do Estudo

O sistema experimental foi implementado no espaço exterior da mina de sal-gema em Loulé (Figura II.2), com as coordenadas geográficas: zona 29S, longitude 588130 m E e latitude 4110342 m N.



Figura II.2. Localização esquemática da instalação do sistema experimental na empresa TechSalt, Loulé (Google Maps, 2021).

II.4. Sistema Experimental

Utilizaram-se três tanques com dimensões distintas, fazendo-se variar a altura, e mantendo a largura e o comprimento, ambos de 1 m nos três casos. Definiu-se a altura de 40 cm para o tanque mais pequeno, de 80 cm para o tanque médio e de 160 cm para o tanque maior. Em termos de reservatórios para recolha de água dessalinizada, utilizaram-se as mesmas dimensões, sendo colocados lado a lado dos respetivos tanques (Figura II.3, Figura II.4, Figura II.5 e Figura II.6). Tanto os tanques como os reservatórios foram construídos utilizando-se material compósito polimérico reforçado com fibra de vidro (PRFV) por apresentar alta resistência à tração, flexão e impacto. No caso dos tanques, as paredes laterais foram pintadas de preto para potenciar a absorção da luz solar e, portanto, o aquecimento.



Figura II.3. Sistema experimental instalado na empresa TechSalt, Loulé.



Figura II.4. Pormenor do tanque mais pequeno e respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.



Figura II.5. Pormenor do tanque médio e o respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.



Figura II.6. Pormenor do tanque maior e o respetivo reservatório, instalados na empresa TechSalt, Loulé.

Atendendo a que a evaporação, a condensação e a recolha da água dessalinizada serão etapas cruciais para a produtividade do sistema, foram testadas tampas em dois materiais distintos, policarbonato e vidro. Quando este estudo se iniciou, optou-se por escolher policarbonato para as coberturas dos três tanques, por facilitar muito o seu transporte desde a fábrica onde foram produzidas até ao local de instalação do sistema experimental. Ao fim de algumas semanas, considerou-se importante comparar a produtividade do sistema experimental se fossem utilizadas coberturas de vidro. Para o efeito foi construída uma nova tampa, recorrendo ao material de vidro, dando origem a novas recolhas.

Na construção das tampas, definiu-se a sua colocação com uma inclinação de 37° (Figura II.7), correspondente à latitude do local experimental, em Loulé, seguindo a recomendação de trabalhos anteriores (Singh & Tiwari, 2004).



Figura II.7. Inclinação de 37° da tampa do tanque maior do sistema experimental, instalado na empresa TechSalt, Loulé.

Foi colocada uma caleira por tanque (Figura II.8) para recolha da água dessalinizada após a condensação no interior da respetiva cobertura. Através desta caleira, a água dessalinizada percorria o caminho até ao reservatório, colocado ao lado do tanque.



Figura II.8. Pormenor da caleira para recolha de água dessalinizada nos tanques do sistema experimental, na empresa TechSalt, Loulé.

II.4.1. Sensores Instalados

Para recolher os dados relativos à variável temperatura em diferentes localizações, tais como em diferentes alturas da coluna de água, do ar atmosférico exterior (fora do tanque) e do ar interior (dentro do tanque, acima da coluna de água), foram instalados sensores para o efeito, seguindo-se a respetiva monitorização do sistema. Em cada tanque foi instalado um *array* de sensores (Figura II.9.a), com quatro sensores de temperatura submersos (a alturas diferentes, proporcionalmente nos três tanques), e um sensor de temperatura interior na parte superior do tanque, fora da água. Além disso, foi instalado no exterior do sistema experimental um sensor de temperatura ambiente (atmosférica), para monitorizar as variações ao longo do dia no local de estudo.

Inicialmente também se instalou um sensor do nível da água, ultrassónico, juntamente com o sensor de temperatura do ar interior, posicionado no topo do *array* da sensorização e virado para baixo (Figura II.9.b), no entanto os dados recolhidos não tinham precisão

suficiente. Para ultrapassar esta dificuldade, instalaram-se réguas com comprimento adequado e precisão de 5 em 5 cm (Figura II.10).

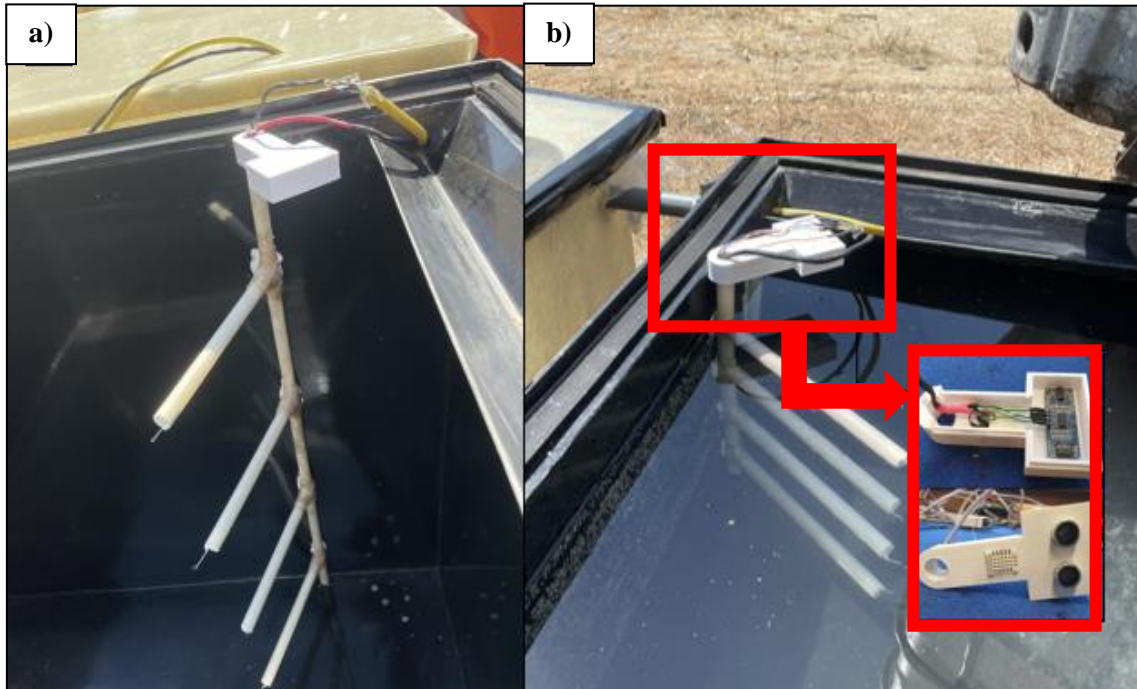


Figura II.9. Array de sensores para monitorização da temperatura em diferentes alturas da coluna de água (a) e localização do sensor ultrassônico de distância e do sensor de temperatura interior do ar (b).

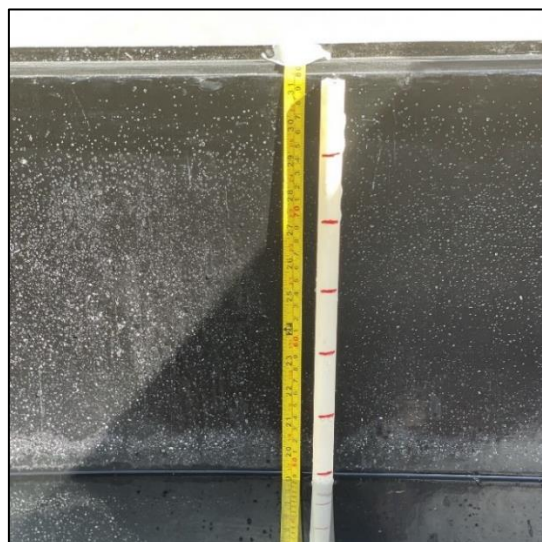


Figura II.10. Régua com marcações de 5 em 5 cm.

Escolheram-se tubos de PVC como material do *array* de sensores, com um diâmetro interno de 2 cm. Cada tubo principal, com altura correspondente à altura do respetivo tanque (40 cm, 80 cm ou 160 cm), liga-se a quatro outros tubos com comprimento de 20 cm, localizados a alturas proporcionais a cada tanque e equidistantes (Figura II.11, Figura II.12 e Figura II.13).

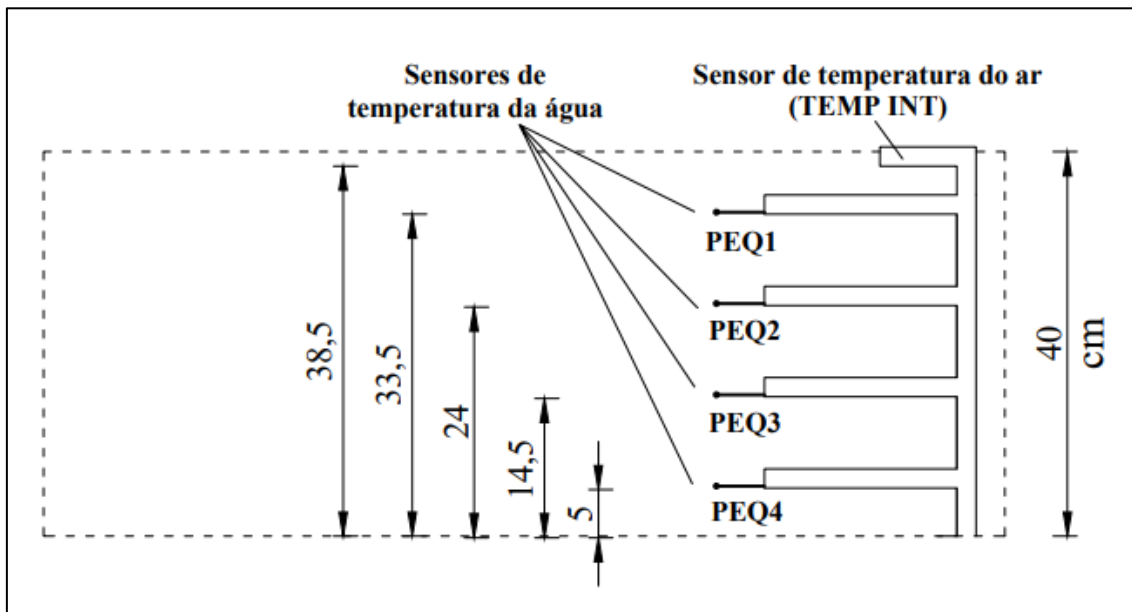


Figura II.11. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque mais pequeno instalado na TechSalt, Loulé.

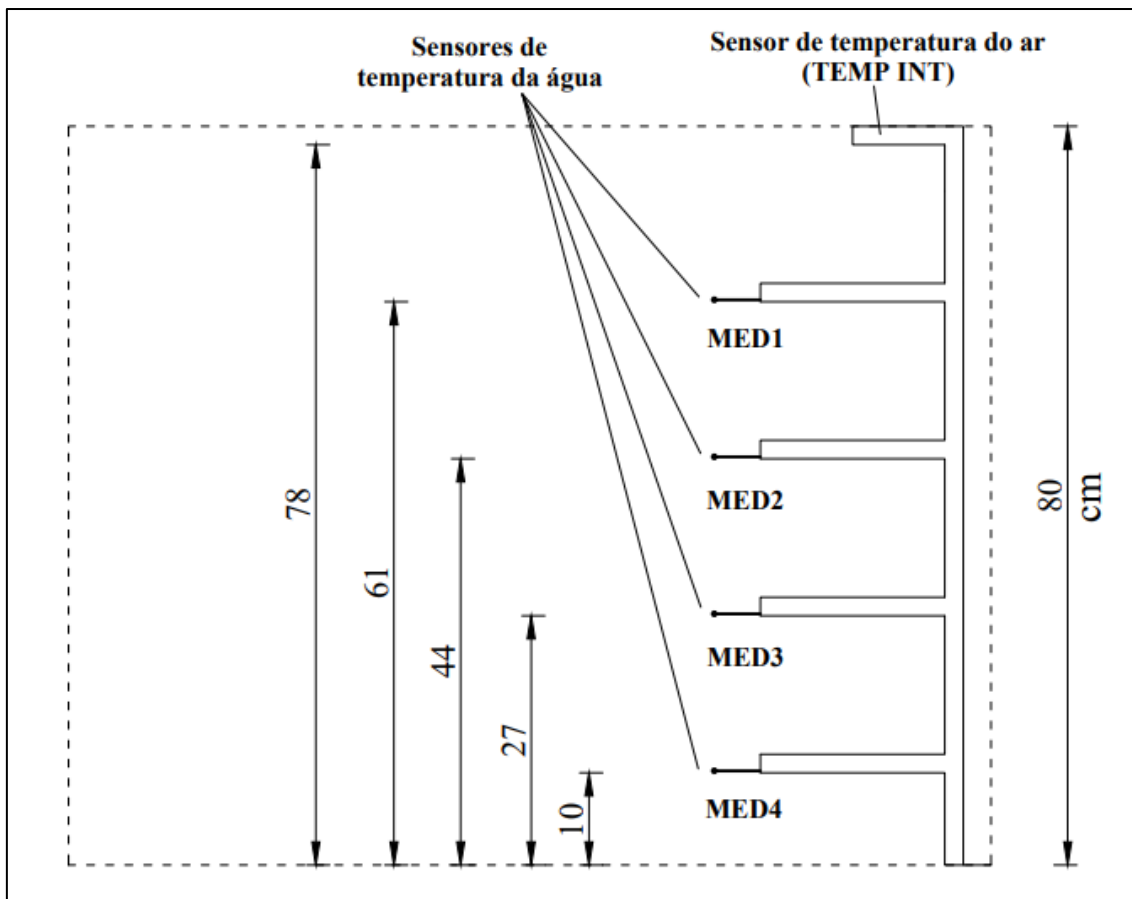


Figura II.12. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque médio instalado na TechSalt, Loulé.

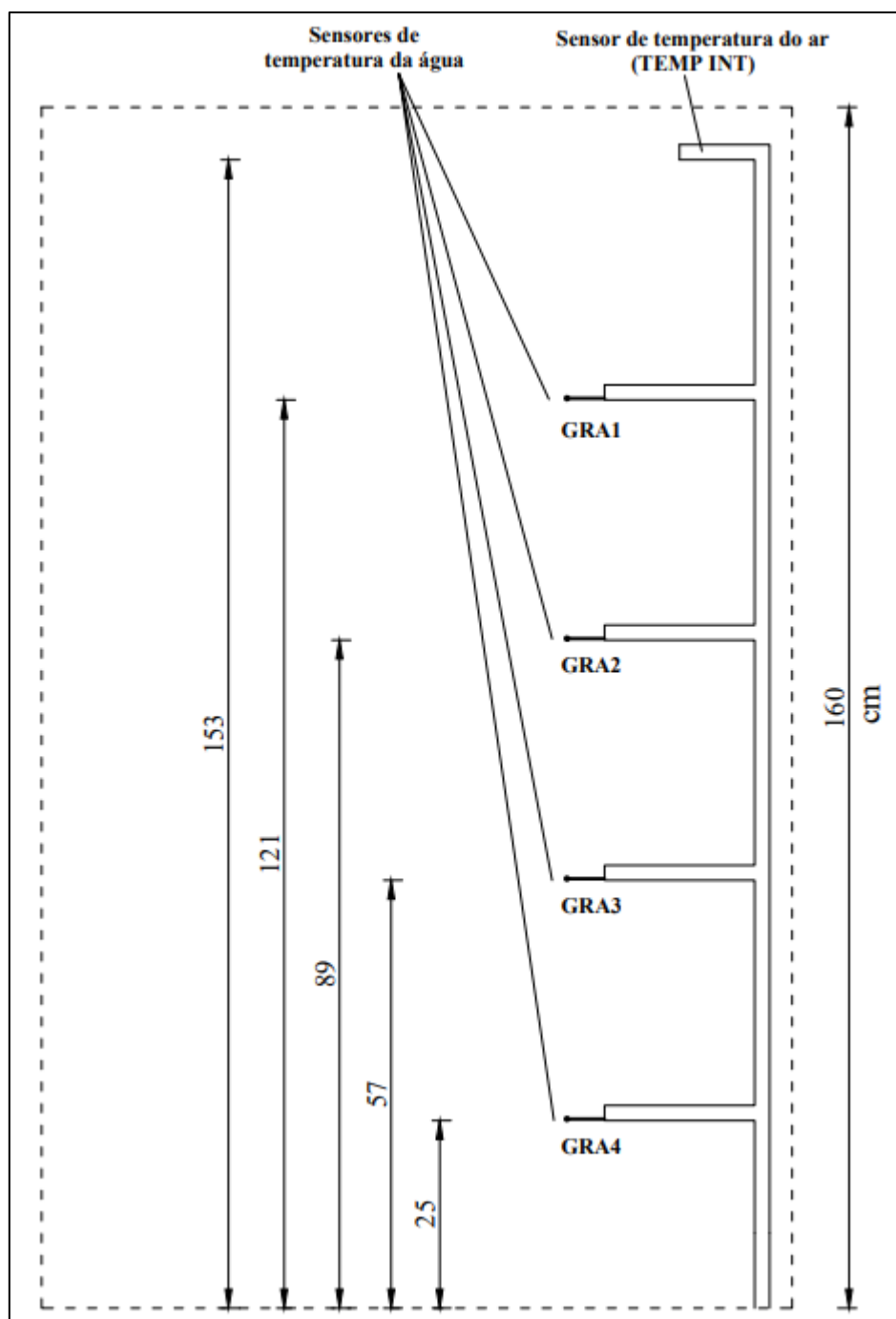


Figura II.13. Esquema de sensorização da temperatura do ar e da água no interior do tanque maior instalado na TechSalt, Loulé.

Para recolha e armazenamento dos dados da temperatura foi utilizado um *Datalogger* modelo *DL2e*. Equipou-se o *logger* com uma placa medidora de tensões, que permite até 15 canais diferentes, conectados com os sensores de temperatura. Os sensores de temperatura utilizados neste estudo são Termopares tipo K, e funcionam a temperaturas entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ aos $1\ 200\text{ }^{\circ}\text{C}$. Procedeu-se à calibração destes termopares em laboratório,

antes da instalação do sistema experimental *in situ*. A diferença máxima de leituras para com um termómetro calibrado foi de 0,04 °C.

II.5.Período Experimental

Atendendo ao período de funcionamento do Projeto WER (de janeiro a dezembro de 2021), procedeu-se a um desenho experimental e à aquisição dos respetivos componentes (sensores, tanques, reservatórios, tampas e outros). Atendendo à conjuntura atual de pandemia, os tanques e os reservatórios só puderam ser instalados *in situ* no final do mês de abril. Após a sua instalação, procedeu-se à instalação e testagem do sistema de sensorização.

O período experimental *in situ* iniciou-se no dia 24 de maio e prolongou-se até o dia 11 de outubro de 2021, sendo que após esta data se continuou a recolher dados que em tempo útil não foram incluídas neste estudo. Assim, consideram-se duas etapas experimentais, a Etapa 1 e a Etapa 2.

II.5.1. Etapa 1

No início do período experimental, a 24 de maio de 2021, optou-se por encher o tanque mais pequeno (colocando-se a tampa de policarbonato) para se perceber de forma mais célere a evolução do processo de dessalinização. Foram detetadas diversas dificuldades no funcionamento, como fugas de água, imprecisão nas leituras do sensor de nível ultrassónico, irregularidades na recolha de água dessalinizada no reservatório e necessidade de se testar com uma tampa de vidro.

A água recolhida no reservatório mais pequeno ainda apresentava uma salinidade elevada, levantando novas questões a serem testadas no processo de dessalinização.

Procedeu-se à aquisição de uma tampa de vidro para ser testada posteriormente.

Corrigidas todas as dificuldades, entre 17 de junho e 08 de setembro de 2021 realizou-se a Etapa 1, no tanque mais pequeno e com a tampa de policarbonato, monitorizando-se as variáveis necessárias para se caracterizar o processo de dessalinização solar.

Também no dia 17 de junho optou-se por se encher o tanque maior, colocando-se a tampa de policarbonato. De forma inesperada, este tanque não teve resistência suficiente para conter a massa de água da mina de sal-gema. Verificaram-se roturas nas paredes laterais e conseqüente perdas de água. Procedeu-se posteriormente a um reforço das paredes laterais, que, no entanto, se revelou ineficaz. Teve, portanto, que se abandonar a utilização deste tanque maior.

Assim sendo, a água inicialmente colocada no tanque maior foi bombada para o tanque médio no dia 10 de agosto de 2021, confirmando-se a sua salinidade nesse momento.

Durante o processo de enchimento do tanque médio, surgiu uma nova dificuldade. Ocorreu uma ligeira deslocação do tanque, alterando a sua inclinação e inviabilizando a recolha de água dessalinizada para o respetivo reservatório. Esta situação só foi detetada posteriormente, no dia 08 de setembro e imediatamente corrigida. A partir da correção da inclinação, avançou-se com a experiência para a Etapa 2.

II.5.2. Etapa 2

Na Etapa 2, entre 08 de setembro e 11 de outubro de 2021, testou-se a substituição da tampa de policarbonato por uma tampa de vidro no tanque mais pequeno. Em simultâneo, avançou-se com a experimentação da dessalinização no tanque médio, este com tampa de policarbonato.

III. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

III.1. Caracterização da Água da Mina de Sal-gema

A caracterização analítica da água da mina de sal-gema apresenta-se na Tabela III.1. De acordo com as características desta água, conclui-se que, utilizando o resultado obtido para a densidade, em média cada litro de água da mina de sal-gema conterá 201 g de sal (e eventualmente outras substâncias).

Os resultados obtidos para ST indicam que cada litro da água da mina de sal-gema terá 322 g de substâncias suspensas e dissolvidas (orgânicas e inorgânicas).

Quando se converte o resultado obtido para a condutividade elétrica em salinidade (UNESCO/ICES/SCOR/IAPSO, 1981 *in* OceanLife, 2017), utilizando-se a fórmula aplicável à água do mar (com salinidade máxima de 42 g/kg), chegamos a um valor de salinidade de 234,1 g/kg. Isto é, na água da mina de sal-gema a salinidade calculada com esta fórmula corresponderia a 281,1 g/L, portanto inferior ao valor obtido por refratometria (320 g/L).

Tabela III.1. Características da água da mina de sal-gema (média \pm desvio padrão).

Densidade (g/L)	Sólidos Totais (g/L)	Condutividade Elétrica (mS/cm)	Salinidade (g/L)
1201 \pm 1	322 \pm 2	227 \pm 1	320 \pm 10

III.2. Composição do Sal

A composição do sal desta mina de sal-gema foi caracterizada por um laboratório acreditado para o efeito, do Instituto Nacional de Engenharia e Tecnologia Industrial (INETI) e apresenta-se na Tabela III.2, onde se compara com alguns dados analíticos referentes à sal marinho do Oceano Atlântico (Galiotto *et al.*, 2020; Vitao, 2020; Jasmine Alimentos, 2014).

Tabela III.2. Composição analítica do sal da mina de sal-gema, Loulé (INETI) e do sal marinho do Oceano Atlântico (Galiotto *et al.*, 2020; Vitao, 2020; Jasmine Alimentos, 2014).

Ensaio	Sal de Sal-gema	Sal Marinho	Unidade
Cinza insolúvel em HCl	0,68	NQ	g/100g
Humidade	<0,8 (LQ) ⁽¹⁾	NQ	g/100g
Insolúveis em água	2,07	NQ	%
Cloreto de Sódio - Cálculo	92,2	NQ	%
Alumínio	442,39065	NQ	mg(Al)/kg
Cloretos	93,5	55,5	% (NaCl)
Manganês	4,37	NQ	mg(Mn)/kg
Bário	1,29	NQ	mg(Ba)/kg
Sódio	36,90	30,8	g/100g
Mercurio	<0,05 (LQ) ⁽¹⁾	NQ	mg(Hg)/kg
Sulfatos	1,65	7,7	g/100g
Cádmio	<0,01 (LQ) ⁽¹⁾	NQ	mg(Cd)/kg
Chumbo	0,24	NQ	mg(Pb)/kg
Níquel	0,44	NQ	mg(Ni)/kg
Arsénio	0,12	NQ	mg(As)/kg
Ferro	334,56	22,99	mg(Fe)/kg
Flúor	<50 (LQ) ⁽¹⁾	NQ	mg(F)/kg
Magnésio	0,15	3,7	g(Mg)/100g
Estrôncio	63,7	NQ	mg(Sr)/kg
Iodo	<0,1 (LQ) ⁽¹⁾	NQ	mg(I)/kg
Cálcio	NQ	1,2	g(Ca)/100g
Potássio	NQ	1,1	g(K)/100g

⁽¹⁾ Limite de quantificação;
NQ – Não quantificado.

Como se pode verificar na tabela anterior, o sal de sal-gema apresenta teores mais elevados de cloretos (1,7 vezes maiores), sódio (1,2 vezes maiores) e ferro (14,6 vezes maiores), e menores de sulfatos (cerca de 5 vezes menores) e magnésio (cerca de 25 vezes menores).

Em termos de metais pesados quantificados no sal da mina de sal-gema, os mais tóxicos (mercúrio e cádmio) apresentam-se inferiores aos limites de quantificação. Os outros metais potencialmente tóxicos, como níquel, arsénio e estrôncio, encontram-se em quantidades que podem ser consideradas vestigiais, isto é, na ordem de partes por milhão.

III.3. Resultados Experimentais da Dessalinização Solar

III.3.1. Etapa 1

Testou-se a dessalinização no tanque mais pequeno, colocando um volume de água da mina de sal-gema suficiente (313 L) para cobrir os sensores PEQ1, PEQ2, PEQ3 e PEQ4, mas deixando o sensor do ar interior emerso. Utilizou-se a tampa de policarbonato, durante 83 dias, sendo a salinidade inicial de 320 g/L.

Durante esta etapa, a evolução diária da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar interior e da água no tanque (b), apresentam-se na Figura III.1.

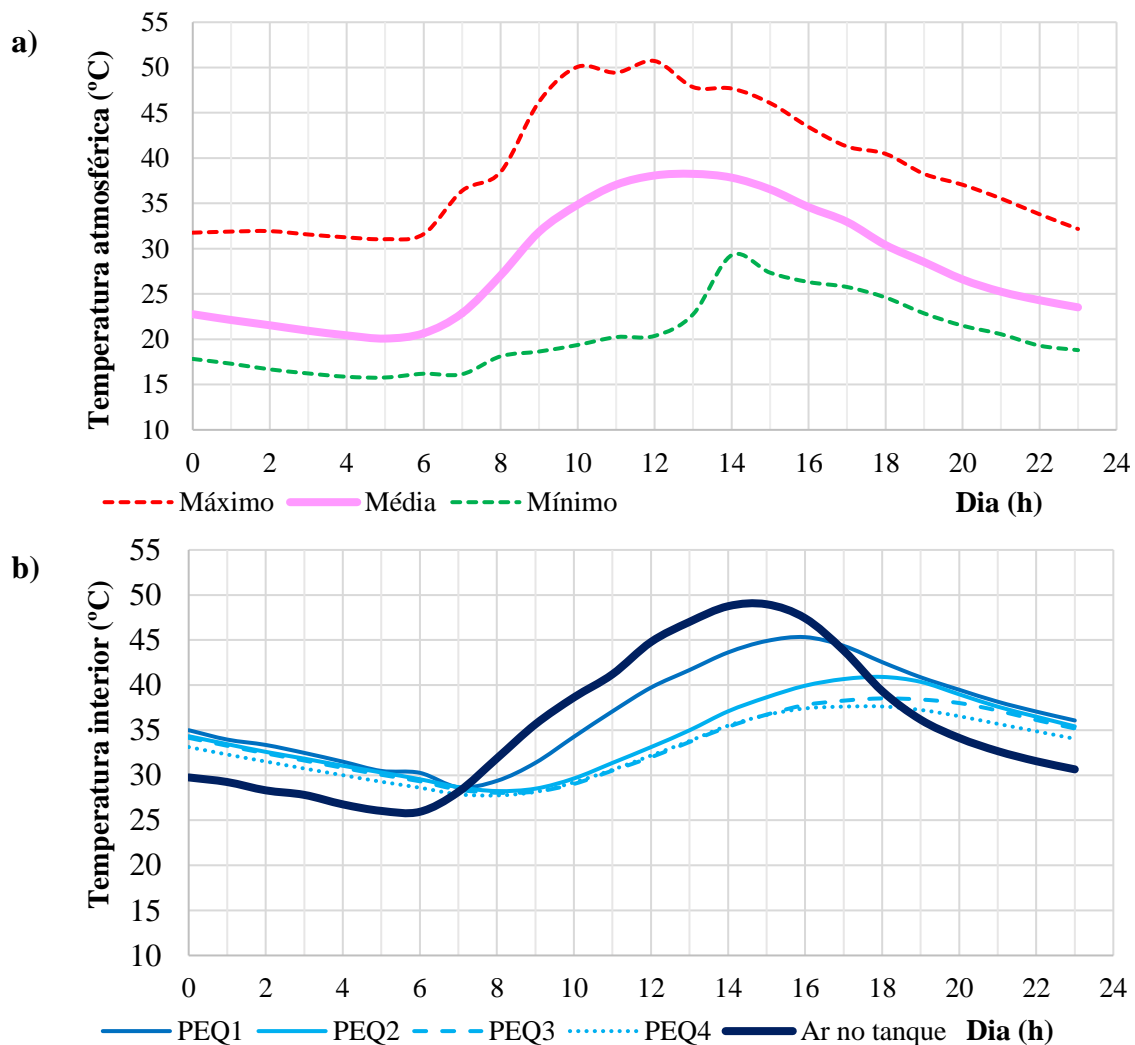


Figura III.1. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque pequeno (PEQ1: 33,5 cm, PEQ2: 24 cm, PEQ3: 14,5 cm e PEQ4: 5 cm), durante a Etapa 1.

Como se pode observar na figura anterior, a temperatura do ar interior varia de forma muito similar à temperatura atmosférica (coeficiente de correlação $r^2 = 0,9128$).

Durante este período experimental, ocorreu uma produtividade de 0,23 L/dia.m², sendo a salinidade (por refratometria) da água recuperada de 10 g/L e a condutividade elétrica de 15,4 mS/cm.

No período referente à Etapa 1, correspondente a 83 dias, houve uma precipitação de sal no fundo do tanque (Figura III.2), estimada aproximadamente em 5,6 kg de sal.

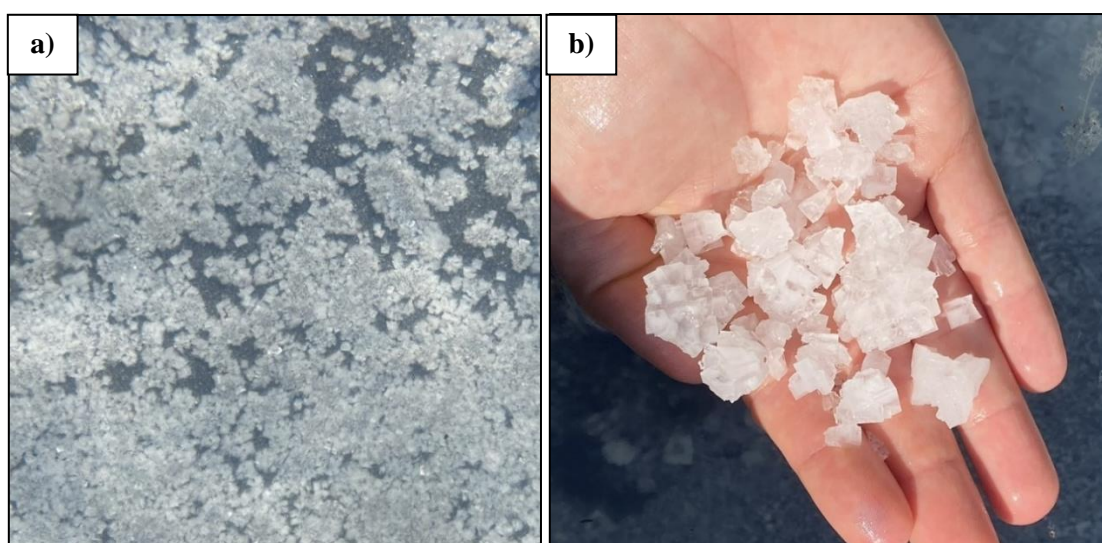


Figura III.2. Sal precipitado no fundo do tanque mais pequeno (a) e pormenor do sal (b).

III.3.2. Etapa 2

Para se otimizar os resultados obtidos na Etapa 1 no tanque mais pequeno, substituiu-se a tampa de policarbonato por uma tampa de vidro, especificamente feita para o efeito, e avançou-se com a experiência. O início da Etapa 2 deu-se a 08 de setembro e teve a duração de 33 dias, partindo-se de um volume inicial de água igual a 295 L, com salinidade inicial de 320 g/L.

A evolução diária da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar interior e da água no tanque mais pequeno (b), apresentam-se na Figura III.3.

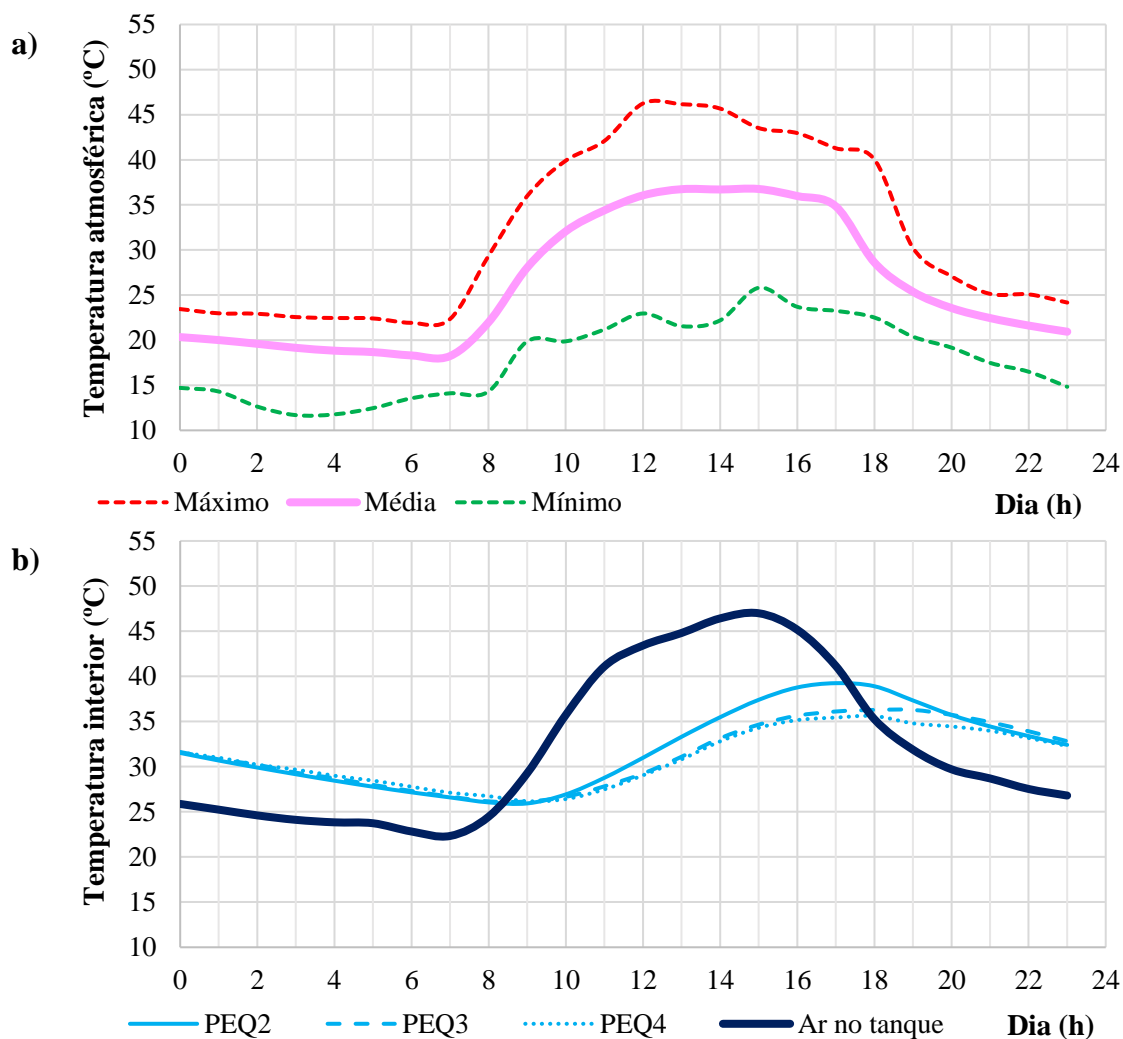


Figura III.3. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque mais pequeno (PEQ2: 24 cm, PEQ3: 14,5 cm e PEQ4: 5 cm), durante a Etapa 2.

Nesta etapa obteve-se uma correlação entre a temperatura atmosférica e a temperatura no interior do tanque de $r^2 = 0,9644$, portanto superior à obtida na Etapa 1 ($r^2 = 0,9128$). Esta diferença pode estar associada à substituição do policarbonato por vidro que, de acordo com estudos anteriores, é o material mais indicado para sistemas de dessalinização solar (Ayoub & Maleab, 2012).

Durante este período, correspondente a 33 dias, a produtividade deste tanque experimental foi de 0,45 L/dia.m², sendo a salinidade (por refratometria) da água recuperada de 3 g/L e a condutividade elétrica de 5,2 mS/cm. A precipitação estimada de sal no fundo do tanque mais pequeno foi de aproximadamente 4,7 kg de sal.

No que diz respeito ao tanque médio, em 08 de setembro de 2021 partiu-se de um volume de 496 L, suficiente para cobrir os sensores MED2, MED3 e MED4, e deixando o sensor do ar interior emerso. Utilizou-se a tampa de policarbonato, uma vez que só existia uma tampa de vidro. A experiência manteve-se durante 33 dias, sendo que neste caso a salinidade inicial era de 300 g/L.

A evolução diária da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar interior e da água no tanque médio (b), durante a Etapa 2, apresentam-se na Figura III.4.

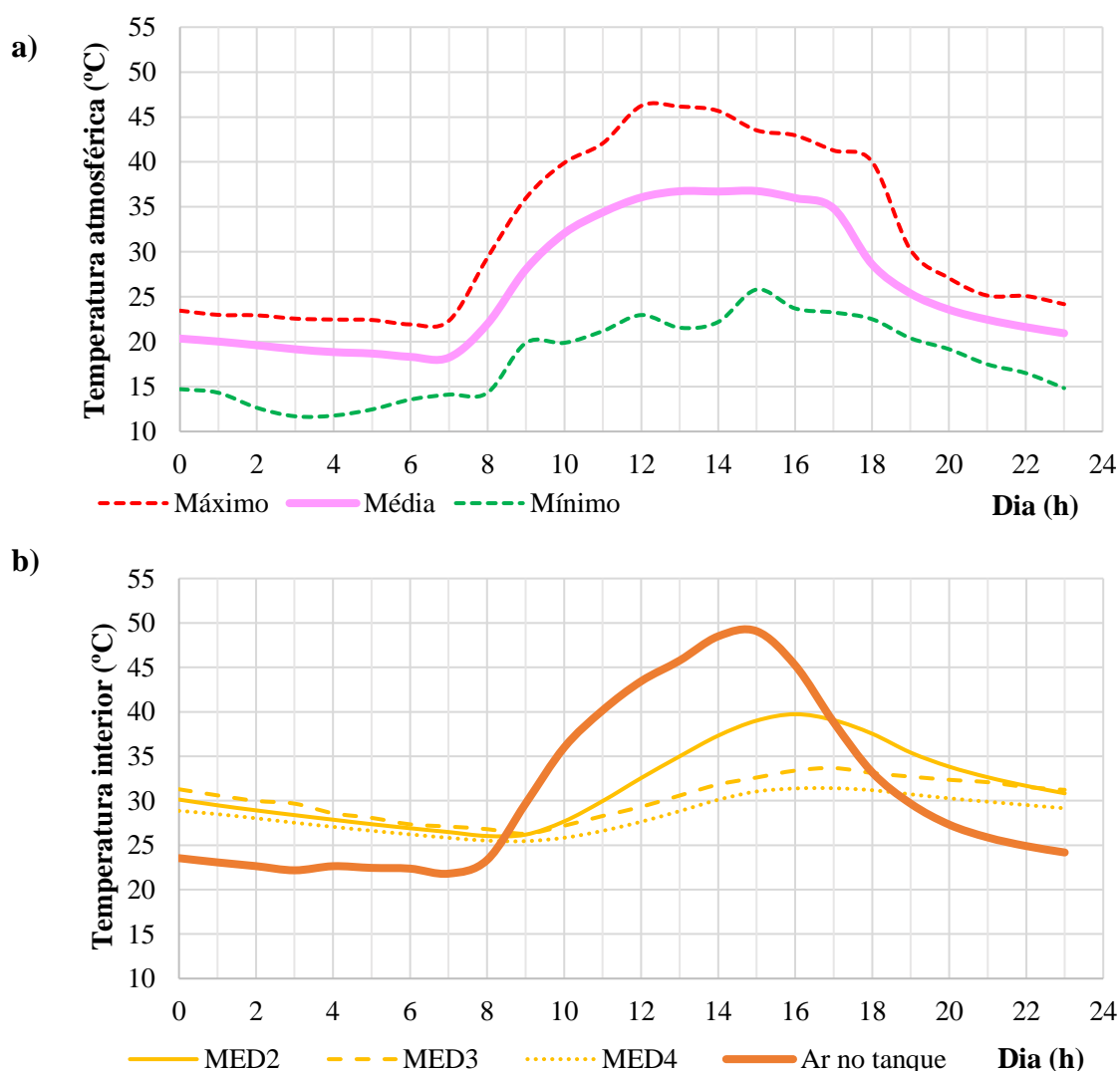


Figura III.4. Variação da temperatura atmosférica (a) e da temperatura do ar e da água (b) a diferentes alturas a partir do fundo do tanque médio (MED2: 44 cm, MED3: 27 cm e MED4: 10 cm), durante a Etapa 2.

A partir da análise da figura anterior, verifica-se que existe uma grande correlação entre a variação diária da temperatura no interior do tanque e a da temperatura atmosférica. Mesmo com a tampa de policarbonato, no tanque médio a correlação obtida entre a temperatura atmosférica e interior foi de $r^2 = 0,9604$, portanto mais elevada do que no tanque mais pequeno com a mesma tampa ($r^2 = 0,9128$).

Esta correlação no tanque médio foi próxima da obtida para o tanque pequeno com tampa de vidro ($r^2 = 0,9644$), sugerindo a necessidade de se testar a dessalinização no tanque médio, mas com tampa de vidro. Procedeu-se a esta terceira etapa, que se encontra em curso, portanto os resultados não foram recolhidos em tempo útil para este estudo.

Assim sendo, a produtividade deste tanque experimental médio (com tampa de policarbonato) foi de $0,62 \text{ L/dia.m}^2$, sendo a salinidade (por refratometria) da água recuperada $< 1 \text{ g/L}$ (limite de quantificação) e a condutividade elétrica de $139 \mu\text{S/cm}$.

No período referente à Etapa 2, correspondente a 33 dias, houve uma precipitação de sal no fundo do tanque médio, estimada aproximadamente em $6,1 \text{ kg}$ de sal (Figura III.5).



Figura III.5. Sal precipitado no fundo do tanque médio.

III.3.3. Influência da Tampa em Policarbonato *versus* Tampa em Vidro na Evolução da Temperatura no Interior do Tanque Mais Pequeno

Para se testar a influência da tampa em policarbonato *versus* tampa em vidro no processo de dessalinização solar, colocadas em etapas distintas do período experimental no tanque mais pequeno, selecionaram-se dois dias em que as temperaturas atmosféricas foram muito similares, como se apresenta na Tabela III.3.

Tabela III.3. Diferenciais de temperatura dos quatro dias escolhidos para comparação entre tampas no tanque mais pequeno.

	Data	Temperatura Atmosférica às 13 h (°C)	Temperatura Atmosférica às 6 h (°C)	Amplitude Térmica Diária (°C)	Material da Tampa
a)	30/agosto	36,4	18,9	17,5	Policarbonato
	09/setembro	36,1	19,5	16,6	Vidro
b)	21/agosto	41,1	20,0	21,2	Policarbonato
	11/setembro	41,0	20,5	20,5	Vidro

Calcularam-se as médias das temperaturas (atmosférica e do ar interior no tanque) para as diversas horas ao longo do dia (Figura III.6). Nesta análise estatística foram eliminados os *outlier* e calcularam-se os coeficientes de correlação entre a temperatura atmosférica e a temperatura do ar interior no tanque. No caso da tampa em policarbonato, para os dias analisados, o r^2 variou entre 0,8415 (**a**) e 0,8466 (**b**). Quando se utilizou a tampa de vidro, obtiveram-se valores mais elevados para o coeficiente de correlação, nomeadamente de $r^2 = 0,9293$ (**a**) e de $r^2 = 0,9278$ (**b**).

Resumindo, quando se comparam dias com evoluções diárias de temperatura similares, a tampa de vidro mostrou-se associada a valores de produtividade mais elevados. Estes dados reforçam os trabalhos anteriormente publicados (Tleimat & Howe, 1969; Phadatare & Verma, 2007; Phadatare & Verma, 2009; Panchal, 2016).

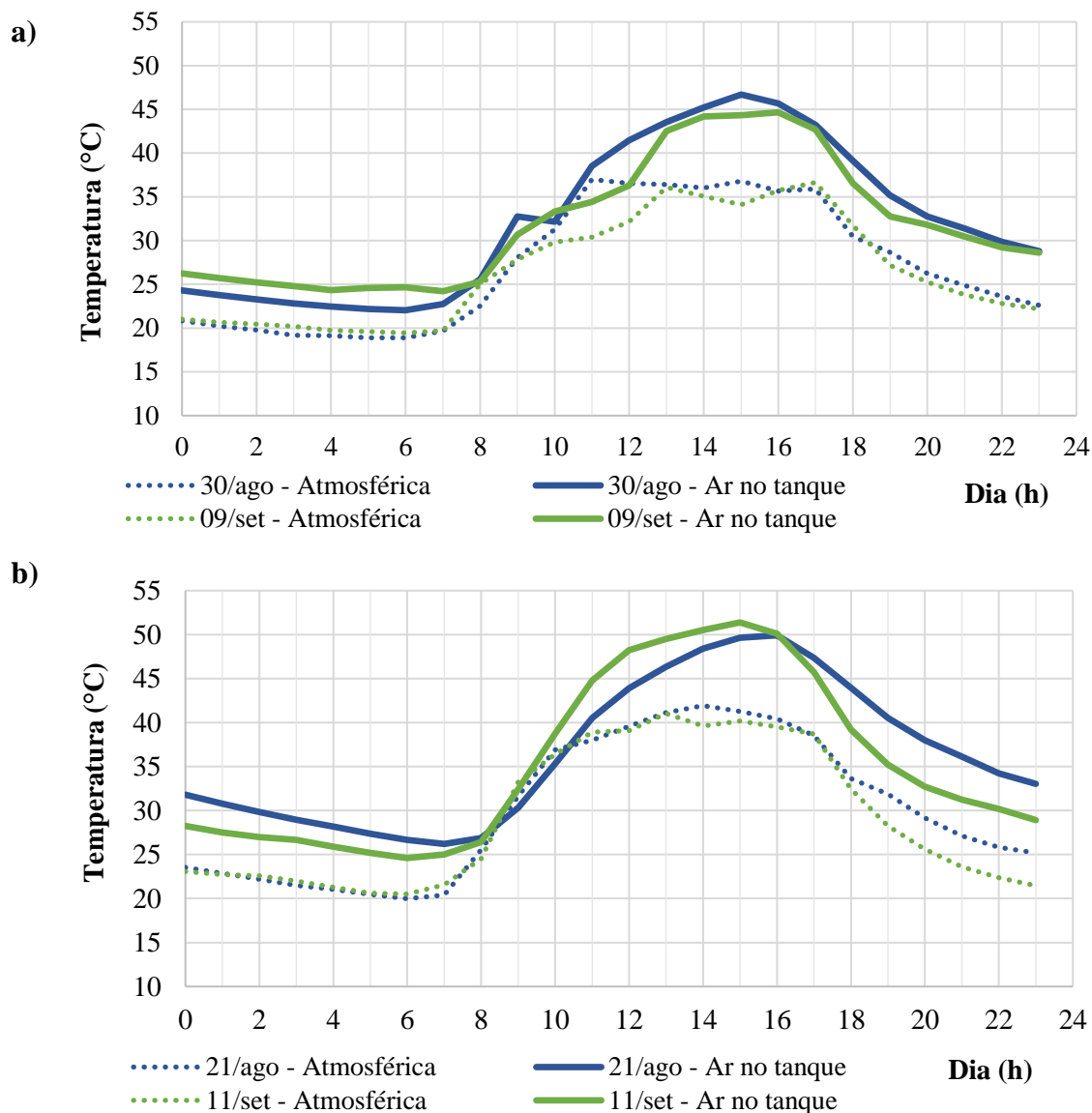


Figura III.6. Variações das temperaturas diárias com **tampa de policarbonato (cor azul)** e com **tampa de vidro (cor verde)**.

III.3.4. Influência do Tamanho do Tanque na Evolução da Temperatura no seu Interior Durante a Dessalinização

Durante dois dias do período experimental (20 e 21 de agosto, Tabela III.4), quando o sistema de sensorização estava a funcionar em pleno, analisaram-se os dados recolhidos para se perceber a influência do tamanho dos tanques (mais pequeno *versus* médio), ambos com tampa de policarbonato, na evolução da temperatura interior (Figura III.7). Como se pode observar nessa figura, as temperaturas mais elevadas foram atingidas

no interior do tanque médio. Em ambos os tanques, se verifica que a camada mais superficial de água é que sofre maiores variações de temperatura (apresentam maior amplitude térmica), sendo que as camadas menos superficiais demoram mais tempo a responder às variações térmicas, tal como se esperava devido ao calor específico da água. Assim sendo, no tanque médio, o maior volume de água sofre um maior aquecimento, sendo que neste tanque ocorrerá uma maior evaporação de água e, portanto, uma maior produtividade, em termos de dessalinização.

Tabela III.4. Diferenciais de temperatura dos dois dias escolhidos, para quando os dois tanques estavam em simultâneo com tampa de policarbonato.

Data	Temperatura Atmosférica às 13 h (°C)	Temperatura Atmosférica às 6 h (°C)	Amplitude Térmica Diária (°C)	Material da Tampa
20/agosto	38,9	18,1	20,7	Policarbonato
21/agosto	41,1	20,0	21,2	

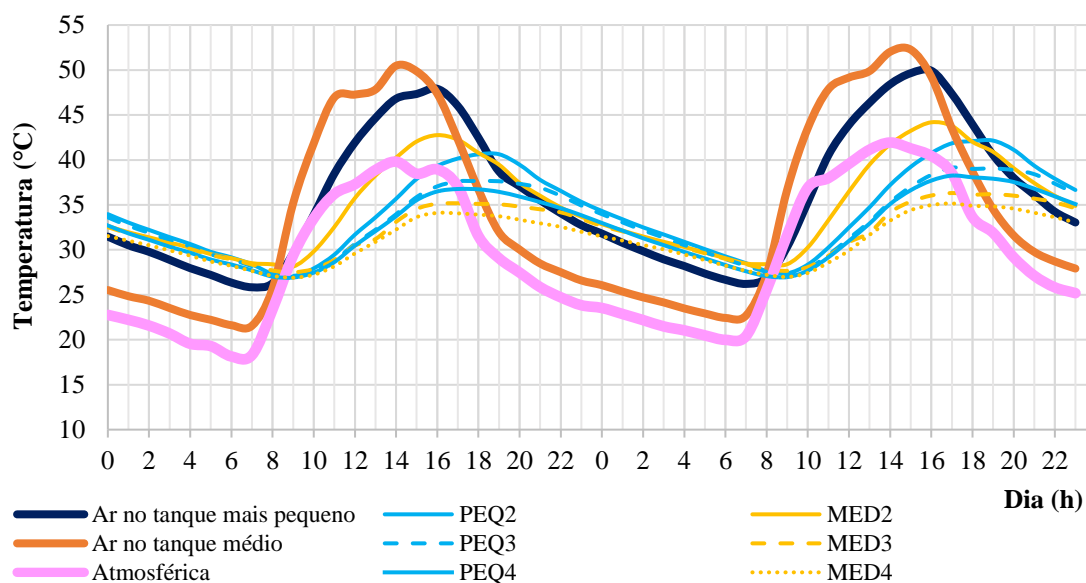


Figura III.7. Variações das temperaturas diárias entre as 00h do dia 20 e as 23h59 do dia 21 de agosto de 2021, no tanques mais pequeno e médio em simultâneo, com tampa de policarbonato.

A Figura III.8 mostra-nos os coeficientes de correlação entre a temperatura atmosférica e a temperatura do ar interior nestes dois tanques em 20 e 21 de agosto, sendo que o valor mais elevado foi obtido para o tanque médio ($r^2 = 0,9781$), em detrimento do tanque mais pequeno ($r^2 = 0,8466$).

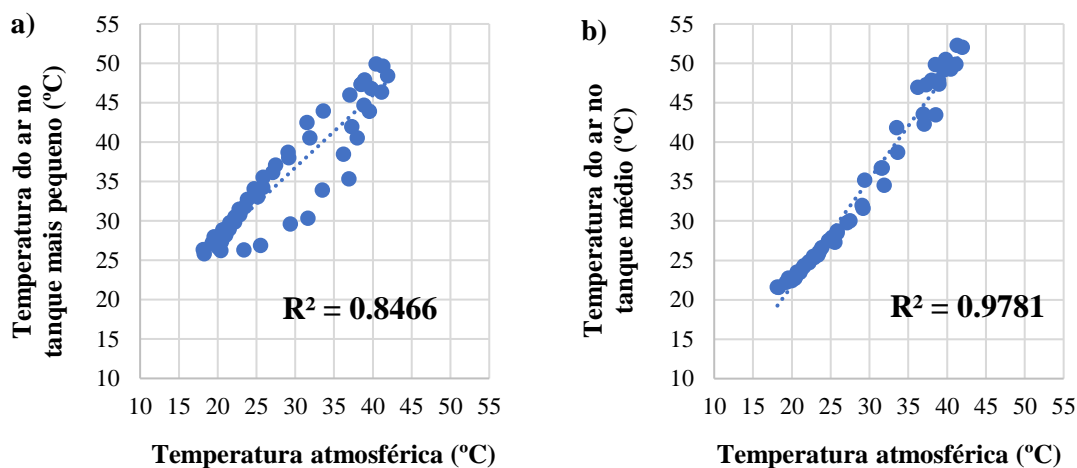


Figura III.8. Comparação dos coeficientes de correlação (r^2) entre o tanque de tamanho mais pequeno (a) e o tanque de tamanho médio (b), cobertos com tampa de policarbonato.

III.3.5. Análise do Efeito na Temperatura Interior da Variação do Tamanho do Tanque em Simultâneo com o Material da Tampa

Nesta fase, procedeu-se à comparação de condições distintas em termos de tamanho de tanques e do material das respetivas tampas. Já existia alguma evidência de que as condições que levavam a uma maior produtividade estariam associadas ao tanque médio e à tampa de vidro. No entanto, só existia uma tampa de vidro. Assim sendo, decidiu-se comparar a evolução da temperatura interior no tanque mais pequeno, com tampa de vidro, em simultâneo no tanque médio, com tampa de policarbonato, durante dois dias, de acordo com a Tabela III.5.

Tabela III.5. Diferencias de temperatura dos dois dias escolhidos, no qual cada tanque estava com uma tampa diferente em simultâneo.

Data	Temperatura Atmosférica às 13 h (°C)	Temperatura Atmosférica às 6 h (°C)	Amplitude Térmica Diária (°C)
10/setembro	38,9	18,9	20,1
11/setembro	41,0	20,5	20,5

Observou-se que, quando foi colocada a tampa de vidro no tanque mais pequeno (Figura III.9), a evolução diária de temperatura interior do tanque pequeno é muito similar à evolução da temperatura diária do tanque médio com tampa de policarbonato.

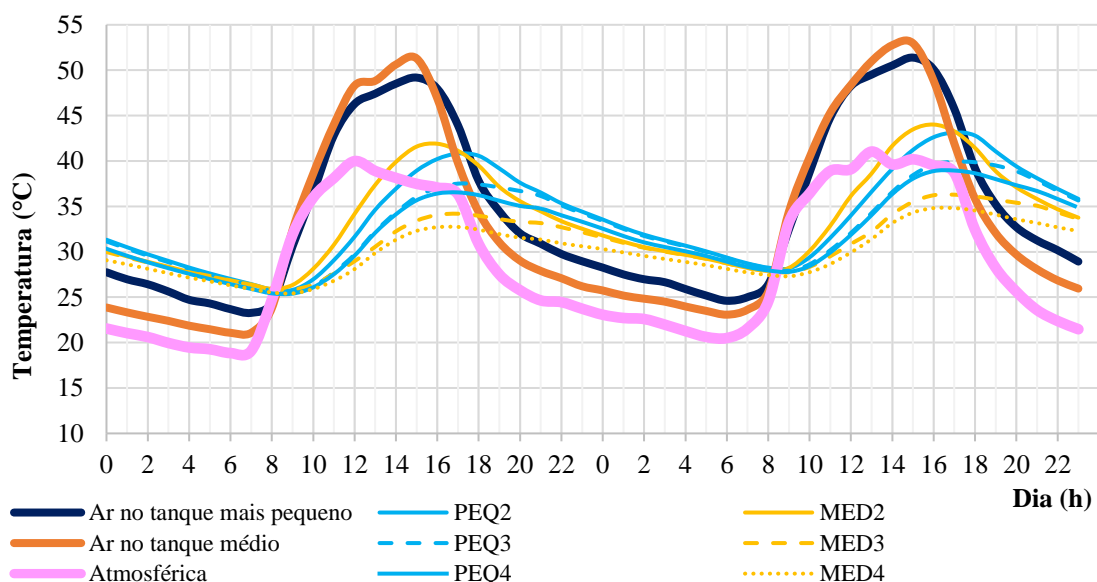


Figura III.9. Variações das temperaturas ao longo dos dias 10 e 11 de setembro no sistema (tanque mais pequeno com tampa de vidro e tanque médio com tampa de policarbonato).

Desta forma, parece mais uma vez evidente que as condições ideais para a dessalinização solar com este sistema experimental serão o tanque médio com tampa de vidro. Quando se calcula a correlação entre a temperatura atmosférica e a temperatura do ar interior nos tanques (Figura III.10), o r^2 mais elevado ($r^2 = 0,9456$) obteve-se no tanque médio, mas o r^2 do tanque mais pequeno ($r^2 = 0,9145$) foi mais elevado do que os anteriormente obtidos com tampa de policarbonato ($r^2 = 0,8466$ em 21 de agosto e $r^2 = 0,8415$ em 30 de agosto).

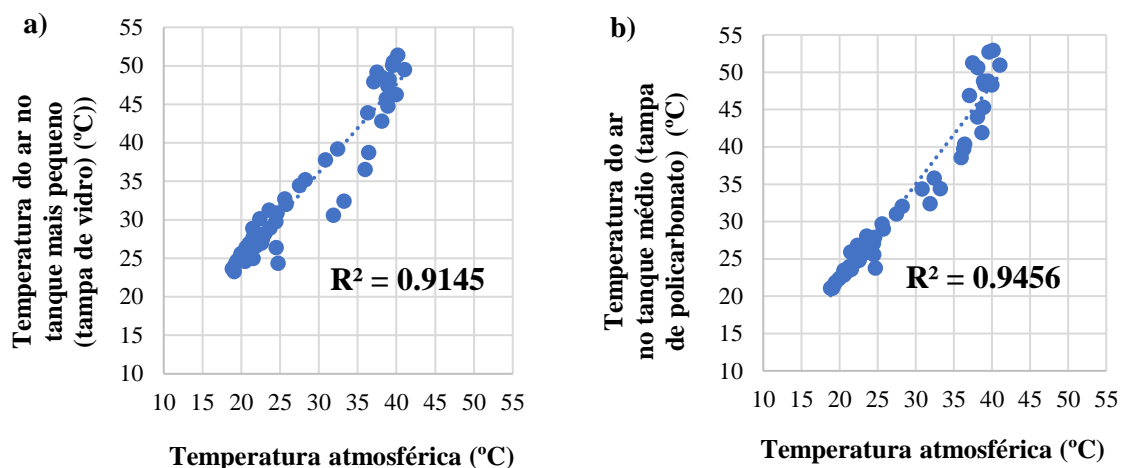


Figura III.10. Coeficientes de r^2 para os dias 10 e 11 de setembro, para o tanque mais pequeno com tampa de vidro (a) e para o tanque médio com tampa de policarbonato (b).

Quando se considerou um período experimental mais amplo, entre 08 e 20 de setembro, com as mesmas condições, distintas em termos de tamanho de tanques e do material das respetivas tampas, obtiveram-se os r^2 que se apresentam na Figura III.11.

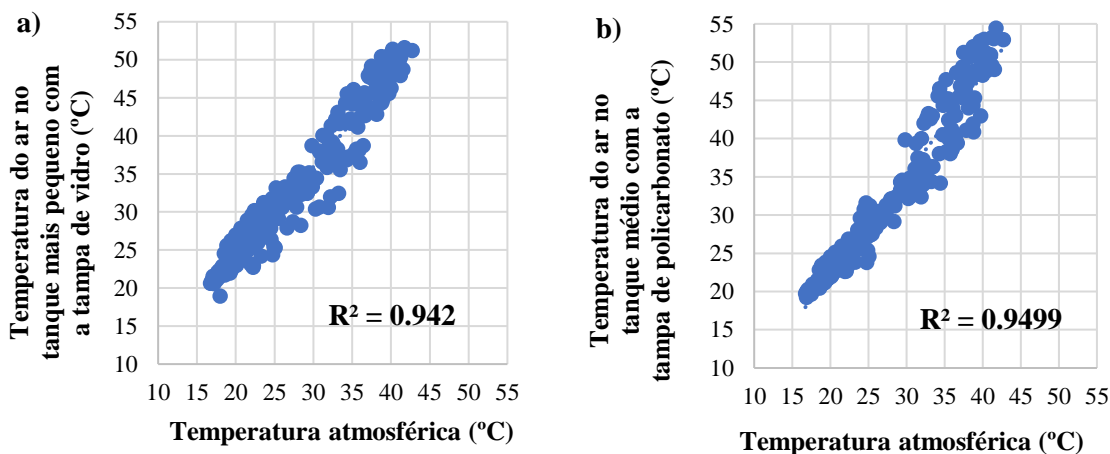


Figura III.11. Coeficientes de r^2 para o período entre 8 a 20 de setembro, para o tanque mais pequeno com tampa de vidro (a) e para o tanque médio com tampa de policarbonato (b).

Em relação à produtividade, entre 08 a 20 de setembro com o tanque mais pequeno com tampa de vidro obteve-se uma média de 0,49 L/dia.m², enquanto que com o tanque médio com tampa de policarbonato se obteve uma média de 0,84 L/dia.m².

A Tabela III.6 resume os resultados obtidos até o momento neste sistema experimental.

Tabela III.6. Resumo dos resultados de produtividade dos tanques (Etapas 1 e 2).

Tamanho do Tanque	Material da Tampa	Produtividade (L/dia.m²)
Mais	Policarbonato (Etapa 1)	0,23
pequeno	Vidro (Etapa 2)	0,45
Médio	Policarbonato (Etapa 2)	0,62
Maior	Rotura	

Assim sendo, reforça-se a necessidade de se testar a produtividade do tanque médio com tampa de vidro (trabalho já em curso).

III.4. Usos Urbanos Não Potáveis para a Água Dessalinizada

Numa lógica de economia circular, de forma a evitar-se/reduzir-se a necessidade de transporte da água dessalinizada para usos longínquos do local onde é produzida, tentou-se identificar potenciais usos urbanos não potáveis, considerando-se um raio de aproximadamente 600 m (Figura III.12). Nesta envolvência à mina de sal-gema, são evidentes grandes consumos de água que não carece de ser potável, nomeadamente, para rega de espaços verdes, lavagens de espaços exteriores, lavagens de contentores de resíduos, e para alguns usos num grande espaço comercial aí existente.



Figura III.12. Raio de 600 m a partir da localização da Mina de Sal-gema, em Loulé.

Desta forma, seriam evitados consumos energéticos no transporte da água (na bombagem) e poupava muita água tratada para consumo humano que atualmente é utilizada em usos não potáveis.

Na distância envolvente à mina de sal-gema considerada, de acordo com as estimativas do município consomem-se cerca de 18 m³ por mês de água tratada para consumo humano, principalmente em lavagens de espaços exteriores e de contentores de resíduos sólidos urbanos.

Atendendo a que a salinidade máxima da água obtida neste estudo foi de 3 g/L (5,2 mS/cm), portanto superior à recomendada para rega, os primeiros usos a considerar

deveriam ser lavagens de espaços exteriores (ruas e passeios) na imediação da mina e de contentores de resíduos sólidos urbanos. Propõe-se que em estudos posteriores se monitorize a salinidade da água produzida de forma a garantir que, caso haja produção de água suficiente com condutividade inferior a 1 mS/cm, esta possa ser utilizada para a rega de espaços verdes, ou mesmo para a rega agrícola, uma vez que não é espetável que esta água tenha contaminação microbiológica. Mesmo assim, recomenda-se que seja feito uma avaliação do risco da utilização desta ApR (Água para Reutilização), para diversos usos, com a possibilidade de se utilizarem barreiras complementares (Decreto-Lei n.º 119/2019). Desta forma, existe um grande potencial de poupança de água para consumo humano, utilizada em usos não potáveis, nos espaços exteriores da cidade.

De acordo com ERSAR (2019), por cada m³ de água tratada para consumo humano que sai pela torneira, são gastos 0,88 kWh de energia, sendo que após a sua utilização um m³ de água residual urbana são gastos 0,81 kWh para a sua drenagem e tratamento em ETAR. Se assumirmos que cada kWh de energia gasta representa a emissão de 200 g CO₂ (APA, 2021), a utilização local desta água dessalinizada, para além da grande vantagem financeira para a TechSalt, representa uma importante medida de sustentabilidade à escala local, correspondendo a uma ação prática para mitigar os efeitos das alterações climáticas.

III.5. Possíveis Usos para o Sal

De acordo com o referido anteriormente, estão disponíveis para serem dessalinizados 61 m³ de água por dia. Considerando os resultados obtidos até o momento no tanque médio, partindo de 300 g/L e obtendo 1 g/L, isto corresponde a cerca de 18,2 t de sal diariamente.

Numa lógica de circularidade, foram inventariados usos possíveis para este sal, numa região onde o turismo é a principal atividade económica e onde o clima Mediterrânico potencia muitas atividades recreativas relacionadas com a água, nomeadamente piscinas, parques aquáticos, spas, etc. O Algarve é o responsável por 50 % do Valor Acrescentado Bruto (VAB) do turismo na economia portuguesa, cerca de 1,1 mil milhões de euros em 2018 (Ramalho, 2019). Em setembro de 2021, houve um total de 1 874 676 dormidas nos estabelecimentos de alojamento turísticos no Algarve (INE, 2021). Loulé é um dos

municípios do país, na região do Algarve, com maior representatividade em termos de empreendimentos turísticos que envolvem atividades de lazer relacionadas com a água.

De acordo com motores de pesquisa não oficiais de alojamentos turísticos, estima-se que em novembro de 2021 existam mais de 6 000 piscinas em instalações turísticas no Algarve (como hotéis, villas, resorts, hostels, etc.), sendo que mais de 60 se localizam em Loulé. Além disso, no Algarve existem 12 municípios com piscinas municipais (Visit Algarve, 2021) e seis parques aquáticos, distribuídos entre os concelhos de Lagoa e Loulé.

Assim sendo, atendendo à grande quantidade de sal disponibilizado no processo da dessalinização, a sua utilização local para desinfecção de águas para usos recreativos teria um enorme potencial.

Outra oportunidade de utilização do sal seria para tratamentos de beleza e bem-estar físico (talassoterapia). De acordo com motores de pesquisa não oficiais (Tripadvisor, 2021), o Algarve tem mais de 100 centros de spa. Neste tipo de utilização, o sal pode ser comercializado para estabelecimentos como spas, ou no próprio local poderiam ser instaladas infraestruturas que utilizassem a água da mina para banhos de imersão, a semelhança no que existe na região de Castro de Marim (Figura III.13), em que a água tem uma salinidade de aproximadamente 240 g/L (Água Mãe, 2021; Ribeiro, 2020).



Figura III.13. Banho flutuante na Salina de Castro de Marim (Água Mãe, 2021).

Por último, e não menos importante, seria de se avaliar o uso deste sal na indústria alimentar. No que diz respeito à indústria conserveira, na região do Algarve existem três unidades, Conserveira do Sul e FAROPEIXE, localizadas na Zona Industrial de Olhão, e a Conserveira do Arade, na zona do Parchal, entre os concelhos de Lagoa e Portimão. Estas indústrias fabricam patés e conservas variadas que envolvem a salga do pescado. Neste tipo de utilização, será necessária uma monitorização mais rigorosa de metais que possam constituir algum tipo de risco para a saúde pública por ingestão.

Para além disso, o sal, devidamente acautelados todos os riscos de toxicidade alimentar, pode ser comercializado como tal, ou adicionando-se ervas aromáticas locais.

IV. CONCLUSÕES

De maneira a se encontrar uma solução para o problema real da empresa TechSalt, em Loulé, projetou-se e monitorizou-se durante cerca de quatro meses diferentes tamanhos e coberturas de tanques experimentais de dessalinização solar. A água que se pretendia dessalinizar tinha uma salinidade aproximadamente 10 vezes maior que a água do mar, sendo assim houve muita dificuldade em se encontrar maneiras eficientes de tratamento para esta água, visto que toda a bibliografia consultada fornece resultados para águas salobras ou água do mar. Os próprios ensaios laboratoriais de ST para caracterização da água tiveram que ser realizados duas vezes, pois em um primeiro momento pensou em realizar-se o ensaio sem diluição e a quantidade de sal extravasou os recipientes, aderindo às paredes da estufa e à parte exterior dos recipientes, o que impossibilitou a pesagem final.

Durante a Etapa 1 (duração de 83 dias), o tanque mais pequeno com tampa de policarbonato obteve uma produtividade de 0,23 L/dia.m², sendo a salinidade final da água dessalinizada de 10 g/L, a condutividade elétrica de 15,4 mS/cm e a precipitação estimada de sal no fundo do tanque de aproximadamente 5,6 kg de sal.

Neste momento houve muita dúvida se a baixa produtividade estava relacionada com a escolha de policarbonato para a tampa e fez o processo ser mais lento, por isso foi indispensável a troca do material da tampa do tanque mais pequeno. Na Etapa 2 (duração de 33 dias), no tanque mais pequeno com tampa de vidro a produtividade foi de 0,45 L/dia.m² (quase o dobro da tampa de policarbonato, portanto o vidro ajudou a aumentar a produtividade), sendo a salinidade da água recuperada de 3 g/L, a condutividade elétrica de 5,2 mS/cm e a precipitação estimada de sal no fundo do tanque de aproximadamente 4,7 kg de sal.

Ainda na Etapa 2, no tanque médio com tampa de policarbonato a produtividade foi de 0,62 L/dia.m², sendo a salinidade da água dessalinizada < 1 g/L (limite de quantificação), a condutividade elétrica de 139 µS/cm e a precipitação estimada de sal no fundo do tanque de aproximadamente 6,1 kg de sal.

Acredita-se que durante a Etapa 2 a melhora de resultado de remoção de sal no tanque mais pequeno (de 10 g/L na Etapa 1 para 3 g/L na Etapa 2) também está relacionada com uma maior distância da tampa da coluna de água. Ao longo do tempo, a água foi sendo dessalinizada e o nível no tanque desceu, o que gerou uma maior distância da parte

superior da água em relação à tampa. Pode ser feita uma analogia com o que ocorreu no ensaio laboratorial de ST: à subida de temperatura, conforme a água evaporava, o sal começou a aderir nas paredes e teto da estufa. Num primeiro momento com o tanque muito cheio, isso pode ter ocorrido e partículas de sal aderiram-se à tampa, sendo assim quando a água evaporou, condensou e escorreu para o reservatório, levou estas partículas de sal junto. Ao longo do processo isto foi estabilizando-se e a coluna de água diminuindo de altura, portanto a quantidade de sal na água dessalinizada foi diminuindo. No tanque médio, visto que este não foi cheio até o topo, desde o começo a quantidade de sal na água dessalinizada foi < 1 g/L, inferior ao limite de quantificação.

A correlação entre a temperatura atmosférica e a temperatura do ar interior nos tanques foi maior no tanque mais pequeno com a tampa de vidro ($r^2 = 0,9644$), seguido pelo tanque médio com tampa de policarbonato ($r^2 = 0,9604$) e, por fim, o tanque mais pequeno com tampa de policarbonato ($r^2 = 0,9128$). Mesmo com a tampa de policarbonato, verificou-se que o tanque médio apresentou a maior produtividade ($0,62$ L/dia.m²) em relação às outras situações monitorizadas, com eficiência de remoção de sal de 99 %. Pensando em tudo isto, a Etapa 3 (em andamento) terá grandes probabilidades de fornecer informações relativas à melhor produtividade para estes sistemas de dessalinização solar, a partir do tanque médio com cobertura em vidro, que foi visto alcançar temperaturas interiores maiores e gerar maiores diferenciais de temperatura, pois o vidro arrefece mais rapidamente que o policarbonato, e a água continua com uma temperatura elevada. De acordo com trabalhos anteriores (Tleimat & Howe, 1969; Phadatare & Verma, 2009), na água do mar a produtividade aumentou em média 30 % quando se passou a cobertura de policarbonato para vidro, por isso espera-se conseguir uma melhora na produtividade do tanque médio.

Além disso, a avaliação de possíveis utilizações da água dessalinizada em usos urbanos não potáveis revelou que se pode poupar cerca de 18 m³ por mês de água tratada para consumo humano, principalmente em lavagens de infraestruturas e de equipamentos urbanos na envolvente da mina de sal-gema. Para além disso, o sal recuperado parece ter um grande potencial de uso principalmente na desinfeção de águas para usos recreativos em piscinas e parques aquáticos da região.

V. PERSPETIVAS FUTURAS

Atendendo às dificuldades que surgiram devido ao atraso da montagem do sistema experimental associado ao cenário de pandemia, os resultados apresentados neste estudo não incluem os dados da última etapa de dessalinização solar, correspondente à dessalinização no tanque médio com tampa de vidro.

Com os dados obtidos neste estudo, as condições experimentais que se mostraram mais produtivas foram o tanque médio com tampa de policarbonato, em que durante 33 dias (entre setembro e outubro de 2021) se obteve 0,62 L/dia.m² de água com salinidade < 1 g/L e 6,1 kg de sal.

O processo da dessalinização solar da água da mina de sal-gema, com uma salinidade cerca de 10 vezes superior à da água do mar, nas condições experimentais testadas, revelou-se mais demorado do que o observado em trabalhos anteriores com água do mar (Rufuss *et al.*, 2016), em que a produtividade variou entre 2 a 4 L/dia.m², e os tanques eram cobertos com tampas de vidro.

Os resultados obtidos apontam para um grande potencial de utilização da água dessalinizada em usos urbanos exteriores na periferia da mina de sal-gema, considerando um raio de 600 m. Também o sal obtido revelou ter múltiplas utilizações a escala local e regional, podendo contribuir para potenciar a economia, numa lógica de circularidade.

Será importante, dar continuidade a este estudo, testando-se este tanque médio com a tampa que apresentar melhor produtividade (de vidro ou de policarbonato) durante um período experimental mais prolongado, de forma a perceber a variação da produtividade ao longo dos diversos meses do ano.

Finalmente, nesta fase estão a ser concluídos os últimos ensaios experimentais, que poderão ser conclusivos para delinear mais detalhadamente a estratégia futura de dessalinização solar da água da mina de sal-gema, de forma a que passe da fase experimental para a escala real.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2020). Bases do Plano Regional de Eficiência Hídrica: Região do Algarve. Volume I - Memória descritiva. Julho, 2020. Disponível em: https://apambiente.pt/_zdata/Apresentacoes/2020/PlanoRegEficienciaHidricaAlg/PlanoEH_Algarve_VFinal_26Ago2020__VOL_I.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2021.
- Agência Portuguesa do Ambiente (APA). (2021). RNC2050 – Roteiro para a Neutralidade Carbónica. Disponível em: <https://descarbonizar2050.apambiente.pt/>>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- Água Mãe. (2021). Produtos de Sal Marinho Tradicional. Disponível em: <http://www.aguamae.pt/>>. Acesso em: 15 out. 2021.
- Akash, B. A., Mohsen, M. S., Osta, O., & Elayan, Y. (1998). Experimental Evaluation of a Single-Basin Solar Still Using Different Absorbing Materials. *Renewable Energy*, 14, 307-310. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00082-2)
- Almond, R. E. A., Grooten, M., & Peterson, T. (2020). Living Planet Report 2020- *Bending the curve of biodiversity loss*. World Wildlife Fund, Gland, Switzerland. Disponível em: <https://c402277.ssl.cf1.rackcdn.com/publications/1371/files/original/ENGLISH-FULL.pdf?1599693362>>. Acesso em: 12 jan. 2021.
- Araújo, A. C. S. P. A. (2013). Contribuição para o Estudo da Viabilidade/Sustentabilidade da Dessalinização enquanto Técnica de Tratamento de Água. Dissertação, Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Portugal, 2013. <http://hdl.handle.net/10362/10203>
- Arjunan, T., Aybar, H., & Nedunchezian, N. (2009). Status of solar desalination in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13(9), 2408–2418. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.03.006>
- Ayoub, G. M., & Malaeb, L. (2012). Developments in solar still desalination systems: A critical review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 42(19), 2078-2112. <https://doi.org/10.1080/10643389.2011.574104>
- Baird, R. B., Rice, C., & Eaton, A. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 23rd. Water Environment Federation, American Public Health Association, American Water Works Association.
- Balan, R., Chandrasekaran, J., Shanmugan, S., Janarthanan, B., & Kumar, S. (2011). Review on passive solar distillation. *Desalination and water treatment*, 28(1-3), 217-238. <https://doi.org/10.5004/dwt.2011.1742>

Blaga, A. (1978). Use of plastics in solar energy applications. *Solar Energy*, 21, 331-338.
[https://doi.org/10.1016/0038-092X\(78\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0038-092X(78)90010-5)

Booking. (2021). Pesquisa por alojamentos turísticos no Algarve com piscina. Disponível em: https://www.booking.com/searchresults.pt-pt.html?label=gen173nr-1DCAEoggI46AdIM1gEaLsBiAEBmAEfuAEXyAEM2AED6AEB-AEDiAIBqAIDuALPzoWMBsACAdICJDY1NDY0OWY1LTJlOTctNDJjMC1iNjMwLTkzNjM4YjUyNTQ0MtgCBOACAQ&sid=23845a065dbbe9bc919dda25515b592a&aid=304142&lang=pt-pt&sb_lp=1&src=index&error_url=https%3A%2F%2Fwww.booking.com%2Findex.pt-pt.html%3Flabel%3Dgen173nr-1DCAEoggI46AdIM1gEaLsBiAEBmAEfuAEXyAEM2AED6AEB-AEDiAIBqAIDuALPzoWMBsACAdICJDY1NDY0OWY1LTJlOTctNDJjMC1iNjMwLTkzNjM4YjUyNTQ0MtgCBOACAQ%3Bsid%3D23845a065dbbe9bc919dda25515b592a%3Bsb_price_type%3Dtotal%3Bsig%3Dv1fJi44lx7%26%3B&ss=Algarve%2C+Portugal&is_ski_area=&ssne=Amesterd%C3%A3o&ssne_untouched=Amesterd%C3%A3o&checkin_year=&checkin_month=&checkout_year=&checkout_month=&group_adults=2&group_children=0&no_rooms=1&b_h4u_keep_filters=&from_sf=1&search_pageview_id=1e4973e7d0c9012c&ac_suggestion_list_length=5&ac_suggestion_theme_list_length=0&ac_position=0&ac_langcode=pt&ac_click_type=b&dest_id=1064&dest_type=region&place_id_lat=37.10658&place_id_lon=-8.283326&search_pageview_id=1e4973e7d0c9012c&search_selected=true®ion_type=province&ss_raw=algarve&nflt=hotelfacility%3D301. Acesso em: 02 nov. 2021.

Clayton, R. (2015). *A review of current knowledge: desalination for water supply*. Foundation for Water Research. Disponível em: <http://www.fwr.org/desal.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2021.

Decreto-Lei n.º 119/2019 de 21 de Agosto da Presidência do Conselho de Ministros. Diário da República: Série I, n.º 159 (2019). Disponível em: <https://dre.pt/home/-/dre/124097549/details/maximized>. Acesso em: 02 nov. 2021.

Dual Seal Glass (2021). Physical Properties. Disponível em: <https://dualsealglass.co.uk/glass-technology/physical-properties/>. Acesso em: 21 out. 2021.

Elsaid, K., Kamil, M., Sayed, E. T., Abdelkareem, M. A., Wilberforce, T., & Olabi, A. (2020). Environmental impact of desalination technologies: A review. *Science of The Total Environment*, 748, 141528.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141528>

- Eltawil, M. A., Zhengming, Z., & Yuan, L. (2009). A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(9), 2245-2262. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.06.011>
- Empresite. (2021). Piscinas Municipais em Faro. Início, Empresite Portugal, Piscinas Municipais, Faro. Disponível em <<https://empresite.jornaldenegocios.pt/Actividade/PISCINA-MUNICIPAL/concelho/FARO/>>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR). (2019). Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP), v.1.
- European Environmental Agency (EEA). (2019). Healthy environment, healthy lives: how the environment influences health and well-being in Europe. EEA Report. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/healthy-environment-healthy-lives>>. Acesso em: 15 jan. 2021.
- Fath, H. E. (1998). Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment. *Desalination*, 116(1), 45-56. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00056-3](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00056-3)
- Galiotto, G., Siviero, J., Branco, C. S., Facco, E. M. P., & Chilanti, G. (2020). Composição mineral de diferentes tipos de sais de cozinha. *DEMETRA: Alimentação, Nutrição & Saúde*, 15(1), e51430, dez. 2020. Disponível em: <<https://www.e-publicacoes.uerj.br/index.php/demetra/article/view/51430%3B>>. Acesso em: 22 out. 2021.
- Garcia-Rodriguez, L. (2002). Seawater desalination driven by renewable energies: A review. *Desalination* 143(2), 103–113. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(02\)00232-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(02)00232-1)
- Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: current and future challenges for better water supply sustainability. *Desalination*, 309, 197-207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2012.10.015>
- Gleick, P. H. (2006). Environment and Security: Water Conflict Chronology Version, 2006–2007. *The World's Water 2006-2007: The Biennial Report on Freshwater Resources*, p. 189.
- Gleick, P. H., Allen, L., Christian-Smith, J., Cohen, M. J., Cooley, H., Heberger, M., Morrison, J., Palaniappan, M. & Schulte, P. (2012). *The World's Water Volume 7: The Biennial Report on Freshwater Resources*. Island press. <https://doi.org/10.1007/978-1-59726-228-6>.
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2021). Dormidas (mensal) nos estabelecimentos de alojamento turístico por localização geográfica e tipo (alojamento turístico).

- Período de referência dos dados: setembro de 2021. Disponível em: <https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009808&contexto=bd&selTab=tab2>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- International Resource Panel, United Nations Environment Programme. Sustainable Consumption (UNEP), & Production Branch. (2011). *Decoupling natural resource use and environmental impacts from economic growth*. UNEP/Earthprint. Disponível em: <<https://www.resourcepanel.org/reports/decoupling-natural-resource-use-and-environmental-impacts-economic-growth>>. Acesso em: 09 jan. 2021.
- Jasmine Alimentos. (2014). Entenda a diferença entre sal refinado e sal marinho. Disponível em: <<https://www.jasminealimentos.com/wikinatural/sal-refinado-x-sal-marinho/>>. Acesso em: 28 out. 2021.
- Jones, E., Qadir, M., van Vliet, M. T., Smakhtin, V., & Kang, S. M. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of the Total Environment*, 657, 1343-1356. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.076>
- Kabeel, A. E., Khalil, A., Omara, Z.M., & Younes, M.M. (2012). Theoretical and experimental parametric study of modified stepped solar still. *Desalination*, 289, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.12.023>
- Khawaji, A. D., Kutubkhanah, I. K., & Wie, J. M. (2008). Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, 221(1-3), 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.067>
- Leitão, A. (2015). Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o séc. XXI. *Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting*, 1(2), 150-171. ISSN: 2183-3826
- Luz, A. B. D. & Lins, F. A. F. (2008). Rochas & minerais industriais: usos e especificações. 2ª ed. Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/522/1/Rochas%20Min.Ind.2a%20edicao%20%28Adao%20e%20F.Lins%29.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2021.
- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2, 23-44. Disponível em: <<https://emf.thirdlight.com/link/coj8yt1jogq8-hkhkq2/@/download/1>>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- Magagna, D., Hidalgo González, I., Bidoglio, G., Peteves S., Adamovic, M., Bisselink B., De Felice, M., De Roo, A., Dorati, C., Ganora, D., Medarac, H., Pistocchi, A., Van De Bund, W. & Vanham, D. (2019). *Water – Energy Nexus in Europe*, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019, ISBN 978-92-76-03385-1, <https://doi.org/10.2760/968197>

- Martins, M. A. G. (2021). Minas de sal-gema em Loulé: uma hipótese de habitar o vazio. Dissertação de Mestrado, Departamento de Arquitectura, Universidade de Évora. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10174/29186>>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- Mathioulakis, E., Belessiotis, V., & Delyannis, E. (2007). Desalination by using alternative energy: Review and state-of-the-art. *Desalination*, 203(1-3), 346-365. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.03.531>
- Mauter, M. S., & Fiske, P. S. (2020). Desalination for a circular water economy. *Energy & Environmental Science*, 13(10), 3180-3184. <https://doi.org/10.1039/d0ee01653e>
- Mavukkandy, M. O., Chabib, C. M., Mustafa, I., Al Ghaferi, A., & AlMarzooqi, F. (2019). Brine management in desalination industry: From waste to resources generation. *Desalination*, 472, 114187. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.114187>
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2012). A global assessment of the water footprint of farm animal products. *Ecosystems*, 15(3), 401-415. <https://doi.org/10.1007/s10021-011-9517-8>
- Mohamed, A. M., & Bicer, Y. (2019). Integration of pressure retarded osmosis in the solar ponds for desalination and photo-assisted chloralkali processes: Energy and exergy analysis. *Energy Conversion and Management*, 195, 630-640. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.032>
- Nassrullah, H., Anis, S. F., Hashaikeh, R., & Hilal, N. (2020). Energy for desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 491, 114569. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114569>
- Oceanlife. (2017). Oceanlife Water Salinity Converter. Disponível em: <<https://www.oceanlife.it/index.php/en/19-notizie/370-water-salinity-converter-en>>. Acesso em: 19 out. 2021.
- Omara, Z. M., Hamed, M. H., & Kabeel, A. E. (2011). Performance of finned and corrugated absorbers solar stills under Egyptian conditions. *Desalination*, 277(1-3), 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.04.042>
- Panagopoulos, A. (2020). Process simulation and techno-economic assessment of a zero liquid discharge/multi-effect desalination/thermal vapor compression (ZLD/MED/TVC) system. *International Journal of Energy Research*, 44(1), 473-495. <https://doi.org/10.1002/er.4948>
- Panagopoulos, A., & Haralambous, K. J. (2020). Environmental impacts of desalination and brine treatment - challenges and mitigation measures. *Marine Pollution Bulletin*, 161 (October 2020), 111773. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111773>
- Panchal, H. (2016). Performance Investigation on Variations of Glass Cover Thickness on Solar Still: Experimental and Theoretical Analysis. *Technology and Economics*

- of Smart Grids and Sustainable Energy*, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s40866-016-0007-0>
- Panchal, H., & Patel, P. (2016). Energy absorbing materials used in solar still for enhancement in distillate output: a review. *International Journal of Ambient Energy*, 37(5), 528-540. <https://doi.org/10.1080/01430750.2014.991839>
- Phadatare, M. K., & Verma, S. K. (2007). Influence of water depth on internal heat and mass transfer in a plastic solar still. *Desalination*, 217(1-3), 267-275. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.03.006>
- Phadatare, M. K., & Verma, S. K. (2009). Effect of cover materials on heat and mass transfer coefficients in a plastic solar still. *Desalination and Water Treatment*, 2(1-3), 254–259. <https://doi.org/10.5004/dwt.2009.290>
- Piatti, T. M., & Rodrigues, R. A. F. (2005). Plásticos: características, usos, produção e impactos ambientais. Univesidade Federal de Alagoas, Série: Conversando sobre Ciências em Alaboas. Disponível em: <http://www.usinaciencia.ufal.br/multimidia/livros-digitais-cadernos-tematicos/Plasticos_caracteristicas_usos_producao_e_impactos_ambientais.pdf>. Acesso em: 23 out. 2021.
- Qadir, M. & Smakhtin, V. (2018). *Where the water is?* in Project Syndicate (17 May 2018). Disponível em: <www.project-syndicate.org/commentary/tappingunconventional-freshwater-sources-by-manzoor-qadir-and-vladimir-smakhtin-2018-05?barrier=accesspaylog>. Acesso em: 09 jan. 2021.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.02.008>
- Ramalho, A. (2019). O Algarve no Contexto Nacional. Os Nossos Campeões: Summit do Algarve, Novo Banco. Disponível em: <https://barlavento.sapo.pt/wp-content/uploads/2019/02/Apresenta%C3%A7%C3%A3o-Dr-AR-Summit-Algarve_v15022019-1.pdf>. Acesso em: 11 out. 2021.
- Reali, M. & Modica, G. (2008). Solar stills made with tubes for sea water desalting. *Desalination*, 220 (2008), 626-632. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.061>
- Ribeiro, S. (2020). Salinas de Castro Marim: fui experimentar o Spa Salino Água Mãe - Algarve. Disponível em: <<https://www.viajecomigo.com/2020/10/12/spa-salinas-de-castro-marim-algarve/>>. Acesso em: 30 out. 2021.
- Rufuss, D. D. W., Iniyani, S., Suganthi, L., & Davies, P. A. (2016). Solar stills: A comprehensive review of designs, performance and material advances. *Renewable*

- and Sustainable Energy Reviews*, 63, 464-496.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.068>
- Saadat, A. H. M., Islam, M. S., Islam, M. S., Parvin, F. & Sultana, A. (2017). Desalination Technologies for Developing Countries: A Review. *Journal of Scientific Research*. 10 (1), 77-97. <http://dx.doi.org/10.3329/jsr.v10i1.33179>
- Samee, M., Mirza, U., Majeed, T., and Ahmad, N. (2007). Design and performance of a simple single basin solar still. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11(3), 543–549. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.03.003>
- Singh, H. N., & Tiwari, G. N. (2004). Monthly performance of passive and active solar stills for different Indian climatic conditions. *Desalination*, 168, 145-150. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.06.180>
- Sood, A., & Smakhtin, V. (2014). Can desalination and clean energy combined help to alleviate global water scarcity?. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 50(5), 1111-1123. <https://doi.org/10.1111/jawr.12174>
- Stigter, T. Y., Varanda, M., Bento, S., Nunes, J. P., & Hugman, R. (2017). Combined Assessment of Climate Change and Socio-Economic Development as Drivers of Freshwater Availability in the South of Portugal. *Water Resour Manage*, 31, 609–628. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-0994-y>
- Sydney Desalination Plant. (2021). Disponível em: <<https://www.sydneydesal.com.au/how-we-do-it/infrastructure/>>. Acesso em: 03 nov. 2021.
- Teixeira, P. M. M. (2017). O Diapiro de Loulé, Estudo Geofísico do Sal-gema da Mina Campina de Cima. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Geologia. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/105739>>. Acesso em: 18 out. 2021.
- Tleimat, B. W., & Howe, E. D. (1969). Comparison of plastic and glass condensing covers for solar distillers. *Solar Energy*, 12(3), 293–304. [https://doi.org/10.1016/0038-092x\(69\)90044-9](https://doi.org/10.1016/0038-092x(69)90044-9)
- Tripadvisor. (2021). Spas & Wellness Centers in Algarve. Disponível em: <<https://www.tripadvisor.com/Attractions-g189111-Activities-c40-Algarve.html>>. Acesso em: out. 2021.
- UNESCO/ICES/SCOR/IAPSO (1981). Background papers and supporting data on the international equation of state of seawater 1980. Disponível em: <<http://unesdoc.unesco.org/images/0004/000473/047363eb.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2021.

- United Nations Children's Fund (UNICEF) & World Health Organization (WHO). (2019). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities. New York: United Nations Children's Fund (UNICEF) and World Health Organization, 2019. Disponível em: <<https://data.unicef.org/resources/progress-drinking-water-sanitation-hygiene-2019/>>. Acesso em: 07 jan. 2021.
- United Nations World Water Assessment Programme (UNWWAP). (2014). *The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy*. Paris, UNESCO. Disponível em: <<https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/1714Water%20Development%20Report%202014.pdf>>. Acesso em: 05 jan. 2021.
- United Nations World Water Assessment Programme (UNWWAP). (2020). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*, Paris, UNESCO, 219 pages. ISBN: 978-92-3-100371-4
- Visit Algarve. (2021). Piscinas Municipais. Disponível em: <<https://www.visitalgarve.pt/pt/pesquisa-equipamento.aspx?page=1&keyword=piscinas%20municipais>>. Acesso em: 02 nov. 2021.
- Vitao. (2020). Diferenças entre sal refinado e sal marinho. Disponível em: <<https://ser.vitao.com.br/diferencas-entre-sal-refinado-e-sal-marinho/>>. Acesso em: 13 out. 2021.
- Wallis, P. J., Ward, M. B., Pittock, J., Hussey, K., Bamsey, H., Denis, A., Kenway, S. J., King, C. W., Mushtaq, S., Retamal, M. L. & Spies, B. R. (2014). The water impacts of climate change mitigation measures. *Climatic change*, 125(2), 209-220. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1156-6>
- Warsinger, D. M., Mistry, K. H., Nayar, K. G., Chung, H. W., & Lienhard, J. H. (2015). Entropy generation of desalination powered by variable temperature waste heat. *Entropy*, 17(11), 7530-7566. <https://doi.org/10.3390/e17117530>