

WHITE PAPER

MARÉ CLARA

*Sistema Híbrido de Micro-Dessalinização Costeira de Baixo Custo
Energia solar, recuperação térmica, controlo inteligente e valorização da
salmoura*

Uma proposta de investigação aplicada para a resiliência hídrica do litoral português

Autor: Augustus Veritas

Autor	Augustus Veritas
Data	26 de Abril de 2026

Este white paper propõe uma arquitectura híbrida e modular para dessalinização de água do mar em pequena e média escala, orientada para cenários costeiros com pressão crescente sobre os recursos hídricos. A proposta combina osmose inversa, aproveitamento de calor de baixo grau, energia solar, monitorização inteligente e valorização da salmoura.

Resumo executivo

O presente white paper apresenta o conceito MARÉ CLARA: um sistema híbrido de micro-dessalinização costeira de baixo custo, desenhado para responder à crescente pressão sobre os recursos hídricos em regiões litorais portuguesas. A proposta parte de uma constatação simples: a água do mar é abundante, mas a sua conversão em água potável continua limitada por custos energéticos, desgaste de materiais, complexidade operacional e impacto da salmoura residual. Em vez de procurar uma solução única e milagrosa, este documento defende uma arquitectura integrada e localmente adaptada.

Tese central: o avanço decisivo poderá não residir numa única tecnologia revolucionária, mas numa integração elegante entre membranas, calor de baixo grau, energia solar, controlo inteligente e aproveitamento do concentrado salino.

1. O contexto: água, energia e resiliência territorial

A dessalinização já deixou de ser uma hipótese remota em Portugal. No Algarve, a implementação da Estação de Dessalinização de Água do Mar integra a estratégia de reforço da oferta hídrica e de adaptação à escassez de água [2]. Em paralelo, a IEA destaca que as tecnologias de membrana, em particular a osmose inversa, passaram a dominar a capacidade global de dessalinização graças à sua maior eficiência relativa quando comparada com processos térmicos clássicos [1].

Todavia, a maturidade industrial não significa resolução plena do problema. A dessalinização continua a enfrentar obstáculos conhecidos: custo energético, fouling, pré-tratamento exigente, exposição a eventos de contaminação marinha e gestão ambiental da salmoura. O ponto crítico, portanto, não é apenas “dessalinizar”, mas fazê-lo com menor custo, maior robustez e melhor integração territorial.

2. O problema mal formulado da dessalinização

Grande parte do debate público trata a dessalinização como um mero desafio de separação físico-química: retirar o sal e obter água doce. Essa formulação é incompleta. O verdadeiro problema é sistémico. Envolve energia disponível no local, materiais, manutenção, qualidade variável da água captada, logística de distribuição e destino económico e ecológico do concentrado salino.

Quando a pergunta é reformulada desta maneira, surge um novo campo de possibilidades: talvez o passo em frente não esteja numa membrana milagrosa, mas numa arquitectura híbrida que faça cada componente trabalhar naquilo em que é mais eficiente.

3. Proposta MARÉ CLARA

O conceito MARÉ CLARA propõe um sistema modular para pequena e média escala, orientado para zonas costeiras, explorações agro-industriais, empreendimentos turísticos, portos, comunidades descentralizadas e cenários de apoio em períodos de seca. O sistema seria composto por cinco blocos integrados:

- Pré-tratamento robusto e adaptativo, desenhado para reduzir sólidos, matéria orgânica e riscos de fouling.
- Núcleo de osmose inversa como etapa principal de produção de água.
- Etapa térmica auxiliar, alimentada por calor solar ou calor residual de baixo grau, para recuperação adicional de água e tratamento do concentrado.
- Controlo inteligente, com lógica preditiva para pressão, limpeza, qualidade da água e eficiência operacional [4][6].
- Valorização parcial da salmoura, convertendo um passivo em fluxo com potencial económico [3][5].

Matriz estratégica da proposta

Dimensão	Problema actual	Resposta proposta
Energia	A dessalinização continua dependente de energia eléctrica e sensível ao custo energético.	Combinação de osmose inversa com recuperação de energia, solar e calor residual de baixo grau.
Operação	Fouling, incrustação e falhas no pré-tratamento degradam desempenho e elevam custos.	Pré-tratamento robusto e controlo preditivo para limpeza, pressão e qualidade de operação.
Salmoura	O concentrado salino é muitas vezes tratado apenas como passivo ambiental.	Valorização parcial da salmoura: recuperação adicional de água, sais e usos biotecnológicos de nicho.
Escala	Mega-centrais nem sempre servem pequenas comunidades ou usos distribuídos.	Módulo replicável para zonas costeiras, turismo, agro-indústria e aplicações descentralizadas.

4. Hipótese de investigação

A hipótese central deste white paper é a seguinte: um sistema híbrido que combine osmose inversa, recuperação energética, calor de baixo grau e estratégias de valorização da salmoura

poderá oferecer melhor desempenho técnico-económico do que uma solução isolada de osmose inversa em pequena e média escala [6][7].

O ganho esperado não depende apenas de reduzir o consumo específico de energia. Depende também de diminuir limpezas não planeadas, aumentar vida útil operacional, estabilizar desempenho em condições variáveis e criar usos úteis para o concentrado salino.

5. Porque esta abordagem pode ser relevante para Portugal

Portugal reúne condições particularmente interessantes para uma linha de investigação desta natureza. Existem regiões costeiras com stress hídrico sazonal, boa disponibilidade solar, polos industriais com potencial de calor residual e sectores económicos — turismo, agricultura intensiva, logística portuária — onde a segurança hídrica pode tornar-se um factor competitivo.

Além disso, uma abordagem distribuída complementa, e não concorre directamente com, grandes infra-estruturas centralizadas. Uma mega-estação serve uma parte do problema; módulos menores e robustos podem servir nichos onde a centralização é mais cara, lenta ou pouco flexível.

6. Linhas técnicas prioritárias

- Optimização do pré-tratamento para prolongar vida útil das membranas.
- Integração de recuperação de energia e painéis solares em regime híbrido.
- Uso de calor residual ou solar térmico para etapas complementares de concentração e recuperação de água.
- Aplicação de modelos de IA para previsão de fouling e gestão da limpeza [4][6].
- Ensaio de valorização da salmoura: sais, recuperação adicional de água e biotecnologia halotolerante [3][5].

7. Benefícios esperados

Em termos estratégicos, a proposta poderá gerar quatro benefícios principais. Primeiro, reforço da resiliência hídrica local. Segundo, redução do custo total por metro cúbico em aplicações bem escolhidas. Terceiro, melhoria da circularidade material e ambiental. Quarto, criação de uma base tecnológica exportável para outros contextos costeiros de pequena e média escala.

A elegância desta abordagem está em usar energia nobre apenas onde ela é indispensável, e energia de menor qualidade onde esta ainda tem valor. Em vez de desperdiçar calor, aproveita-se calor. Em vez de rejeitar toda a salmoura, tenta-se extrair utilidade. Em vez de operar às cegas, mede-se e prevê-se.

8. Principais riscos e limites

Este white paper não apresenta a proposta como panaceia. Há riscos objectivos: complexidade excessiva do sistema, ganhos económicos insuficientes em muito pequena escala, manutenção mais difícil do que o previsto e valorização da salmoura com retorno limitado fora de contextos específicos. A própria literatura recente sublinha que muitas soluções de valorização ainda permanecem em fase piloto [3].

A prudência técnica, porém, não invalida a oportunidade. Antes pelo contrário: indica que o caminho correcto é ensaiar, medir, validar e só depois escalar.

9. Roteiro de desenvolvimento

- Fase 1 — Modelação técnico-económica e desenho conceptual do sistema.
- Fase 2 — Construção de bancada experimental com água salina de composição controlada.
- Fase 3 — Ensaio de osmose inversa, pré-tratamento e recuperação energética.
- Fase 4 — Integração da etapa térmica auxiliar e dos algoritmos de controlo.
- Fase 5 — Avaliação da salmoura e cenários de valorização.
- Fase 6 — Demonstração piloto em contexto costeiro português.

10. Em que difere a proposta MARÉ CLARA da solução actualmente prevista para o Algarve

A solução actualmente prevista para o Algarve assenta, segundo a informação pública disponível, numa dessalinizadora de água do mar baseada em osmose inversa, equipada com sistemas de recuperação de energia e complementada por produção fotovoltaica. Trata-se de uma infra-estrutura moderna e energeticamente optimizada, mas centrada numa lógica convencional de produção de água potável em grande escala.

A proposta MARÉ CLARA distingue-se por avançar para um paradigma mais integrado, modular e experimental. Em vez de se limitar a uma linha principal de osmose inversa com optimização energética, propõe uma arquitectura híbrida, combinando osmose inversa, eventual etapa térmica auxiliar alimentada por calor solar ou residual, controlo inteligente da operação e valorização parcial da salmoura. O foco deixa de estar apenas na produção de água e passa a incluir também a redução de custos operacionais em pequena e média escala, a robustez local e a circularidade do sistema.

Outra diferença essencial reside na escala e finalidade. A infraestrutura do Algarve foi concebida como resposta regional estratégica, funcionando sobretudo como origem complementar de abastecimento em períodos de escassez. Já o conceito MARÉ CLARA foi pensado para aplicações descentralizadas e replicáveis, como pequenas comunidades costeiras, explorações agrícolas, instalações turísticas, portos ou unidades industriais com acesso a calor residual.

Em síntese, pode dizer-se que a solução do Algarve representa uma dessalinização eficiente e prudente, enquanto a proposta MARÉ CLARA pretende explorar uma dessalinização híbrida, circular e adaptável, orientada não apenas para produzir água, mas para repensar o sistema técnico e económico em que essa água é produzida.

13. Conclusão

O futuro da dessalinização de baixo custo talvez não nasça de uma máquina única e milagrosa, mas de uma arquitectura inteligente que una diferentes princípios físicos, materiais e lógicas de operação. O projecto MARÉ CLARA parte precisamente dessa visão: transformar a dessalinização numa conversa harmoniosa entre pressão, calor, dados e circularidade material.

Num tempo em que a água se torna uma variável estratégica de soberania, coesão territorial e estabilidade económica, pensar sistemas híbridos e distribuídos é mais do que um exercício técnico. É uma forma de preparar o país para um futuro menos dependente do imprevisto e mais capaz de fazer da escassez um problema tratável com engenho, rigor e visão.

11. Matriz de Viabilidade Tecno-Económica para Portugal

A viabilidade deste tipo de projecto em Portugal varia significativamente com a geografia, a escala, o perfil de consumo, o acesso a energia e a disponibilidade de alternativas hídricas. A matriz seguinte sintetiza uma leitura estratégica preliminar para diferentes contextos nacionais.

12. Potencial de internacionalização e exportação - uma oportunidade made in Portugal

A proposta MARÉ CLARA pode ser enquadrada não apenas como projecto de investigação aplicada, mas como embrião de uma solução tecnológica desenvolvida em Portugal com vocação de exportação. O posicionamento mais promissor não está na competição directa com mega-centrais globais, mas na criação de sistemas modulares, híbridos e inteligentes, dirigidos a mercados costeiros com escassez hídrica, turismo intensivo, pequenas ilhas, portos, marinas, agro-indústria de alto valor e instalações industriais com acesso a calor residual. Portugal reúne condições particularmente interessantes para essa via: uma extensa fachada atlântica, boa disponibilidade solar, pressão hídrica crescente em algumas regiões e um ecossistema emergente de inovação ligado à economia do mar [8][9].

Existe ainda um argumento industrial a favor desta ambição. Portugal não parte do zero no domínio do tratamento de água. A actividade de empresas nacionais na área da dessalinização e da gestão hídrica, incluindo projectos já implementados no Algarve para usos turísticos, mostra que há base técnica para engenharia, integração, operação e manutenção. Ao mesmo tempo, a construção da dessalinizadora do Algarve oferece ao país um contexto de demonstração e aprendizagem operacional que pode funcionar como vitrine tecnológica. Se esta experiência for prolongada por uma linha própria de desenvolvimento em sistemas modulares e híbridos, Portugal poderá posicionar-se como fornecedor de soluções adaptadas a contextos atlânticos e mediterrânicos, em vez de depender apenas da importação de tecnologia [2][10].

O verdadeiro valor exportável poderá residir menos na venda isolada de equipamentos e mais na oferta de um pacote integrado: concepção do sistema, automação, integração com energia solar, eventual aproveitamento de calor residual, gestão digital da operação, manutenção remota e modelos simplificados de valorização da salmoura. Em termos estratégicos, esta abordagem permitiria ligar investigação, demonstração em território nacional, industrialização progressiva e internacionalização. Dito sem solenidade excessiva: em vez de exportar apenas ideias brilhantes que acabam a apanhar pó, Portugal poderia exportar uma tecnologia concreta, afinada pelo mar, pela seca e pela inteligência prática [8][11].

Contexto	Viabilidade	Leitura prática
Algarve urbano / abastecimento estratégico	Alta	Já existe decisão pública e investimento significativo para reforçar a resiliência hídrica regional. A lógica é estratégica e de segurança de abastecimento, mais do que de água barata para uso indiferenciado.
Alentejo litoral costeiro	Média	Pode fazer sentido em pontos localizados com pressão hídrica, procura turística ou industrial e boa integração energética. Sem esse enquadramento, a economia torna-se mais apertada.
Madeira	Média a Alta	O contexto insular favorece soluções modulares e estratégicas, sobretudo onde a autonomia hídrica e energética tenha valor elevado.
Açores	Média	A viabilidade existe em aplicações localizadas, mas depende muito da escala, da dispersão territorial e da robustez operacional do sistema.
Turismo costeiro de grande escala	Alta	A continuidade do abastecimento pode justificar investimento superior, especialmente em zonas de forte pressão sazonal sobre a água.
Turismo de pequena / média dimensão	Média	Pode ser viável com módulos compactos e apoio fotovoltaico, mas o peso do investimento exige procura previsível e boa taxa de utilização.
Agricultura intensiva de alto valor	Média	Faz mais sentido como complemento para culturas de maior valor económico e elevada sensibilidade à disponibilidade de água.
Agricultura extensiva / baixo valor	Baixa	Em geral, a conta não fecha. A água dessalinizada tende a ser demasiado cara para usos agrícolas de margem curta.
Indústria costeira com calor residual	Alta	É um dos cenários mais promissores para uma arquitectura híbrida, pois o calor residual pode melhorar a eficiência global e a viabilidade económica.
Portos, zonas logísticas e plataformas técnicas costeiras	Média a Alta	São contextos em que autonomia, previsibilidade de consumo e integração energética local podem favorecer soluções modulares.

Pequenas comunidades costeiras	Média	A viabilidade depende da simplicidade da operação, da automação e da manutenção reduzida. Sistemas demasiado complexos perdem atractividade.
Uso generalizado em todo o país	Baixa	Não é uma solução universal para Portugal. Onde existam alternativas convencionais mais baratas, essas continuarão a ter prioridade económica.

14. Referências essenciais

- [1] International Energy Agency (IEA). Wired for water: how electrification is transforming desalination. 2024.
- [2] Águas do Algarve. Cerimónia de assinatura do contrato misto para a concepção, construção e exploração do sistema de dessalinização na Região do Algarve. 4 Nov. 2024.
- [3] Morgante C. et al. A global outlook of the desalination industry and state-of-the-art in brine valorisation. *Desalination*, 2025.
- [4] El Allaoui A. et al. A bibliometric review of smart technologies: IoT and AI for desalination. *Desalination*, 2025.
- [5] Rotter A. et al. Innovative solutions for valorization of desalination brine. *Circular Economy*, 2025.
- [6] Tabsissi K. et al. Current insights and future outlooks of energy-efficient desalination technologies. *Results in Engineering*, 2026.
- [7] Sun Q. et al. Optimized design of a membrane and thermal hybrid desalination system. *Desalination*, 2025.
- [8] AICEP. AICEP promove inovação nacional no âmbito da economia azul. 2025.
- [9] Portugal Global / Blue Economy Cluster. Blue Economy Cluster. 2025.
- [10] Bondalti Water. Bondalti Water implementa dessalinização no Pestana Hotel Group. 2024.
- [11] FCT. Sustainable Blue Economy Partnership. 2025.