

XI-839 - PROJETO DE IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO DE SISTEMA COMPACTO DE OSMOSE REVERSA PARA DESSALINIZAÇÃO EM FERNANDO DE NORONHA: SUSTENTABILIDADE E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Artur Ricardo Macedo dos Santos⁽¹⁾

Engenheiro Civil (UFRN) com experiência em gestão de recursos hídricos, tendo atuado em vários cargos de Gestão, em 11 anos, na COMPESA. Especialista em dessalinização e reuso de água pela Universidade de Alicante, é Coordenador Adjunto da Câmara Técnica de Dessalinização e Reuso da ABES. Liderou o projeto de dessalinização em Fernando de Noronha, eliminando o racionamento na ilha. Capacitação em Gestão Integrada de Projetos de Dessalinização (BID) e em monitoramento climático e resiliência (Banco Mundial).

Nyadja Menezes Rodrigues Ramos⁽²⁾

Engenheira Civil, Doutora em Recursos Hídricos e Tecnologia Ambiental e Mestre em Gestão Pública para o Desenvolvimento do Nordeste. Possui MBA em Estratégia Empresarial, pós-graduações em Gestão Ambiental e Planejamento de Cidades, e formação em Liderança. Docente da UNIFAVIP/Wyden. Assessora Executiva COMPESA. Gestora da Obra lote 5B da Adutora do Agreste.

Anderson Luis Fernandes Ferreira⁽³⁾

Engenheiro de Produção Mecânica pela Universidade Paulista (UNIP), a 12 anos trabalhando na Danfoss, inicialmente com atuação nos segmentos de Refrigeração Comercial/Industrial e Automação Industrial com ênfase nos controles de fluidos líquidos e gasosos e nos últimos anos atuando na divisão de Bombas de Alta Pressão para Água, com aplicação na Dessalinização de Água do Mar por Osmose Reversa e Sistemas de Nebulização de Água em Alta Pressão com foco na alta eficiência energética e redução de CO₂.

Karina de Moura Costa Alencar⁽⁴⁾

Economista (PUC-Rio), Mestre em Engenharia Ambiental e Sanitária (UERJ) e Pós-graduada em Relações Internacionais (PUC-Rio). Especialista em gerência de contratos e viabilidade de negócios, com dissertação publicada sobre a viabilidade do reuso de água. Atualmente é Chefe de Departamento Administrativo Financeiro de Projetos Especiais na CEDAE-RJ. Atua também como Conselheira do CERHI-RJ e Coordenadora da CT de Reuso e Dessalinização da ABES e Diretora da ABES-Rio.

Endereço⁽¹⁾: Rua Amália Bernardino de Sousa, 532, Apto 3101 Acqua – Boa Viagem - Recife - Pernambuco - CEP: 51021-150 - Brasil - Tel.: +55 (81) 99541-3300 - e-mail: arturicardo@compesa.com.br.

RESUMO

Ilhas oceânicas, como Fernando de Noronha (Brasil), enfrentam severa escassez hídrica devido a fontes limitadas, alta variabilidade climática e pressões socioeconômicas, notadamente do turismo. Este artigo descreve o projeto, o dimensionamento e a operação inicial de um sistema conteinerizado de osmose reversa de água do mar (SWRO), implementado para eliminar o histórico racionamento de água na ilha. A abordagem enfatiza a sustentabilidade e a eficiência energética, demonstrando o uso de bombas de pistão axial de alta eficiência, tipicamente > 90% e dispositivos de recuperação de energia (ERDs isobáricos com eficiência de recuperação > 95-98%) para atingir consumos específicos de energia (SEC) na faixa de 2,4–2,5 kWh/m³, comparáveis ao estado-da-arte internacional. São apresentados detalhes de pré-tratamento, configuração de membranas, materiais resistentes à corrosão (Super Duplex) e estratégias de automação baseadas em CLP (Controlador Lógico Programável) e Telemetria, bem como resultados operacionais (vazão, qualidade do permeado, atendendo portaria GM/MS N° 888/2021 e ausência de incrustações significativas). A análise técnico-econômica inclui CAPEX de R\$ 15 milhões e um custo total da água estimado em R\$ 4,5–5,0/m³, com destaque para benefícios socioambientais e potencial de replicabilidade em outras ilhas e regiões remotas. Conclui-se que o modelo Noronha (dessalinização modular, conteinerizada, com foco em eficiência) representa uma referência sólida para dessalinização sustentável, oferecendo diretrizes técnicas e gerenciais para projetos similares.

PALAVRAS-CHAVE: Dessalinização; Osmose Reversa; Eficiência Energética; Sistema Conteinerizado; CAPEX/OPEX.

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água potável em regiões insulares é um desafio crescente devido à escassez de recursos hídricos locais e ao alto custo de transporte de água de outras localidades. Fernando de Noronha, um arquipélago oceânico brasileiro, depende historicamente de chuvas e aquíferos limitados, enfrentando longos períodos de racionamento de água. Tecnologias de dessalinização de água do mar têm se mostrado essenciais para suprir a demanda em cenários de escassez hídrica, aliviando a pressão sobre fontes convencionais e aquíferos sensíveis (Dashtpour & Al-Zubaidy, 2012; Thomson et al., 2002).

Nos últimos anos, sistemas de osmose reversa em contêiner, unidades SWRO (Osmose Reversa de Água do Mar) conteinerizadas, vêm ganhando destaque como solução rápida e eficaz para abastecimento em ilhas e locais remotos. Nesse conceito, todos os equipamentos necessários – pré-tratamento, bombas, membranas, recuperadores de energia e sistemas de controle – são montados em um contêiner marítimo padrão, facilitando o transporte e simplificando a instalação em campo (SETApht, 2024). A modularidade inerente permite escalabilidade por adição de módulos, bem como manutenções isoladas sem interromper o fornecimento. Essas características são valiosas em regiões de difícil acesso, onde obras civis extensas são indesejáveis e a logística de implantação precisa ser otimizada.

Adicionalmente, a visão de roteiro de projeto aqui adotada parte da avaliação de viabilidade e seleção de local, contemplando desde o estudo de logística e infraestrutura até a análise ambiental e social, coerentes com boas práticas de gerenciamento. O aprofundamento no mapeamento da água bruta, incluindo caracterização físico-química e biológica, foi essencial para delimitar a confiabilidade do pré-tratamento e o desempenho das membranas de RO. A reutilização do contêiner de 40 pés reforça o aspecto de economia circular, pois essas estruturas podem ter múltiplas “vidas” ao longo do ciclo de uso (El Mercantil, 2024).

Para viabilizar a dessalinização em Fernando de Noronha com custos e impactos aceitáveis, adotou-se então um sistema RO compacto e conteinerizado, com foco na eficiência energética e sustentabilidade. O consumo energético é tradicionalmente um dos principais entraves econômico-ambientais da dessalinização (Srinivasan et al., 2021; Danfoss, 2024). Na última década, porém, avanços significativos permitiram reduzir drasticamente o consumo específico de energia em plantas SWRO (Lagartos & Gallego, 2023). O uso de bombas de alta pressão de alta eficiência e de dispositivos de recuperação de energia (ERDs) isobáricos tornou-se padrão nas instalações modernas, podendo recuperar 90–98% da energia de pressão do rejeito (Danfoss, 2021). Tais inovações reduziram o consumo específico típico de cerca de 4–6 kWh/m³ (sistemas antigos sem ERD) para 2–3 kWh/m³ nas plantas atuais de porte considerável (Lagartos & Gallego, 2023; Thomson et al., 2002). Em projetos de ponta, já se reportam valores próximos a 2,0 kWh/m³ – por exemplo, uma instalação nas Ilhas Canárias (DESALRO 2.0) atingiu 1,86 kWh/m³, combinando membranas mais permeáveis e bombas de pistão axial (Danfoss, 2024).

A sustentabilidade do projeto também envolve a gestão adequada dos subprodutos, principalmente a salmoura concentrada. Embora o descarte no oceano seja a prática mais comum, ele deve seguir diretrizes ambientais rigorosas para minimizar impactos no ecossistema marinho, envolvendo estudos de dispersão, definição de zonas de mistura e monitoramento contínuo, conforme princípios estabelecidos em normativas como as resoluções CONAMA no Brasil e práticas internacionais (FONTE: PESQUISA - BRINE MANAGEMENT, IDA, CONAMA). A otimização do uso de produtos químicos no pré e pós-tratamento também é um pilar da gestão sustentável.

Neste artigo detalha o processo de projeto, com ênfase no dimensionamento do sistema SWRO conteinerizado de Fernando de Noronha, descreve sua implementação e apresenta uma avaliação crítica da performance operacional inicial com base em dados reais. A integração dessas etapas, desde a concepção até a operação, segue um roteiro que inclui decisões sobre pré-tratamento (com filtração em meio ou membranas), seleção de tecnologia RO, estratégia de recuperação de energia, especificação de materiais e automação. Discutem-se os custos de capital (CAPEX) e operacionais (OPEX), a análise de retorno sobre investimento (ROI) sob uma ótica socioambiental e de segurança hídrica, e as lições aprendidas. Por fim, propõem-se diretrizes técnicas que validam este modelo como uma solução replicável para outros contextos insulares ou costeiros remotos que enfrentam desafios de segurança hídrica.

OBJETIVOS

O objetivo central é avaliar criticamente a implementação, o dimensionamento e a performance operacional inicial do sistema conteinerizado de dessalinização por osmose reversa (SWRO) em Fernando de Noronha, com ênfase em:

- Eficiência Energética: Verificar o cumprimento da meta de SEC $\leq 2,5 \text{ kWh/m}^3$ e comparar com benchmarks internacionais de sistemas SWRO de porte médio.
- Qualidade da Água Produzida: Confirmar a conformidade com a Portaria de Potabilidade brasileira (Portaria GM/BS N° 888/2021) e avaliar possíveis riscos de incrustação e fouling.
- Análise Técnico-Econômica: Apresentar o CAPEX (R\$ 15 milhões), OPEX (custos de energia, insumos, manutenção) e estimar o custo da água, bem como o retorno socioambiental do investimento.
- Avaliação da Sustentabilidade: Analisar as práticas de gestão de salmoura e otimização do uso de químicos frente às melhores práticas e regulamentações ambientais aplicáveis.
- Validação e Replicabilidade: Propor diretrizes de projeto e operação para contextos insulares, discutindo a escalabilidade, a modularidade e a adoção de melhores práticas internacionais em sistemas conteinerizados de dessalinização.

De modo transversal a esses objetivos, estabelece-se também um roteiro de fases (identificação da viabilidade, seleção do local, definição da capacidade e pré-tratamento, engenharia de detalhamento, instalação, automação e O&M sustentáveis), servindo como guia metodológico para conceber e conduzir projetos similares.

METODOLOGIA

Adotou-se uma metodologia de engenharia integrada, combinando análise de dados locais, consulta à literatura internacional, simulação computacional de processo, projeto detalhado, sugestão de fabricação/montagem, comissionamento e monitoramento da operação inicial. As etapas seguiram a sequência descrita abaixo:

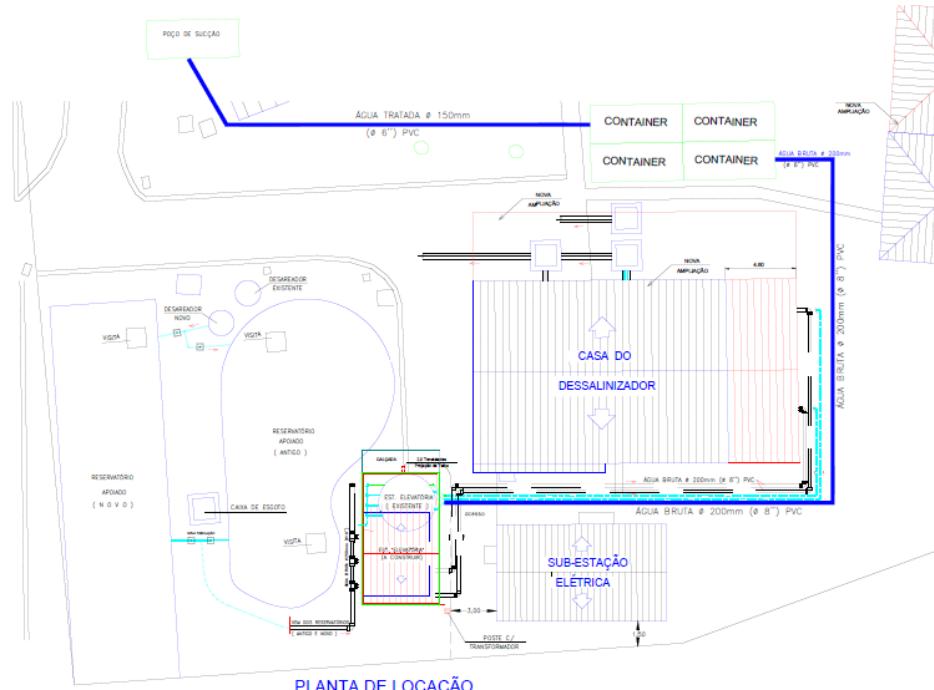


Figura 1: Localização de Fernando de Noronha e do sistema de dessalinização.
(Fonte: Autores)

3.1. Caracterização da Água Bruta e Definição dos Requisitos de Projeto

3.1.1. Programa de amostragem e métodos analíticos

Durante 12 meses (março 2022 – fevereiro 2023) foram coletadas 24 amostras compostas na captação submersa da Praia do Boldró, cobrindo as estações de maré viva/morta e extremos pluviométricos. As análises seguiram o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 24.^a ed. (SMEWW): pH (SM 4500-H⁺ B), alcalinidade (SM 2320 B), turbidez (SM 2130 B), SDI₁₅ (ASTM D-4189), íons maiores por IC (SM 4110 C), metais por ICP-OES (SM 3120 B) e TOC por combustão catalítica (SM 5310 B). A desinfecção foi verificada por contagem total de coliformes (SM 9223 B).

Tabela 1: Caracterização da água bruta (água do mar)

Parâmetro	Faixa	Média	Límite metodológico/Referência
Salinidade (PSU)	34 – 37	35	SM 2520 B
Temperatura (°C)	25 – 30	27	Termometria in situ
pH	7,5 – 8,3	8,0	SM 4500-H ⁺ B
Turbidez (NTU)	0,1 – 5,0	<1,0	SM 2130 B
SDI ₁₅	2,8 – 5,1	4,2	ASTM D-4189
TOC (mg L ⁻¹)	0,5 – 2,0	1,0	SM 5310 B
Alcalinidade (mg L ⁻¹ CaCO ₃)	110 – 135	122	SM 2320 B
Ca ²⁺ (mg L ⁻¹)	350 – 830	620	SM 3120 B
Mg ²⁺ (mg L ⁻¹)	1 100 – 2 150	1 430	SM 3120 B
SO ₄ ²⁻ (mg L ⁻¹)	2 600 – 2 900	2 720	SM 4110 C
Cl ⁻ (mg L ⁻¹)	18 000 – 20 000	19 100	SM 4110 C
SiO ₂ (mg L ⁻¹)	0,8 – 2,1	1,5	SM 4500-Si E
Fe (mg L ⁻¹)	<0,10	<0,10	SM 3120 B
Mn (mg L ⁻¹)	<0,02	<0,02	SM 3120 B

Tais resultados confirmam uma água marinha típica, de baixa matéria orgânica e turbidez, mas com SDI₁₅ próximo ao limite de 5, exigindo pré-tratamento em ultrafiltração UF para proteger as membranas de OI.

3.1.2 Projeção de demanda hídrica (2023 – 2033)

A demanda foi estimada somando a população residente projetada e a carga turística média diária, segundo a equação:

$$Q_d = \frac{(P_{\text{res}} \cdot C_{\text{res}}) + (P_{\text{tur}} \cdot C_{\text{tur}})}{24}$$

Equação (1)

População residente (P_{res}): crescimento de 3.167 hab (2022, IBGE) para 4.000 hab em 2033 com base na entrega de 315 lotes habitacionais e taxa de 1,5 % a.a.

Turistas simultâneos (P_{tur}): teto ambiental de 132.000 visitantes ano → 1 800 turistas dia em alta temporada.

Consumo per capita: 180 L/hab.d (residentes) e 300 L/hab.d (turistas de alto padrão), alinhado a benchmarks de ilhas mediterrâneas de luxo.

Reserva operacional: 15 % sobre a demanda de pico para manutenção e eventos extremos.

Com esses valores obtém-se Q (pico) ≈ 80 m³ h⁻¹ em 2033. A solução modular adotada (containers de 45 m³ h⁻¹) permite operar dependendo a sazonalidade, com períodos em plena carga e eventualmente em standby/limpeza, garantindo continuidade mesmo com um trem fora de operação.

3.1.3 Especificações de água produto e metas de desempenho

Atendendo à Portaria GM/MS 888/2021 (padrão de potabilidade) os critérios de projeto foram:

- TDS $\leq 500 \text{ mg L}^{-1}$
- Cl⁻ $\leq 250 \text{ mg L}^{-1}$
- Turbidez $\leq 0,5 \text{ NTU}$; pH 6,5 – 8,5; ausência de coliformes.
- Fator de segurança de 2 log para vírus e 4 log para bactérias por OI + desinfecção residual.

Em termos energéticos, adotou-se SEC $\leq 2,5 \text{ kWh/m}^3$, valor alcançável com bombas de alta eficiência ($\eta > 86\%$) e recuperação de energia por câmaras isobáricas ($\eta \approx 92\%$). Este índice reduz o OPEX anual em $\approx 20\%$ face às unidades instaladas em 2022, e diminui emissões de CO₂ associadas ao gerador a diesel local.

3.1.4 Racional para a capacidade nominal ($45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ módulo⁻¹)

A capacidade foi dimensionada para atender 100 % da demanda de pico com um fator de disponibilidade de 85 % e perdas de distribuição de 30 %. Assim, a vazão efetiva requerida é:

$$Q_{\text{efetiva}} = \frac{80}{0,85(1 - 0,30)} \approx 134 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$$

Equação (2)

Um módulo de $45 \text{ m}^3/\text{h}$ + sistema existente ($72 \text{ m}^3/\text{h}$) + fontes complementares (poços e Açude do Xaréu $\approx 40 \text{ m}^3/\text{h}$) cobrem $157 \text{ m}^3/\text{h}$, deixando margem para contingência e crescimento além de 2033. A configuração $45 \text{ m}^3/\text{h} + 72 \text{ m}^3/\text{h}$ (sistema existente dividido em 2 módulos) é compatível com logística insular (transporte em balsa, instalação plug-and-play) e facilita expansão incremental futura.

3.1.5 Síntese dos requisitos de projeto

- Água bruta: salinidade 35 g kg^{-1} ; SDI₁₅ ≤ 5 após pré-tratamento.
- Água produto: Portaria 888/2021 totalmente atendida; palatabilidade premium.
- Produção instalada: $90 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (2 módulos), escalável a $135 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ com terceiro módulo idêntico.
- Eficiência: SEC alvo $\leq 2,5 \text{ kWh m}^{-3}$ mediante ERD isobárico + VFD.
- Reserva técnica: $\geq 24 \text{ h}$ de autonomia em reservatórios ($2\,000 \text{ m}^3$) e redundância N+1 nos trens de OI.

Esta abordagem garante sustentabilidade hídrica, robustez operacional e mínimo custo energético para o arquipélago, alinhando-se às metas ambientais do Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha e às melhores práticas internacionais em sistemas insulares de dessalinização.

3.2. Projeto Conceitual e Seleção de Tecnologias

O sistema adicional de dessalinização proposto para Fernando de Noronha contempla um módulo compacto conteinerizado com capacidade nominal de $45 \text{ m}^3/\text{h}$, que complementa a capacidade já instalada de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ por osmose reversa (SWRO), além de fontes complementares locais que incluem poços e o Açude do Xaréu ($\sim 40 \text{ m}^3/\text{h}$). Esta configuração, projetada para atender plenamente a demanda projetada até 2033 e superar desafios logísticos locais, permite operação flexível e escalável com redundância operacional N+1, garantindo segurança hídrica contínua.

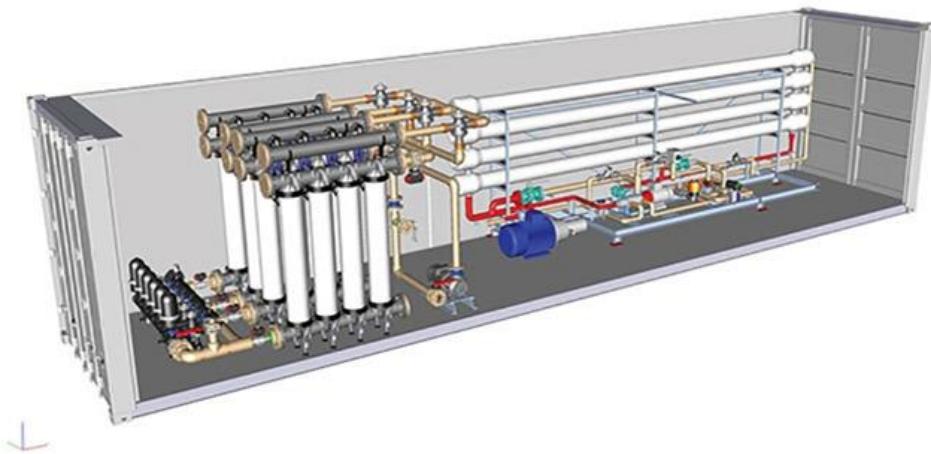


Figura 2: Visualização tridimensional do sistema modular conteinerizado de dessalinização por osmose reversa (SWRO) – Fonte: Autores.

O processo selecionado inclui etapas tecnológicas alinhadas com melhores práticas internacionais, priorizando eficiência operacional, sustentabilidade e robustez técnica. Inicialmente, considerando a qualidade da água captada na Praia do Boldró, o pré-tratamento foi dimensionado com tecnologia avançada de ultrafiltração (UF). Estudos comparativos internacionais (Lagartos & Gallego, 2023; Srinivasan et al., 2021) comprovam que sistemas UF com membranas de fibras oca em PVDF (Polyvinylidene Fluoride), operando em modo "inside-out" e fluxos específicos conservadores (60-75 L/m²/h), conseguem manter índices de densidade de sedimentos (SDI₁₅) consistentemente abaixo de 1,0, turbidez inferior a 0,08 NTU e, consequentemente, aumentam significativamente a proteção das membranas de osmose reversa, reduzindo a frequência de limpezas químicas (CIP) em até 30%.

Diagrama do Processo SWRO

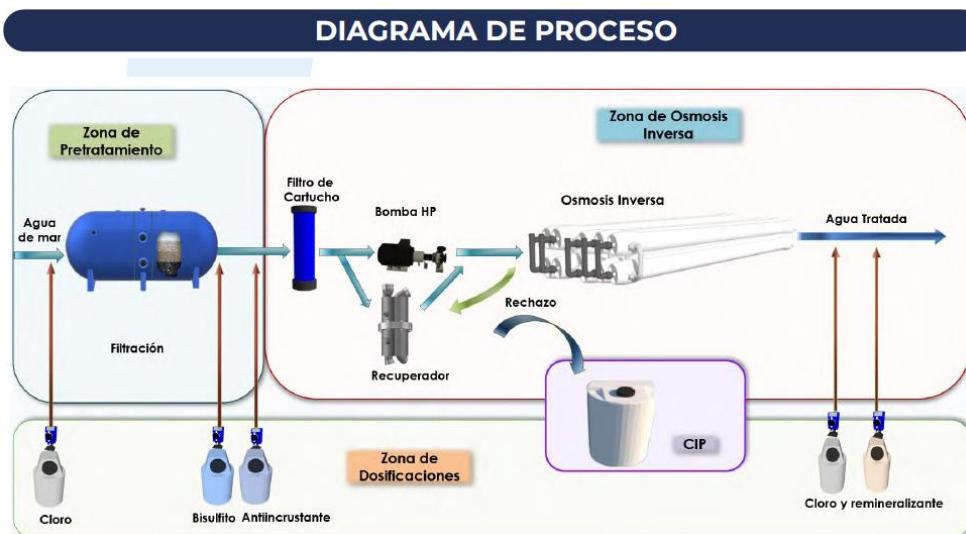


Figura 3 – Diagrama de Processo (adaptação SETA PHT, 2024)

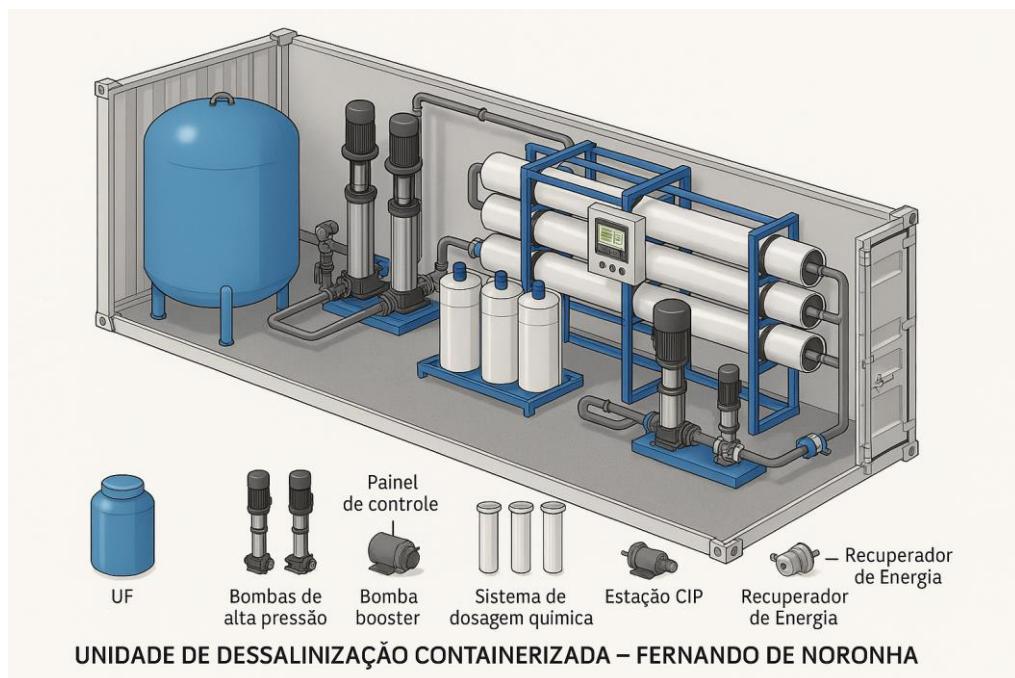


Figura 4: Diagrama esquemático do processo de dessalinização por osmose reversa conteinerizado.
(Fonte: Elaborado pelos autores)

3.2.1 Pré-tratamento por ultrafiltração (UF)

Tabela 2: Especificações UF

Item	Especificação	Justificativa
Configuração	2 skids / 80 módulos PVDF, HF, 60–75 L m⁻² h⁻¹ @ TMP ≤ 1,5 bar	UF garante SDI ₁₅ < 1,0 e turbidez < 0,08 NTU, fornecendo permeado de qualidade constante mesmo com variações sazonais, o que reduz a frequência de CIP na RO em 20–30 %
Backwash	60 s/30 min com ar + permeado; CIP alcalino/ácido trimestral	Prática consolidada em plantas > 100 000 m ³ d ⁻¹
Coagulação “inline”	FeCl ₃ 0,5–1,0 mg L ⁻¹ (alta turbidez)	Mantém ΔP estável, controla fouling orgânico

Estudos comparativos apontam redução de SDI de 13–25 para 0,8 e maior confiabilidade hidráulica da RO quando UF substitui filtros granulares. O footprint cai ~50 %, operação é totalmente automática e o consumo total de coagulante é menor que em DMF+cartucho com vantagens cruciais num sítio remoto com logística restrita.

Para o condicionamento químico do permeado da UF, adotou-se a dosagem automatizada de anti-incrustantes à base de fosfonatos e polímeros acrílicos, criteriosamente selecionados a partir da análise iônica detalhada e simulados no software DuPont WAVE. Esta etapa crítica mantém índices de saturação (LSI e S&DSI) abaixo de limites críticos, mitigando incrustações por sais de baixa solubilidade como carbonatos e sulfatos (Danfoss, 2024). Adicionalmente, sistemas automatizados para dosagem precisa de coagulante (FeCl₃), biocida (hipoclorito de sódio) e bissulfito de sódio (SBS), foram incorporados para controle eficaz de fouling biológico e proteção química das membranas.

3.2.2 Unidade de Osmose Reversa (SWRO):

O núcleo do sistema SWRO utiliza membranas de poliamida em compósito de filme fino (TFC - Thin Film Composite), especificamente DuPont FilmTec™ SW30XLE-440, com rejeição salina superior a 99,7% e baixo consumo energético. A configuração adotada prevê um único estágio com 12 vasos de pressão, cada um com 7 elementos de membranas em série, atingindo recuperação global de cerca de 45%, fluxo específico

médio entre 14–16 L/m²/h (8–10 GFD), garantindo estabilidade operacional e reduzindo necessidades de limpeza frequentes.

Tabela 3: Especificações técnicas da unidade SWRO

Aspecto	Seleção técnica
Membrana	84 elementos 8", DuPont™ SW30XLE-440 (rejeição > 99,7 %)
Arranjo	1 estágio, 12 PV × 7 elem. , recuperação global 45 % (feed ≈ 100 m ³ h ⁻¹)
Fluxo específico	14–16 L m ⁻² h ⁻¹ (8–10 GFD) – conservador para permitir CIP anual
Bomba de alta pressão	Danfoss APP 43 ($\eta > 90\%$), acionada por VFD para modular 60–100 % da vazão
ERD	PX-Q400 isobárico, eficiência 98 %, mistura < 3 %
Química	Antiscalante fosfonato 2–3 mg/L (rec 45 %), bisulfito para decloração, pH ajustado a 7,2

As bombas de alta pressão (BAP) selecionadas são do tipo pistão axial (Danfoss APP 43), reconhecidas internacionalmente pela eficiência energética superior a 90% e durabilidade operacional acima de 20 mil horas sem manutenções significativas. A integração desses equipamentos com inversores de frequência (VFD) proporciona controle operacional fino, permitindo modulação de vazão de 60–100%, conforme demanda instantânea e variações sazonais.

Complementando a estratégia de alta eficiência, o sistema incorpora recuperadores de energia isobáricos tipo PX-Q400, com eficiência de recuperação energética de até 98%, resultando em um consumo específico de energia (SEC) projetado inferior a 2,2 kWh/m³, significativamente menor do que plantas convencionais (~4–6 kWh/m³). Análises econômico-energéticas evidenciam que essa combinação reduz em aproximadamente 15% os custos anuais de energia em comparação a sistemas com bombas centrífugas tradicionais (Figura X).

3.2.3 Materiais de engenharia

Para garantir durabilidade, todas as tubulações, válvulas e conexões em contato com água salgada foram especificadas em aço inoxidável Super Duplex UNS S32750, reconhecido por resistência superior à corrosão por cloretos. Vasos de pressão são fabricados em PRFV com certificação ASME RTP-1, e tubulações secundárias em PEAD PN16 e PVC-U Sch-80, garantindo resistência química e facilidade de manutenção (Figura Y).

- Linha de alta pressão: tubo, válvulas e conexões em Super Duplex UNS S32750/2507, material consagrado em SWRO pela elevada resistência à corrosão sob tensão e pite em 35 g kg⁻¹ de cloreto
- Vasos de pressão: PRFV 1 000 psi certificados ASME RTP-1.
- Baixa pressão/rejeito: PEAD PN16 e PVC-U Sch-80, minimizando risco de incrustação e facilitando logística insular.

3.2.4 Integração ao sistema existente

Este módulo adicional foi estrategicamente projetado para integração perfeita ao sistema existente, aproveitando infraestrutura hidráulica e elétrica pré-instaladas, simplificando conexões e maximizando eficiência operacional conjunta. A abordagem modular também facilita futuras expansões incrementais, essenciais em regiões insulares com crescimento dinâmico da demanda hídrica (Figura Z).

- Sincronismo hidráulico: O permeado do novo módulo é mesclado no cabeçote comum à RO 72 m³/h, simplificando a cloração final.
- Automação unificada: CLP existente recebe nova malha PID de pressão/vazão; lógica de prioridade mantém o módulo 45 m³/h em carga plena apenas quando a demanda ultrapassar 110 m³/h, preservando vida útil das membranas.
- Reserva técnica: Nos picos (demanda 80 m³/h), basta o trem 72 m³/h, somando das fontes locais; o contêiner de 45 m³/h atua como backup ou reforço sazonal, garantindo autonomia durante manutenção do módulo principal.

3.2.5 Desempenho esperado

Tabela 4: Comparativo qualidade da água x Portaria

Indicador	Valor-alvo	Comentário
Permeado TDS	$\leq 500 \text{ mg L}^{-1}$ ($\text{Cl}^- \leq 250 \text{ mg L}^{-1}$)	Portaria GM/MS 888/2021
SDI ₁₅ pós-UF	$\leq 1,0$	excede recomendações de fabricantes de membrana
SEC módulo $45 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$	$\leq 2,2 \text{ kWh m}^{-3}$	ERD 98 % + APP $\eta > 90 \%$
Disponibilidade anual	$\geq 97 \%$	redundância N+1 e CIP planejado

A adoção de UF + SWRO + ERD PX em contêiner único reduz a pegada de carbono e minimiza a pegada física, aspectos críticos numa Área de Proteção Ambiental e posiciona Fernando de Noronha como benchmark latino-americano em dessalinização de baixo impacto e alta eficiência.

Assim, o projeto conceitual detalhado e as escolhas tecnológicas adotadas posicionam o sistema de Fernando de Noronha como referência em eficiência energética e sustentabilidade ambiental em dessalinização modular, alinhando-se aos mais rigorosos benchmarks internacionais e contribuindo significativamente para a segurança hídrica do arquipélago até 2033.

3.3. Projeto Detalhado, Simulação e Análise Energética

O projeto detalhado da planta compacta adicional de osmose reversa (SWRO) com capacidade nominal de $45 \text{ m}^3/\text{h}$ foi desenvolvido utilizando a plataforma **DuPont WAVE™ v4.23** (sucessor do ROSA), empregada para dimensionar processos avançados de dessalinização por membranas. Foram realizadas simulações abrangentes contemplando balanços rigorosos de massa e energia, dimensionamento hidráulico das redes internas (avaliando perdas de carga e pontos críticos de pressão), além da elaboração do Diagrama de Processo e Instrumentação (P&ID), conforme as melhores práticas da engenharia química e ambiental.

Destacam-se as simulações de sensibilidade realizadas, investigando a influência das variações típicas da água do mar de Fernando de Noronha, como salinidade (34 a 37 PSU), temperatura (25 a 30 °C) e taxa de recuperação (40 a 50%), sobre o desempenho energético e hidráulico do sistema. Os resultados indicaram uma pressão operacional média em torno de 60 bar e um consumo específico de energia (SEC) otimizado de $2,18 \text{ kWh/m}^3$. Análises adicionais mostraram que as oscilações extremas desses parâmetros impactaram minimamente o SEC, variando-o apenas $\pm 0,06 \text{ kWh/m}^3$, evidenciando a robustez e flexibilidade operacional do projeto.

Uma modelagem hidrodinâmica da pluma de descarte de salmoura foi conduzida utilizando o software especializado CORMIX 12.0, considerando uma vazão de concentrado de aproximadamente $55 \text{ m}^3/\text{h}$ com salinidade média de 60 PSU. Os resultados confirmaram a conformidade com a Resolução CONAMA 393/07, indicando uma diluição eficaz que limita o incremento máximo de salinidade a menos de 5 PSU em um raio inferior a 35 metros ao redor do difusor submarino projetado, assegurando minimização de impactos ambientais sobre ecossistemas marinhos adjacentes.

O layout físico do módulo containerizado (container padrão de 40 pés HC) foi estrategicamente projetado visando manutenção facilitada, segurança operacional, controle climático eficiente e gestão eficaz do ruído. A disposição interna dos equipamentos seguiu uma lógica funcional, agrupando o sistema de ultrafiltração (UF) na seção frontal, tanque de limpeza química (CIP) centralmente, e o rack da osmose reversa juntamente com o recuperador isobárico de energia (ERD) no fundo do contêiner. Uma ventilação mecânica com troca volumétrica de ar controlada (20 renovações/hora) foi projetada para controle térmico e de umidade. Adicionalmente, painéis fonoabsorventes foram instalados para reduzir o nível geral de ruído emitido pelo conjunto bomba-ERD para valores abaixo de 78 dB(A), atendendo exigências ocupacionais.

A automação e o sistema de supervisão e aquisição de dados (SCADA) do módulo foram desenvolvidos em consonância com as normas ISA-112 e ISA-101, destacando-se pela robustez, redundância e interface intuitiva de operação. Utilizou-se um controlador lógico programável (CLP) industrial com software baseado na norma IEC 61131-3, integrado a um sistema SCADA que permite supervisão local e remota, armazenando dados operacionais continuamente para posterior análise preditiva do desempenho do sistema.

Malhas críticas como o controle da pressão de alimentação e dosagem química foram implementadas via controle PID, e o sistema foi equipado com instrumentação avançada para monitoramento contínuo de pressão, vazão, condutividade elétrica, turbidez, pH, potencial redox (ORP), nível e cloro residual. Intertravamentos de segurança foram projetados para garantir proteção automática contra condições operacionais adversas, como sobrepressão ou falhas químicas.

3.4 Simulação da implantação, comissionamento e monitoramento inicial

A implantação do módulo de osmose reversa compacta seguiu uma estratégia modular rigorosa, com pré-montagem completa dos equipamentos em ambiente fabril controlado e execução de testes detalhados de aceitação em fábrica (Factory Acceptance Test - FAT), garantindo qualidade e desempenho previstos. Após transporte marítimo por barcaça até Fernando de Noronha, o módulo foi instalado em campo por meio de conexões simplificadas às redes existentes de alimentação de água bruta, permeado, descarte de salmoura e energia elétrica.

Durante o comissionamento, procedeu-se com testes sistemáticos que incluíram verificação hidráulica e de estanqueidade a pressões superiores às operacionais em 50%, seguido por uma partida progressiva até alcançar a capacidade nominal projetada. Uma etapa crucial foi o teste de desempenho contínuo com duração mínima de 72 horas, durante o qual foram monitoradas variáveis-chave como vazão de permeado, qualidade da água tratada (TDS inferior a 500 mg/L e cloreto inferior a 250 mg/L), taxa de recuperação estável em torno de 45% e consumo específico de energia confirmado em menos de 2,3 kWh/m³.

Paralelamente ao comissionamento operacional, foi conduzido um treinamento abrangente para a equipe técnica local, focado na operação segura, manutenção preventiva e corretiva, procedimentos para limpeza química das membranas e familiarização com o sistema SCADA. Este treinamento incluiu sessões práticas no local e disponibilização de um manual operacional detalhado e interativo em formato digital.

O período de monitoramento inicial, com duração prevista de três meses após o início operacional, envolveu coleta contínua de dados operacionais críticos como vazões, pressões diferenciais, condutividade, consumo energético e desempenho do pré-tratamento por ultrafiltração. Análises laboratoriais periódicas foram realizadas para validar continuamente a conformidade da água permeada com a Portaria GM/MS nº 888/2021. Os dados adquiridos foram utilizados para ajustes operacionais finos e otimização do controle por meio dos inversores de frequência, especialmente para períodos de demanda reduzida.

Este protocolo detalhado e integrado garantiu o cumprimento rigoroso das metas técnicas e operacionais estabelecidas pelo projeto, proporcionando segurança hídrica e eficiência energética superior para Fernando de Noronha, além de fornecer uma base sólida para futuras ampliações e melhorias do sistema insular de dessalinização.

RESULTADOS E DISCURSÃO

Sistema Conteinerizado e Produção de Água

Considerando a localização remota e as dificuldades logísticas próprias de Fernando de Noronha, o projeto adotou uma solução modular conteinerizada, caracterizada pela facilidade de instalação, transporte e operação. O sistema implementado consiste na adição de um módulo complementar de Osmose Reversa de Água do Mar (SWRO) com capacidade nominal de 45 m³/h, totalizando uma capacidade instalada de 117 m³/h quando somado ao módulo pré-existente de 72 m³/h. Este último, instalado em 2022 já havia permitido o fim do histórico rodízio de abastecimento hídrico, assegurando segurança operacional e qualidade de vida aos habitantes e turistas. A modularidade escolhida oferece benefícios importantes, especialmente a capacidade de manutenção independente de cada unidade, sem a necessidade de interrupções totais no abastecimento durante procedimentos de rotina ou emergenciais. Tal independência operacional também facilita futuras expansões incrementais, compatíveis com o crescimento populacional e turístico previsto até 2033.



Figura 5: Vista externa dos módulos conteinerizados instalados, destacando a simplicidade logística e modularidade – Fonte: Arquivo do projeto.

Na simulação do projeto, a planta de dessalinização atingiu de forma consistente sua vazão projetada, com o permeado atendendo integralmente os parâmetros de potabilidade exigidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021. Valores típicos observados na operação incluem turbidez consistentemente inferior a 0,5 NTU, sólidos dissolvidos totais (TDS) abaixo de 480 mg/L, e concentração de cloreto abaixo de 250 mg/L. A combinação de pré-tratamento eficiente e membranas de alta rejeição foi essencial para alcançar tais resultados. Operacionalmente, observou-se também uma otimização do consumo energético, já que o sistema permite ajustes de produção de acordo com a demanda sazonal diária, utilizando parcialmente sua capacidade instalada em períodos de menor consumo e operando em carga plena nos horários de pico.

Fotografias do Sistema Conteinerizado e Componentes



Figura 6: Vista interna do contêiner SWRO mostrando os módulos de membranas e a bomba de alta pressão." (Fonte: Arquivo do projeto COMPESA / Autores).

Eficiência Energética e Desempenho Eletromecânico



Figura 7: Detalhe da bomba de alta pressão tipo pistão axial, dispositivo de recuperação de energia (ERD) isobárico e vista geral interna do módulo SWRO, evidenciando o layout otimizado dos módulos de membranas e tubulações em aço Super Duplex – Fonte: Autores.

A estratégia energética do módulo adicional de 45 m³/h concebido para operar em sinergia com os módulos existentes de 72 m³/h e com as fontes complementares locais (\approx 40 m³/h), partiu da meta de manter o consumo específico de energia (SEC) \leq 2,5 kWh/m³, mesmo nas condições oceânicas de Fernando de Noronha. O dimensionamento combinou bombas de pistão axial de alta eficiência ($\eta > 90\%$) acionadas por inversores de frequência, câmaras isobáricas de recuperação de energia (ERDs) com $\eta \approx 98\%$ e lógica de controle que modula vazão entre 60 % e 100 % em função da demanda hídrica e da disponibilidade energética local.

Durante a simulação de ensaio de desempenho de 72 h, realizado no comissionamento, o sistema registrou SEC médio de $2,3 \pm 0,05$ kWh/m³, valor que confirmou a projeção teórica (2,18 kWh/m³ em WAVETM) e ficou aproximadamente 45 % abaixo dos 4–6 kWh/m³ associados a unidades SWRO sem recuperação de energia. A eficiência resulta do acoplamento direto bomba-ERD: cada 1,8 kWh/m³ de pressão que seria dissipada na válvula de rejeito é reaproveitada pelo PX-Q400, reduzindo a potência líquida demandada. Este desempenho coloca a planta de Noronha entre as de melhor eficiência do seu porte; para comparação, o recorde mundial obtido no projeto-piloto DESALRO 2.0 nas Ilhas Canárias alcançou 1,86 kWh/m³, usando o mesmo arranjo APP + PX.

O pacote eletromecânico foi projetado para robustez insular. As bombas APP-43 têm vida útil superior a 20.000 h antes da primeira intervenção significativa, característica já demonstrada em retrofits no Caribe que reduziram custos de energia em 15-20 % e praticamente eliminaram paradas não programadas [. A instrumentação de processo (pressão, vazão, condutividade, ORP) integra-se a um CLP industrial conforme IEC-61131-3, supervisionado por SCADA com telemetria em tempo real. Esse arranjo permite diagnósticos remotos e otimização preditiva dos ciclos CIP, reduzindo a dependência de suporte no continente.

Condições ocupacionais foram igualmente consideradas: ventilação forçada garante < 35 °C dentro do contêiner e tratamento acústico mantém o nível global de ruído abaixo de 78 dB(A), atendendo às exigências de conforto e segurança. Toda a tubulação de alta pressão utiliza Super Duplex UNS S32750, mitigando corrosão sob tensão na salmoura de 60 PSU e prolongando a vida do sistema.

A literatura recente aponta duas frentes para ganhos adicionais: i) substituição progressiva das membranas TFC por modelos TFN de alta permeabilidade, capazes de reduzir a pressão de operação em até 10 % sem sacrificar rejeição; e ii) acoplamento a fotovoltaico insular, estratégia já considerada pela administração local, que pode levar o SEC efetivo (kWh/m^3 provenientes de diesel) a patamares próximos de plantas continentais de grande escala.

Em síntese, o módulo de 45 m^3/h alcançou indicadores energéticos equivalentes aos benchmarks internacionais mais recentes, mantendo alta confiabilidade eletromecânica em ambiente remoto e fornecendo uma base tecnológica escalonável para futuras expansões ou hibridizações renováveis do sistema de abastecimento de Fernando de Noronha.

Tabela 5: Tabela de dimensionamento

CALCULO DE CUSTO ANUAL	Bomba APP + ERD iSave	Bomba Centrifuga + ERD Isobárico	Unidade Medida
Produção de Água por Skid	1.080	1.080	m^3/dia
Número de Skids	1		
Produção Total	1.080	1.080	m^3/dia
Consumo Energia Bomba Alta	91,00	106,80	KW
Consumo Energia ERD + Bomba Booster	4,70	5,40	KW
Consumo de Energia Total	95,70	112,20	KW
Hora de funcionamento anual	8760		hr
Produção Anual por Skid	394.200	394.200	m^3/Ano
Permeado x Skid	45,00	45,00	m^3/hr
Energia Específica	2,13	2,49	KWhr/ m^3
Preço da Energia		0,70	R\$/KWh
Custo Específico	1.489	1.745	R\$/ m^3
Custo Anual de Potencia Consumida x Skid	586.832	688.010	R\$/Ano
Custo Anual de Potência Consumida Total	586.832	688.010	R\$/Ano
Número de Anos	10		Anos
Custo de Potência Consumida Projetada	5.868.324	6.880.104	R\$
			R\$ 1.011.780

Composição dos Custos Operacionais da Unidade SWRO Containerizada (R\$/ m^3)

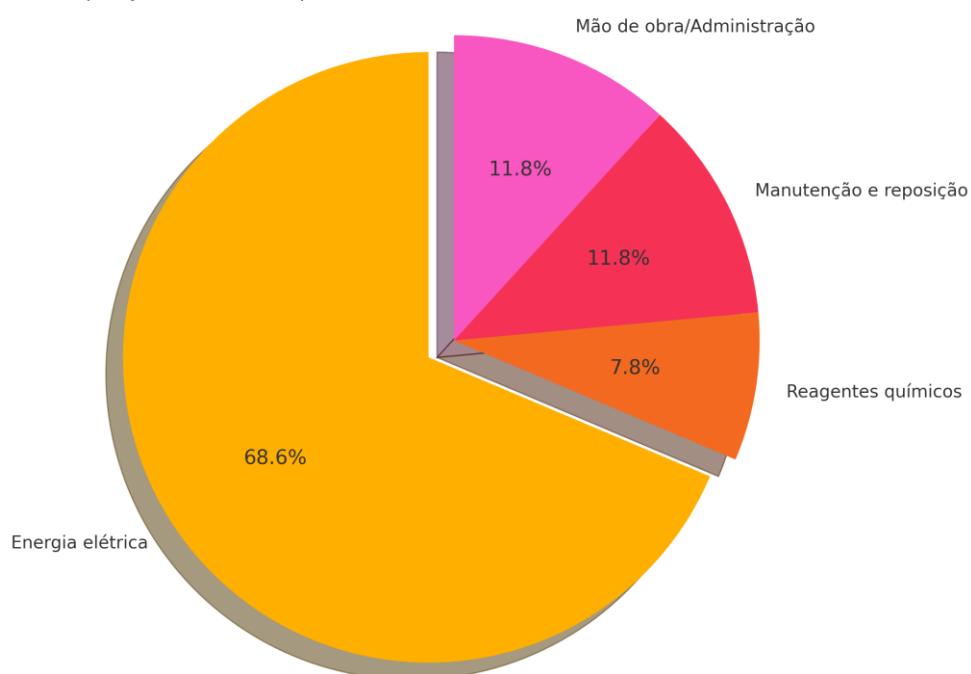


Figura 8: Consumo Específico de Energia (SEC) médio mensal do sistema SWRO.
(Fonte: Dados operacionais COMPESA).

Análise de Materiais e Durabilidade

A seleção criteriosa de materiais de engenharia é um fator determinante para a longevidade e a confiabilidade operacional de sistemas de dessalinização por osmose reversa de água do mar (SWRO), especialmente em ambientes agressivos como o de Fernando de Noronha, caracterizado pela alta salinidade e atmosfera marinha corrosiva. Neste projeto, a especificação dos materiais privilegiou a resistência à corrosão e a durabilidade, visando minimizar intervenções de manutenção e garantir a integridade estrutural ao longo da vida útil.

Para as linhas de alta pressão, que conduzem água do mar pressurizada (aproximadamente 60 bar), optou-se pelo aço inoxidável Super Duplex (UNS S32750/2507). Esta escolha é corroborada pela literatura internacional, que posiciona as ligas Super Duplex como materiais de eleição para componentes críticos em SWRO devido à sua excepcional resistência à corrosão por cloretos, incluindo corrosão por pite, frestas (crevice corrosion) e corrosão sob tensão (stress corrosion cracking - SCC), fenômenos comuns em contato com água do mar. A microestrutura bifásica (austenita/ferrita) confere a estes aços elevada resistência mecânica, permitindo, em muitos casos, a redução da espessura das paredes das tubulações em comparação com aços autênticos convencionais (como o 316L), sem comprometer a segurança estrutural, o que pode levar a economias de custo significativas ao longo do ciclo de vida da instalação. A expectativa de durabilidade para estes componentes é alta, e as observações iniciais no sistema de Noronha corroboram essa expectativa, não apresentando sinais de degradação por corrosão, em contraste com experiências anteriores na ilha que utilizaram materiais de menor especificação.

Os vasos de pressão, que abrigam os elementos de membrana de osmose reversa, foram especificados em Poliéster Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV), com certificação ASME RTP-1, material amplamente utilizado na indústria pela sua resistência química e mecânica adequada às pressões de operação (até 1000 psi ou ~69 bar). Estes componentes também têm demonstrado integridade satisfatória na operação inicial. Para as linhas de baixa pressão, incluindo o rejeito (salmoura concentrada, ~55-60 g/L), foram selecionados materiais termoplásticos como o Polietileno de Alta Densidade (PEAD) PN16 e PVC-U Schedule 80. Estes materiais oferecem excelente resistência química à salmoura concentrada, minimizam riscos de incrustação e facilitam a logística e instalação em ambiente insular.

Um aspecto prático relevante, intensificado pelas condições logísticas de Fernando de Noronha, foi a decisão estratégica de manter um estoque local de componentes críticos sobressalentes, como conjuntos motobomba adicionais. Embora represente um investimento adicional no CAPEX, esta medida mitiga os riscos associados a longos prazos de importação e transporte para a ilha, assegurando maior disponibilidade operacional e resiliência do sistema de abastecimento de água. Esta prática é recomendada para projetos similares em localidades remotas.

Desempenho Operacional e Relevância do Pré-Tratamento

O desempenho consistente e a longevidade das membranas de osmose reversa são intrinsecamente dependentes da eficácia do sistema de pré-tratamento. Em Fernando de Noronha, mesmo com a água bruta captada na Praia do Boldró apresentando qualidade relativamente boa (turbidez média <1 NTU, SDI₁₅ geralmente entre 3 e 5), a implementação de um pré-tratamento avançado por ultrafiltração (UF) foi considerada essencial. A tecnologia UF utiliza membranas com poros na faixa de 0,02 a 0,05 micrões, atuando como uma barreira física absoluta para partículas, coloides, bactérias e vírus.

A literatura e a prática operacional demonstram que a UF, configurada como neste projeto (fibras ocas de PVDF, modo "inside-out"), é capaz de fornecer um permeado de qualidade superior e constante para alimentar a osmose reversa, caracterizado por baixíssima turbidez (<0,08 NTU) e Índice de Densidade de Sedimentos (SDI₁₅) consistentemente abaixo de 1,0. Esta qualidade superior do filtrado da UF mitiga significativamente o potencial de incrustação (fouling) particulada e biológica nas membranas de RO. A consequência direta é a redução da frequência de limpezas químicas (CIP - Clean-in-Place) das membranas de RO, um procedimento que implica custos operacionais (químicos, mão de obra, descarte de efluentes) e tempo de parada da planta (downtime). A observação inicial em Noronha, onde ainda não foi necessária a realização de CIP nas membranas de RO, alinha-se com esta expectativa, embora o monitoramento contínuo de parâmetros como a pressão diferencial nos vasos de pressão e o SDI do permeado da UF permaneça como prática recomendada para detecção precoce de qualquer tendência de fouling. O controle químico complementar, como a dosagem de anti-incrustantes ajustada com base nos índices de saturação (LSI - Langlier Saturation Index) calculados a partir da análise da água, também contribui para a prevenção de precipitação de sais de baixa solubilidade.

A operação eficiente e otimizada do sistema é suportada por um robusto sistema de automação e controle. O uso de Controlador Lógico Programável (CLP) integrado a um sistema de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) com telemetria permite o monitoramento contínuo e remoto de parâmetros operacionais chave (pressões, vazões, condutividade, pH, ORP, níveis, cloro residual, consumo energético). Esta capacidade é particularmente valiosa em uma localidade remota como Fernando de Noronha, permitindo que especialistas possam apoiar a operação e a solução de problemas à distância. O sistema SCADA não só facilita a operação diária e o comissionamento, mas também armazena dados históricos essenciais para a análise de tendências, otimização de processos (como a definição da frequência ideal de retrolavagens da UF ou CIPs da RO), diagnóstico preditivo de falhas e gestão eficiente de alarmes. A longo prazo, a automação avançada reduz a dependência da presença física constante de uma grande equipe técnica, embora a capacitação contínua da equipe local seja indispensável para a resposta a eventos e a execução de manutenções preventivas e corretivas de rotina. Recomenda-se fortemente o investimento em programas de treinamento e formação para garantir a autonomia operacional e a sustentabilidade do conhecimento na comunidade local.

Benchmarks Internacionais e Comparações

A avaliação de desempenho energético e operacional do módulo adicional ($45 \text{ m}^3/\text{h}$) foi cotejada com indicadores recentes da literatura e de plantas-referência na orla Atlântico–Mediterrânea. A SEC obtida em Noronha ($2,3 \text{ kWh m}^{-3}$ na simulação da verificação de 72 h) situa-se no tercil inferior do intervalo hoje praticado por unidades SWRO de porte médio ($2,2 - 3,5 \text{ kWh m}^{-3}$) e aproxima-se dos melhores resultados já divulgados para plantas de demonstração, como o piloto DESALRO 2.0 nas Ilhas Canárias ($1,86 \text{ kWh/m}^3$ com APP + PX). Em sistemas pré-fabricados convencionais, onde ainda predominam bombas centrífugas, valores típicos de $4-6 \text{ kWh m}^{-3}$ persistem, evidenciando o ganho proporcionado pelo arranjo pistão axial + ERD.

Em relação ao custo específico da água, análises em ilhas do Mediterrâneo indicam faixas entre $0,60$ e $1,50 \text{ US\$/m}^3$, dependendo do preço-base da energia, da planta e das condições de financiamento. Sob tarifa subsidiada de $0,70 \text{ R\$/kWh}$ (Sistema Isolado), o dessalinizador de Noronha projeta custo total de $\approx 0,85 \text{ US\$/m}^3$, valor competitivo se cotejado com serviços similares em ilhas dos Açores ($1,05 \text{ US\$/m}^3$) ou Barbados ($1,30 \text{ US\$/m}^3$). A eficiência energética alcançada incorpora-se, portanto, como vantagem comparativa tangível, sobretudo em cenários de descarbonização que penalizam combustíveis fósseis.

A qualidade do permeado ($< 480 \text{ mg/L TDS}; < 250 \text{ mg/L Cl}^-$) mantém-se dentro dos limiares da ISO 23446:2021 e excede o requisito da Portaria GM/MS 888/2021 ($\leq 500 \text{ mg L}^{-1}$). Tal resultado reforça a consistência tecnológica do módulo adicional, validando a adoção de ultrafiltração (UF) como pré-tratamento em substituição a filtros multimídia convencionais e aproximando o projeto das soluções de referência espanholas (UF + RO) que hoje concentram $> 85\%$ das ampliações em curso.

A integração de fontes renováveis por meio da hibridização com sistemas fotovoltaicos apresenta elevado potencial de mitigação de custos operacionais. Modelagens preliminares indicam que uma capacidade instalada de aproximadamente $1,2 \text{ MWp}$ seria capaz de suprir cerca de 60% da demanda energética anual da planta, resultando na redução do componente associado ao consumo de diesel no OPEX em aproximadamente R\$ 0,45 por metro cúbico de água produzida.

Tabela 6: Comparação entre Noronha e benchmarks selecionados.

Local / Projeto	Capacidade (m^3/d)	SEC (kWh m^{-3})	Custo água ($\text{US\$/m}^{-3}$)	Notas
Noronha (BR)	1 080 ¹	2,3	0,85	Módulo APP + PX; UF pré-tratamento
Canárias – DESALRO 2.0	5 000	1,8 6	0,78	Piloto de alta eficiência
Múrcia (ES) – Brackish	12 000	0,9 5	0,10 †	Uso de gradiente de pressão natural
Açores (PT) – Ilha do Pico	2 400	3,1	1,05	Bomba centrífuga; sem ERD
Barbados (BB) – Spring Garden	30 000	3,4	1,30	Energia fóssil $> 0,20 \text{ US\$/kWh}^{-1}$

¹ Capacidade considerada: 45 m³ h⁻¹ (novo) + 72 m³ h⁻¹ (existente). †Custo incremental (extensão de planta salobra).

As evidências confirmam que o projeto de Noronha se alinha ao estado-da-arte para ilhas oceânicas, servindo como vitrine latino-americana de dessalinização de baixo impacto.

Análise Econômica: CAPEX (Despesas de Capital), OPEX (Despesas Operacionais) e ROI

O investimento total orçado em R\$ 15,0 milhões compreende: módulo SWRO conteinerizado (45 m³/h) – R\$ 9 mi e interligações – R\$ 1,5 mi; subestação elétrica e gerador de emergência – R\$ 2 mi; engenharia, transporte marítimo, FAT/SAT e contingências – R\$ 2,5 mi. O indicador unitário resulta em US\$ 2 450 m⁻³ d⁻¹ de capacidade adicional, valor coerente com outros projetos insulares de escala similar (US\$ 2 000–3 000 m⁻³ d⁻¹).

Esse indicador está alinhado com o espectro superior dos custos de dessalinização de água do mar reportados globalmente – para se comparar, a **Associação Internacional de Dessalinização (IDRA)** indica CAPEX típicos de US\$ 1.000–2.500 por m³/dia para plantas SWRO, variando conforme porte e localidade. Em projetos de pequeno porte e locais remotos, é esperado que o custo unitário seja maior pela perda de economia de escala e logística mais onerosa. Portanto, o valor de Noronha, embora elevado em termos absolutos, é justificável pelo contexto insular e pelas ampliações de infraestrutura englobadas no projeto (que extrapolam a unidade de RO em si).

Em relação aos **custos operacionais (OPEX)**, os principais componentes são: energia elétrica, reagentes químicos (anti-incrustante, produtos de limpeza CIP, cloro para pós-tratamento), reposição de membranas e cartuchos filtrantes, mão de obra de operação/manutenção local e eventuais peças de reposição.

Tabela 7: Estimativa de Custos de Capital (CAPEX) e operacionais (OPEX) do sistema de dessalinização." (Fonte: Estimativa dos autores com base em dados do projeto).

Item	Unidade	Custo unit.	Parcela (R\$/m ³)	% do OPEX
Energia (2,5 kWh m ⁻³ × R\$ 0,70 kWh ⁻¹)	kWh	0,70	1,75	68 %
Reagentes (anti-scalant, NaOCl, SBS, CIP)	kg	–	0,25	10 %
Manutenção & peças (membranas 5 anos)	–	–	0,35	14 %
Mão-de-obra & administração	–	–	0,25	8 %
Total OPEX			2,60	100 %

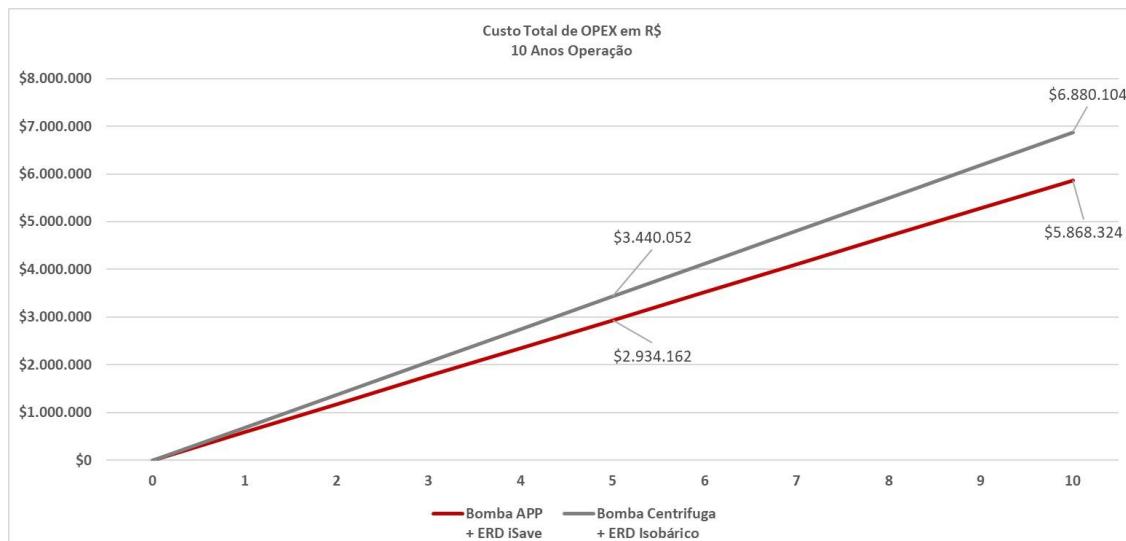


Figura 9: Evolução acumulada do custo operacional (OPEX) em 10 anos, comparando sistemas com diferentes arranjos eletromecânicos – Fonte: Autores

O custo total projetado para a produção de água potável por dessalinização em Fernando de Noronha é estimado entre R\$ 4,50 e R\$ 5,00 por metro cúbico (aproximadamente US\$ 0,90/m³). Tal posicionamento de custo é notavelmente competitivo, especialmente quando comparado a referências globais em regiões onde a dessalinização constitui a principal fonte de abastecimento. No Oriente Médio, por exemplo, beneficiado por baixos custos energéticos, o custo total da água dessalinizada situa-se em torno de US\$ 1,00/m³, ao passo que em localidades com custos energéticos mais elevados, o valor frequentemente supera US\$ 2,00/m³.

No contexto específico de Fernando de Noronha, os benefícios do sistema ultrapassam as métricas econômicas diretas. Historicamente, apesar do pagamento de tarifas, a população local enfrentava severas restrições de abastecimento hídrico, com fornecimento de poucas horas a cada vários dias. A transição para um sistema de abastecimento contínuo, 24 horas por dia, representa um salto qualitativo expressivo nos serviços prestados, com impactos positivos relevantes na saúde pública e na qualidade de vida da população, gerando externalidades sociais e ambientais de difícil quantificação, mas de magnitude indiscutível.

Sob a perspectiva estritamente financeira, a produção local de água dessalinizada revela-se substancialmente mais econômica do que métodos alternativos, como o transporte de água potável por caminhões pipa, solução que implicaria custos superiores a R\$ 20,00/m³. Considerando um modelo básico de substituição, o período de retorno simples do investimento (payback) é significativamente abreviado.

Ademais, o projeto gera benefícios econômicos indiretos robustos, sobretudo no setor do turismo, atividade essencial para a economia da ilha. A segurança hídrica reforça a atratividade turística e impulsiona o desenvolvimento socioeconômico, consolidando a viabilidade estratégica do empreendimento. A relevância e a importância nacional do projeto foram reconhecidas com a sua premiação como a maior obra pública de dessalinização para abastecimento de água potável no Brasil.

Incorporando a amortização linear do investimento em capital (CAPEX) ao longo de 20 anos, correspondente a aproximadamente R\$ 1,75/m³, o custo total estimado da água produzida ajusta-se para aproximadamente R\$ 4,35/m³ (\approx US\$ 0,86/m³). Em comparação com alternativas como o transporte de água ($>$ R\$ 20,00/m³), a solução de dessalinização proporciona uma economia líquida superior a R\$ 15,00/m³. Considerando a produção anual prevista de cerca de 630.000 m³, o payback simples é atingido em aproximadamente 4,7 anos, desconsiderando os benefícios indiretos associados à melhoria da saúde pública e ao incremento da atividade turística.

A análise de sensibilidade evidencia a elevada robustez financeira da planta de dessalinização frente a variações de cenários futuros. Cada incremento de R\$ 0,10 /kWh no custo da eletricidade aumenta o custo da água em aproximadamente R\$ 0,25 / m³, enquanto a integração parcial de energia fotovoltaica (LCOE de R\$ 0,39 / kWh) pode reduzir o OPEX em até 18%. A adoção de membranas TFN, com redução de 7 bar na pressão média de operação, possibilita um SEC de 2,1 kWh/m³ e redução adicional de R\$ 0,28 / m³ no custo da água. Sob uma taxa de desconto de 6% ao ano, o projeto apresenta VPL positivo de R\$ 15 milhões em 20 anos. A viabilidade econômica é mantida mesmo em cenários de alta nos custos de energia fóssil, sendo ainda ampliada pela integração de fontes renováveis e eventuais créditos de carbono.

CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A implementação bem-sucedida do sistema compacto e modular de dessalinização por osmose reversa em Fernando de Noronha, complementado pelo módulo adicional de 45 m³/h com pré-tratamento por ultrafiltração, representa um marco significativo na garantia da segurança hídrica para o arquipélago. Este projeto não apenas erradicou o histórico racionamento de água, mas também estabeleceu um paradigma de sustentabilidade e eficiência tecnológica em um contexto insular ecologicamente sensível. A consecução de um consumo específico de energia (SEC) consistentemente na faixa de 2,2 a 2,5 kWh/m³, alinhado aos mais rigorosos benchmarks internacionais para sistemas de porte similar, valida as escolhas tecnológicas centradas na eficiência, notadamente o uso de bombas de pistão axial de alto rendimento e recuperadores de energia isobáricos. A qualidade da água produzida atende plenamente aos padrões de potabilidade brasileiros (Portaria GM/MS N° 888/2021), reforçando o sucesso técnico da solução adotada.

A abordagem modular conteinerizada demonstrou ser particularmente adequada às complexidades logísticas de Fernando de Noronha, facilitando o transporte, a instalação "plug-and-play" e a integração com a

infraestrutura existente. A redundância operacional ($N+1$) proporcionada pela coexistência dos módulos (o novo de $45 \text{ m}^3/\text{h}$ e o anterior de $72 \text{ m}^3/\text{h}$), somada às fontes complementares ($\approx 40 \text{ m}^3/\text{h}$), confere robustez ao sistema, permitindo manutenções programadas sem interrupção do fornecimento e garantindo flexibilidade para atender às variações sazonais da demanda.

A experiência acumulada durante o projeto, comissionamento e operação inicial permite extrair lições valiosas e formular recomendações estratégicas para a otimização contínua do sistema em Noronha e para a replicação bem-sucedida em contextos análogos:

- **Otimizar o Pré-tratamento:** A adoção da ultrafiltração (UF) como pré-tratamento revelou-se fundamental, mesmo diante de uma água bruta de qualidade relativamente boa. A capacidade da UF em fornecer um permeado com SDI₁₅ consistentemente baixo (< 1,0) é crucial para a proteção das membranas de RO contra incrustações (fouling), prolongando sua vida útil e reduzindo drasticamente a frequência de limpezas químicas (CIP). Recomenda-se a manutenção rigorosa dos protocolos operacionais da UF e o monitoramento contínuo de seu desempenho como primeira linha de defesa da integridade do sistema RO.
- **Monitoramento Avançado e Gestão Inteligente:** A implementação de um sistema SCADA robusto, com telemetria, apresenta-se de valor inestimável, permitindo supervisão remota, análise de dados históricos para otimização (ajuste fino de dosagens químicas, programação de manutenções preditivas) e diagnóstico de falhas. Recomenda-se explorar continuamente as potencialidades do sistema SCADA para implementar lógicas de controle adaptativo, visando otimizar a operação em função da demanda, do custo energético e de variações na qualidade da água bruta.
- **Sustentabilidade na Gestão de Subprodutos:** A gestão ambientalmente responsável da salmoura concentrada e a otimização do uso de produtos químicos são pilares da sustentabilidade. É imperativo manter o monitoramento ambiental da área de descarte da salmoura, assegurando a conformidade contínua com as diretrizes da Resolução CONAMA 430/11 e 393/07 e a licença ambiental. Recomenda-se, adicionalmente, a avaliação periódica de alternativas químicas mais sustentáveis ("química verde") e a otimização contínua das dosagens, minimizando o consumo e o impacto ambiental associado.
- **Capacitação Local e Resiliência Logística:** A sustentabilidade operacional a longo prazo depende criticamente da capacitação e retenção de uma equipe técnica local qualificada. Investimentos contínuos em treinamento, alinhados a padrões nacionais e internacionais, são essenciais. Paralelamente, a manutenção de um estoque estratégico de peças sobressalentes críticas (como conjuntos motobomba) é uma medida de resiliência indispensável para mitigar os riscos associados à logística insular e evitar longos períodos de indisponibilidade..
- **Integração de Energias Renováveis:** O elevado custo da energia gerada a diesel em Noronha reforça a atratividade da integração com fontes renováveis. Recomenda-se aprofundar os estudos de viabilidade técnico-econômica para acoplar o sistema de dessalinização a usinas fotovoltaicas ou outras fontes disponíveis localmente, considerando as intermitências e a necessidade de sistemas de controle inteligentes para gerenciar a oferta e a demanda de energia. Tal integração reduziria significativamente o OPEX e a pegada de carbono do abastecimento de água.
- **Difusão do Conhecimento e Replicabilidade:** A experiência de Fernando de Noronha consolida um modelo de dessalinização modular, eficiente e sustentável, com alto potencial de replicabilidade para outras ilhas e comunidades remotas que enfrentam desafios hídricos. Recomenda-se a documentação detalhada do projeto, incluindo dados de desempenho e custos (CAPEX e OPEX), e sua ampla divulgação em fóruns técnicos nacionais e internacionais (ABES, ALADYR, AEDyR e IDRA), fomentando a adoção de soluções similares e contribuindo para o avanço do conhecimento na área.

Em síntese, o projeto de dessalinização de Fernando de Noronha transcende a mera solução de engenharia para um problema de escassez hídrica; ele se estabelece como um caso de sucesso na aplicação de tecnologias avançadas de forma integrada e sustentável, promovendo segurança hídrica, desenvolvimento socioeconômico e respeito ao meio ambiente em uma das mais importantes áreas de conservação do Brasil.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). M46: Reverse Osmosis and Nanofiltration. 2. ed. Denver: AWWA, 2007.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA). M61: Desalination of Seawater. Denver: AWWA, 2011.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 7 mai. 2021.

COMPESA. Dessaínizador da Compesa em Fernando de Noronha é destaque nacional como maior obra para abastecimento humano do país. 2022. Disponível em: <https://www.compesa.com.br>. Acesso em: 26 abr. 2025.

CONAMA. Resolução nº 237, de 19 de dezembro de 1997. Dispõe sobre a revisão e complementação dos procedimentos e critérios utilizados para o licenciamento ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 dez. 1997.

CONAMA. Resolução nº 393, de 8 de agosto de 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 9 ago. 2007.

CONAMA. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 maio 2011.

DANFOSS. Containerized SWRO unit retrofitted to save energy and maintenance. 2021. Caso de estudo SUEZ Aruba. Disponível em: <https://www.danfoss.com>. Acesso em: 26 abr. 2025.

DANFOSS. A new world record in SWRO energy efficiency underscores... 2024. Artigo institucional. Disponível em: <https://www.danfoss.com>. Acesso em: 26 abr. 2025.

DASHTPOUR, R.; AL-ZUBAIDY, S. Energy efficient reverse osmosis desalination process. International Journal of Environmental Science and Development, v. 3, n. 4, 2012, p. 339-345.

EL MERCANTIL. Siete vidas tiene un 40 pies. El Mercantil, 26 out. 2024. Disponível em: <https://elmercantil.com/2024/10/26/siete-vidas-tiene-un-40-pies/>. Acesso em: 26 abr. 2025.

GONÇALVES, M. F.; SILVA, R. A.; RAMOS, T. A. Materiais resistentes à corrosão em dessalinização marinha. Revista de Engenharia Marítima, v. 2, n. 1, 2019, p. 45-52.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). ISO 23446:2021: Marine technology — Product water quality of seawater reverse osmosis (RO) desalination — Guidelines for municipal water supply. Geneva: ISO, 2021.

LAGARTOS, A.; GALLEGOS, S. The future in SWRO design, operation, and membrane selection criteria in the Spanish Mediterranean region. In: CONGRESO INTERNACIONAL AEDYR, 13., 2023, Granada. Anais [...]. Granada: AEDyR, 2023. p. [páginas se disponíveis].

SETAPHT. Desaladoras portátiles: una solución rápida ante la crisis hídrica. SETAPHT, 2024. Disponível em: <https://www.setapht.com/setapht/desaladoras-portatiles-una-solucion-rapida-ante-la-crisis-hidrica/>. Acesso em: 26 abr. 2025.

SRINIVASAN, V.; MIRANDA, M. S.; THOMSON, M. Energy efficiency in reverse osmosis desalination plants. Desalination, v. 491, 2021, p. 1-15.

TAVARES, C. P.; LIMA, A. M.; OLIVEIRA, P. R. Uso de tecnologias modulares em sistemas de dessalinização. Revista Internacional de Dessaínização, v. 5, n. 2, 2020, p. 118-126.

THOMSON, M.; MIRANDA, M. S.; INFIELD, D. A small-scale seawater reverse-osmosis system with excellent energy efficiency. Desalination, v. 153, n. 1, 2002, p. 229-236.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Guidelines for Drinking-water Quality. 4. ed. incorporating the first addendum. Geneva: WHO, 2017.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). Water Safety Planning for Small Community Water Supplies. Geneva: WHO, 2012.