



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Muriell Bernardo de Macedo

**Estudo preliminar de viabilidade de um sistema de dessalinização de água do
mar no sul da Ilha de Florianópolis**

Florianópolis
2024

Muriell Bernardo de Macedo

Estudo preliminar de viabilidade de um sistema de dessalinização de água do mar no sul da Ilha de Florianópolis

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Maurício Luíz Sens
Coorientador(a): Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso

Florianópolis

2024

Macedo, Muriell Bernardo de

Estudo preliminar de viabilidade de um sistema de dessalinização de água do mar no sul da Ilha de Florianópolis / Muriell Bernardo de Macedo ; orientador, Maurício Luíz Sens, coorientador, Ramon Lucas Dalsasso, 2024.

138 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Engenharia Sanitária e Ambiental. 3. dessalinização . 4. abastecimento de água. 5. gestão hídrica integrada. I. Sens, Maurício Luíz . II. Dalsasso, Ramon Lucas . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Muriell Bernardo de Macedo

Estudo preliminar de viabilidade de um sistema de dessalinização de água do mar no sul da Ilha de Florianópolis

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 11 de dezembro de 2024.

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Prof. Maurício Luíz Sens, Dr.

Orientador(a)

Giuliana Baron, Mestre, UFSC

Ana Maria Beims Lopes, Mestre, UFSC

Fabiana Valois Thiessen, Mestre, Grupo Habitasul

Florianópolis, 11 de dezembro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho à minha família, cujos ensinamentos e apoio incondicional foram a base da minha jornada.

Aos meus pais, Suzete e Marco, minha gratidão eterna. Mãe, Suzete, você me inspira todos os dias com seu jeito único e habilidade de solucionar problemas com maestria. Parte do meu amor pela engenharia nasceu do desejo de resolver as coisas com a mesma dedicação e habilidade que você demonstra diariamente. Pai, Marco, obrigada por sempre me apoiar, acolher e cuidar de mim, sendo meu parceiro em todas as etapas da vida.

À minha irmã incrível, Kárita, meu agradecimento especial por estar sempre ao meu lado, dedicando-se com carinho e bom humor. Suas palavras de incentivo, a ajuda constante e as muitas risadas sobre membranas tornaram esta jornada mais leve e especial. Esta conquista é nossa, um verdadeiro esforço de família. Também agradeço a todos os meus familiares, que sempre acreditaram em mim, oferecendo apoio e motivação em cada passo do caminho.

Aos meus amigos, meu agradecimento por compartilharem momentos de alegria, desafios e conquistas. Um agradecimento especial à Maiá, que tem estado ao meu lado desde sempre, me incentivando e apoiando em todas as etapas da caminhada, especialmente nos momentos mais desafiadores, e à Valentina, por seu carinho, motivação e apoio constante ao longo desta jornada.

Não poderia deixar de expressar minha imensa gratidão aos meus orientadores, Prof. Dr. Maurício Luíz Sens e Prof. Dr. Ramon Lucas Dalsasso, por sua sabedoria, dedicação e comprometimento ao longo de toda esta trajetória. Suas orientações foram fundamentais, não apenas em sala de aula, mas também durante as viagens de estudo e nas experiências como monitora das disciplinas, momentos em que aprendi imensamente e me apaixonei ainda mais pela engenharia. A confiança de vocês no meu potencial, aliada ao incentivo constante para que eu me superasse, foram pilares essenciais para o meu crescimento acadêmico e profissional. Vocês despertaram em mim um amor ainda maior pela Engenharia Sanitária e Ambiental, um curso que admiro profundamente por sua multidisciplinaridade e relevância para a sociedade.

Agradeço também a todos os professores e colegas do curso de Engenharia ao longo da graduação, que, com seus desafios e apoio, me ajudaram a me tornar

uma engenheira capaz de enxergar soluções através dos problemas. Essas vivências reforçaram a importância da disciplina e da perseverança, valores indispensáveis para alcançar qualquer objetivo.

Por fim, deixo uma mensagem para todos: com esforço, dedicação e leveza, é possível alcançar os objetivos que sonhamos, sempre valorizando o aprendizado e as risadas pelo caminho, enquanto mantemos o coração aberto para novas aventuras.

“A cura para tudo é água salgada: suor, lágrimas ou o mar”
(Dinesen [Brixen], 1934, p. 39).

RESUMO

A crescente preocupação global com a escassez de recursos hídricos, intensificada pela poluição de origem antrópica e pelo acelerado crescimento populacional, tem estimulado a busca por soluções inovadoras e sustentáveis para garantir o abastecimento de água potável. Regiões com disponibilidade limitada de água doce enfrentam desafios significativos no atendimento à demanda humana, e a dessalinização da água do mar surge como uma alternativa promissora, especialmente em áreas costeiras. Este estudo propõe a implementação de um sistema de dessalinização por Osmose Inversa na Ilha de Florianópolis, com o objetivo de complementar o abastecimento hídrico em resposta à crescente demanda por água potável na região sul da ilha. A proposta integra o sistema à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, aproveitando a proximidade com o mar, a infraestrutura existente – como reservatórios e rede de distribuição – e a disponibilidade de terreno, fatores que favorecem a viabilidade técnica e operacional da instalação. A revisão bibliográfica abrange técnicas de dessalinização aplicadas ao tratamento e abastecimento de água, com destaque para os desafios associados à crescente escassez de água doce, ao risco de contaminação de fontes naturais e à predominância da ocupação populacional em regiões litorâneas. Entre as tecnologias analisadas, a Osmose Inversa se destaca pela alta eficiência na remoção de sais e impurezas, consolidando-se como a principal escolha em projetos de dessalinização. A metodologia deste estudo inclui uma análise detalhada das características físicas e ambientais da área de implementação, a avaliação técnica da viabilidade do sistema proposto e o delineamento dos requisitos de pré-tratamento necessários para aumentar a durabilidade e o desempenho das membranas. Adicionalmente, o estudo considera os custos econômicos e energéticos associados ao processo, comparando-os com alternativas convencionais de captação e tratamento de água. Também é realizada uma modelagem de dispersão para a salmoura residual, baseada em parâmetros técnicos previamente definidos em estudos de referência. A proposta contempla ainda a captação em margem por meio de poços verticais associados a sistemas de pré-tratamento, bem como a análise de cenários de vazão de 100 L/s e 200 L/s, com sugestões para a localização ideal do sistema e do emissário de salmoura. Os resultados obtidos indicam que, apesar dos desafios iniciais relacionados aos custos de implantação e manutenção, a dessalinização da água do mar apresenta-se como uma solução técnica e economicamente viável para a região sul da Ilha de Florianópolis. A proximidade do mar, a infraestrutura disponível – como redes de distribuição e sistemas de pós-tratamento – e a viabilidade de diluição da salmoura na área prevista para instalação são fatores determinantes para o sucesso do projeto. Além disso, o uso de tecnologias modernas de recuperação de energia torna o sistema mais eficiente e competitivo em termos de custos operacionais. Conclui-se que a dessalinização da água do mar, integrada a um plano de gestão hídrica sustentável e à infraestrutura existente, oferece uma solução complementar robusta e estratégica para o abastecimento hídrico da região. A implementação proposta não apenas reforça a segurança hídrica local, mas também reduz a dependência de fontes externas, minimizando perdas no transporte e contribuindo para a preservação ambiental e a resiliência dos recursos hídricos da ilha.

Palavras-chave: Dessalinização; abastecimento de água; gestão hídrica integrada.

ABSTRACT

The growing global concern over water scarcity, exacerbated by anthropogenic pollution and rapid population growth, has driven the search for innovative and sustainable solutions to ensure the supply of potable water. Regions with limited freshwater availability face significant challenges in meeting human demand, and seawater desalination has emerged as a promising alternative, particularly in coastal areas. This study proposes the implementation of a reverse osmosis desalination system on the Island of Florianopolis, aiming to supplement the water supply in response to the increasing demand for potable water in the southern region of the island. The proposal integrates the system into the Lagoa do Peri Water Treatment Plant (WTP), leveraging the proximity to the sea, existing infrastructure—such as reservoirs and distribution networks—and the availability of land, which collectively enhance the technical and operational feasibility of the installation. The literature review explores key desalination techniques applied to water treatment and supply, emphasizing the challenges associated with freshwater scarcity, the risk of contamination of natural sources, and the predominance of population settlement in coastal regions. Among the technologies analyzed, reverse osmosis stands out for its high efficiency in removing salts and impurities, establishing itself as the leading choice in desalination projects. The methodology of this study includes a detailed analysis of the physical and environmental characteristics of the proposed implementation area, an assessment of the technical feasibility of the proposed system, and the definition of pretreatment requirements to enhance the durability and performance of membranes. Additionally, the study examines the economic and energy costs associated with the process, comparing them to conventional water capture and treatment alternatives. A dispersion modeling of the residual brine is also conducted, based on technical parameters established in reference studies. The proposal further includes shoreline abstraction through vertical wells combined with pretreatment systems, as well as the analysis of flow rate scenarios of 100 L/s and 200 L/s, with recommendations for the optimal location of the system and the brine outfall. The results indicate that, despite initial challenges related to installation and maintenance costs, seawater desalination is a technically and economically viable solution for the southern region of Florianopolis Island. Factors such as proximity to the sea, available infrastructure – including distribution networks and post-treatment systems – and the feasibility of brine dilution at the proposed installation site play a decisive role in the project's success. Additionally, the use of modern energy recovery technologies enhances system efficiency and operational cost competitiveness. It is concluded that seawater desalination, integrated into a sustainable water management plan and existing infrastructure, offers a robust and strategic complementary solution for the region's water supply. The proposed implementation not only strengthens local water security but also reduces dependency on external sources, minimizes transportation losses, and contributes to environmental preservation and the resilience of the island's water resources.

Keywords: Desalination; water supply; integrated water management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS	24
1.1.1	Objetivos Específicos.....	24
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	CONTEXTO DESSALINIZAÇÃO MUNDIAL	25
2.2	CRESCIMENTO DA CAPACIDADE DE DESSALINIZAÇÃO.....	26
2.3	TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO	28
2.4	DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE INVERSA	29
2.5	MEMBRANAS	34
2.6	PRÉ-TRATAMENTO PARA MEMBRANAS DE OI	37
2.7	REJEITO DA DESSALINIZAÇÃO	39
2.8	IMPACTOS AMBIENTAIS.....	43
2.9	ECONOMIA DA DESSALINIZAÇÃO.....	46
2.10	TRATAMENTO DE ÁGUA CONVENCIONAIS VS. DESSALINIZAÇÃO.....	48
2.11	CUSTOS PLANTAS DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR POR OSMOSE INVERSA.....	51
2.11.1	Custos De Implantação (CAPEX)	52
2.11.2	Custos Operacionais (OPEX).....	54
3	METODOLOGIA DA PESQUISA	57
3.1	TIPOLOGIA DA PESQUISA.....	57
3.2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	57
3.2.1	Levantamento De Dados	57
3.2.2	Análise Técnica.....	58
3.2.3	Análise Econômica.....	58
3.2.4	Simulação De Cenários	58
3.2.5	Anteprojeto Da Eta Com Dessalinização Por Osmose Inversa.....	59
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO: ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA COSTA LESTE SUL DE FLORIANÓPOLIS	60
4.2	ÁREA DE ESTUDO PARA PROJETO PILOTO	67
4.3	MODELAGEM EMISSÁRIO DE SALMOURA	75
4.4	SUGESTÃO DE DISTÂNCIA PARA EMISSÃO	85

4.5	CAPTAÇÃO DE ÁGUA MARINHA E PRÉ-TRATAMENTO	88
4.6	ERD (DISPOSITIVO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA) - RECUPERAÇÃO DE ENERGIA POR OSMOSE.....	93
4.7	PÓS-TRATAMENTO.....	96
5	ANTEPROJETO: DESSALINIZAÇÃO.....	99
5.1	PRIMEIRO CENÁRIO UF + OSMOSE REVERSA DE ÁGUA DO MAR (SWRO) – VAZÃO DE 100 L/S	103
5.2	SISTEMA CENÁRIO 2 – VAZÃO DE 200 L/S.....	110
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	125
	REFERÊNCIAS.....	128
	APÊNDICE A- CONFIGURAÇÕES CENÁRIO 100 L/S	138

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Contexto global referente a dessalinização	26
Figura 2 - Principais aplicações da Osmose Inversa por indústria	30
Figura 3 - Osmose Reversa	32
Figura 4 - Componentes de um dessalinizador	36
Figura 5 - Tipos de membranas e suas características	37
Figura 6 - Produção de salmoura por diferentes tecnologias de dessalinização.....	42
Figura 7 - Panorama da Produção de salmoura.....	42
Figura 8 - Produção de salmoura por distância da costa.	43
Figura 9 - Distribuição referente aos custos de dessalinização por cada processo e tipo de água.....	47
Figura 10 - Distribuição dos Custos de Implementação	54
Figura 11 - Custos Operacionais (OPEX) com Escala Logarítmica.	55
Figura 12 - Custo Ambiental da Produção de Água por Dessalinização	56
Figura 13 - Alterações na cobertura do solo ao longo do tempo Costa Leste Sul Florianópolis.....	61
Figura 14 - Mapa de sistemas de abastecimento de Florianópolis.....	61
Figura 15 - Vazão Média e Capacidade Máxima por Fonte de Captação	62
Figura 16 - Projeção populacional CLS.....	63
Figura 17 - Esquema de funcionamento da ETA Lagoa do Peri do SCSL.	64
Figura 18 - Capacidades dos reservatórios SACLS.	66
Figura 19 - Mapa localização área de estudo.....	68
Figura 20 - Área de estudo com setores esquemáticos.	71
Figura 21 - Sistemas de Ondas na Ilha de Santa Catarina	71
Figura 22 - Taxa de Transporte por Caso (ver Tabela 17).	72
Figura 23 - Análise hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.....	74
Figura 24 - Análise Hidrodinâmica e Modelagem de direções e velocidades das correntes Leste.....	75
Figura 25 - Praia da Armação.	76
Figura 26 - Produção de salmoura 100 L/s e 200L/s.....	79
Figura 27 - Modelagem Advecção-Difusão.	80
Figura 28 - Modelagem hidrodinâmica	81
Figura 29 - Comparação entre modelagem dispersão simples x hidrodinâmica	82

Figura 30 - Dispersão emissário 100 metros de comprimento variação tempo x profundidade.	87
Figura 31 - Poço de captação vertical.	91
Figura 32 - Esquema do Dispositivo de Recuperação de Energia (ERD).	95
Figura 33 - Esquema do sistema de captação de água do mar	100
Figura 34 - Sugestão de layout planta de dessalinização para complementar SACLS.	102
Figura 35 - Diagrama de fluxo do sistema de Osmose Inversa.....	104
Figura 36 - Esquema do sistema de osmose reversa com vazão de 100 L/s.	105
Figura 37 - Representação gráfica dos custos de água.	106
Figura 38 - Esquema do sistema de osmose reversa com vazão de 200 L/s	111
Figura 39 - Concentração de solutos estágio 1 - 200 L/s sistema 1.....	112
Figura 40 - Representação gráfica dos custos relacionados ao consumo energético do sistema.....	114
Figura 41 - iSave 70 da Danfoss ERD.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação das águas quando à salinidade.....	25
Tabela 2 - Classificação da dessalinização por fonte de água.....	27
Tabela 3 - Aspectos do Método de Dessalinização (continua).....	28
Tabela 4 - Fatores que influenciam o desempenho da osmose reversa	31
Tabela 5 - Classificação dos Processos OI e faixa de pressão operacional	33
Tabela 6 - Caracterização da qualidade da água bruta do mar para o pré-tratamento	38
Tabela 7 - Preocupações ambientais relevantes e soluções sustentáveis (continua)	44
Tabela 8 - Consumo de energia dos principais processos de dessalinização.....	48
Tabela 9 - Comparação de custos de sistemas de tratamento de água.	51
Tabela 10 - Distribuição dos Custos de Implantação (CAPEX).....	53
Tabela 11 – Custos Operacionais (OPEX) (US\$/m ³)	55
Tabela 12 - Vazão média e capacidade máxima captação SACLs	62
Tabela 13 - Processos de Tratamento da ETA Lagoa do Peri.	65
Tabela 14 - Capacidade e demanda de acordo com cada região	66
Tabela 15 - Parâmetros água bruta Florianópolis.	69
Tabela 16 - Valores de Granulometria (ϕ) da Praia da Armação.....	70
Tabela 17 - Sistema de Ondas e Taxa Média de Transporte Sedimentar.....	72
Tabela 18 - Comportamento de correntes.....	73
Tabela 19 - Análise hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.	73
Tabela 20 - Produção de Salmoura para Diferentes Taxas de Recuperação (100 L/s e 200 L/s)	78
Tabela 21 - Limites de Concentração de Salmoura na Osmose Inversa.....	83
Tabela 22 - Diretrizes para Emissão de Salmoura no Mar	83
Tabela 23 - Características Granulométricas Praia da Armação.....	93
Tabela 24 - Dados de Fluxo e Qualidade da Água sistema 100 L/s.....	104
Tabela 25 - Configuração do sistema e as condições operacionais 100 L/s.....	105
Tabela 26 - Custos de Água.....	106
Tabela 27 – Cenários 100 L/s sistema 1 Dupont Water Solutions (continua).....	107
Tabela 28 - Cenário 100 L/s sistema 2.....	109
Tabela 29 - Dados de Fluxo e Qualidade da Água sistema 200 L/s sistema 1	110

Tabela 30 - Configuração do sistema e as condições operacionais 200 L/s sistema 1	111
Tabela 31 - Ajustes químicos sistema 1 de 200 L/s	113
Tabela 32 - Custos de Água de Serviço para o sistema 1 de 200 L/S	113
Tabela 33 - Dados custos de Eletricidade sistema 1 200 L/S	114
Tabela 34 - Sistema 1 200 L/S	115
Tabela 35 - Dados custos Químicos sistema 1 200 L/S	115
Tabela 36 - Custos Totais Sistema 1 200 L/S	115
Tabela 37 - Cenário 200 L/S Sistema 2 CAPEX (continua).....	116
Tabela 38 – Comparação entre os sistemas 1 e 2 (200 L/S) CAPEX	116
Tabela 39 - Cenário 200 L/S Sistema 2 OPEX.....	117
Tabela 40 - Comparativa entre os sistemas 1 e 2 (200 L/S) OPEX	117
Tabela 41 - Comparação Cenários 100 L/s x 200 L/s	118
Tabela 42 – Comparação consolidada de custos e parâmetros operacionais.	118
Tabela 43 – Comparação de Custos de Água de Serviço.....	119
Tabela 44 – Comparação de Custos de Eletricidade	119
Tabela 45 - Comparação de custos totais (OPEX + CAPEX).	120
Tabela 46 - Tabela de Estimativa de Custos com e sem ERD.....	123
Tabela 47 - Configurações cenário 100 L/s em concentrações (mg/L como íon)....	138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparação dos Constituintes a Serem Removidos e Tecnologias de Tratamento	35
Quadro 2 - Práticas de gestão de rejeitos e seus impactos	40
Quadro 3 - Quadro principais componentes de um SAA.....	50
Quadro 4 - Sistemas de Ondas na Sazonalidade	70
Quadro 5 - Análise de dispersão de acordo com profundidade emissário comprimento 100 metros.	86
Quadro 6 - Objetivos e processos de pré-tratamento.....	89
Quadro 7 - Caracterização da qualidade da água bruta marinha para o pré-tratamento	91
Quadro 8 - Tipos de Dispositivos de Recuperação de Energia para Dessalinização	95
Quadro 9 - Critérios para sistemas de operação.....	101
Quadro 10 - Parâmetros e benefícios do dispositivo ERD.	122

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BWD	Água Salobra (<i>Brackish Water Desalination</i>)
BW-ED	Eletrodialise com água salobra
BW-RO	Osiose Inversa com água salobra
EAP	Leste Asiático e Pacífico
ED	Eletrodialise (<i>Electrodialysis</i>)
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
GWI	<i>Global Water Intelligence</i>
kWh/m ³	Quilowatt-hora por metro cúbico de água produzida
LAC	América Latina e Caribe
LM	Médio Baixo
MED	Destilação de Múltiplos Estágios (<i>Multi-Effect Distillation</i>)
MENA	Oriente Médio e Norte da África
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MSF	Destilação por Flash em Múltiplos Estágios (<i>Multi-Stage Flash</i>)
MVC	Compressão Mecânica de Vapor (<i>Mechanical Vapor Compression</i>)
NA	América do Norte
RO	Osiose Reversa (<i>Reverse Osmosis</i>)
RW	Águas Salobras e Duras (<i>Reclaimed Water</i>)
SAA	Sistemas de Abastecimento de Água
SCSL	Abastecimento de Água Costa Sul Leste
SDI	Índice de Densidade de Silte (<i>Silt Density Index</i>)
SSA	África Subsaariana
SW-MED	Destilação de Múltiplos Estágios com água do mar
SW-MSF	Flash de Múltiplos Estágios com água do mar
SWRO	Osiose Reversa de Água do Mar (<i>Seawater Reverse Osmosis</i>)
SW-RO	Osiose Inversa com água do mar
TDS	Sólidos Totais Dissolvidos (<i>Total Dissolved Solids</i>)
TVC	Compressão Térmica de Vapor (<i>Thermal Vapor Compression</i>)
UF	Ultrafiltração (<i>Ultrafiltration</i>)

UHPRO	Osmose Inversa de Ultra-Alta Pressão (<i>Ultra-High Pressure Reverse Osmosis</i>)
VC	Compressão de Vapor (<i>Vapor Compression</i>)
WE	Europa Ocidental
WMH	Litros por Metro Quadrado por Hora (<i>Liters per Square Meter per Hour</i>)

1 INTRODUÇÃO

A sustentabilidade global não poderá ser atingida sem assegurar a disponibilidade de água potável para todos os usuários. Apesar de ser um dos objetivos centrais (SDG6) da agenda da ONU 2030 para o desenvolvimento sustentável (ONU, 2015), a escassez de água atual está aumentando rapidamente, afetando um número crescente de consumidores residenciais, comerciais, industriais e agrícolas em todo o mundo (Faramarzi *et al.*, 2010; Vollmer e Harrison, 2021; Mishra *et al.*, 2021). Estima-se que a demanda global por água aumentará em 55%, enquanto cerca de 25% das grandes cidades já enfrentam algum nível de estresse hídrico (Lund Schlamovitz e Becker, 2021), o que representa um risco significativo para a saúde pública, a segurança alimentar e o desenvolvimento econômico em muitas regiões do mundo. Atualmente, aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas no mundo carecem de acesso à água potável segura (UNICEF e OMS, 2019). Essa realidade se torna ainda mais crítica nas áreas urbanas, onde a competição por recursos hídricos é intensa e a disponibilidade de água tratada pode ser uma questão vital para populações vulneráveis.

No Brasil, a gestão dos recursos hídricos apresenta uma grande variabilidade, refletindo a diversidade geográfica, econômica e social do país. As mudanças climáticas impactam diretamente a hidrologia, tornando as previsões sobre as vazões cada vez mais incertas. O Plano Nacional de Mudança Climática (MMA, 2008) ressalta a importância de realizar uma avaliação abrangente dos impactos das mudanças climáticas sobre a disponibilidade de água e os riscos associados a esse recurso.

A escassez de água potável é um desafio crescente em várias regiões do mundo, incluindo Florianópolis, onde a demanda por água tem aumentado significativamente. A capital de Santa Catarina enfrenta problemas hídricos comuns a muitas áreas urbanas brasileiras. Com uma população de 537.213 habitantes, segundo o Censo de 2022, e uma densidade demográfica de 796,05 habitantes por km², a cidade registrou um crescimento de 27,53% em comparação a 2010 (IBGE, 2022). A estimativa para 2024 é de 576.361 pessoas (IBGE, 2024). Além disso, a ilha é um destino turístico popular, resultando em uma flutuação significativa da demanda por água durante a alta temporada, quando a população pode aumentar substancialmente devido ao veraneio. Essa pressão adicional sobre os sistemas de abastecimento agrava ainda mais a situação hídrica.

O crescimento desordenado e a especulação imobiliária têm impactado a qualidade de vida e a preservação do ecossistema, gerando a percepção de "inchaço" urbano. Desde os anos 1990, bairros como o Campeche, predominantemente residenciais, atraíram moradores permanentes em razão de sua beleza natural. O Plano Diretor de Urbanismo de Florianópolis, instituído pela Lei Complementar Municipal 482/2014 e revisado em maio de 2023 pela Lei Complementar 739/2023, estabelece diretrizes para o uso e ocupação do solo, promovendo a verticalização e o adensamento urbano, mesmo em áreas carentes de infraestrutura básica, como a rede de esgoto. Essa situação resulta em irregularidades na destinação de efluentes, contaminando rios e praias e exacerbando os problemas ambientais na região.

A Lagoa do Peri, situada no sul da ilha, é a principal fonte de água doce que abastece o Sistema Costa Leste/Sul de Florianópolis. A qualidade da água é regulada pela Resolução CONAMA nº 357/2005 e monitorada pelo Instituto do Meio Ambiente de Santa Catarina (IMA). Contudo, a urbanização descontrolada e a poluição têm comprometido essa qualidade, aumentando os custos de tratamento, que são repassados à população (CASAN, 2024). A Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri opera atualmente em sua capacidade máxima, ilustrando a pressão sobre a infraestrutura hídrica local, especialmente durante os períodos de alta demanda.

O Sistema Costa Leste/Sul é abastecido pela Lagoa do Peri e por poços subterrâneos, como os do Campeche e Rio Tavares. Entretanto, a demanda crescente exige soluções complementares. Além disso, a água também é captada do Rio Cubatão, no continente, com vazões variando de 500 a 1.200 L/s, dependendo das condições de estiagem e da qualidade da água (CASAN, 2024). A interrupção do abastecimento, devido a rompimentos na rede, destaca a necessidade de uma gestão integrada dos recursos hídricos, bem como a consideração de sistemas alternativos para evitar a sobrecarga dos mananciais existentes.

A interdependência entre os setores hídrico e energético agrava a crise da água, considerando que o tratamento e a distribuição de água consomem aproximadamente 7% da energia global (Tripathi, 2007). Essa escassez não apenas impacta a disponibilidade de água, mas também afeta a oferta de energia, comprometendo o desenvolvimento econômico e a qualidade de vida. Portanto, as soluções para a crise hídrica devem ser alinhadas a estratégias que promovam a eficiência energética, visando uma gestão sustentável dos recursos naturais.

Com o crescimento populacional e o desenvolvimento acelerado, a limitação dos recursos de água doce tornou-se uma questão central para o desenvolvimento sustentável (Ligaray *et al.*, 2020; LIN *et al.*, 2021). Nesse contexto, a dessalinização da água do mar se destaca como uma tecnologia essencial para mitigar a escassez hídrica em escala global (Liu *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2020). Essa abordagem apresenta-se como uma alternativa promissora para complementar o fornecimento de água potável, especialmente em regiões costeiras como Florianópolis, onde a demanda por água é crescente e os sistemas de abastecimento frequentemente enfrentam Sobrecarga e flutuações na disponibilidade de recursos hídricos.

A Ilha de Santa Catarina possui uma vasta disponibilidade de água salgada, sendo cercada pelo oceano Atlântico, o que torna a dessalinização uma alternativa viável e sustentável. Ao utilizar um recurso abundante e subaproveitado, o processo de dessalinização pode reduzir significativamente a pressão sobre os mananciais de água doce, como a Lagoa do Peri, preservando-os para futuras gerações e minimizando o impacto ambiental causado pelo uso excessivo (Guerreiro, 2009).

A dessalinização de água é reconhecida como uma das principais abordagens para obter água potável a partir de diversas fontes (Prihasto *et al.* (2009). Esse processo envolve a remoção de sais e outros minerais da água do mar ou da água salobra, tornando-a adequada para o consumo humano e para usos industriais e domésticos (Jamaly *et al.*, 2014). Com os avanços nas tecnologias de membranas, os métodos que utilizam membranas estão se destacando como as alternativas mais promissoras e eficientes em termos energéticos para a dessalinização (Cay-Durgun; Lind, 2018). Esses processos apresentam ainda benefícios como menor necessidade de espaço, compactação das instalações, facilidade de operação e automação (Wang *et al.*, 2017).

Os sistemas baseados em membranas funcionam por meio de pressão, utilizando membranas semipermeáveis que permitem a passagem das moléculas de água, enquanto rejeitam os sais (AMY *et al.*, 2017; QASIM *et al.*, 2018). A Osmose Inversa, em particular, é considerada a técnica mais confiável e avançada para dessalinização de água do mar e água salobra, servindo como uma solução alternativa para a produção de água limpa e visando a redução dos custos relacionados a esses processos (PARK *et al.*, 2012; SARAI ATAB *et al.*, 2016).

Exemplos de projetos bem-sucedidos, como os sistemas de dessalinização implementados em Fernando de Noronha e o Programa Água Doce (PAD),

evidenciam a viabilidade dessa tecnologia em contextos desafiadores, promovendo o acesso à água potável para comunidades vulneráveis e contribuindo para a segurança hídrica. A utilização da dessalinização como uma opção para complementar o abastecimento de água em Florianópolis, especialmente na região da Costa Leste Sul, é respaldada por vários fatores que evidenciam seu potencial para abordar os desafios hídricos da área.

A água limpa é um recurso escasso e estressado, uma vez que apenas cerca de 2,5% de toda a água presente na Terra é adequada para uso e consumo humano direto (ABDELKAREEM *et al.*, 2018; ALKAISI *et al.*, 2017). Diante da crescente demanda por recursos hídricos, a dessalinização surge como uma alternativa promissora para ampliar as opções de abastecimento, utilizando a vasta quantidade de água do mar, que cobre mais de 71% da superfície terrestre (USGS, 2019). Apesar de a maior parte dos recursos hídricos ser composta por água salina (com salinidade entre 30.000 e 50.000 mg/L), o desenvolvimento de técnicas de dessalinização é crucial para transformar água salina em água potável, sendo que tecnologias baseadas em membranas e processos térmicos estão sendo empregadas em escala industrial globalmente (YOUNES *et al.*, 2019).

Contudo a dessalinização também apresenta desafios significativos, o custo inicial de construção de plantas dessalinizadoras pode ser alto, e o impacto ambiental da extração de água do mar e do descarte de sal concentrado requer atenção. Estudos como o de Pérez-Foguet *et al.* (2019) enfatizam a necessidade de uma gestão integrada que considere tanto os benefícios quanto os impactos ambientais da dessalinização.

Este trabalho representa um estudo preliminar que visa verificar a viabilidade da implementação de um sistema de dessalinização integrado à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri. A análise considera a infraestrutura existente, que já possui reservatórios e redes de distribuição ativas, permitindo um aproveitamento otimizado dos recursos disponíveis. O projeto propõe o uso do sistema atual para o pós-tratamento da água dessalinizada, incluindo a instalação de tanques de contato para fluoretação e desinfecção. A instalação de módulos de Osmose Inversa e um sistema de pré-tratamento em margem com poços verticais pode ser realizada sem grandes intervenções, prolongando a vida útil das membranas e assegurando a operação estável.

É essencial avaliar a proximidade do local ao mar, assim como a questão da posse do terreno pela concessionária responsável pelo abastecimento, uma vez que esses fatores impactam diretamente a viabilidade do projeto. Além disso, a proximidade da Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri com a Praia da Armação facilita a captação da água do mar, reduzindo os custos de transporte e energia associados ao processo. Outro aspecto a ser analisado é a dispersão da salmoura resultante do processo de dessalinização, considerando se as condições locais são adequadas para o descarte do concentrado, a fim de minimizar impactos ambientais.

Economicamente, a dessalinização tem se tornado cada vez mais sustentável, com inovações que reduzem o consumo energético e os impactos relacionados ao descarte de salmoura. A integração de fontes de energia renovável pode ainda contribuir para diminuir os custos operacionais, tornando essa tecnologia mais acessível e ecologicamente viável (Malaeb; Ayoub, 2011).

Este estudo preliminar busca avaliar aspectos de viabilidade da implementação de um sistema de dessalinização na ETA da Lagoa do Peri, considerando aspectos técnicos, econômicos e ambientais. Serão examinadas as condições geológicas, oceanográficas e hidrológicas da região, além de comparações com projetos semelhantes em outras localidades. A dessalinização é considerada uma alternativa, para complementar e assegurar a disponibilidade de abastecimento da costa leste sul.

A adoção da dessalinização por Osmose Inversa na Ilha de Santa Catarina pode representar uma solução técnica viável, ambientalmente responsável e economicamente sustentável. Este trabalho visa estabelecer as bases para um futuro projeto, bem como para um estudo mais aprofundado sobre a viabilidade de um sistema de dessalinização por Osmose Inversa, direcionado ao abastecimento da Costa Leste Sul de Florianópolis. Além disso, pretende-se que os resultados sirvam como modelo que pode ser replicado em outras regiões da ilha que enfrentam desafios semelhantes no abastecimento de água.

Além disso, a adoção de tecnologias de dessalinização está alinhada com os princípios do desenvolvimento sustentável. Ao utilizar a água do mar, essa solução pode contribuir para a conservação dos ecossistemas aquáticos locais, diminuindo a pressão sobre os mananciais de água doce e promovendo um equilíbrio entre o

desenvolvimento humano e a preservação ambiental. Essa consideração é crucial para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos a longo prazo.

1.1 OBJETIVOS

Realizar um estudo preliminar (anteprojeto) técnico, econômico e ambiental para a implementação de um sistema de dessalinização por Osmose Inversa integrado à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, visando garantir o abastecimento sustentável de água potável para a população da Costa leste sul, de Florianópolis com uma gestão integrada e eficiente dos recursos hídricos.

1.1.1 Objetivos específicos

- a) Analisar as tecnologias de dessalinização que se adequam melhor às características e necessidades da Costa Leste Sul
- b) Avaliar custos e benefícios da dessalinização, a partir de análise econômico-financeira comparativa, considerando o investimento inicial, os custos de operação e manutenção, bem como os impactos ambientais e sociais associados à implementação de um sistema de dessalinização, determinando seu custo-benefício CAPEX/OPEX.
- c) Propor diretrizes para integração do sistema de dessalinização: recomendações técnicas e operacionais para a integração eficiente do sistema de dessalinização com a Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, levando em conta aspectos como compatibilidade tecnológica, sustentabilidade ambiental e viabilidade econômica.
- d) Identificar um local adequado para a instalação do sistema de dessalinização, avaliando as condições que favoreçam sua implementação.
- e) Propor pré-tratamento da água que será dessalinizada, assegurando a otimização do processo e a eficiência do sistema de Osmose Inversa.
- f) Propor alternativas para o tratamento ou destino do concentrado gerado no processo de Osmose Inversa, visando minimizar os impactos ambientais associados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CONTEXTO DESSALINIZAÇÃO MUNDIAL

Em termos gerais, com o crescimento demográfico e espacial da população urbana em todo o mundo, e reconhecendo que mais da metade da população mundial vive a até 100 quilômetros da costa (National Oceanic and Atmospheric Administration, U.S. Department of Commerce, 2023). O crescimento esperado no mercado de dessalinização é muito relevante, não apenas no setor de água do mar, mas também em processos de dessalinização de água salobra e água residual (Lattemann *et al.*, 2010). Essa ampliação prevista deve-se, em grande parte, ao avanço significativo nas metodologias de dessalinização, que se tornam cada vez mais eficientes e permitem uma redução considerável no custo do metro cúbico de água tratada. Além disso, a técnica ganha destaque pela crescente necessidade de encontrar fontes alternativas de água, devido à poluição e à escassez de água doce, que estão se tornando problemas cada vez mais graves (Guerreiro, 2009).

Tabela 1 - Classificação das águas quando à salinidade

Classificação	Salinidade (‰)	Salinidade (g/L)
Águas doces	Igual ou Inferior a 0,5	Igual ou Inferior a 0,5
Águas salobras	Superior a 0,5 e inferior a 30	Superior a 0,5 e inferior a 30
Águas salinas	Igual ou superior a 30	Igual ou superior a 30

Fonte: Adaptado de Resolução CONAMA N° 357, de 17 de março de 2005.

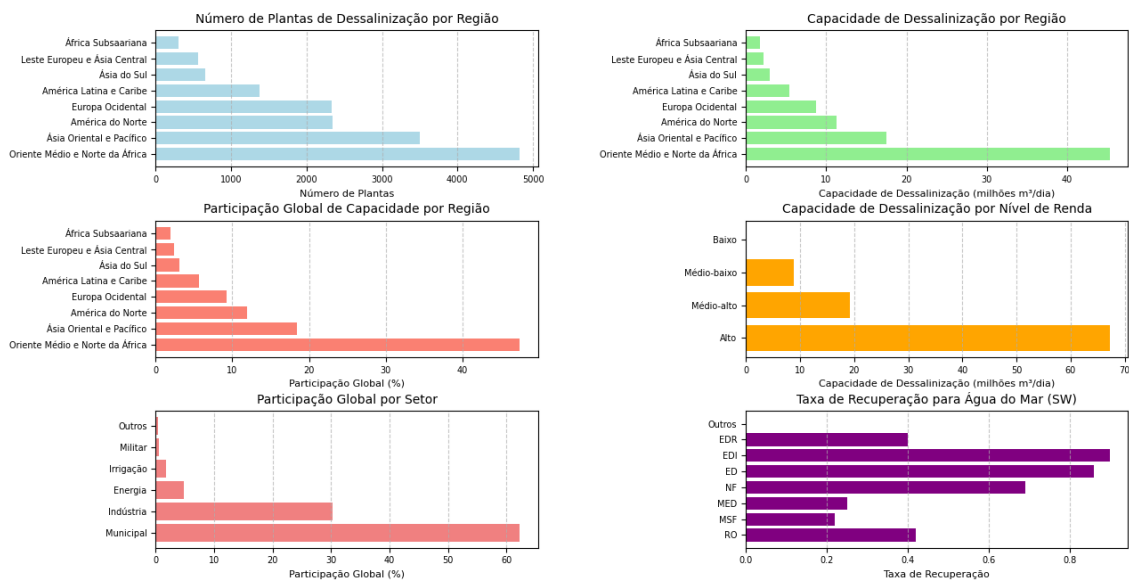
De acordo com o World Economic Forum (2024), a dessalinização de águas salinas pode ser considerada uma alternativa viável para a escassez de água potável em várias partes do mundo. Este processo envolve a remoção de sais e outros minerais da água do mar, permitindo que essa água seja utilizada para consumo humano e outras finalidades (ver Tabela 1). No entanto, a dessalinização enfrenta desafios significativos, principalmente devido às suas altas demandas energéticas. Essas tecnologias exigem grandes quantidades de energia térmica e/ou eletricidade, resultando na liberação de calor residual, emissões de gases de efeito estufa e descarte de salmoura.

2.2 CRESCIMENTO DA CAPACIDADE DE DESSALINIZAÇÃO

Nos últimos anos, a capacidade global de dessalinização tem apresentado um crescimento notável, superando 85 milhões de metros cúbicos por dia (Mm³/d) em 2016. Esse aumento é resultado de uma demanda crescente por água potável diante da escassez hídrica, com uma projeção de crescimento contínuo de forma exponencial (Bennett, 2013). Entre 2007 e 2015, a capacidade mundial passou de 47,6 milhões de m³/dia para uma previsão de 97,5 milhões de m³/dia (Bennett, 2013).

A estimativa recente para a capacidade global de dessalinização aumentou dramaticamente, passando de aproximadamente 35 milhões de m³ por dia (MCM/dia) em 2005 (Gleick, 2006) para cerca de 95 MCM/dia, dos quais 62,25% foram utilizados para fins municipais e 30,2% para aplicações industriais (Jones *et al.*, 2019). Em termos de capacidade de dessalinização, a região do Oriente Médio e Norte da África (Mena), incluindo os países do Conselho de Cooperação do Golfo (GCC), Ásia Oriental e Pacífico, e América do Norte, detêm cerca de 47,5%, 18,4% e 11,9%, respectivamente, enquanto, segundo o número de plantas de dessalinização, os números são 30,3%, 22% e 14,7%, respectivamente (Jones *et al.*, 2019) (Figura 1).

Figura 1 - Contexto global referente a dessalinização



Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

Embora a população global cresça de maneira linear, a produção de água por dessalinização exibe um padrão de crescimento exponencial. Para se ter uma ideia, a produção de 1.000 m³ de água doce por dia demanda cerca de 10.000 toneladas de

óleo anualmente, o que contribui para a degradação ambiental (Kalogirou, 2005; Gude, 2015). Essa realidade pode ser resumida na expressão "óleo por água", evidenciando a pressão crescente sobre as reservas de combustíveis fósseis e os impactos sociais e econômicos associados, como a dependência de países produtores de petróleo e a instabilidade econômica.

Conforme o inventário DesalData da Global Water Intelligence (GWI), as instalações de dessalinização tratam uma variedade de fontes hídricas, incluindo salmoura, água do mar, água salobra, água de rios, águas residuais e água pura. Dentre estas, aproximadamente 59% da capacidade instalada provém da água do mar, 21% da água salobra, e as demais fontes são representadas por água de rios (9%), águas residuais (6%) e água pura (5%) (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificação da dessalinização por fonte de água

Tipo de Dessalinização	Percentual (%)	Número de Plantas
Água do Mar (SWD)	61	5328
Água Salobra (BWD)	21	5960
Águas Salobras e Duras (RW)	8	1825
Águas de Rios	9	-
Águas Residuais	6	-
Água Pura	5	-

Fonte: Elaborado Autora (2024) - Adaptado de SHAHABI *et al.* (2017), JONES *et al.* (2019) e Global Water Intelligence (GWI).

Além disso, projeções indicam que até 2025, cerca de dois terços da população mundial poderão enfrentar a escassez de água, o que reforça a necessidade de tecnologias de dessalinização como uma solução viável (Damania *et al.*, 2017). O Aqueduct© Water Risk Atlas fornece uma análise abrangente dos riscos hídricos, enfatizando a importância de alternativas sustentáveis.

Os fatores políticos e econômicos são determinantes na seleção de projetos de dessalinização, especialmente aqueles com capacidade superior a 50.000 m³/dia. A decisão sobre esses projetos muitas vezes considera os custos políticos em comparação às alternativas de gestão hídrica, o que pode levar a escolhas influenciadas por questões emocionais e éticas (Gude, 2015).

No que tange às tecnologias empregadas, a Osmose Inversa (RO) destaca-se principalmente na dessalinização de água salobra e em instalações que tratam

águas residuais. Contudo, os métodos térmicos, como a multifiltração (MSF), ainda predominam na dessalinização de água do mar, enquanto a Osmose Inversa de água do mar (SWRO) está se tornando cada vez mais comum.

2.3 TECNOLOGIAS DE DESSALINIZAÇÃO

Em relação aos mecanismos mais comuns de dessalinização, Younos e Tulou (2005) mencionam os processos de Microfiltração, Ultrafiltração, Nanofiltração, Osmose Inversa, Eletrodialise e Eletrodialise Reversível. Dentre esses, a Osmose Inversa, a Eletrodialise e a Eletrodialise Reversível são os métodos mais apropriados para o tratamento de água de origem marinha.

Os métodos de dessalinização podem ser classificados em dois subgrupos: processos térmicos e processos por membranas. Dentro dos processos térmicos, destacam-se a Destilação por Flash em Múltiplos Estágios (MSF), a Destilação de Múltiplos Efeitos (MED) e a Destilação por Compressão de Vapor (CV). Já os processos de dessalinização por membranas incluem a Osmose Reversa (OR) e a Eletrodialise (ED) (Ghaffour; Missimer; Amy, 2013) (Tabela 3).

Tabela 3 - Aspectos do Método de Dessalinização (continua)

Aspecto	Descrição
Vantagens	Fornecimento de água potável a partir de fontes salinas. Redução da dependência de fontes de água doce. Adequada para áreas com escassez de água doce.
Desvantagens	Custo elevado de instalação e operação. Gestão de salmoura concentrada como subproduto. Impacto ambiental potencial nas áreas de captação
Método de Captação	Coleta de Água do Mar: Água do mar é coletada através de bombas e tubulações. Pré-Tratamento: Pode incluir sistemas para remoção de sólidos e organismos.
Processos de Dessalinização	Osmose Inversa: Água do mar é forçada através de membranas semipermeáveis para remover sais e contaminantes. Destilação: Água é evaporada e depois condensada para remoção de impurezas.

Tabela 3 - Aspectos do Método de Dessalinização (conclusão)

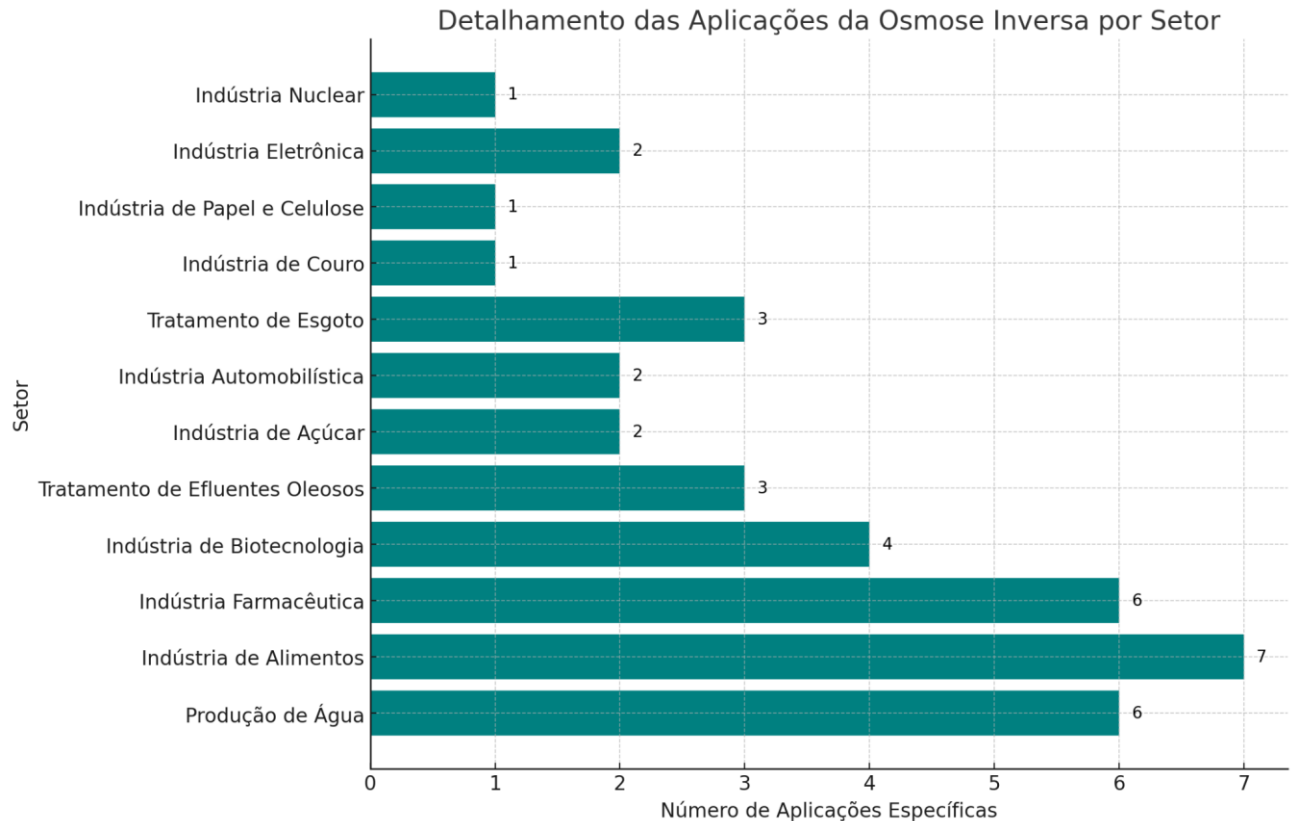
Aspecto	Descrição
Fatores a Considerar	<p>Eletrodialíse: Utiliza eletricidade para remover íons da água.</p> <p>Filtração por Membranas: Utiliza diferentes tipos de membranas para separar contaminantes.</p> <p>Capacidade da Membrana: Refere-se à vazão e eficiência das membranas de Osmose Inversa.</p> <p>Qualidade da Água de Entrada: Considera a salinidade e a presença de contaminantes.</p> <p>Eficiência Energética: Relacionada à tecnologia utilizada e ao consumo energético do sistema</p> <p>Gestão de Resíduos: Manejo adequado da salmoura e de outros resíduos gerados no processo.</p>
Considerações Técnicas	<p>Dimensionamento do Sistema: Baseado na vazão desejada e na capacidade das membranas</p> <p>Monitoramento e Manutenção: Necessário para garantir a eficiência e a qualidade do sistema.</p> <p>Impacto Ambiental: Avaliação dos efeitos na fauna e flora marinha, além de impactos em áreas costeiras.</p>

Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

2.4 DESSALINIZAÇÃO POR OSMOSE INVERSA

Diversas opções para dessalinização existem e sua escolha depende de considerações econômicas e ambientais (Figura 2). Conforme Watson *et al.* (2003), dentre os sistemas de dessalinização, a Osmose Inversa se destaca, tanto em número de instalações (68% das instalações), quanto em percentual da capacidade instalada (44% da capacidade).

Figura 2 - Principais aplicações da Osmose Inversa por indústria



Fonte: Adaptado de Carvalho (2003).

Os processos de Osmose Inversa (RO) podem ser classificados com base na qualidade da água de entrada. Assim, existem plantas de RO destinadas à dessalinização de água salobra (BWRO), cuja salinidade varia entre 500 mg/L e 10.000 mg/L, e plantas de RO voltadas para a dessalinização de água do mar (SWRO), com uma salinidade em torno de 30.000 mg/L. Dentro das BWRO, há uma subdivisão entre aquelas que lidam com baixa salinidade, que processam água com níveis de salinidade de 500 a 2.500 mg/L, e as que tratam água de alta salinidade, com valores entre 2.500 e 10.000 mg/L. Atualmente, aproximadamente 50% da água dessalinizada em todo o mundo é produzida por meio do método de Osmose Inversa (Goh *et al.*, 2018). A eficiência desse processo é influenciada por diversos fatores, incluindo as condições operacionais, o tipo de membrana utilizada e as características da água de entrada.

O fluxo de permeado e a rejeição de sal são os principais parâmetros de desempenho de um processo de Osmose Inversa ou de nanofiltração. Sob condições de referência específicas, o fluxo e a rejeição são propriedades intrínsecas do desempenho da membrana (Mulder, 1987). O fluxo e a rejeição de um sistema de

membranas são principalmente influenciados por variáveis como pressão, temperatura, recuperação e salinidade na água de alimentação (Tabela 4).

Tabela 4 - Fatores que influenciam o desempenho da osmose reversa

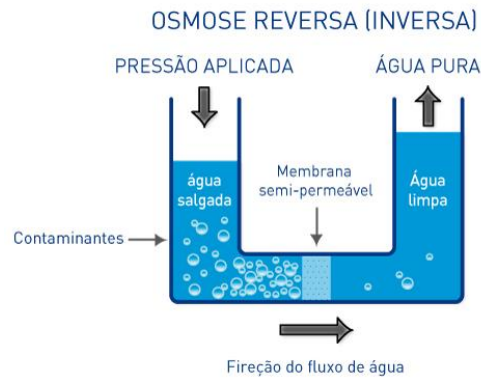
Fatores	Efeito sobre o Fluxo de Permeado	Efeito sobre a Rejeição de Sal
Pressão	Aumenta	Diminui
Temperatura	Aumenta	Aumenta
Recuperação	Diminui	Diminui
Concentração de Sal na Água de Alimentação	Aumenta	Diminui

Fonte: Adaptado de *FilmTec Reverse Osmosis Membranes* (2023).

A dessalinização por Osmose Inversa é uma técnica que utiliza a movimentação da água através de uma membrana semipermeável para remover sais e impurezas. Quando uma solução diluída é colocada em contato com uma solução concentrada, ocorre a movimentação dos íons em direção à solução diluída e a movimentação de água pura em direção à solução mais concentrada. Esse fenômeno é conhecido como difusão. Comparada a outras técnicas de filtração a OI é caracterizada por rejeitar contaminantes muito pequenos, ao contrário das técnicas de microfiltração, de nanofiltração e de ultrafiltração, as quais são indicadas para contaminantes de maior tamanho (Greenlee *et al.*, 2009). Quando a difusão se processa através de uma membrana semipermeável, que permite a passagem da água, mas não dos solutos, este processo é denominado osmose.

A pressão necessária para impedir a osmose é chamada de pressão osmótica, que pode ser quantificada pela diferença de nível entre as duas soluções quando se atinge o equilíbrio (Juan, 2000) (Figura 3).

Figura 3 - Osmose Reversa



A pressão osmótica pode ser expressa pela seguinte equação:

$$FT = Fg + FP + Fm + Fos \quad (1)$$

Em que:

FT = potencial total

Fg = potencial gravitacional

FP = potencial de pressão

Fm = potencial mátrico

Fos = potencial osmótico

Tabela 5 - Classificação dos Processos OI e faixa de pressão operacional

Tipo de Processo	Faixa de Pressão Operacional (bar)	Aplicação Principal
OI de Alta Pressão	56 a 105	Alta pureza e altas rejeições a solutos inorgânicos
OI de Baixa Pressão	14 a 42	Rejeições moderadas a solutos orgânicos de baixa massa molar
Nanofiltração (OI Aberta)	3 a 14	Filtragem seletiva de íons e remoção parcial de sais
Pressão Osmótica para Água do Mar	25	Base para dessalinização, necessitando pressões superiores (geralmente 40 bar) para água potável

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de Bhattacharyya; Williams (1992).

Para aumentar o volume de água potável obtido através do processo de dessalinização, é necessário aplicar uma pressão extra que supere a pressão osmótica. Isso faz com que a água pura se mova da solução mais concentrada para a solução menos concentrada, invertendo a direção natural da osmose. Esse processo é conhecido como Osmose Inversa.

Dois aspectos são fundamentais para a dessalinização por Osmose Inversa: a disponibilidade de uma fonte de energia suficiente para vencer o potencial osmótico da água salina e a qualidade da membrana semipermeável utilizada para separar os sais (Juan, 2000) (ver Tabela 5).

A eficiência do processo pode ser avaliada por meio de duas equações principais. O percentual de recuperação de água potável (%R) é determinado pela relação entre o volume de água potável produzida (V_p) e o volume de água de alimentação (V_a):

$$\%R = (V_a / V_p) \times 100 \quad (2)$$

O percentual de rejeição de sais (%E) mede a eficiência da membrana em separar os sais da água de alimentação, sendo calculado pela relação entre a concentração de sais na água dessalinizada (C_p) e a concentração de sais na água a ser dessalinizada (C_a):

$$\%E = ((C_a C_p) - 1) \times 100 \quad (3)$$

Independentemente da eficiência da membrana e da configuração do sistema, a Osmose Inversa sempre produzirá água potável e um rejeito, conhecido como salmoura, que possui alta salinidade. Devido ao potencial poluente do rejeito, é crucial planejar sua disposição de forma cuidadosa, uma vez que a disposição inadequada pode levar à poluição de cursos d'água e solos, comprometendo o ecossistema local (Kalogirou, 2005).

A Osmose Inversa apresenta ainda diversas vantagens em relação aos métodos tradicionais de dessalinização, incluindo baixo consumo de energia, investimento inicial reduzido, capacidade de alcançar até 75% de rendimento de água purificada e a remoção de 99% dos sais minerais, bactérias e partículas. Além disso, é um processo contínuo que requer pouco espaço e facilita a construção, operação e manutenção, devido à sua natureza modular. A principal característica da Osmose Inversa é que a membrana atua como uma barreira a todos os sais dissolvidos e moléculas inorgânicas com peso molecular superior a 100, enquanto as moléculas de água passam livremente (Dow Latin America, 1996; Taylor; Jacobs, 1996).

2.5 MEMBRANAS

As membranas têm se tornado uma inovação significativa nos processos de tratamento de água, representando a primeira grande evolução desde o advento das tecnologias convencionais no início do século XX (Schneider; Tsutiya, 2001). Os métodos que utilizam tecnologia de membranas e gradiente de pressão como força motriz incluem microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI).

Embora relativamente recentes, os processos de separação com membranas têm evoluído rapidamente. Uma característica marcante desses métodos é que a maioria das separações ocorre sem mudança de fase, o que os torna energeticamente

mais vantajosos quando comparados aos processos térmicos tradicionais. Além disso, esses processos apresentam baixo custo energético e geram um produto final de alta qualidade (Habert *et al.*, 1997).

O processo de filtração por membranas utiliza uma membrana semipermeável que permite a passagem da água, mas bloqueia a movimentação de moléculas maiores e indesejáveis, como vírus, bactérias, metais pesados e sais (Younos; Tulou, 2005). Essas membranas são tipicamente constituídas por camadas finas de materiais poliméricos ou sintéticos, que podem ser configuradas de diferentes formas, como espirais, fibras ocas, placas ou tubos (Who, 2007). A escolha do tipo de membrana é baseada em fatores como a estabilidade ao pH, durabilidade, resistência mecânica, capacidade de suportar pressões elevadas e eficiência na remoção de solutos (Quadro 1). No entanto, as configurações em espiral e fibra oca são as mais comuns, devido ao seu desempenho superior e custo-benefício (Who, 2007).

Quadro 1 - Comparação dos Constituintes a Serem Removidos e Tecnologias de Tratamento

Constituintes a Serem Removidos	Sistema Convencional	Separação por Membranas
Turbidez, sólidos suspensos e contaminantes microbiológicos	Coagulação, floculação, filtração e desinfecção	Microfiltração
Cor, odor e compostos orgânicos	Carvão ativado, cloração, filtração e aeração	Ultrafiltração
Dureza, sulfatos, ferro e metais pesados	Abrandamento com cal, troca iônica, oxidação, filtração, coagulação e floculação	Nanofiltração
Sais dissolvidos	Destilação e troca iônica	Osiose Inversa

Fonte: Adaptado CETESB (2018).

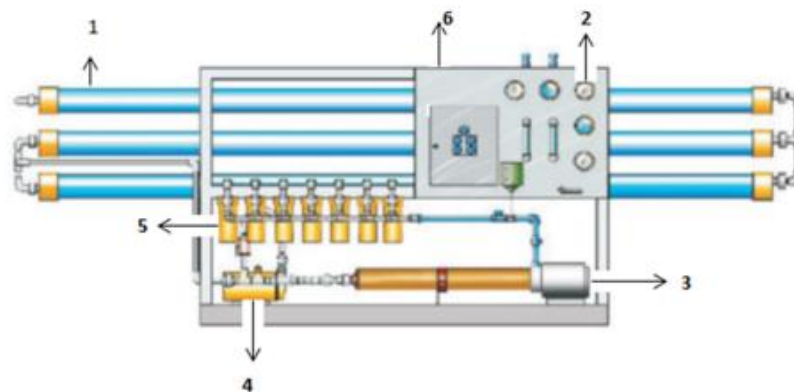
A Osiose Inversa é o principal processo de dessalinização de água que utiliza membranas permeáveis à água e essencialmente impermeáveis a sais (Brião *et al.*, 2014; Habert *et al.*, 2004; Malaeb; Ayoub, 2011; Al-Karaghoul; Kazmerski, 2013). Nesse processo, a rejeição do soluto ocorre devido à exclusão por cargas elétricas e/ou pelas interações físico-químicas entre soluto, solvente e membrana (Brião *et al.*, 2014; Malaeb; Ayoub, 2011).

A Osiose Inversa (RO) é uma das formas mais avançadas de filtração disponíveis. A membrana de RO atua como uma barreira que impede a passagem da maioria dos sais dissolvidos, moléculas inorgânicas e moléculas orgânicas com peso molecular superior a cerca de 100. No entanto, as moléculas de água passam livremente pela membrana, resultando em um fluxo de água purificada. A eficiência

na remoção de sais dissolvidos varia entre 95% e 99%, dependendo de fatores como tipo de membrana, composição da água de entrada, temperatura e projeto do sistema (CERB, BA, 2011).

A RO possui diversas aplicações, como a dessalinização de água do mar ou salobra para consumo humano, recuperação de águas residuais, processamento de alimentos e bebidas, separações biomédicas e purificação de água para uso doméstico e industrial (Figura 4). Os principais componentes de um sistema de dessalinização por osmose reversa incluem:

Figura 4 - Componentes de um dessalinizador



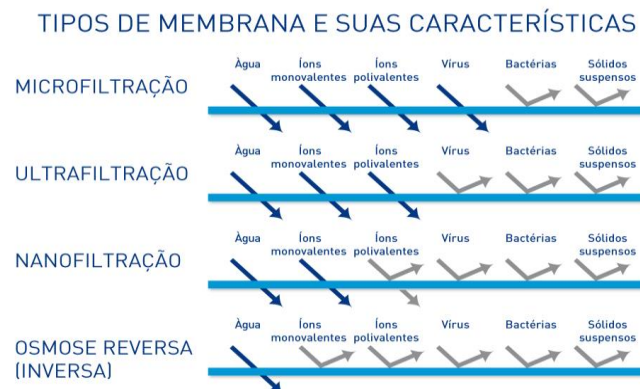
Fonte: CERB, BA, 2011.

- 1) Tubos de Alta Pressão: Instalam as membranas e conectam os componentes do sistema, evitando vazamentos. A água salobra pode provocar ferrugem na estrutura.
- 2) Manômetros de Pressão: Utilizados para medir as pressões em diversos pontos do sistema, como antes e após os filtros, antes e após as membranas, e na saída de água potável.
- 3) Bomba de Retrolavagem: Responsável pela limpeza dos elementos de membrana após a operação, evitando o acúmulo de água salobra. Pode ser usada também durante a limpeza química das membranas.
- 4) Filtros de Cartuchos: Realizam o pré-tratamento da água de alimentação e/ou pós-tratamento da água permeada, com a taxa de filtragem definida pela porosidade e área do filtro.
- 5) Quadro de Comando: Controla e monitora o funcionamento do sistema. Deve ser mantido limpo, com parafusos e terminais bem apertados.

- 6) Bomba de Alta Pressão: Gera a pressão necessária para que as membranas produzam a vazão de água com a qualidade exigida. Normalmente, são centrífugas de alta velocidade ou de pistão.

De acordo com Lee, Jin e Hong (2016), os sistemas de Osmose Inversa são essenciais para o tratamento de água nesse setor, além disso, a Osmose Inversa é amplamente utilizada na produção de água ultrapura em setores como a indústria de semicondutores, geração de energia (alimentação de caldeiras) e aplicações médicas e laboratoriais. Quando combinada com sistemas de troca iônica (IX), a RO pode reduzir significativamente os custos operacionais e a frequência de regeneração do IX (Figura 5). As pressões transmembranas típicas da RO variam de 5 bar (75 psi) para água salobra até mais de 84 bar (1.200 psi) para água do mar.

Figura 5 - Tipos de membranas e suas características



Fonte: Pentair (2024).

2.6 PRÉ-TRATAMENTO PARA MEMBRANAS DE OI

A escolha de um pré-tratamento adequado depende de uma análise criteriosa da qualidade da água bruta e das especificações do processo subsequente. A qualidade da água dos oceanos é influenciada por fatores como ventos, marés e chuvas, os quais podem variar de forma significativa ao longo do tempo. Assim, a tecnologia selecionada deve garantir resultados consistentes, mesmo frente a essas variações ambientais (Bonnelye *et al.*, 2004; Prihasto; Liu; Kim, 2009).

No contexto da dessalinização, o pré-tratamento desempenha um papel fundamental na eficiência e longevidade das plantas de Osmose Inversa (OI). Sua principal função é remover sólidos suspensos, coloides, compostos orgânicos,

minerais e microrganismos presentes na água do mar, prevenindo a formação de incrustações (*fouling*) na superfície das membranas (Voutchkov, 2010).

Os pré-tratamentos podem ser classificados em convencionais, como filtração e coagulação/floculação, e não convencionais, como microfiltração, ultrafiltração e filtração em sedimento de praia (Bonnelye *et al.*, 2004; Dehwah *et al.*, 2015). A filtração em sedimento de praia destaca-se por sua capacidade de adaptar-se à geologia local, promovendo uma filtração natural ao longo do leito oceânico. Isso resulta em uma qualidade de água captada superior, especialmente em comparação à captação direta no mar aberto (Ghaffour; Missimer; Amy, 2013).

A localização do ponto de captação também é crucial para minimizar o risco de *fouling*. Recomenda-se evitar áreas próximas a indústrias, descargas de efluentes, portos e estuários. Além disso, é essencial monitorar parâmetros críticos da água bruta, como turbidez, pH e temperatura, para determinar a necessidade e a eficácia do pré-tratamento (Voutchkov, 2010) (Tabela 6).

Tabela 6 - Caracterização da qualidade da água bruta do mar para o pré-tratamento

Parâmetros	Considerações
Turbidez (uT)	A turbidez aceitável para as membranas de OI deve estar abaixo de 1uT. Níveis altos (50uT) necessitam de sedimentação ou outro tratamento.
COT (mg. L⁻¹)	Abaixo de 0,5 mg. L ⁻¹ a formação de <i>fouling</i> é improvável. Acima de 2 mg. L ⁻¹ a formação de <i>fouling</i> é provável.
SDI	SDI < 2: sem necessidade de pré-tratamento adicional. SDI entre 2 e 4: pré-tratamento pode ser necessário. SDI > 4: pré-tratamento necessário. O monitoramento deve ser anual, considerando variações sazonais.
Ferro (mg. L⁻¹)	Ferro reduzido pode ser tolerado até 2 mg. L ⁻¹ . Ferro oxidado com concentração > 0,05 mg. L ⁻¹ pode acelerar o <i>fouling</i> das membranas.
Manganês (mg. L⁻¹)	Manganês reduzido tolerado até 0,1 mg. L ⁻¹ . Manganês oxidado não deve ultrapassar 0,02 mg. L ⁻¹ , sob risco de acelerar o <i>fouling</i> .
Temperatura (°C)	Abaixo de 12°C aumenta a demanda energética. Acima de 35°C aumenta o <i>fouling</i> . Acima de 45°C causa danos irreversíveis às membranas.
Óleos e graxas (mg. L⁻¹)	Concentrações > 0,02 mg. L ⁻¹ aceleram o <i>fouling</i> .
pH	O pH deve estar entre 7,6 e 8,3. Exposição prolongada a pH < 4 ou > 11 pode causar danos irreversíveis às membranas.

Fonte: Adaptado de Voutchkov (2010).

Entre as opções de pré-tratamento consideradas inovadoras, destaca-se a filtração em areia de praia, cuja aplicação pode ser ajustada de acordo com a geologia do local e as características da água que será tratada. Em geral, a água captada de fontes subterrâneas, como poços e galerias de infiltração, apresenta melhor qualidade do que a captada em mar aberto. Isso ocorre porque, ao atravessar os sedimentos presentes no fundo oceânico, a água passa por um processo de filtração natural, que melhora sua qualidade (Ghaffour, Missimer e Amy, 2013; Missimer *et al.*, 2013).

2.7 REJEITO DA DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização é classificada de acordo com a tecnologia utilizada e o tipo de água de entrada, resultando em diferentes impactos ambientais (EIs). Esses impactos estão frequentemente relacionados aos efluentes de salmoura, que podem afetar a qualidade da água costeira e a vida marinha (Heck *et al.*, 2018; Panagopoulos *et al.*, 2019). Atualmente, a produção de água dessalinizada atinge aproximadamente 95,37 milhões de m³ por dia. No entanto, um dos desafios mais significativos dessa tecnologia é o manejo do rejeito gerado, denominado salmoura ou "brine", que resulta do processo de dessalinização.

Estimativas indicam que a produção global de salmoura gira em torno de 141,5 milhões de m³ por dia, cifra que supera em 50% as projeções anteriores (Jones *et al.*, 2019). Esse rejeito é especialmente concentrado no Oriente Médio e Norte da África, onde países como Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Kuwait e Catar representam 55% da produção total de salmoura. A salmoura, caracterizada por sua alta concentração de sal, apresenta desafios econômicos e ambientais, pois sua disposição inadequada pode causar danos severos aos ecossistemas locais.

A eficiência da recuperação de água nas plantas dessalinizadoras, que é a proporção de água de entrada convertida em água tratada, é um fator crítico. Por exemplo, em uma planta com uma taxa de recuperação de 0.4, 40% da água é transformada em água potável, enquanto 60% se tornam salmoura. Essa taxa varia conforme a tecnologia utilizada e a qualidade da água de entrada; tecnologias de membranas, como a Osmose Inversa (RO), geralmente apresentam taxas de recuperação mais altas em comparação com tecnologias térmicas (Ghaffour *et al.*, 2013).

O gerenciamento eficaz da salmoura é fundamental para mitigar os impactos ambientais e reduzir os custos associados ao seu descarte. É imprescindível a adoção de estratégias inovadoras de manejo e opções de disposição, que possam fomentar o desenvolvimento contínuo das instalações de dessalinização e assegurar a disponibilidade de água para as gerações futuras (Jones *et al.*, 2019).

Conforme Missimer (1994), citado por Moraes (1995), as opções para a disposição dos resíduos da dessalinização variam conforme as características dos rejeitos e o ambiente local (Quadro 2). Entre as alternativas disponíveis, destacam-se:

Quadro 2 - Práticas de gestão de rejeitos e seus impactos

Prática	Descrição	Riscos e Considerações
Descarga em corpos d'água	Lançamento direto dos rejeitos em rios, lagos ou oceanos.	Pode causar salinização e degradação da qualidade da água nas áreas impactadas.
Injeção em poços profundos	Armazenamento de rejeitos líquidos em camadas geológicas profundas	Requer monitoramento rigoroso para evitar contaminação de aquíferos e solos adjacentes.
Lagoas de percolação	Estruturas para retenção e evaporação dos rejeitos líquidos.	Planejamento inadequado pode levar à acumulação de sais e contaminação do solo.
Espalhamento no solo	Distribuição dos rejeitos líquidos diretamente sobre o solo.	Riscos de salinização e perda de fertilidade do solo; solução temporária
Concentração e evaporação	Processo para reduzir o volume de rejeitos e obter sais utilizáveis	Exige infraestrutura específica e pode ser aproveitado em indústrias.

Fonte: Adaptado de Missimer (1994).

A valorização dos rejeitos da dessalinização apresenta alternativas promissoras, como o cultivo de plantas tolerantes à salinidade. Essas espécies podem aproveitar os sais presentes nos rejeitos e contribuir para a produção de forragem de qualidade. Estudos indicam que a forragem de algumas dessas plantas contém aproximadamente 16% de proteína, 0,12% de fósforo e 59% de matéria orgânica, configurando-se como uma fonte de nutrientes relevante para ruminantes (Miyamoto, 1993). Além da agricultura, a aquicultura também se beneficia da reutilização de água

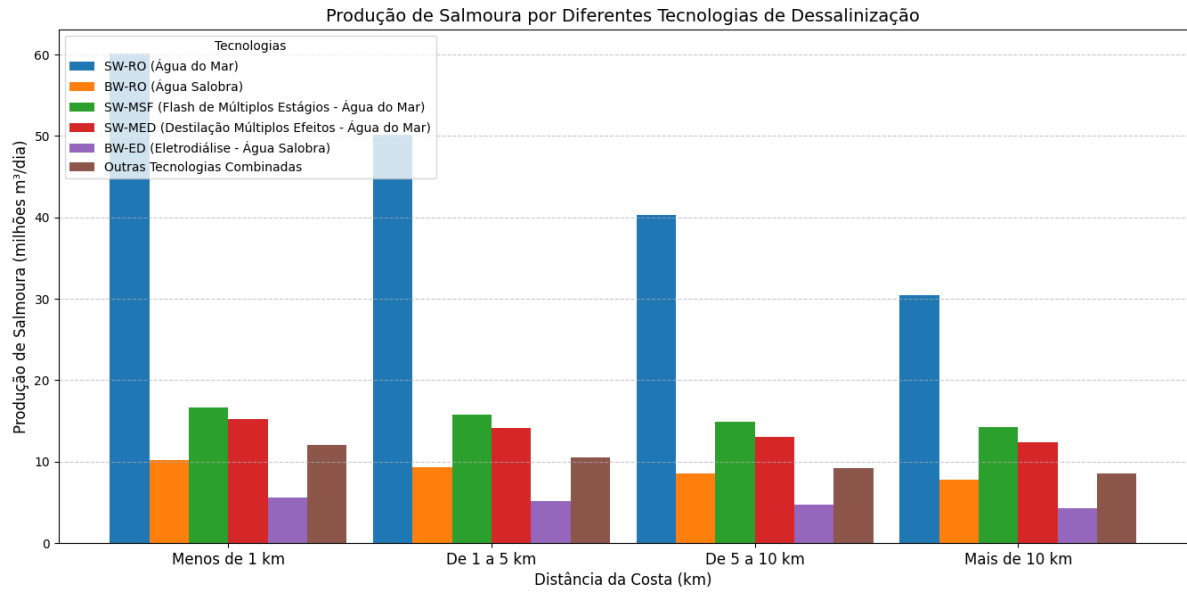
salobra. O cultivo de espécies adaptadas a ambientes salinos, como tilápias do gênero *Oreochromis*, tem se destacado em diversas regiões. Práticas que utilizam água salobra para controlar a proliferação de algas demonstram potencial para melhorar a qualidade do pescado, além de contribuir para a gestão sustentável dos recursos hídricos.

A gestão dos rejeitos gerados pela dessalinização requer uma abordagem integrada, considerando tanto a minimização de impactos ambientais quanto a valorização de subprodutos, como o sal. O desenvolvimento de tecnologias inovadoras e a adoção de práticas sustentáveis são cruciais para equilibrar as demandas humanas e a preservação ambiental. Em áreas interiores, a disposição adequada de salmoura é particularmente desafiadora. Estima-se que cerca de 22 milhões de m³ de salmoura sejam gerados a mais de 50 km da costa, evidenciando a necessidade de soluções sustentáveis para o manejo desse rejeito (Jones *et al.*, 2019).

Apesar dos desafios, iniciativas inovadoras buscam explorar o uso da salmoura em processos industriais, como a extração de minerais e aplicações térmicas. O tratamento adicional da salmoura para a remoção de poluentes pode abrir novas possibilidades de reutilização, reduzindo a pressão sobre os recursos hídricos e minimizando os impactos ambientais (Gomez; Cath, 2011).

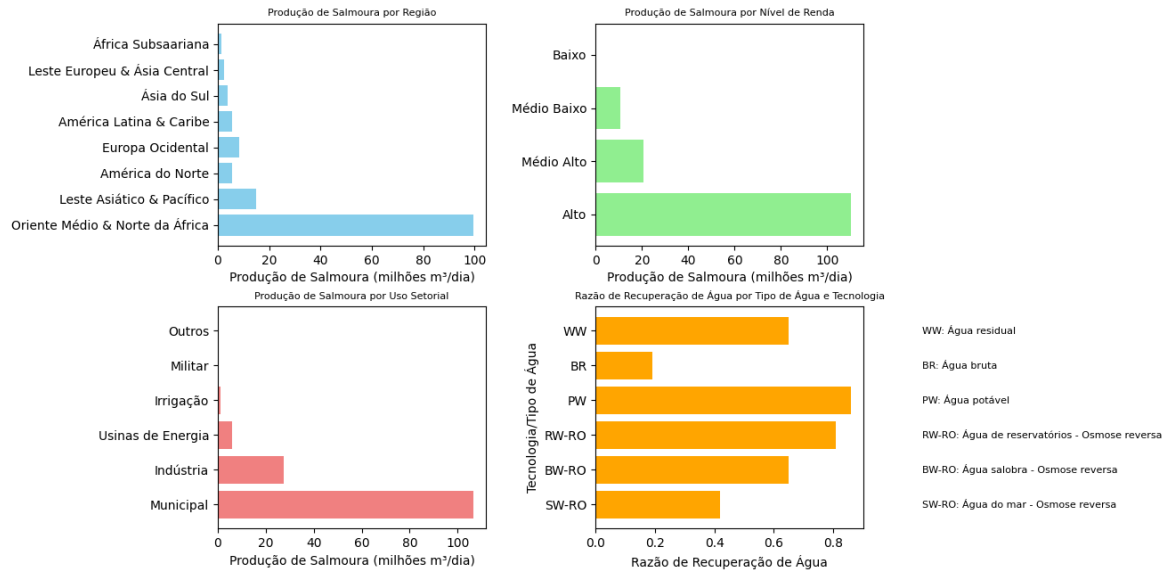
Os gráficos abaixo apresentam a caracterização da produção de salmoura (em m³/dia) em diferentes regiões e distâncias da costa, segmentada por tecnologias de dessalinização. As barras representam as seguintes tecnologias: SW-RO (Osmose Inversa com água do mar), BW-RO (Osmose Inversa com água salobra), SW-MSF (flash de múltiplos estágios com água do mar), SW-MED (Destilação de Múltiplos Estágios com água do mar), BW-ED (Eletrodialise com água salobra) e outras tecnologias combinadas (Figura 6). Os resultados indicam que a produção de salmoura é mais elevada para a tecnologia SW-RO, seguida por BW-RO e SW-MSF, refletindo a predominância dessas técnicas no panorama global de dessalinização (Figura 7 e 8).

Figura 6 - Produção de salmoura por diferentes tecnologias de dessalinização.



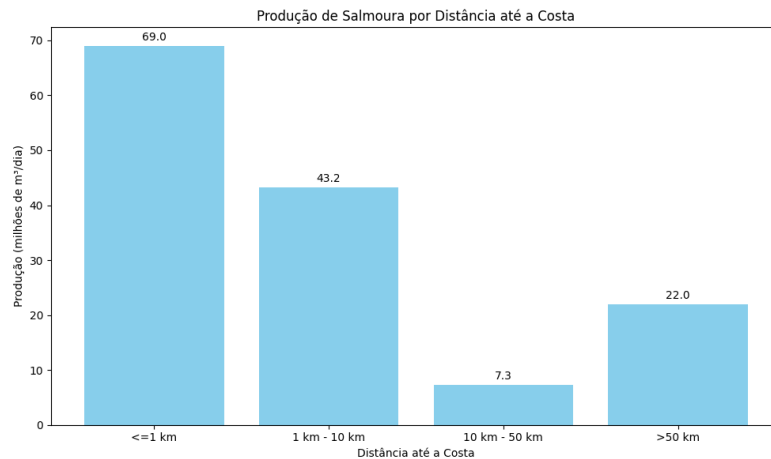
Fonte: Elaborado pela autora (2024), com dados baseados em DesalData, 2018

Figura 7 - Panorama da Produção de salmoura



Fonte: Elaborado pela Autora (2024), a partir dos dados de DesalData, 2018.

Figura 8 - Produção de salmoura por distância da costa.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de DesalData (2018).

2.8 IMPACTOS AMBIENTAIS

A análise da sustentabilidade das tecnologias de dessalinização envolve a avaliação de quatro componentes principais: ambiental, econômico, social e tecnológico. A viabilidade técnica é um dos aspectos fundamentais, pois os processos de dessalinização exigem grandes quantidades de energia, utilizam insumos químicos e apresentam custos elevados, o que implica também em emissões ambientais consideráveis. Portanto, o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias eficientes são essenciais para reduzir os impactos ambientais e melhorar a viabilidade dos processos.

Do ponto de vista econômico, os impactos dependem de vários fatores, como a qualidade e a disponibilidade da fonte de água, o tipo de energia utilizada, a tecnologia escolhida para o processo, além dos custos de operação e manutenção. A localização geográfica também exerce uma grande influência sobre a viabilidade econômica de projetos de dessalinização, considerando as condições financeiras e a infraestrutura disponível. Tais fatores devem ser analisados detalhadamente para garantir a sustentabilidade financeira das operações (Pereira *et al.*, 2016).

No aspecto ambiental, destacam-se os impactos relacionados às emissões de gases de efeito estufa (GEE), o descarte de salmoura e produtos químicos, que podem afetar negativamente os ecossistemas marinhos. As emissões de GEE, associadas ao consumo de energia, contribuem para o aquecimento global e a acidificação dos oceanos. Já o descarte inadequado de salmoura pode causar um aumento da salinidade nos ambientes receptores, comprometendo a biodiversidade marinha

(Lattermann *et al.*, 2009). Além disso, o uso intensivo de água do mar para resfriamento e alimentação dos processos pode resultar na captura de organismos marinhos, caracterizando impactos como o impingimento e arrastamento (*entrainment*) (Höpner; Windelberg, 1996).

No que se refere aos aspectos sociais, a aceitação pública das plantas de dessalinização depende da confiança da comunidade na qualidade e quantidade da água produzida. Fatores como o custo da água, os impactos ambientais e a segurança hídrica também influenciam a decisão social sobre a implementação dessas tecnologias, especialmente em regiões com alta vulnerabilidade hídrica ou com atividades pesqueiras e turísticas próximas (Taylor, 2006).

A tabela abaixo resume algumas soluções sustentáveis para a planta de dessalinização, baseadas nos estudos de Lattermann e Höpner (2008) sobre os impactos ambientais e a avaliação de impacto da dessalinização de água do mar (Tabela 7).

Tabela 7 - Preocupações ambientais relevantes e soluções sustentáveis (continua)

Preocupações Ambientais	Soluções Sustentáveis
Descarga de concentrado salino (salmoura)	Diluição da salmoura em local adequado com emissário submarino, com modelagem e estudos técnicos para garantir a dispersão segura.
Poluição marinha	Tratamento de resíduos de retrolavagem e limpeza, utilizando tecnologias que minimizem a poluição marinha, como filtração avançada.
Captação de água do mar	Uso de poços verticais em margens ou sistemas de captação subsuperficial, com baixa velocidade de entrada, minimizando impactos na fauna marinha.
Uso de produtos químicos	Implementação de tecnologias que reduzam ou eliminem o uso de produtos químicos, como sistemas de osmose reversa de alta eficiência.
Uso de energia e emissões de GEE	Implementação de dispositivos de recuperação de energia e uso de fontes renováveis (solar, eólica ou geotérmica) para reduzir o consumo de energia e emissões de GEE.

Tabela 7 - Preocupações ambientais relevantes e soluções sustentáveis (conclusão)

Preocupações Ambientais	Soluções Sustentáveis
Uso de materiais	Melhoria na reciclabilidade e reutilização de materiais, como membranas de osmose reversa mais duráveis e recicláveis.
Uso do solo e paisagem	Seleção de terrenos disponíveis e de baixo impacto visual e social, preferencialmente perto da captação, para evitar grandes intervenções e transporte de água.
Integração com infraestruturas existentes	Integração da planta de dessalinização com sistemas de gestão hídrica existentes, aproveitando a infraestrutura de distribuição de água e redes de saneamento, além de otimizar o uso de recursos hídricos locais.
Desafios sociais e visuais	Localização em áreas de baixo impacto social e visual, garantindo que a planta não interfira em áreas turísticas, residenciais ou de alto valor ambiental.
Gestão hídrica integrada	Integração da dessalinização com os sistemas de gestão hídrica regionais (sistemas de captação, tratamento e distribuição), para otimizar o uso de todas as fontes de água e garantir uma distribuição equilibrada.
Reutilização de água e redução de desperdício	Sistemas de reutilização de água tratada, tanto da própria planta de dessalinização quanto de outras fontes, para reduzir o desperdício e otimizar os recursos hídricos disponíveis.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Além da salinidade, os processos de dessalinização frequentemente utilizam produtos químicos para o pré-tratamento da água, controle de *biofouling* e limpeza das membranas. Esses produtos químicos, que podem incluir desinfetantes como cloro e coagulantes, podem ter efeitos tóxicos sobre a vida marinha quando liberados juntamente com a salmoura (Agus; Sedlak, 2010). A presença de subprodutos de desinfecção, como bromofenóis e ácidos haloacéticos, tem sido associada a impactos negativos em organismos aquáticos, como algas e invertebrados (Kuhn; Pattard, 1990). Portanto, a análise do ciclo de vida dos produtos químicos utilizados nos

processos de dessalinização é fundamental para entender seu impacto no meio ambiente.

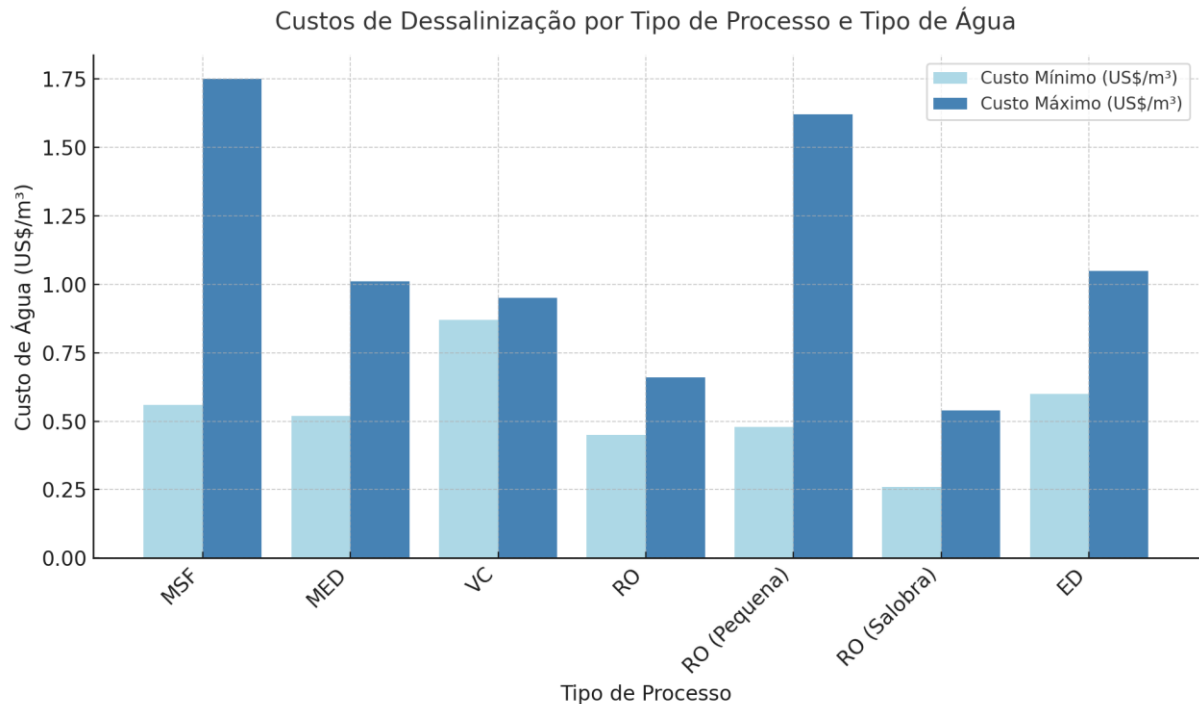
Para minimizar os impactos ambientais da dessalinização, é crucial escolher localizações estratégicas para o descarte da salmoura, preferencialmente em áreas distantes de habitats sensíveis e onde a diluição ocorra rapidamente. A monitorização contínua da salmoura e a avaliação dos impactos ambientais devem ser parte integrante da operação das plantas de dessalinização (Liu *et al.*, 2013). Além disso, a adoção de tecnologias inovadoras que reduzam a geração de salmoura e o uso de produtos químicos prejudiciais pode contribuir para a viabilidade ambiental dos sistemas de dessalinização em Florianópolis.

2.9 ECONOMIA DA DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização tem se mostrado uma alternativa viável para o suprimento de água doce, especialmente em regiões com escassez hídrica severa. Embora não seja uma solução universal, essa tecnologia é particularmente relevante em comunidades que enfrentam secas prolongadas e problemas relacionados ao crescimento urbano, industrialização e aumento populacional. Dados indicam que, atualmente, existem aproximadamente 15.906 plantas de dessalinização operacionais em todo o mundo, com uma capacidade total de 95,37 milhões de metros cúbicos por dia, evidenciando a crescente adoção dessa tecnologia (Jones *et al.*, 2019).

Os custos associados à dessalinização variam amplamente, dependendo de diversos fatores, incluindo a salinidade da água de alimentação e a tecnologia utilizada. Estudos comparativos mostram que, em regiões com fontes abundantes de água superficial ou subterrânea, as tecnologias convencionais, como coagulação-floculação e filtração, são geralmente mais econômicas (Figura 9). No entanto, em contextos em que as fontes de água são limitadas, a dessalinização se torna uma opção mais competitiva, principalmente em áreas costeiras onde a água do mar é facilmente acessível (Gude, 2015).

Figura 9 - Distribuição referente aos custos de dessalinização por cada processo e tipo de água



Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de Mezher, T. *et al.* (2011).

A dessalinização de água do mar consome grandes quantidades de energia, tanto diretamente, por meio de processos de destilação que utilizam vapor, quanto indiretamente, por meio do consumo de eletricidade da rede elétrica. A oferta de energia é um fator essencial no planejamento de novas plantas de dessalinização. A principal preocupação ambiental relacionada à demanda de energia é a emissão de poluentes atmosféricos, como gases de efeito estufa (principalmente CO₂), gases responsáveis pela chuva ácida (NO_x, SO_x), material particulado fino (PM), entre outros, que são gerados quando combustíveis fósseis são usados para gerar eletricidade ou vapor. Esses poluentes afetam a qualidade do ar e contribuem para as mudanças climáticas, sendo um desafio tanto em nível nacional quanto internacional (Lattemann *et al.*, 2009, p. 35).

Abaixo a tabela que mostra o consumo de energia elétrica (kWh/m³) e o consumo de energia térmica (MJ/m³) para os diferentes processos de dessalinização (Tabela 8):

Tabela 8 - Consumo de energia dos principais processos de dessalinização

Tipo de Processo	Consumo de Energia Elétrica (kWh/m ³)	Consumo de Energia Térmica (MJ/m ³)	Consumo Total de Energia (kWh/m ³)	Qualidade da Água Produzida (ppm)
MSF	2,5 – 5,0	190 – 282	19,58 – 27,25	E10
MED	2,0 – 2,5	145 – 230	14,45 – 21,35	E10
MVC	7,0 – 12,0	Nenhum	7 – 12	E10
TVC	1,8 – 1,6	227	16,26	E10
RO (Água do Mar)	4,0 – 6,0 (com recuperação de energia)	Nenhum	4 – 6	400 – 500
RO (Água Salobra)	1,5 – 2,5	Nenhum	1,5 – 2,5	200 – 500
ED	2,64 – 5,5	Nenhum	2,64 – 5,5	150 – 500

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de MEZHER, T. *et al.* (2011).

2.10 TRATAMENTO DE ÁGUA CONVENCIONAIS VS. DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização deve ser considerada como parte de um tratamento integrado dentro de uma abordagem de gestão hídrica que visa otimizar e preservar os recursos disponíveis. Em vez de ser vista como uma tecnologia concorrente ao tratamento convencional de água doce, ela desempenha um papel complementar, especialmente em regiões onde os recursos hídricos estão cada vez mais escassos. Nesse sentido, é importante entender que não há uma comparação direta entre o tratamento de água doce e o processo de dessalinização, pois ambos têm finalidades distintas e podem ser usados de forma integrada para atender à demanda de água. O tratamento convencional é eficaz para águas superficiais e subterrâneas, enquanto a dessalinização é crucial em contextos em que os recursos de água doce são insuficientes ou inacessíveis (Bennett, 2011).

Se houvesse abundância de água doce, a dessalinização não seria uma prioridade. No entanto, a crescente pressão sobre os recursos de água doce, combinada com a contaminação das águas subterrâneas e a demanda crescente,

justifica o uso dessa tecnologia. As águas subterrâneas, especialmente em áreas urbanas e residenciais, estão cada vez mais comprometidas pela poluição, o que torna necessário diversificar as fontes de abastecimento de água (Sachs, 2013). A dessalinização, portanto, insere-se em um contexto de gestão integrada, no qual tecnologias complementares trabalham em conjunto para garantir a disponibilidade de água em um cenário de recursos hídricos limitados.

Outro fator importante é a política de preços da água. Em muitos países em desenvolvimento, como China e Índia, os preços da água são fortemente subsidiados, levando a um uso ineficiente e insustentável dos recursos hídricos. A implementação de políticas que reflitam o verdadeiro custo da água é fundamental para promover um uso mais responsável e sustentável (Sachs, 2013).

A adoção de políticas públicas que promovam o uso eficiente dos recursos hídricos é essencial. A implementação de políticas de preços que reflitam o custo real da água, incluindo o custo das tecnologias de dessalinização, é necessária para evitar o uso insustentável dos recursos. Em muitos países em desenvolvimento, como a China e a Índia, os subsídios excessivos resultam em desperdício de água e deterioração dos recursos hídricos (Sachs, 2013). A experiência de países europeus que removeram subsídios, como a Hungria, onde o preço da água aumentou até 15 vezes, demonstra a necessidade de um equilíbrio entre precificação e acesso equitativo à água (Jones *et al.*, 2019).

O transporte de água também envolve custos elevados, especialmente em sistemas que dependem de longas distâncias e terrenos complexos. Esses sistemas de transporte estão sujeitos a riscos de rompimentos, perda de água ao longo da rede e altos custos operacionais devido à necessidade de bombeamento contínuo para superar diferenças de altitude e distância. Além disso, a infraestrutura necessária para transportar água de fontes distantes precisa ser mantida e atualizada constantemente, gerando custos recorrentes de manutenção e reparo. Em casos de falhas nas adutoras, como rompimentos, os custos para reparo podem ser substanciais, além do impacto sobre o abastecimento da população.

A estrutura de custos de um Sistema de Abastecimento de Água (SAA), segundo o PLANASA (Plano Nacional de Saneamento), é organizada conforme os componentes do sistema, discriminados em três categorias principais: obras civis, equipamentos e materiais (Quadro 3).

Quadro 3 - Quadro principais componentes de um SAA

Componentes do Sistema	Obras Civis	Equipamentos	Materiais
Captação	Estrutura física	Bombas, geradores	Tubulações, conexões
ERAB (Estação de Recalque de Água Bruta)	Casa de bombas	Motores, bombas hidráulicas	Válvulas, registros
Adutora de Água Bruta	Canalizações	Motores de recalque	Tubos, válvulas
Tratamento	Estruturas de concreto	Filtros, decantadores	Produtos químicos
ERAT (Estação de Recalque de Água Tratada)	Edificações	Bombas, geradores	Válvulas, registros
Adutora de Água Tratada	Infraestrutura	Bombas	Tubulações, conexões
Reservatório	Tanques de concreto	Sensores de nível	Tubos, conexões
Rede de Distribuição	Tubulações	Medidores, registros	Canos, conexões
Ligações	Ramais domiciliares	Medidores, válvulas de controle	Conexões, tubos

Fonte: Adaptado de PLANASA, 2024

De acordo com o estudo de Altherre Branco Rosa (Avaliação Técnico-Econômica de Dois Sistemas de Tratamento de Água para Abastecimento Lages/SC, 2021), foi realizada uma análise comparativa entre dois sistemas de tratamento de água: o convencional e o baseado em membranas. A pesquisa revelou que, embora o sistema de membranas apresenta um custo inicial de implantação superior ao do sistema convencional (R\$ 14.500.000,00 contra R\$ 8.500.000,00), o custo médio de produção (CMP) do sistema por membranas é de R\$ 0,24/m³, enquanto o sistema convencional apresenta um CMP de R\$ 0,20/m³.

A principal diferença entre os dois sistemas está nos custos operacionais. O sistema convencional envolve maiores custos com insumos químicos e tratamento de resíduos, enquanto o sistema por membranas apresenta custos mais elevados com energia e equipamentos especializados, como as membranas e as bombas de alta pressão. Além disso, a análise de risco realizada por meio de simulações de Monte Carlo demonstrou que a qualidade da água bruta tem impacto direto nos custos

operacionais de ambos os sistemas, podendo levar a aumentos consideráveis, especialmente nos custos com energia e no manejo de resíduos gerados. Assim, a escolha entre os dois sistemas deve levar em conta não apenas os custos iniciais, mas também os custos operacionais ao longo da vida útil da estação, além dos riscos associados à variabilidade na qualidade da água captada (Altherre Branco Rosa, 2021).

Abaixo, apresenta-se segundo a tabela 9, uma comparação entre os custos de implantação e o custo médio de produção (CMP) para os dois sistemas de tratamento de água:

Tabela 9 - Comparação de custos de sistemas de tratamento de água.

Componente	Sistema Convencional	Sistema por Membranas
Licenças Ambientais	R\$ 60.000,00	R\$ 60.000,00
Equipamentos	R\$ 8.000.000,00	R\$ 13.800.000,00
Preparação do Terreno	R\$ 50.000,00	R\$ 50.000,00
Mão de Obra	R\$ 390.000,00	R\$ 590.000,00
Total de Implantação	R\$ 8.500.000,00	R\$ 14.500.000,00
Custo Médio de Produção (CMP)	R\$ 0,20/m ³	R\$ 0,24/m ³
Impacto de Custos Operacionais	Insumos químicos e tratamento de resíduos	Energia e implantação

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de Altherre (2021).

2.11 CUSTOS PLANTAS DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA DO MAR POR OSMOSE INVERSA

A dessalinização de água do mar por Osmose Inversa (OI) tem se consolidado como uma solução crescente para mitigar a escassez de água potável em regiões costeiras e áridas. No entanto, a viabilidade econômica das plantas de dessalinização depende de uma análise detalhada de seus custos de implantação (CAPEX) e custos operacionais (OPEX). O investimento inicial, especialmente em sistemas de Osmose Inversa, e os custos contínuos de operação são elementos fundamentais para determinar a sustentabilidade econômica dessas plantas.

De acordo com o estudo de Lermontov e Pereira (2024), a avaliação de custos em plantas de dessalinização deve ser dividida em dois grupos principais: custos de implantação (CAPEX) e custos operacionais e de manutenção (OPEX). A distinção entre esses dois tipos de custos é fundamental, pois impacta diretamente a análise de

viabilidade econômica do projeto em diferentes escalas de operação. Além disso, o tipo de tecnologia utilizada, a localização da planta e a capacidade de produção de água influenciam diretamente esses custos.

2.11.1 Custos de implantação (CAPEX)

A implantação de uma planta de dessalinização de água do mar por Osmose Inversa envolve diversos componentes de custo, abrangendo desde a captação da água até os sistemas de tratamento final. Esses custos podem ser classificados em várias categorias, como captação e rejeito, pré-tratamento, sistema de membranas, tubulações, equipamentos e construção civil. A tabela a seguir apresenta a distribuição percentual dos principais componentes de custo de uma planta de dessalinização típica (Tabela 10).

Tabela 10 - Distribuição dos Custos de Implantação (CAPEX).

Componente	Descrição	Porcentagem do Total CAPEX (%)
Captação/Rejeito	Sistema de captação de água do mar e descarte de salmoura	6,88
Pré-Tratamento (MF/UF)	Sistema de captação de água do mar e descarte de salmoura	6,8
Sistema Membranas	Membranas de Osmose Inversa	12,3
Tubulações	Tubulações e conexões do sistema	7,9
Bombas e Equipamentos	Bombas de alta pressão, sistemas auxiliares	7,9
Construção Civil	Obras civis, fundações e estruturas físicas	16,1
Custos de Desenvolvimento e Projeto	Engenharia e projetos necessários para a planta	6,8
Equipamentos e Materiais	Equipamentos auxiliares e materiais necessários	25,5
Instalação e Serviços Diversos	Serviços de instalação e outros custos operacionais	7,6
Jurídico e Custos Ambientais	Custos com licenciamento e aspectos ambientais	1,0
Recuperação de Energia	Sistemas de recuperação de energia (para reduzir consumo energético)	1,5
Vasos de Pressão	Vasos de pressão necessários para o processo de osmose	1,4

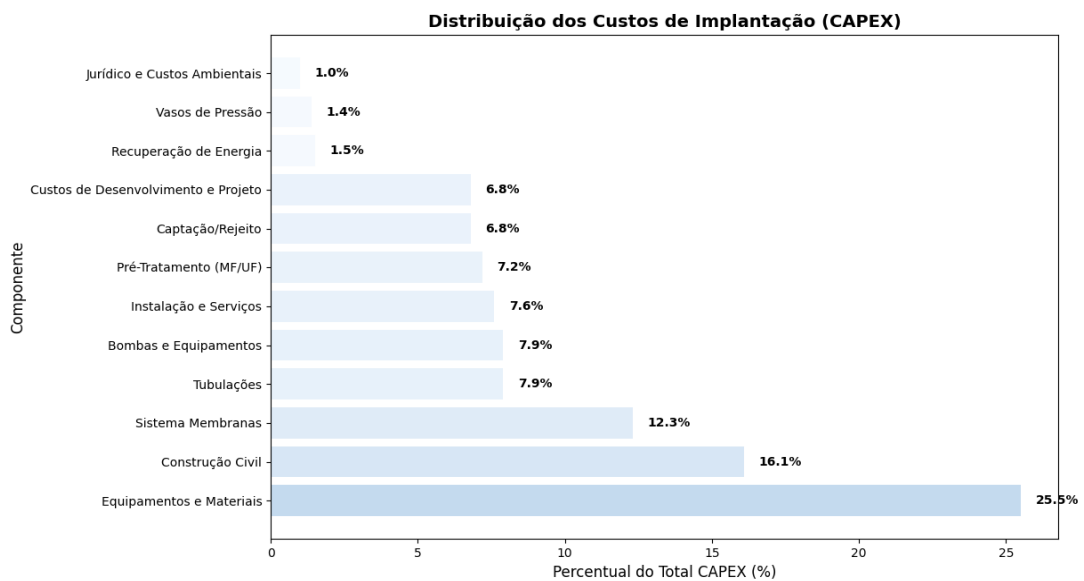
Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de Lermontov e Pereira (2024).

Componentes de Custo de Capital (CAPEX) (Figura 10): Os custos de capital são os investimentos iniciais necessários para a construção de uma planta de RO. Os principais componentes incluem:

- a) Desenvolvimento do local
- b) Edificações e escritórios
- c) Estrutura de captação de água do mar
- d) Dutos e bombas de transferência
- e) Tratamento prévio

- f) Bombas de alta pressão
- g) Racks de RO e permeadores
- h) Descarga de salmoura e instalações
- i) Tratamento/armazenamento de água tratada

Figura 10 - Distribuição dos Custos de Implementação



Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

A variação nos custos de capital é influenciada por fatores como localização, capacidade do sistema, grau de pré-tratamento e características da água de entrada.

2.11.2 Custos operacionais (OPEX)

Os custos operacionais referem-se às despesas contínuas para operar e manter a planta. De acordo com o estudo de PEM (2015), a energia representa o maior componente dos custos operacionais, seguido pela substituição de membranas e produtos químicos. A tabela 11 a seguir apresenta a distribuição dos custos operacionais por componente.

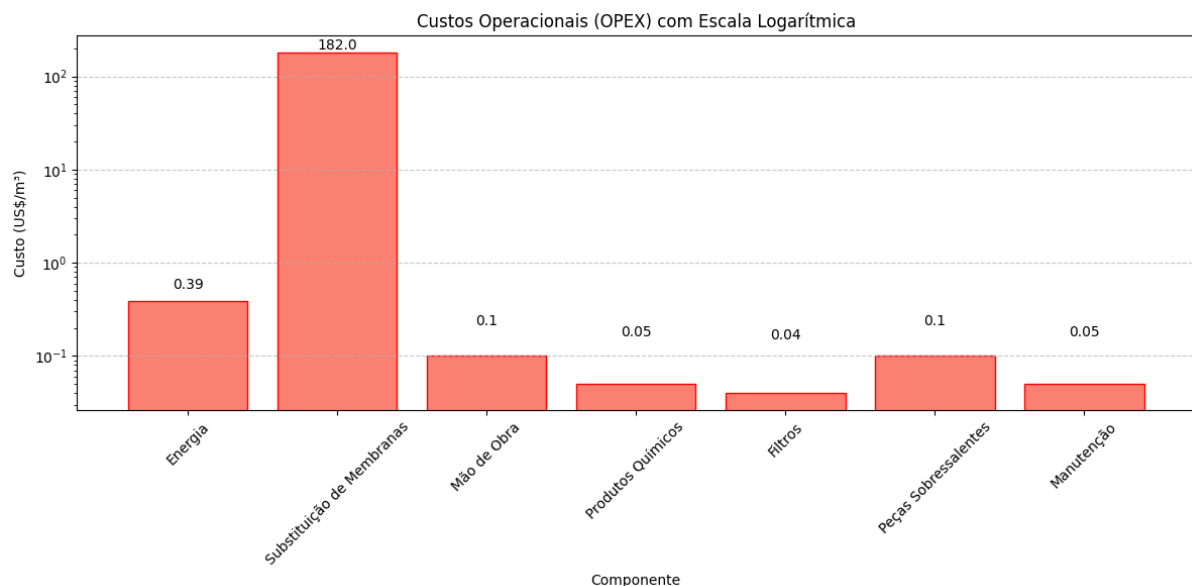
Tabela 11 – Custos Operacionais (OPEX) (US\$/m³)

Componente	Custo (US\$/m ³)	% Contribuição
Energia	0.0864	36,4
Produtos químicos	0.0299	12,6
Mão de obra	0.0381	16
Filtros	0.0043	1.8
Substituição de membranas	0.0474	20
Peças sobressalentes	0.0110	4,6
Manutenção	0.0087	8,6
Total	0.2373	100

Fonte: Elaborado pela Autora . Dados de Lermontov e Pereira (2024)

A energia é o principal componente dos custos operacionais em sistemas de dessalinização. Uma planta de osmose reversa (RO) equipada com um sistema de recuperação de energia pode consumir de um terço a até metade da energia utilizada por uma planta de Destilação por Flash em Múltiplos Estágios (MSF) (PEM, 2015) (Figura 11).

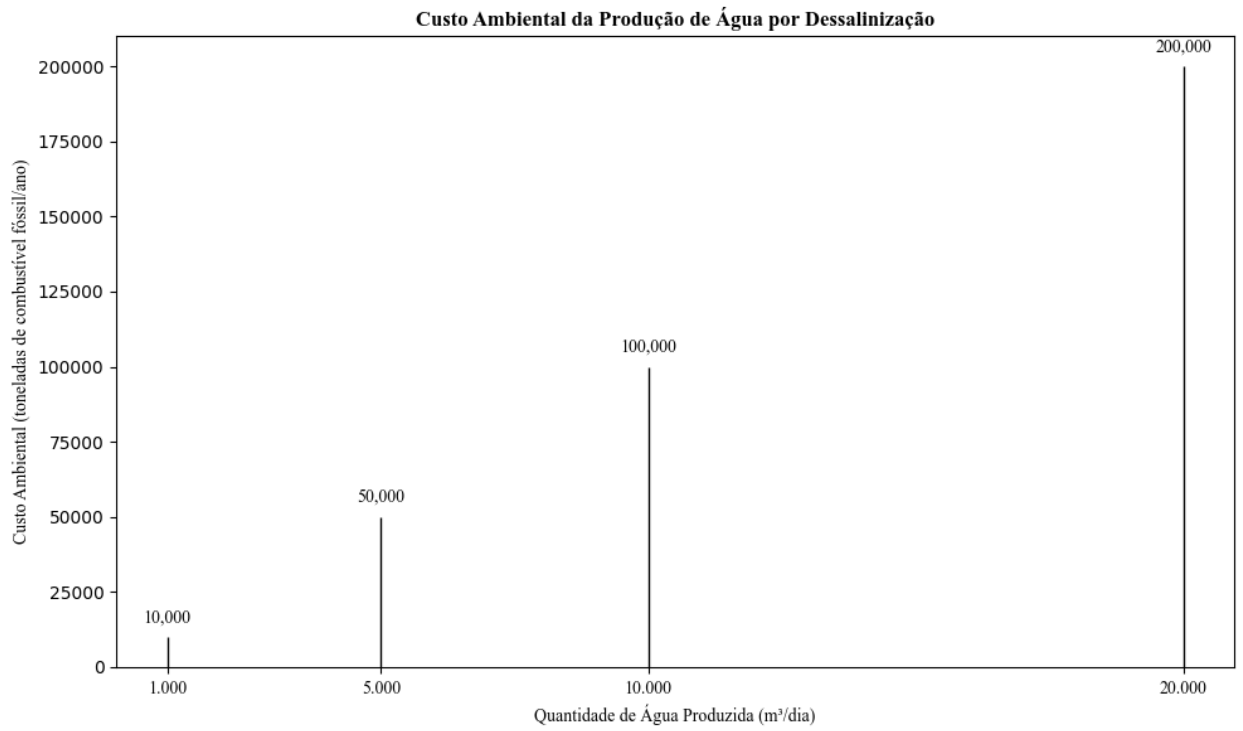
Figura 11 - Custos Operacionais (OPEX) com Escala Logarítmica.



Fonte: Elaborado pela Autora . Dados de Lermontov e Pereira (2024).

Comparando os custos operacionais de um sistema de RO com outras fontes de água, observa-se que a dessalinização pode ser competitiva em determinadas regiões (Leitner, 2009) (Figura 12).

Figura 12 - Custo Ambiental da Produção de Água por Dessalinização



Fonte: Elaborado pela Autora com dados de Kalogirou (2005) e Gude (2015).

3 METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia utilizada neste estudo é uma combinação de pesquisa descritiva, exploratória e bibliográfica, com análises quali-quantitativas. O estudo se baseia em dados numéricos, parâmetros técnicos e conceitos, como avaliação econômica, técnica e ambiental, considerando as características específicas da região e utilizando modelagens computacionais. Essas abordagens fornecerão subsídios para avaliar a viabilidade da implementação de um sistema de dessalinização no sul da Ilha de Florianópolis.

3.1 TIPOLOGIA DA PESQUISA

- a) Descritiva: Envolve a descrição dos sistemas de dessalinização existentes, suas tecnologias e suas interações com o meio ambiente.
- b) Exploratória: Focada na investigação de novas tecnologias e aplicações para integrar o processo de dessalinização ao sistema de abastecimento da costa leste sul. O objetivo é explorar hipóteses por meio de sondagens, aprimorar ideias, desenvolver insights e formular hipóteses para estudos futuros.
- c) Estudo de Caso: Por se tratar de uma pesquisa específica e localizada, assume a forma de um estudo de caso da dessalinização no sul da Ilha de Florianópolis. A pesquisa se apoia em fontes bibliográficas do tema abordado.
- d) Bibliográfica: Com base em uma análise de artigos científicos, livros e estudos de caso sobre processos de dessalinização e seus impactos econômicos, técnicos e ambientais.

3.2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

3.2.1 Levantamento de dados

O levantamento de dados foi realizado a partir de diversas fontes, incluindo:

- a) Bases científicas (Scopus, Google Scholar, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, ResearchGate, entre outras).
- b) Relatórios ambientais e estudos de impacto.

- c) Teses e dissertações sobre a região de Florianópolis, com foco nas características da costa leste sul, área de interesse.
- d) Informações relacionadas a recursos hídricos e tecnologias de dessalinização.

3.2.2 Análise técnica

Foi conduzida uma análise técnica das tecnologias de dessalinização, com ênfase naquelas mais viáveis para a região. A análise inclui:

- a) Características específicas da Praia da Armação e suas condições para a captação de água.
- b) Definição dos parâmetros adequados para um sistema de dessalinização por Osmose Inversa, incluindo pré-tratamento.
- c) Escolha de sistemas de membranas de Osmose Inversa disponíveis no mercado, baseadas em eficiência e custo.
- d) Estudo de alternativas viáveis para a gestão do concentrado salino (salmoura) gerado, considerando o emissário de salmoura e suas características de dispersão na região.

3.2.3 Análise econômica

A análise de custo-benefício da dessalinização inclui a avaliação de:

- a) Investimentos de capital (CAPEX) e custos operacionais (OPEX) associados à implementação e operação de um sistema de dessalinização.

3.2.4 Simulação de cenários

Foram simulados cenários com o objetivo de complementar o abastecimento de água da costa leste sul até o ano de 2044, num horizonte de 20 anos, para analisar o impacto de um sistema de dessalinização no futuro abastecimento da região. Serão considerados dois cenários principais:

- 1) Vazão complementar de 100 L/s.
- 2) Vazão complementar de 200 L/s.

3.2.5 Anteprojeto da ETA com dessalinização por osmose inversa

O projeto da Estação de Tratamento de Água (ETA) integrada com dessalinização foi desenvolvido com foco nos seguintes aspectos:

- a) Localização: Escolha do local mais adequado para a instalação do sistema.
- b) Capacidade: Definição da capacidade do sistema de dessalinização para complementar a demanda futura.
- c) Equipamentos e Estrutura: Especificação dos principais componentes, como bombas, membranas de Osmose Inversa, sistemas de captação e pré-tratamento. Captação de Água: Análise do processo de captação da água do mar e transporte para a ETA.
- d) Pré-tratamento e pós-tratamento: Descrição do pré-tratamento necessário para otimizar o processo de dessalinização, e pós-tratamento. (Detalhar o benefício do sistema subterrâneo para minimizar o impacto visual e preservar o local de implantação, e pós-tratamento.
- e) Relatar os estudos de impacto ambiental possível.
- f) Membranas: Seleção das membranas mais adequadas para o sistema, baseadas nas características da água local.
- g) Layout: Elaboração de um layout preliminar da ETA, integrando o sistema de dessalinização ao conjunto de infraestrutura existente

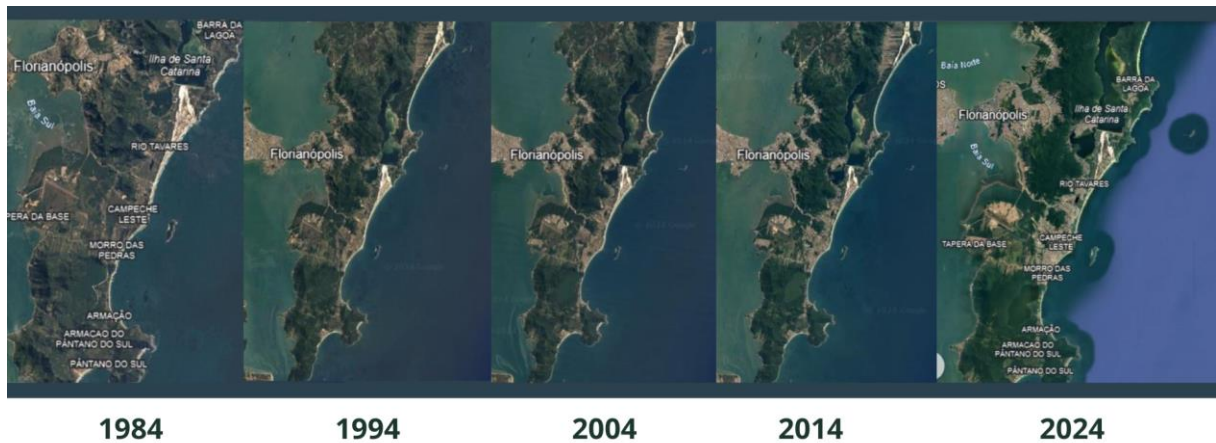
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO: ABASTECIMENTO DE ÁGUA NA COSTA LESTE SUL DE FLORIANÓPOLIS

O crescimento populacional na região sul de Florianópolis tem se intensificado nas últimas décadas, gerando uma pressão significativa sobre as fontes tradicionais de abastecimento de água e as infraestruturas existentes (Figura 13). Entre 2000 e 2022, a população da região aumentou de 64 mil para 107 mil habitantes, refletindo um crescimento de 67% (IBGE, 2022). Esse aumento populacional, muitas vezes não planejado, tem contribuído para a sobrecarga do Sistema Costa Leste/Sul de abastecimento de água e intensificado a escassez de água potável. A urbanização acelerada e o influxo de turistas aumentam ainda mais a demanda hídrica, tornando necessária uma revisão crítica das capacidades das fontes de abastecimento e das infraestruturas associadas.

Atualmente, o Sistema Costa Sul/Leste (SCLS) de abastecimento de água é predominantemente alimentado pela Lagoa do Peri, cuja bacia hidrográfica cobre uma área de 20,1 km² e apresenta uma vazão média de 433,78 L/s. Até a implementação da Estação de Tratamento de Água (ETA) Lagoa do Peri, em 2000, o sistema era suplementado por 12 poços artesianos localizados ao longo do Aquífero do Campeche, com uma capacidade total de 148 L/s, utilizados especialmente como reserva técnica durante a alta temporada. No entanto, o Aquífero do Campeche enfrenta vulnerabilidades significativas, como intrusão salina e contaminação por águas residuárias, problemas que têm se agravado com o crescimento populacional e o aumento do turismo (CASAN, 2020).

O SCLS atende os distritos da Barra da Lagoa, Lagoa da Conceição, Campeche, Ribeirão da Ilha e Pântano do Sul, sendo predominantemente composto por áreas urbanas. Atualmente, o sistema abastece cerca de 100.000 habitantes, dos quais 95% residem na área urbana e 5% na zona rural. Durante a alta temporada, o número de pessoas atendidas pode ultrapassar 147.281 (Campanário, 2007).

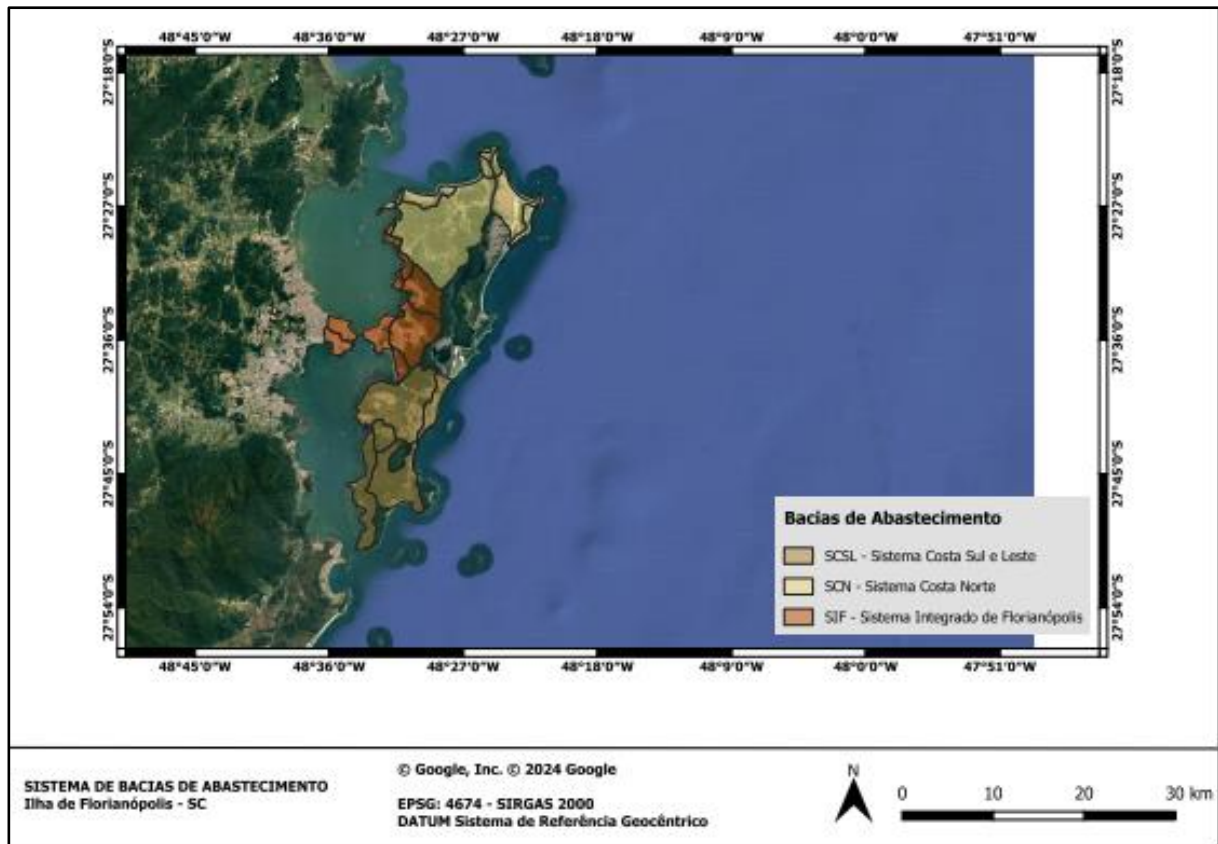
Figura 13 - Alterações na cobertura do solo ao longo do tempo Costa Leste Sul Florianópolis



Fonte: Elaborado pela Autora - Google Earth, 2024

O Sistema de Abastecimento de Água Costa Sul Leste atende os distritos da Barra da Lagoa, Lagoa da Conceição, Campeche, Ribeirão da Ilha e Pântano do Sul, áreas predominantemente urbanas (Figura 14).

Figura 14 - Mapa de sistemas de abastecimento de Florianópolis



Fonte: Elaborado pela Autora em qGIS v3.36 (2024).

A demanda de água é de aproximadamente 300 L/s durante a maior parte do ano. No entanto, durante os meses de alta temporada, essa demanda pode aumentar

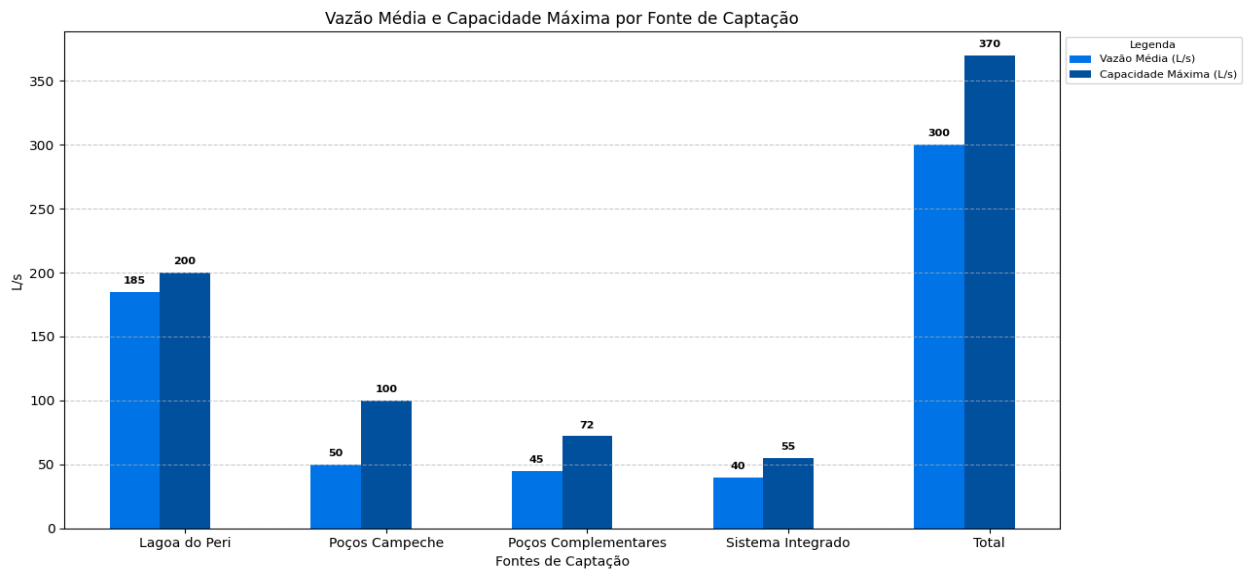
para cerca de 370 L/s devido ao influxo de turistas (CASAN, 2024). A tabela a seguir apresenta a vazão média e a capacidade máxima de cada fonte de captação (Figura 15), essencial para enfrentar os picos de consumo nos períodos de maior demanda (Tabela 12):

Tabela 12 - Vazão média e capacidade máxima captação SACLs

Fonte de Captação	Vazão Média (L/s)	Capacidade Máxima (L/s)
Captação Lagoa do Peri	185	200
Captação Poços Campeche (UT Campeche)	50	100
Captação Poços Complementares	45	72
Proveniente do Sistema Integrado	40	55
Total	300	370

Fonte: Adaptado da CASAN (2024)

Figura 15 - Vazão Média e Capacidade Máxima por Fonte de Captação



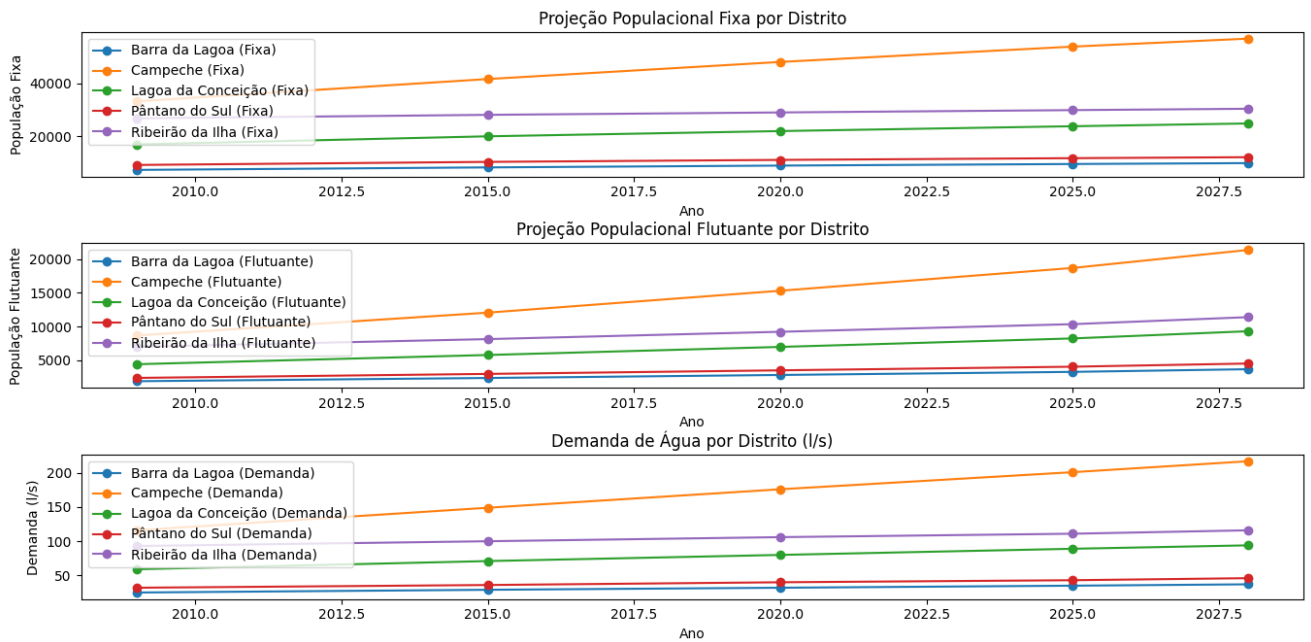
Fonte: Elaborado pela Autora (2024), a partir de dados da CASAN (2024).

O Sistema Costa Sul/Leste foi iniciado em 2000 e abrange diferentes fontes de captação, como a Lagoa do Peri, tratada na ETA com flotação, e a Unidade de Tratamento de Água (UTA) do Campeche, que utiliza captação subterrânea por meio de nove poços. Além disso, sete poços complementares, distribuídos entre os bairros do Campeche, Rio Tavares e Lagoa da Conceição, garantem o fornecimento contínuo de água tratada. Essas instalações visam atender à crescente demanda da região,

complementadas por medidas da Companhia Catarinense de Águas e Saneamento para assegurar a qualidade e a continuidade do abastecimento (CASAN, 2024).

O SCLS também leva em consideração a população flutuante, composta por turistas e visitantes temporários, cujos números são obtidos por meio de estudos do IPUF e dados da SANTUR. Entre 2009 e 2028, espera-se que a população total do sistema cresça de 117.272 para 184.066 habitantes, com um aumento expressivo na população flutuante, especialmente em áreas de alto fluxo turístico, como Campeche e Barra da Lagoa. Este aumento populacional impacta diretamente na demanda de água, que deve subir de 325 L/s em 2009 para 510 L/s em 2028 (Figura 16). A demanda varia entre os diferentes distritos, com áreas mais turísticas, como o Campeche, apresentando uma necessidade maior de abastecimento, enquanto bairros como Pântano do Sul e Ribeirão da Ilha possuem uma demanda relativamente menor.

Figura 16 - Projeção populacional CLS



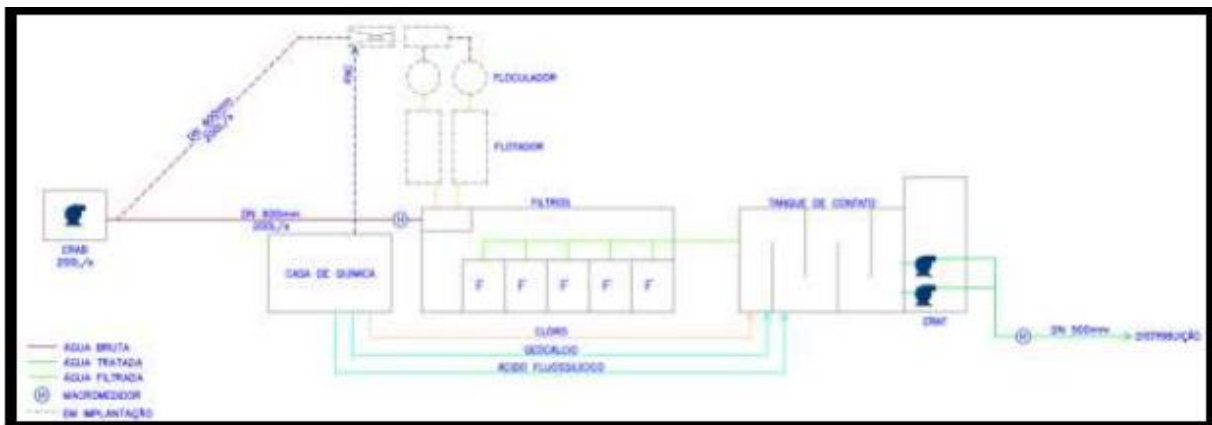
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A adução de água tratada da Estação de Tratamento de Água (ETA) Lagoa do Peri é realizada por meio de uma adutora de 500 mm de diâmetro, que conecta a Estação de Recalque de Água Tratada (ERAT) à estrada geral localizada a leste da Lagoa do Peri. A partir dessa adutora, a água segue para as regiões norte, oeste e

sul de Florianópolis, abastecendo as redes de distribuição e os reservatórios situados a jusante (CASAN, 2019).

O tratamento da água na ETA Lagoa do Peri (Figura 17) envolve várias etapas. Inicialmente, é realizada a coagulação com sulfato de alumínio, seguida pela filtração direta por filtros descendentes. A correção de pH é feita com óxido de cálcio (CaO), e a desinfecção é realizada com cloro gasoso (ClO). Além disso, a fluoretação é realizada com fluossilicato de sódio (NaSiF_6). O Sistema de Flotação por Ar Dissolvido (FAD) é empregado para melhorar a clarificação da água, removendo impurezas de forma mais eficiente. Todos esses processos são gerenciados por sistemas automatizados, que otimizam a dosagem de produtos químicos e o controle dos parâmetros de qualidade da água (Tabela 13).

Figura 17 - Esquema de funcionamento da ETA Lagoa do Peri do SCSL.



Fonte: (CASAN, 2019)

O sistema de deságue de lodo da ETA reduz o volume de resíduos gerados, sendo que, mensalmente, são produzidas cerca de 95 toneladas de lodo. Esse resíduo é enviado para o aterro sanitário da Momento Engenharia, localizado em Blumenau, para disposição final (CASAN, 2019).

Tabela 13 - Processos de Tratamento da ETA Lagoa do Peri.

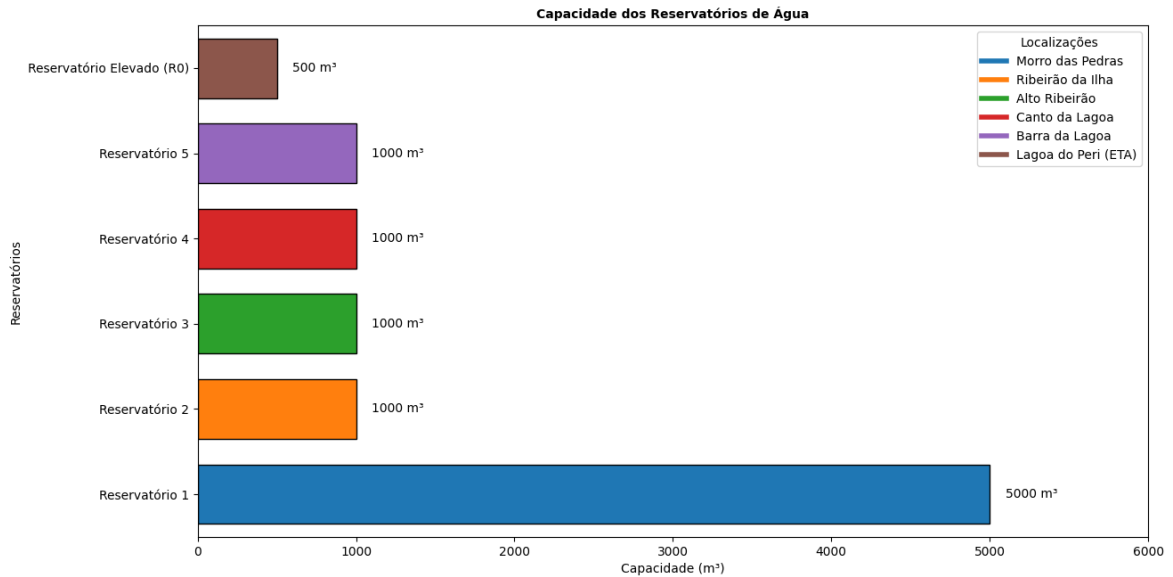
Etapa de Tratamento	Descrição
Medição	Controle da vazão de água bruta
Calha Parshall (Mistura Rápida)	Neutralização e coagulação com geocálcio e sulfato de alumínio
Clarificação (Floculação + FAD)	Flotação por ar dissolvido, dois módulos de 120 L/s
Filtração Descendente	Filtros de areia e antracito, lavagem em contracorrente
Pós-Cloração, Fluoretação e Correção de pH	Aplicação de cloro, fluoretação, e correção de pH com geocálcio
Estação de Recalque de Água Tratada (ERAT)	Recalque de água tratada para distribuição
Deságue de Efluentes	Sistema de prensa parafuso para efluentes da ETA

Fonte: Elaborada pela Autora (2024).

O Sistema Costa Sul/Leste (SCLS) possui uma infraestrutura de reservação composta por seis reservatórios, com capacidades variando de 1 m³ a 600 m³, totalizando 1.609 m³ de capacidade. Estes reservatórios estão localizados em diferentes pontos da região.

Além disso, há um reservatório elevado com capacidade de 500 m³, alimentado pela Estação de Recalque de Água Tratada (ERAT) na própria ETA da Lagoa do Peri (CASAN, 2019) (Figura 18).

Figura 18 - Capacidades dos reservatórios SACLs.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

De acordo com o estudo da CASAN (2020), a análise da demanda necessária de água e da capacidade de reservação para abastecimento nos distritos do Sistema Costa Leste/Sul de Florianópolis, em 2010, revela que a capacidade de reservação ainda é superior à demanda em cada local (Tabela 14).

Tabela 14 -Capacidade e demanda de acordo com cada região

Distrito	População (hab.)	Demanda Necessária (m³)	Capacidade Atual (m³)	Déficit (m³)
Ribeirão da Ilha	33.729	93	2000	691
Campeche	41.863	116	5000	-
Lagoa da Conceição	21.233	59	1000	694
Barra da Lagoa	9.04	25	1000	-279
Pântano do Sul	11.407	32	5000	-
Total	117.272	325	9000	1106

Fonte: Dados adaptados de CASAN (2020).

A saída da Estação de Tratamento de Água (ETA) Lagoa do Peri é conectada à Estação de Recalque de Água Tratada (ERAT), que possui dois conjuntos

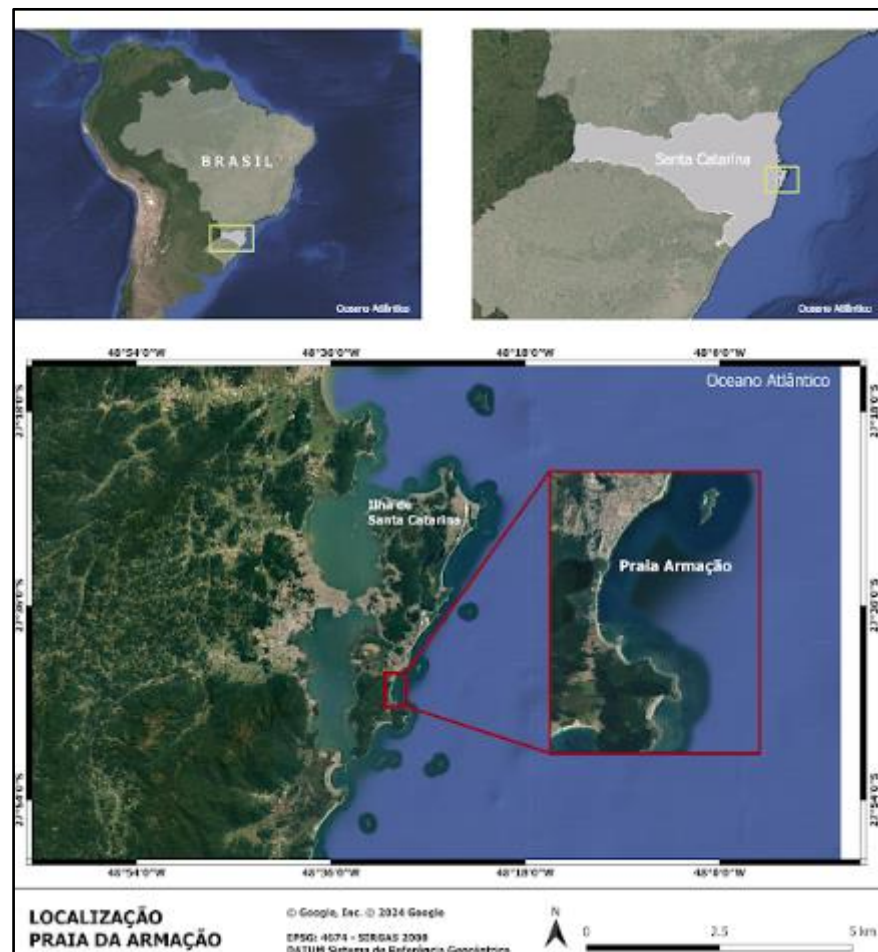
motobombas responsáveis pelo recalque de água tratada para a rede de distribuição. O sistema também conta com dois alimentadores “*boosters*” principais, no Canto da Lagoa e Barra da Lagoa, além de outros seis pontos de bombeamento para garantir o abastecimento nas regiões mais altas do SCLS.

4.2 ÁREA DE ESTUDO PARA PROJETO PILOTO

A Praia da Armação do Pântano do Sul, localizada no sudeste da Ilha de Santa Catarina, em Florianópolis, apresenta características geomorfológicas e ambientais de grande relevância para estudos de processos erosivos e captação de água do mar para dessalinização. A região está situada entre as coordenadas 27°45'02" S e 48°30'03" W & 27°43'24" S e 48°30'15" W, sendo limitada ao norte pelo promontório rochoso do Morro das Pedras e ao sul pelo tómbolo que conecta a praia à Ilha das Campanhas. Além disso, é atravessada pelo rio Quinca Antônio, que atua como sangradouro da Lagoa do Peri, destacando-se como um dos principais mananciais de água doce da região (Polette, Souza e Mazzer, 1995).

O presente capítulo tem como objetivo detalhar as características geomorfológicas, climáticas, hidrodinâmicas e de transporte sedimentar da Praia da Armação, que será o ponto de captação de água do mar para um sistema de dessalinização (Figura 19). O sistema de pré-tratamento em margem será instalado em uma área anexa à Estação de Tratamento de Água da Lagoa do Peri, já existente e situada em frente à praia, otimizando a viabilidade do processo de captação e dessalinização da água marinha visado pelo projeto.

Figura 19 - Mapa localização área de estudo.



Fonte: Elaborado pela Autora em qGIS v3.36 (2024).

A Praia da Armação possui uma extensão aproximada de 3.500 metros, apresentando uma configuração em enseada de espiral, limitada por formações rochosas ao norte e ao sul (Figura 20). Sua geomorfologia é caracterizada pela presença de um tómbolo no extremo sul, que conecta a praia à Ilha das Campanhas, e pelo rio Quinca Antônio, que atua como sangradouro da Lagoa do Peri, um importante corpo hídrico de água doce da região (Brown; Mclachlan, 1990; Wisner *et al.*, 2004).

Conforme identificado por Abreu de Castilhos (1995), o local apresenta um comportamento morfodinâmico predominantemente refletivo. Esse tipo de morfodinâmica sugere que as ondas refletem de volta, em vez de se dissiparem completamente ao longo da costa, resultando em menor erosão e proporcionando uma estrutura costeira relativamente estável. Essa estabilidade morfodinâmica é vantajosa para a instalação de infraestrutura de dessalinização, pois reduz os riscos

associados à erosão costeira, facilitando a manutenção das estruturas ao longo da faixa de praia.

A salinidade média da água do mar na Praia da Armação é de aproximadamente 35 g/L, um parâmetro essencial para o desempenho dos sistemas de dessalinização, especialmente nos processos de Osmose Inversa (Kalogirou, 2005). As variações na salinidade podem impactar diretamente a eficiência das membranas de Osmose Inversa (Tabela 15). Por isso, é fundamental um monitoramento contínuo da salinidade para ajustar os parâmetros operacionais, garantindo uma operação eficiente e estável do sistema. Além disso, a qualidade da água também influencia a necessidade de um pré-tratamento adequado, essencial para minimizar o acúmulo de sólidos nas membranas e, assim, prolongar a vida útil do sistema.

Tabela 15 - Parâmetros água bruta Florianópolis.

Parâmetro	Valor Médio	Valor Máximo	Valor Mínimo
Turbidez (uT)	2,18	6,55	0,55
Cor Aparente (uH)	27,62	80	7
Temperatura (°C)	19,3	23,3	14,9
Condutividade Elétrica (mS/cm)	49,51	57,5	33,8
Salinidade (g/kg)	34,7	39,8	28,2

Fonte: Adaptado de Burgardt (2017).

Segundo os estudos realizados por Abreu de Castilhos (1995) e Horn Filho (2006), as análises granulométricas da Praia da Armação indicam valores semelhantes aos encontrados no estudo de Dalbosco (2013). A pesquisa concluiu que, no setor Central da praia, as partículas são mais grosseiras, enquanto no setor Sul observou-se uma fração mais fina. Esses resultados são apresentados na tabela 16 abaixo, que compara as granulometrias obtidas por esses autores e o estudo de Dalbosco (2013). Esses dados são essenciais para entender as dinâmicas locais, permitindo avaliar a viabilidade do sistema de dessalinização, considerando as características geomorfológicas da região.

Tais informações são de extrema relevância para a tomada de decisões sobre os sistemas, equipamentos e formatos de tratamento e pré-tratamento, além de sua operação.

Tabela 16 - Valores de Granulometria (ϕ) da Praia da Armação

Estudos – Autores (ano)	Granulometria Praia da Armação (ϕ)
Abreu de Castilhos (1995)	0,19
Horn Filho (2006)	0,13
Dalbosco (2013)	0,16

Fonte: Adaptado pela Autora (2024).

O quadro 4 a seguir apresenta a sazonalidade dos sistemas de ondas e suas características, fornecendo informações cruciais para o planejamento das infraestruturas costeiras, como as de dessalinização.

Quadro 4 - Sistemas de Ondas na Sazonalidade

Estação	Energia Dominante	Direção Predominante	Observações
Outono	Média	SSE (26%) S (23%)	Predominância de ondas do setor Sul.
Inverno	Alta	SSE (20%) S (18%) SE (10%) ENE (8%) E (5%)	Condições de alta energia, associadas às passagens de frentes frias e "lestadas".
Primavera	Média	ENE - E (30%) ESE - SE (28%) SSE - S (29%)	Crescimento das contribuições do setor Leste, distribuição direcional mais uniforme.
Verão	Baixa	ENE – E (100%)	Condições de baixa energia, continuidade do movimento sazonal para o setor Leste.

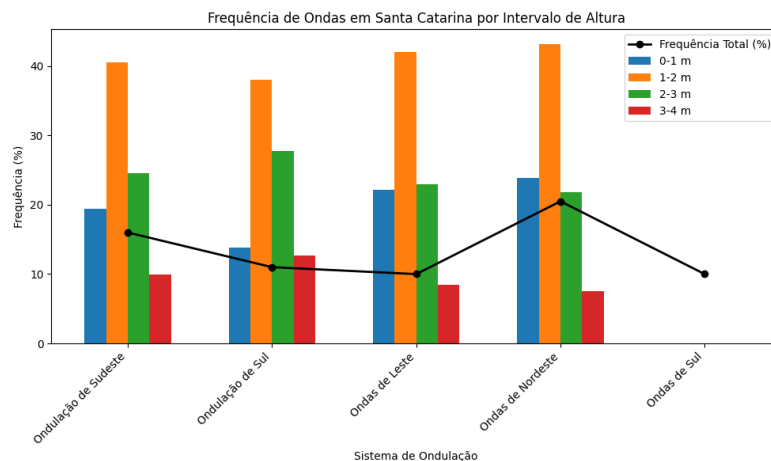
Fonte: Adaptado de Franco e Melo Filho (2008).

Figura 20 - Área de estudo com setores esquemáticos.



Fonte: Adaptado pela Autora (2024), Google Earth, 2024.

Figura 21 - Sistemas de Ondas na Ilha de Santa Catarina



Fonte: Adaptado de Franco; Melo Filho (2008).

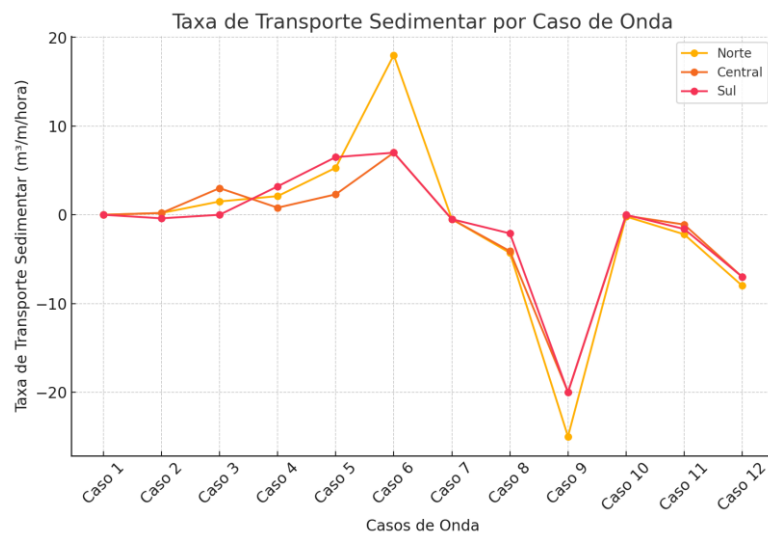
A análise hidrodinâmica da área é outro fator crucial, pois fornece informações sobre as correntes e o transporte sedimentar, aspectos fundamentais para avaliar a qualidade da água captada para tratamento e pré-tratamento (Figura 21). Tais dados são essenciais para entender as condições de estabilidade e eficiência das operações, incluindo a diluição da salmoura produzida, que será descartada por meio de um emissário no local. A tabela 17 a seguir apresenta a análise do transporte sedimentar para diferentes condições de onda, fornecendo subsídios para o planejamento e implementação de sistemas que considerem a viabilidade de operação do tratamento e o impacto ambiental do descarte da salmoura (Figura 22).

Tabela 17 - Sistema de Ondas e Taxa Média de Transporte Sedimentar

Sistema de Ondas	Caso de Onda	Hs (m) em Águas Rasas	Taxa Média Transporte Sedimentar (m ³ /m/hora) - Norte	Taxa Média Transporte Sedimentar (m ³ /m/hora) - Central	Taxa Média Transporte Sedimentar (m ³ /m/hora) - Sul	Comentários
Nordeste	Caso 1	0,6	0 a +0,3	0 a +0,3	0 a -0,8	Ondulação moderada
	Caso 2	0,8	0,2 a +1,0	0,2 a +1,0	-0,4 a -1,8	Ondulação mais intensa
	Caso 3	1,2	1,5 a +7,0	3 a +7,0	0 a -8,0	Alta energia de onda
Leste	Caso 4	0,8	2,1 a +5,2	0,8 a +3,8	3,2 a -1	Maior eficiência no transporte
	Caso 5	1,3	5,3 a +10,6	2,3 a +9,6	6,5 a -3	Efeito significativo no setor norte
Sudeste	Caso 6	1,6	18 a +32	7 a +30	7 a -10	Alta taxa de transporte
	Caso 7	0,8	-0,5 a -1,7	-0,5 a -1,4	0 a -0,5	Ondulação mais fraca
	Caso 8	1,2	-4,3 a -9,2	-4,1 a -8,5	-2,1 a +3	Transporte mais fraco
Sul	Caso 9	2,1	-25 a -43	-20 a -42	-20 a +1,3	Alta intensidade, pouco transporte no Sul
	Caso 10	0,6	-0,2 a -0,6	-0,1 a -0,3	0 a -0,1	Ondulação mais fraca
	Caso 11	1,0	-2,2 a -4,1	-1,1 a -2,6	0 a -1,6	Correntes mais fracas
	Caso 12	1,6	-8 a -13	-7 a -12	0 a -7	Menor transporte no setor sul

Fonte: Adaptado de Dalbosco (2013).

Figura 22 - Taxa de Transporte por Caso (ver Tabela 17).



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 18 - Comportamento de correntes

Corrente	Velocidade (m/s)	Direção (°)	Profundidade (m)
Corrente 1	0,6	45	15
Corrente 2	0,4	120	20
Corrente 3	0,7	150	18
Corrente 4	0,5	60	25

Fonte: Adaptado de Dalbosco (2013).

Tabela 19 - Análise hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.

Tempo (horas)	Velocidade da correnteza (m/s)	Concentração de sedimentos (mg/L)
0	2,0	10
2	2,3	12
4	2,5	09
6	2,8	14
8	3,0	11
10	2,7	13

Fonte: Adaptado de Dalbosco (2013).

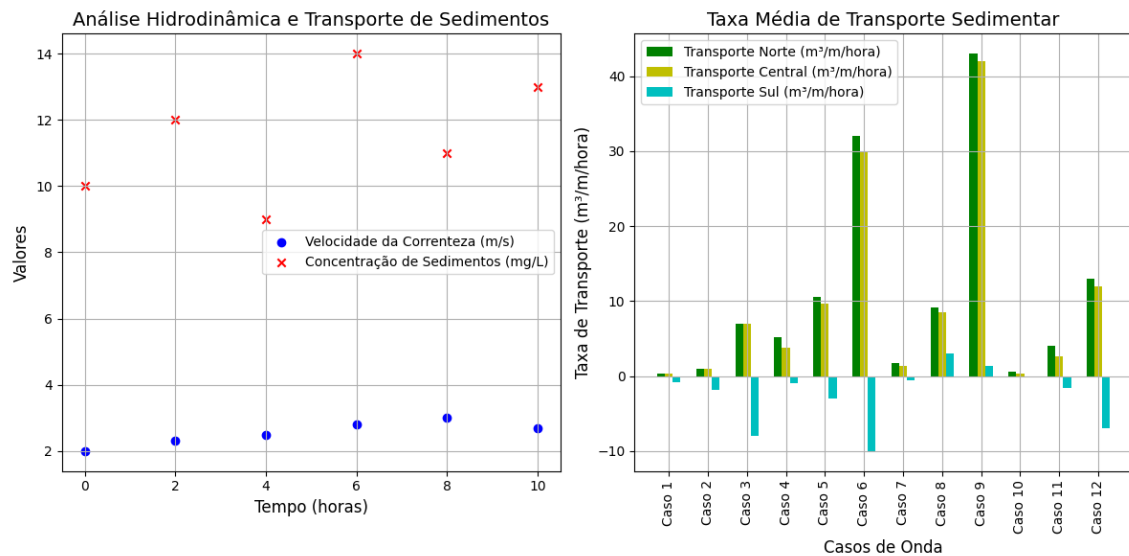
De acordo com os dados apresentados por Dalbosco (2013), as condições hidrodinâmicas (ver Tabela 18) e de transporte sedimentar (ver Tabela 19) indicam que o local apresenta características favoráveis para a dispersão de salmoura, especialmente em áreas com correntes e ondas de maior intensidade:

- a) **Correntes e Hidrodinâmica:** As correntes apresentaram velocidades entre 0,4 e 0,7 m/s e direções variando entre 45° e 150°, refletindo a interação de diferentes fatores meteorológicos e marinhos que influenciam o transporte de sedimentos e a dispersão de salmoura. A profundidade das correntes, variando de 15 a 25 metros, é um fator determinante para o posicionamento do emissário de salmoura, garantindo uma dispersão eficaz e minimizando impactos ambientais. A corrente 3 (0,7 m/s a 150°) se destaca, pois sua velocidade e direção favorecem uma maior dispersão da salmoura, sendo a mais indicada para o descarte.
- b) **Sistema de Ondas e Transporte Sedimentar:** A análise do sistema de ondas indica variações significativas nas taxas de transporte sedimentar para diferentes direções de onda. Casos de alta energia, como o caso 6 (Leste), apresentam as maiores taxas de transporte sedimentar, com valores de até +32 m³/m/hora no setor norte, o que pode facilitar a diluição da salmoura pela maior mobilidade dos sedimentos (Figura 23). Por outro lado, casos como o 12

(Sul) apresentam menores taxas de transporte (-8 a -13 m³/m/hora), o que pode resultar em acúmulo de resíduos na região sul, exigindo atenção na gestão do descarte. Direções de ondas com maior intensidade (Leste e Nordeste) proporcionam melhores condições para dispersão e diluição da salmoura.

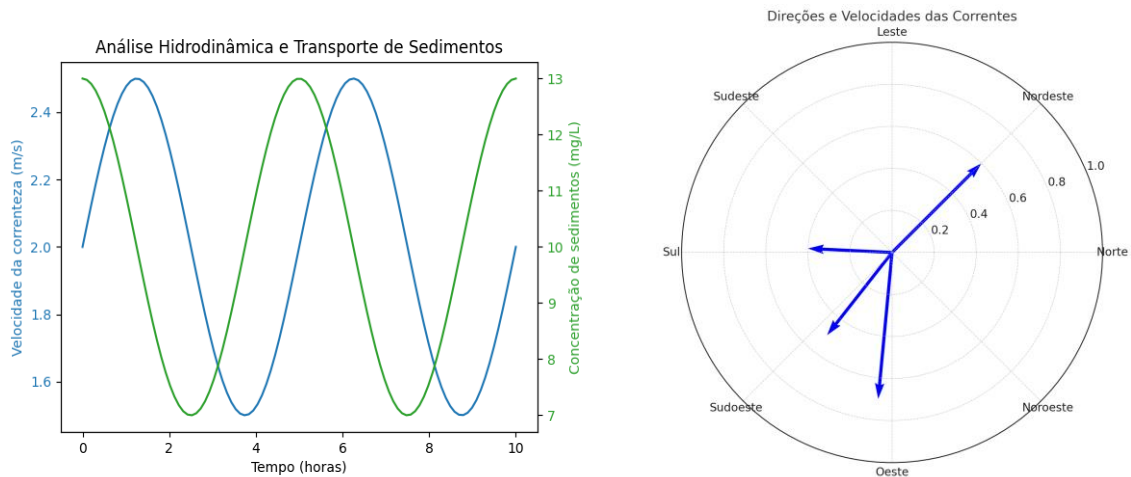
- c) **Concentração de Sedimentos:** A análise temporal da concentração de sedimentos mostra um comportamento flutuante. A velocidade das correntes variou entre 2,0 e 3,0 m/s, atingindo o pico após 6 horas. A concentração de sedimentos acompanhou parcialmente o aumento da velocidade da correnteza, variando entre 9 e 14 mg/L (Figura 23). Essas condições são favoráveis para o pré-tratamento da água captada, ajudando a reduzir o risco de obstrução das membranas do sistema de dessalinização e melhorando a eficiência do processo (Figura 24).

Figura 23 - Análise hidrodinâmica e de transporte de sedimentos.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 24 - Análise Hidrodinâmica e Modelagem de direções e velocidades das correntes Leste



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

4.3 MODELAGEM EMISSÁRIO DE SALMOURA

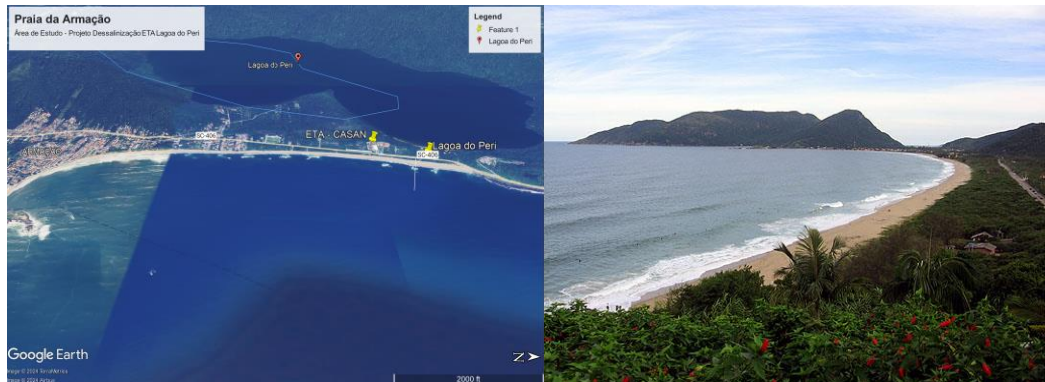
A modelagem da dispersão de salmoura é uma ferramenta fundamental para a avaliação dos impactos ambientais associados ao descarte de efluentes salinos provenientes de processos de dessalinização. Neste estudo, foram empregados dois tipos de modelos: um modelo simplificado de advecção-difusão e um modelo hidrodinâmico mais complexo. Ambos os modelos consideraram as condições hidrodinâmicas da área de estudo, incluindo a velocidade das correntes, características das ondas e profundidade do mar.

Cerca de 70% da produção global de salmoura ocorre em regiões costeiras, onde plantas de dessalinização frequentemente descartam a salmoura diretamente em corpos d'água salinos. Esse descarte pode alterar a salinidade local, afetando a fauna e flora marinhas, com consequentes impactos na biodiversidade (Ghaffour *et al.*, 2013). O estudo da dinâmica na Praia da Armação fornece dados essenciais para compreender o comportamento dos sedimentos e contribui para a modelagem da viabilidade do emissário de salmoura na região.

A análise dos dados de Dalbosco (2013) revelou que as ondas provenientes do leste têm impacto significativo na dinâmica hidrodinâmica da Praia da Armação (Figura 25), influenciando diretamente o transporte de sedimentos e a distribuição de energia na região. A difração dessas ondas ao contornar o costão da Ilha das Campanhas gera zonas de sombra que alteram a distribuição de energia e o transporte de sedimentos, fatores essenciais para o equilíbrio dinâmico da praia. Para modelar a dispersão da salmoura nas condições ambientais específicas da área, foi

utilizado o software Python, permitindo simular as interações entre a salmoura e o ambiente aquático, com base em parâmetros de estudos de Franco e Melo Filho (2008), Araújo *et al.* (2003) e Abreu de Castilhos (1995), que forneceram dados sobre o regime de ondas, variação da linha de costa e características morfodinâmicas da região.

Figura 25 - Praia da Armação.



Fonte: (Esquerda) Imagem adaptada do Google Earth® / (Direita) Foto da coleção pessoal da Autora (2024).

A Ilha das Campanhas atua como um protetor natural, reduzindo a altura das ondas, especialmente nas regiões central e sul da Praia da Armação. O setor norte é o mais exposto, com as maiores alturas de onda, enquanto o setor sul, protegido pela Ilha das Campanhas, recebe predominantemente ondas de leste. De acordo com Dalbosco (2013), as correntes são mais intensas quando as ondas provêm do leste e sudeste, com uma velocidade máxima de 0,55 m/s. As correntes de retorno, geradas no sul da praia, têm implicações no transporte de sedimentos, sendo mais intensas em sistemas de ondas de leste e sudeste. A taxa de transporte sedimentar é mais elevada no setor norte, com valores positivos indicando o transporte de sedimentos de norte em direção ao sul.

Será também considerada a sazonalidade, visto que o setor norte apresenta maior variação nas taxas de transporte sedimentar devido à maior energia das ondas. A variabilidade volumétrica nas campanhas foi maior nos setores norte e central, com forte sazonalidade relacionada à intensidade das ondas. O setor sul, devido à proteção da Ilha das Campanhas, mostrou maior estabilidade. A presença da ilha contribui para uma diminuição da variabilidade sedimentar no sul, gerando um perfil mais estável.

Outro fator relevante para o estudo é a urbanização no setor sul da praia, que resultou na supressão de áreas de restinga e dunas, comprometendo a capacidade de recuperação natural da praia, especialmente durante eventos de alta energia. O modelo de perfil de equilíbrio sugere que o setor sul sofrerá retração da linha de costa para atingir o equilíbrio estático, o que é inviável devido à urbanização existente.

Para a modelagem da dispersão da salmoura, diversos fatores ambientais devem ser considerados:

- a) Velocidade das Correntes: A correnteza média da Praia da Armação varia entre 2,0 e 3,0 m/s, favorecendo a diluição e dispersão da salmoura, prevenindo seu acúmulo e minimizando os impactos ambientais.
- b) Batimetria: A profundidade da água, que chega a 10 metros na zona de difração, e as características da plataforma interna influenciam diretamente o comportamento da salmoura. Áreas mais profundas favorecem a diluição pela maior interação entre a água do mar e a salmoura.
- c) Padrões de Ondas: A interação das ondas com a costa afeta a dispersão da salmoura, já que a difração das ondas cria zonas de sombra que alteram a distribuição de energia, impactando a eficiência da diluição.
- d) Transporte de Sedimentos: A movimentação de sedimentos contribui para a mistura da salmoura com a água do mar, melhorando sua dispersão.

A modelagem da dispersão de salmoura é essencial para prever o comportamento dos efluentes em corpos d'água. Neste estudo, foram adotados dois tipos de modelos de dispersão: um modelo simples de advecção-difusão, apropriado para estimativas iniciais, e um modelo mais complexo com simulação hidrodinâmica, que oferece previsões mais precisas e considera as condições variáveis do mar, aplicando-se ao transporte de sedimentos em suspensão na coluna de água.

Para calcular a produção de salmoura gerada por um sistema de dessalinização, utiliza-se uma fórmula que relaciona a capacidade de tratamento da planta (Qd), a taxa de recuperação (RR) e o volume de salmoura (Qb) produzido. A equação para o cálculo do volume de salmoura é dada por:

$$Qb = Qd \times \left(\frac{1 - RR}{RR}\right) \quad (4)$$

Onde:

Qb = volume de salmoura produzido por dia (m^3/dia),

Qd = capacidade de tratamento da planta de dessalinização (m^3/dia),

RR = taxa de recuperação (em porcentagem), que representa a quantidade de água potável produzida em relação à quantidade total de água tratada.

A taxa de recuperação (RR) pode ser determinada por diversos métodos, incluindo a análise de dados de salinidade da água de alimentação (Sf) e da salmoura (Sb) (Tabela 20). Usando as equações (2) e (3), podemos calcular a taxa de recuperação com base nessas salinidades (Figura 26):

$$Sb = Sf \times \left(\frac{1 - RR}{RR}\right) \quad (5)$$

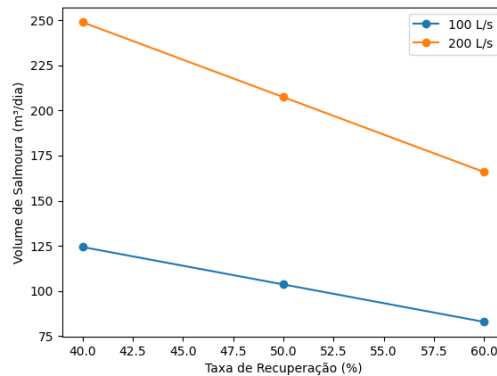
$$RR = 1 - \frac{Sb}{Sf} \quad (6)$$

Tabela 20 - Produção de Salmoura para Diferentes Taxas de Recuperação (100 L/s e 200 L/s)

Capacidade do Sistema (L/s)	Taxa de Recuperação (R)	Volume de Salmoura (Qb) - m^3/dia
100 L/s (207,36 m^3/dia)	40%	124,42 m^3/dia
100 L/s (207,36 m^3/dia)	50%	103,68 m^3/dia
100 L/s (207,36 m^3/dia)	60%	82,94 m^3/dia
200 L/s (414,72 m^3/dia)	40%	248,83 m^3/dia
200 L/s (414,72 m^3/dia)	50%	207,36 m^3/dia
200 L/s (414,72 m^3/dia)	60%	165,89 m^3/dia

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 26 - Produção de salmoura 100 L/s e 200L/s



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Esses cálculos são fundamentais para estimar a quantidade de salmoura gerada em plantas de dessalinização, o que é crucial para avaliar o impacto ambiental do descarte dessa salmoura no ambiente marinho, como discutido por Jones *et al.* (2019) em sua análise global sobre a produção de salmoura e dessalinização.

O Modelo de Dispersão Simples, baseado na equação de advecção-difusão, considera que a dispersão é resultado da combinação entre difusão turbulenta e advecção, que é o movimento causado pela correnteza (Figura 27). Esse modelo, embora simplificado, é eficiente para estimativas iniciais e para prever a dispersão em condições de correntes relativamente constantes (ISLAM; CHAUDHRY, 1997). A formulação básica é a seguinte:

$$I(x, y, t) = I_0 \cdot e^{-\lambda x} \cdot \sin(k \cdot y - \omega \cdot t) \quad (7)$$

Onde:

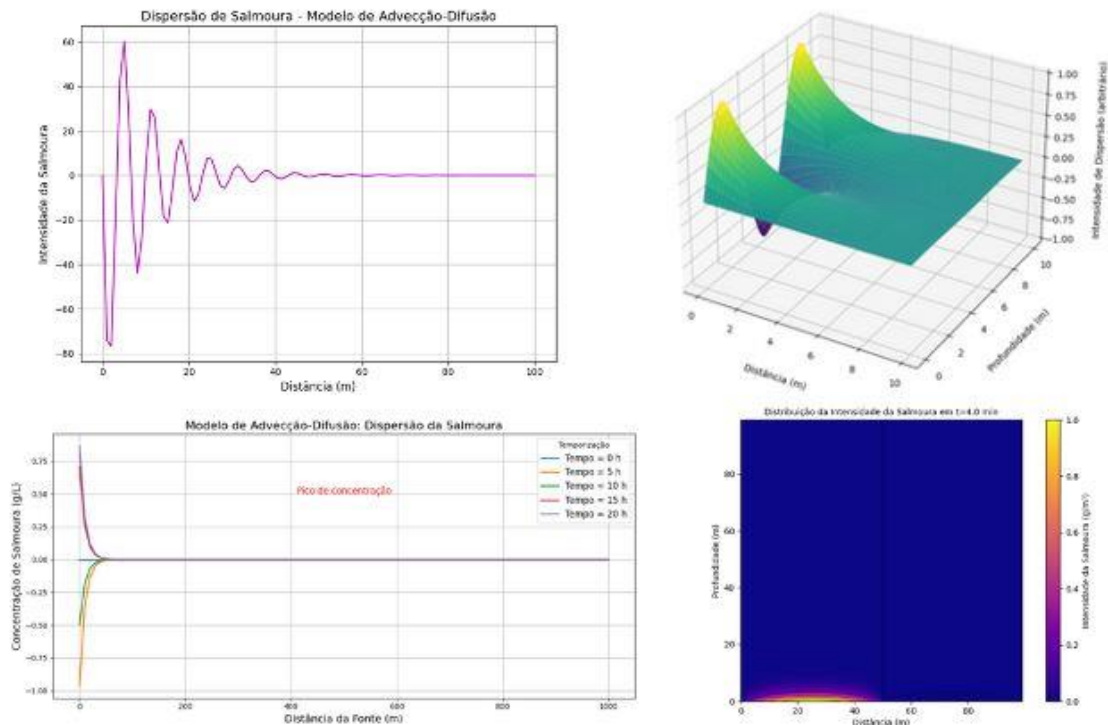
I_0 = Intensidade inicial da salmoura.

Λ = Comprimento de onda relacionado à dissipação da salmoura (pode ser estimado a partir das características das ondas e da correnteza).

k = Número de onda (relacionado ao padrão de ondas).

Ω = Frequência angular das ondas.

Figura 27 - Modelagem Advecção-Difusão.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A intensidade da salmoura diminui com a distância devido à dissipação, o que implica que, à medida que a salmoura se afasta da fonte de emissão, sua concentração se reduz. A direção e intensidade das correntes e ondas desempenham um papel crucial na dispersão. Na Praia da Armação, as condições de ondas e correntes influenciam diretamente a dispersão da salmoura, tanto na coluna d'água quanto ao longo da praia. A dispersão temporal é importante para entender a propagação da salmoura ao longo do tempo, sendo essencial para a gestão ambiental da área e o planejamento de soluções para minimizar os impactos dessa atividade no ecossistema.

Para simular a dispersão com maior precisão, foi implementado um modelo de simulação hidrodinâmica, que considera variáveis ambientais como correntes, ondas e marés. Este modelo é especialmente adequado para ambientes marinhos dinâmicos, proporcionando uma representação realista do movimento e da dispersão da salmoura (PORTE PEREIRA *et al.*, 2021). O modelo foi implementado em Python, utilizando técnicas numéricas para resolver as equações de movimento hidrodinâmico com variáveis dependentes do tempo. As equações baseadas em Navier-Stokes para

fluxos incompressíveis com ajustes para os coeficientes de dispersão vertical e horizontal foram resolvidas numericamente utilizando o método das diferenças finitas:

$$\partial t / \partial C + \vec{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (D \nabla C) \quad (8)$$

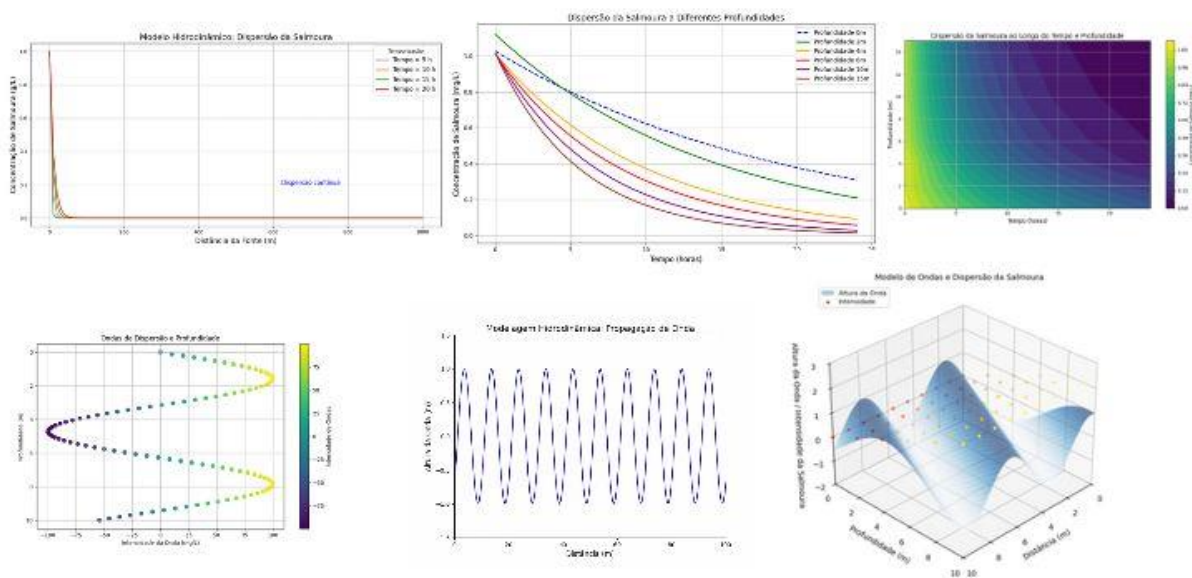
Onde:

\vec{u} = representa o vetor de velocidade das correntes marinhas.

∇C = descreve o gradiente de concentração.

Esse sistema de equações foi resolvido numericamente utilizando o método das diferenças finitas. A simulação forneceu resultados gráficos que evidenciam como a concentração de salmoura diminui com o tempo devido à interação da correnteza e à dispersão. O modelo de simulação hidrodinâmica mostrou uma dissipação mais eficiente da salmoura nas primeiras horas, com uma estabilização na taxa de diminuição após esse período (Figura 28).

Figura 28 - Modelagem hidrodinâmica



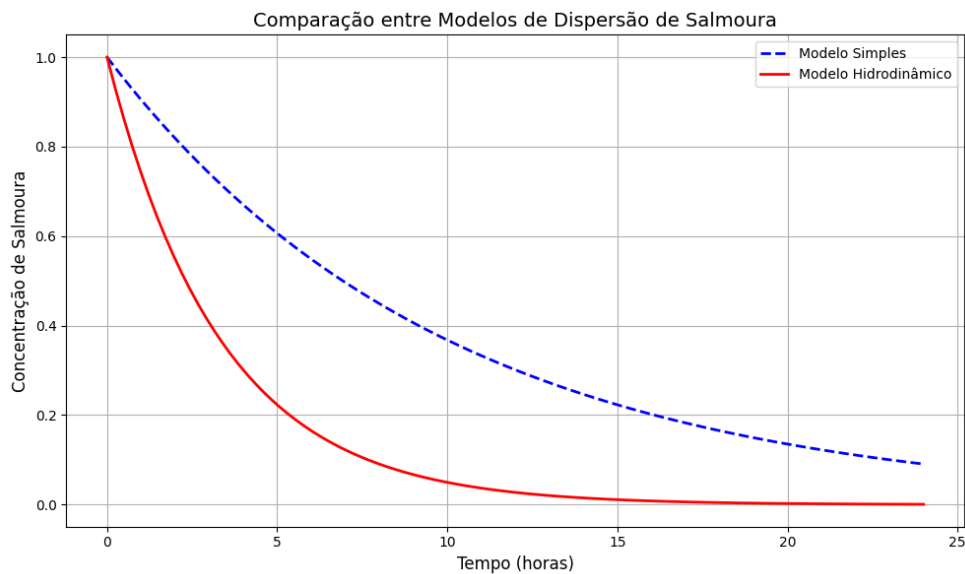
Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A comparação entre os modelos de simulação hidrodinâmica e dispersão simples revela que o modelo hidrodinâmico é mais eficiente na dispersão de poluentes na Praia da Armação do Pântano do Sul. Nesse modelo, a concentração diminui

rapidamente nas primeiras horas devido à interação das correntes e dispersão, estabilizando-se posteriormente. Em contraste, o modelo de dispersão simples apresenta uma diminuição mais gradual, sugerindo uma dispersão menos eficiente, possivelmente

A comparação entre os modelos de simulação hidrodinâmica e dispersão simples mostra que o modelo hidrodinâmico é mais eficiente na dispersão de poluentes na Praia da Armação do Pântano do Sul. Nele, a concentração diminui rapidamente nas primeiras horas devido à interação das correntes e dispersão, estabilizando-se posteriormente. Em contraste, o modelo de dispersão simples apresenta uma diminuição mais gradual, sugerindo uma dispersão menos eficiente, possivelmente pela ausência de variáveis hidrodinâmicas dinâmicas (Figura 29).

Figura 29 - Comparação entre modelagem dispersão simples x hidrodinâmica



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A seguir estão os principais limites e parâmetros da salmoura gerada por esse processo de Osmose Inversa (OI) e suas diretrizes (Tabela 21 e 22):

Tabela 21 - Limites de Concentração de Salmoura na Osmose Inversa.

Parâmetro	Valor
Limite de TDS (mg/L)	70.000 a 80.000
Limite de TDS (UHPRO)	Até 130.000
Salinidade (g/L)	Geralmente 2 a 3 vezes maior que a água do mar (≈ 35 g/L)
pH	Entre 6,5 e 8,5
Temperatura	Variável, dependendo do ambiente

Fonte Adaptado de Lee e Lee (2016) e Elimelech e Phillip (2011).

Tabela 22 - Diretrizes para Emissão de Salmoura no Mar

Parâmetro	Limite
Aumento de Salinidade (g/L)	Inferior a 1 g/L em relação ao nível natural
TDS	Compatível com a salinidade natural do mar
Oxigênio Dissolvido	Níveis adequados para organismos aquáticos
Nitrogênio e Fósforo	Níveis controlados para evitar eutrofização

Fonte: Adaptado de U.S. Environmental Protection Agency (2018).

A implementação de um emissário de salmoura na Praia da Armação do Pântano do Sul é considerada viável, desde que a dispersão e diluição sejam suficientes para mitigar os impactos negativos. A análise deve atender aos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, modificada pela Resolução CONAMA nº 430/2011, que define padrões de lançamento de efluentes em corpos d'água. Contudo, é imprescindível realizar estudos adicionais, como simulações hidrodinâmicas e modelagens de transporte de sedimentos, para prever o comportamento da salmoura sob diferentes condições do mar e seus efeitos na dinâmica ecológica local.

A viabilidade do emissário proposto é respaldada por estudos que analisam o comportamento hidrodinâmico e o transporte de sedimentos na área. Segundo Cavalcante e colaboradores (2018), a presença de um parcel em águas rasas atua como uma lente de focalização da energia das ondas, gerando diferentes efeitos nas zonas adjacentes. As ondulações provenientes do leste e nordeste resultam em uma zona de redução de energia na sombra do parcel, enquanto as áreas laterais

apresentam um aumento na altura das ondas, especialmente na região central da praia (CAVALCANTE *et al.*, 2018).

As ondas do sudeste, que possuem maior energia, também demonstram um padrão de focalização, criando zonas de diminuição da altura nas proximidades. Essa dinâmica hidrodinâmica resulta em gradientes hidráulicos na zona de arrebenção, influenciando as correntes de deriva geradas pelas ondas (Cavalcante *et al.*, 2018). A modelagem sugere que as características da zona de arrebenção no trecho sul e centro-sul da praia são controladas pela presença do costão rochoso e do parcel. Essa área urbanizada, com aporte sedimentar reduzido, é evidenciada pela largura diminuída da praia, mesmo após eventos erosivos significativos, como os ocorridos em 2010. Assim, a instalação do emissário se configura como uma estratégia crucial para a gestão adequada dos resíduos na região (Cavalcante *et al.*, 2018).

A análise hidrodinâmica indica que a batimetria da antepraia provoca variações nas alturas das ondas, as quais dependem dos três estados de mar predominantes. Os estados de maior energia (sudeste) e maior frequência (nordeste) demonstram um transporte de sedimentos em direção ao norte, enquanto as condições que combinam intensidade e frequência (leste) apresentam um transporte residual em direção ao centro-sul da praia. O transporte resultante de ondas de sudeste pode atingir valores de até 9 m³/hora/m.L, em contraste com o transporte gerado por ondas de leste, que é de apenas 0,7 m³/hora/m.L (Cavalcante *et al.*, 2018).

Para determinar a distância ideal para a emissão da salmoura no mar usando um emissário, é importante considerar alguns fatores, como a intensidade da salmoura, a dissipação esperada, as características do local de emissão e os impactos ambientais. Com base nos dados de Cavalcante (2018), foi possível observar alguns fatores sobre a dispersão da salmoura e suas características no local de estudo que afetam a eficácia da diluição e dispersão da salmoura:

- a) Velocidade da Correnteza: A correnteza média na praia, estimada entre 2,0 e 3,0 m/s, favorece a dispersão da salmoura. Essa velocidade elevada reduz a probabilidade de acúmulo da salmoura, minimizando os impactos negativos sobre a fauna e flora locais.
- b) Batimetria: A profundidade de 10 m na zona de difração, aliada às características da plataforma interna, exerce influência significativa na diluição da salmoura. Em áreas de maior profundidade, a interação da salmoura com a água do mar é intensificada, facilitando a dispersão.

- c) Padrões de Ondas: As variações nos padrões de ondas provenientes do sudeste, leste e nordeste impactam diretamente a dispersão da salmoura. A difração das ondas cria zonas de sombra onde a energia é atenuada, o que pode comprometer a eficácia da diluição.
- d) Sedimentos e Transporte: O transporte de sedimentos em direção ao norte pode interferir na distribuição e intensidade da salmoura. A movimentação dos sedimentos atua como um mecanismo adicional de mistura, favorecendo uma diluição mais homogênea da salmoura na coluna d'água.

4.4 SUGESTÃO DE DISTÂNCIA PARA EMISSÃO

Com base nas simulações realizadas e para garantir a diluição adequada da salmoura, é fundamental que a distância do emissário seja suficiente para permitir que a salmoura se disperse de forma eficaz antes de alcançar áreas sensíveis (Quadro 5). A seguir, detalhamos as diretrizes para maximizar a dispersão e minimizar impactos ambientais:

1) Emissão Inicial:

- a) A distância inicial do emissário deve ser de 100 a 200 metros da costa. Essa distância é comumente utilizada em emissões marinhas e permite que a salmoura se misture com as águas oceânicas antes de atingir zonas costeiras sensíveis.
- b) A profundidade de emissão é outro fator importante, pois quanto maior a profundidade, maior será a eficiência na dispersão da salmoura.

2) Monitoramento Contínuo:

- c) Após a emissão, o monitoramento contínuo das concentrações de salmoura em diferentes profundidades e distâncias é crucial para avaliar a eficácia da diluição.
- d) O uso de sensores de salinidade e turbidez ajudará a monitorar as condições em tempo real e garantir que não ocorram impactos adversos nas comunidades marinhas.

3) Modelagem de Dispersão:

- e) Utilizar modelagens de dispersão baseadas em dados locais de correntes, ondas e salinidade é fundamental para simular o comportamento da salmoura sob diferentes condições hidrodinâmicas.

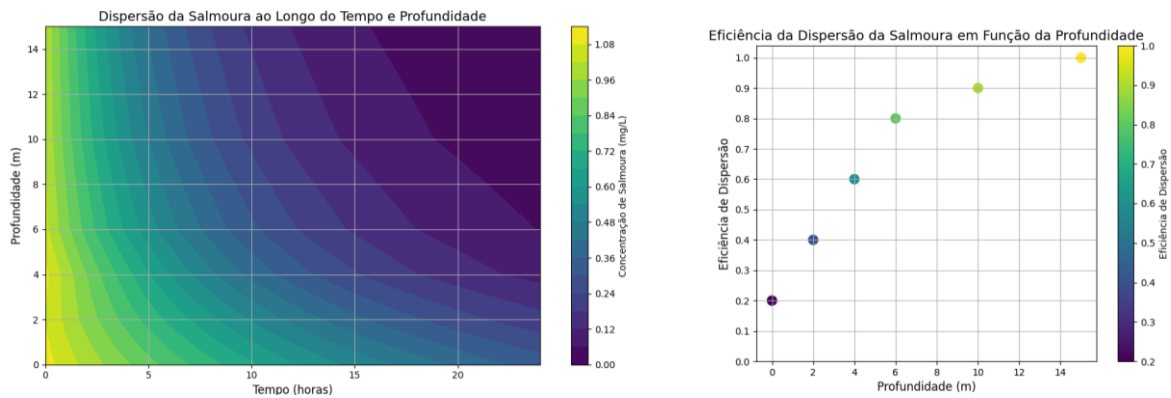
- f) Modelos de advecção-difusão permitirão ajustar dinamicamente a posição e profundidade do emissário, otimizando o processo de diluição e considerando as variações em tempo real de condições ambientais como vento e marés.

Quadro 5 - Análise de dispersão de acordo com profundidade emissário comprimento 100 metros.

Profundidade (m)	Característica do Meio Marinho	Dispersão da Salmoura (Eficiência)	Comentário
0 m (Superfície)	Alta turbulência superficial devido às ondas. Correntes mais fracas.	Menor dispersão. A salmoura tende a se acumular mais perto da superfície.	A troca de massas d'água é mais lenta. Menor diluição da salmoura.
2 m	Mais próxima da superfície, mas já com influência das correntes.	Dispersão moderada. As ondas podem ter efeito, mas as correntes ainda são fracas.	A dispersão começa a ser um pouco mais eficiente, mas ainda moderada
4 m	Maior influência das correntes e ondas mais profundas.	Dispersão eficiente. A salmoura começa a se misturar mais rapidamente com a água.	A água começa a se misturar bem, com efeitos mais fortes das ondas e correntes.
6 m	Correntes mais fortes, maior profundidade e ondas mais intensas.	Alta dispersão. A salmoura se mistura mais rapidamente devido às correntes.	A dispersão é mais eficiente. A mistura com a água é muito maior.
10 m	Correntes intensas e mistura de águas.	Muito alta dispersão. A salmoura se dispersa eficientemente nas camadas mais profundas.	A salmoura se mistura rapidamente com a água ao redor devido à dinâmica das correntes e ondas.
15 m	Região mais profunda, com menos efeito das ondas superficiais, mas intensa troca nas camadas inferiores.	Máxima dispersão. As correntes de fundo ajudam a dispersar a salmoura rapidamente.	O fundo marinho favorece a diluição eficiente da salmoura devido à maior intensidade das correntes de fundo e menor interferência das ondas.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Figura 30 - Dispersão emissário 100 metros de comprimento variação tempo x profundidade.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Com base nas análises hidrodinâmicas e de dispersão, podemos concluir que:

- a) Profundidades maiores (6 m a 15 m) são as mais eficazes para garantir uma boa dispersão da salmoura, devido à intensidade das correntes e à maior mistura das águas.
- b) A Corrente 3, com uma velocidade de 0,7 m/s e direção de 150°, é ideal para otimizar a dispersão da salmoura, proporcionando maior eficiência na diluição.
- c) A distância de 100 a 200 metros da costa é adequada, proporcionando o espaço e tempo necessários para que a salmoura se dilua antes de alcançar áreas costeiras sensíveis e ecossistemas vulneráveis.
- d) Modelagens de dispersão baseadas em dados locais são essenciais para otimizar o processo e ajustar as condições operacionais conforme necessário, permitindo o controle dinâmico da dispersão.

Além disso, a implementação de tecnologias avançadas e inovações no gerenciamento de rejeitos é fundamental para garantir que a dessalinização continue a ser uma solução sustentável para a crise hídrica. Esse processo deve equilibrar a crescente necessidade de água com a proteção ambiental (Ghaffour *et al.*, 2013).

A modelagem da dispersão de salmoura no ambiente marinho depende de uma combinação de fatores químicos, hidrodinâmicos e ambientais (ver Figura 30). A utilização de modelos numéricos, como os de advecção-difusão, ajustados com dados locais de correntes, ondas e salinidade, permitirá simulações precisas sobre a propagação da salmoura e o impacto ambiental do seu descarte, contribuindo para uma gestão mais eficaz e sustentável.

4.5 CAPTAÇÃO DE ÁGUA MARINHA E PRÉ-TRATAMENTO

O pré-tratamento da água do mar é uma etapa essencial para garantir a eficiência e a durabilidade das membranas de Osmose Inversa (OI), removendo impurezas que possam causar obstrução ou danos ao sistema. Este processo é crucial para proteger as membranas contra *fouling* e incrustações, além de melhorar a qualidade microbiológica e a turbidez da água de alimentação. Contaminantes como partículas suspensas, algas e microrganismos, se não tratados adequadamente, podem reduzir a capacidade de fluxo das membranas e comprometer a eficiência na remoção de sais. Estudos de Bartak *et al.* (2012), Voutchkov (2005) e Missimer *et al.* (2015) destacam a importância de um pré-tratamento bem estruturado para maximizar o desempenho dos sistemas de Osmose Inversa e garantir a operação eficiente e econômica da dessalinização.

Além de melhorar a qualidade física e microbiológica da água, o pré-tratamento visa também otimizar a performance da Osmose Inversa, prevenindo danos irreversíveis às membranas e garantindo a manutenção da qualidade da água tratada. A implementação de tecnologias específicas para controle de turbidez, remoção de partículas suspensas e controle microbiológico é fundamental para a operação bem-sucedida do sistema.

Os objetivos do pré-tratamento incluem a remoção de partículas suspensas, controle da turbidez, desinfecção microbiológica e prevenção de *fouling*, entre outros. As tecnologias e processos empregados para alcançar esses objetivos são descritos no quadro 6 a seguir:

Quadro 6 - Objetivos e processos de pré-tratamento.

Objetivo do Pré-Tratamento	Tecnologias e Processos Utilizados
Remoção de Partículas Suspensas e Sólidos	<u>Filtração Mecânica (Filtros Multimídia)</u> : Remove partículas grandes (areia, cascalho) usando camadas de materiais como areia, cascalho e carvão ativado.
Controle da Turbidez	<u>Ultrafiltração (UF)</u> : Utiliza membranas com poros menores para remover partículas finas, como microrganismos, bactérias e alguns vírus, melhorando a qualidade da água.
Desinfecção e Controle Microbiológico	<u>Ultrafiltração (UF)</u> : Também ajuda a reduzir a carga microbiológica, além de remover partículas finas. <u>Captação em Margem (Filtração por Areia de Praia)</u> : Água subterrânea filtrada naturalmente pela areia, com menor turbidez e carga microbiológica.
Remoção de Algas e Organismos Marinhos	<u>Filtração Mecânica (Filtros Multimídia)</u> : Captura impurezas grandes, como algas e sedimentos. <u>Ultrafiltração (UF)</u> : Remove organismos microscópicos como bactérias e algas.
Prevenção de Incrustações e Fouling	<u>Captação em Margem (Filtração por Areia de Praia)</u> : Água já filtrada naturalmente pela areia, com menor turbidez e potencial para redução de fouling nas membranas.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Uma das técnicas empregadas no pré-tratamento da água do mar antes da Osmose Inversa é a filtração em margem, realizada por meio de poços de captação subterrâneos localizados próximos à linha de costa. Esse método utiliza os sedimentos naturais da praia, como a areia, para filtrar a água, aproveitando as propriedades naturais do solo para reduzir a carga de sólidos suspensos e outras impurezas. No sistema de poços de captação vertical, descrito por Missimer (2009), a água subterrânea adjacente ao mar é utilizada, sendo a areia responsável por atuar como um filtro natural, promovendo uma filtragem eficiente e contínua.

Em regiões como a Praia da Armação, onde há grande movimento de correntes marinhas e intensa dispersão de sedimentos, a filtração em margem se torna uma solução mais viável em comparação com a captação de superfície. As correntes podem deslocar grandes volumes de sedimentos, tornando o processo de

filtração por meio de captação direta na superfície menos eficiente, com o risco de entupimento das instalações e maior esforço operacional. Já a captação subterrânea, ao utilizar a filtração natural do solo, aproveita a ação da areia para reter esses sedimentos antes que a água seja bombeada para o sistema de tratamento, garantindo uma água mais limpa e facilitando o processo subsequente de Osmose Inversa.

De acordo com Voutchkov (2005), a filtração por areia de praia em sistemas de captação subterrânea pode melhorar significativamente a qualidade da água, removendo partículas em suspensão, algas e microrganismos presentes na água do mar. Além disso, a constante movimentação das ondas previne a colmatação dos sedimentos, o que favorece a filtração contínua e facilita a dissipação dos colóides presentes na água (Missimer, Jones & Maliva, 2015).

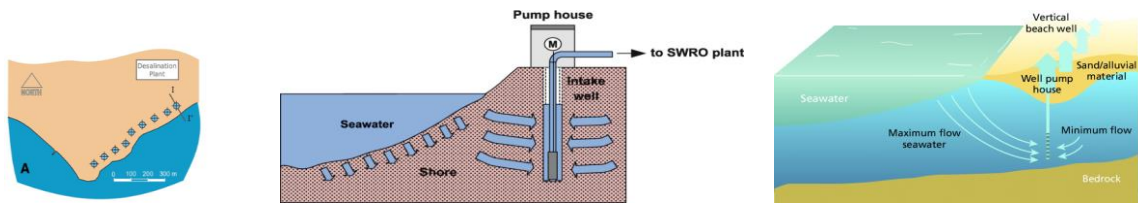
A técnica de hidrojateamento tem se mostrado eficaz na construção de poços verticais para captação de água subterrânea, especialmente em áreas com sedimentos arenosos. Esse método consiste na aplicação de jatos de água de alta pressão para perfurar o solo, facilitando a instalação de poços em locais como a Praia da Armação, onde as condições geológicas, com areia grossa e a ausência de vegetação densa, favorecem a implementação dessa técnica (Bartak *et al.*, 2012).

O pré-tratamento por filtração em margem utilizando poços verticais oferece várias vantagens ambientais e operacionais. Por ser totalmente subterrâneo, o sistema minimiza o impacto visual, interferindo pouco na paisagem local e na fauna, em contraste com sistemas de captação em mar aberto, que podem afetar a biodiversidade marinha e costeira. Além disso, a captação subterrânea reduz a exposição direta aos elementos ambientais e diminui os riscos de obstrução por materiais flutuantes ou contaminantes de superfície. A localização dos poços de praia é importante porque eles devem ser carregados diretamente pela água do mar, caso contrário a mistura com o lençol de água doce pode ocorrer, ocasionando assim, a deterioração da qualidade da água produzida (Missimer, 2009).

Outro benefício importante do sistema de poços verticais é a redução nos custos operacionais do tratamento inicial da água. A filtração natural realizada pela areia, no processo de captação subterrânea, diminui a necessidade de intervenções químicas ou processos físicos complexos, o que torna o sistema mais eficiente e de menor custo em relação a alternativas de pré-tratamento (Missimer, 2009; Voutchkov, 2005). Essa abordagem se mostra particularmente vantajosa em locais como

Florianópolis, onde as condições geológicas e hidrogeológicas são favoráveis à instalação desse tipo de sistema (Dehwah *et al.*, 2015a) (Figura 31).

Figura 31 - Poço de captação vertical.



Fonte: Adaptado de Voutchkov (2005)

A água bruta marinha destinada a sistemas de Osmose Inversa (OI) precisa ser cuidadosamente caracterizada, considerando parâmetros críticos que influenciam tanto a eficiência do pré-tratamento quanto a longevidade das membranas. Entre os principais indicadores de qualidade da água, destacam-se o Índice de Densidade de Silte (SDI), a turbidez e o Carbono Orgânico Total (COT). O SDI, por exemplo, é utilizado para medir a tendência de incrustação nas membranas, enquanto a turbidez e o COT fornecem informações sobre a presença de partículas e matéria orgânica que podem afetar o desempenho do processo de Osmose Inversa.

A seguir, é apresentada um quadro com os principais parâmetros para a caracterização da água bruta marinha e suas considerações no contexto de sistemas de Osmose Inversa (Quadro 7).

Quadro 7 - Caracterização da qualidade da água bruta marinha para o pré-tratamento

Parâmetro	Considerações
Turbidez (uT)	A turbidez aceitável para as membranas de Osmose Inversa (OI) deve ser inferior a 1 uT. Para turbidez elevada (acima de 50 uT), é necessário o uso de sedimentação ou outro processo de tratamento.
COT (mg. L ⁻¹)	Quando o COT está abaixo de 0,5 mg. L ⁻¹ , a formação de fouling é improvável. Valores superiores a 2 mg. L ⁻¹ aumentam a probabilidade de formação de fouling.
SDI	SDI < 2: Não há necessidade de pré-tratamento adicional. 2 < SDI < 4: Pode ser necessário algum pré-tratamento. SDI > 4: O pré-tratamento é essencial. O monitoramento deste índice deve ser anual.
Ferro (mg. L ⁻¹)	O ferro em sua forma reduzida é tolerado pelas membranas até concentrações de 2 mg. L ⁻¹ . O ferro na forma oxidada, com concentração superior a 0,05 mg. L ⁻¹ , pode acelerar o fouling.

Manganês (mg. L ⁻¹)	O manganês reduzido pode ser tolerado até concentrações de 0,1 mg. L ⁻¹ . Quando na forma oxidada, o manganês não deve ultrapassar 0,02 mg. L ⁻¹ , pois pode contribuir para o aumento do fouling.
Temperatura (°C)	Temperaturas abaixo de 12°C podem aumentar a demanda de energia. Temperaturas acima de 35°C intensificam o fouling, e valores superiores a 45°C causam danos irreversíveis à membrana.
Óleos e Graxas (mg. L ⁻¹)	Concentrações acima de 0,02 mg. L ⁻¹ podem acelerar o processo de fouling.
pH	O pH ideal deve estar entre 7,6 e 8,3. Exposição prolongada a valores abaixo de 4 ou acima de 11 pode causar danos irreversíveis às membranas.

Fonte: Adaptado de Burgdardt (2017).

A proposta para a implementação do sistema de captação de água bruta marinha consiste na construção de 10 poços verticais, com diâmetro de 250 mm e profundidade de 25 metros, localizados ao longo da orla próxima à Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri, atualmente sob responsabilidade da CASAN. A água captada por esses poços será direcionada à estação de tratamento, onde passará por um pré-tratamento simples, que incluirá a remoção de sólidos suspensos e outros contaminantes, antes de seguir para o processo de Osmose Inversa, uma microfiltração.

A escolha pelos poços verticais, em detrimento dos poços angulares, está fundamentada na possibilidade de instalação direta em terrenos já pertencentes à CASAN, evitando a necessidade de aquisição de novas áreas próximas à linha de costa. Além disso, os poços verticais apresentam menor complexidade de execução, tanto no que se refere ao licenciamento ambiental quanto à construção, dado que já estão alinhados com as características geológicas e hidrogeológicas da região, além de estarem em conformidade com a infraestrutura local existente (MISSIMER *et al.*, 2013).

Esse sistema oferece vantagens operacionais adicionais, uma vez que a captação subterrânea tende a ser mais estável e menos suscetível a variações na qualidade da água causadas pelo movimento das ondas ou pela ação direta dos ventos. Além disso, reduz o impacto ambiental, pois é totalmente enterrado, evitando interferir com a fauna e flora locais. Em comparação com sistemas de captação em

mar aberto, também minimiza a poluição visual, preservando a estética da paisagem e evitando a presença de estruturas visíveis que possam alterar o cenário natural.

Tabela 23 - Características Granulométricas Praia da Armação

Amostra	Localização	Diâmetro médio do grão (ϕ)	Classificação	Desvio padrão (ϕ)	mm
1	27°43'25,4" S 48°30'18,6" W	0,13	Areia grossa	0,58	0,91
2	27°44'17,3" S 48°30'27,4" W	0,22	Areia grossa	0,63	0,86
3	27°44'58,4" S 48°30'08,9" W	2,07	Areia fina	0,74	0,6

Fonte: Adaptado de Horn (2006).

As amostras de areia coletadas mostram predominância de areia grossa em duas das três amostras, com diâmetros médios dos grãos variando entre 0,13 mm e 0,22 mm, o que indica uma boa capacidade de filtragem para a captação subterrânea. A terceira amostra, com diâmetro médio do grão de 2,07 mm, classificada como areia fina, apresenta um desvio padrão menor, o que sugere uma maior uniformidade na granulometria (ver Tabela 23).

Essas características são relevantes para o dimensionamento e eficiência do sistema de captação, pois a areia grossa, com maior diâmetro de grãos, contribui para a filtração natural, reduzindo a carga de sólidos suspensos antes que a água seja tratada na ETA.

4.6 ERD (DISPOSITIVO DE RECUPERAÇÃO DE ENERGIA) - RECUPERAÇÃO DE ENERGIA POR OSMOSE

A recuperação de energia no processo de dessalinização da água do mar tem se mostrado um avanço essencial para a melhoria da eficiência e sustentabilidade dessa tecnologia. Nos primeiros estágios da dessalinização por osmose reversa (RO), o processo consumia grandes quantidades de energia, tornando-se economicamente inviável em muitos cenários. No entanto, com o aumento da demanda por água potável e o crescente custo da energia, surgiram esforços para tornar o processo mais eficiente.

Os primeiros dispositivos de recuperação de energia envolviam sistemas centrífugos, como turbinas Francis, rodas de turbina Pelton e turbocompressores. Embora esses dispositivos tenham permitido uma redução no consumo de energia, sua eficiência variava entre 75% e 85%, ainda deixando espaço significativo para melhorias. A verdadeira revolução, porém, aconteceu com a introdução de dispositivos isobáricos, como os trocadores de pressão (PX), que alcançam eficiências de até 97% (Gênesis Water Technologies, 2024).

A recuperação de energia por meio desses dispositivos é baseada na troca direta de pressão entre a água do mar que entra na planta e a salmoura concentrada resultante do processo de osmose. Os trocadores de pressão, em particular, são amplamente utilizados nas plantas modernas de osmose reversa e têm sido fundamentais para reduzir substancialmente o consumo específico de energia (SEC). Estudo realizado por Li (2024) aponta que, com a utilização de sistemas de recuperação de energia isobáricos, o SEC das plantas de RO pode ser reduzido para até 3 kWh/m³, o que representa uma melhoria significativa em comparação aos 6 kWh/m³ observados em sistemas mais antigos.

Esse avanço na eficiência energética não só reduz os custos operacionais, como também contribui para a sustentabilidade ambiental das plantas de dessalinização. A redução no consumo de energia diminui a pegada de carbono associada ao processo e, em muitos casos, torna a dessalinização uma solução mais viável para regiões com escassez de água, especialmente quando integrada com fontes de energia renovável, como a solar (Gênesis Water Technologies, 2024).

Os sistemas de recuperação de energia mais eficientes também trazem benefícios econômicos, já que a energia representa cerca de 30 a 50% dos custos operacionais das plantas de dessalinização. Com o uso de tecnologias como os trocadores de pressão (PX), o consumo de energia pode ser significativamente reduzido, tornando a dessalinização mais acessível em regiões com recursos hídricos escassos (Quadro 8). Segundo um estudo da Gênesis Water Technologies (2024), um sistema de recuperação de energia pode reduzir o consumo de energia de 4,5 kWh/m³ para 2,5 kWh/m³, gerando uma economia significativa de energia, o que, por sua vez, reduz o custo da produção de água.

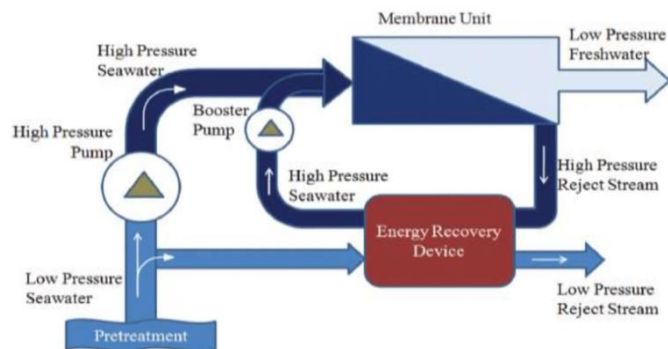
Quadro 8 - Tipos de Dispositivos de Recuperação de Energia para Dessalinização

Tipo de Dispositivo	Eficiência (%)	Características	Aplicações Principais
Dispositivos Centrífugos	-	-	-
Turbinas Francis	75	Dispositivo robusto e confiável para plantas de grande porte, indicado para fluxos de alta taxa.	Plantas grandes com altas taxas de fluxo
Rodas de Turbina Pelton	Até 85	Maior eficiência que as turbinas Francis, ideal para fluxos de alta pressão e taxas de fluxo variáveis.	Tratamento de alta pressão e fluxo variável.
Turbocompressores	≈ 80	Combinação de turbina e bomba, compacto e eficiente, adequado para instalações menores.	Instalações compactas e sistemas menores
Dispositivos Isobáricos			
Trocadores de Pressão (PX)	Até 97	Rotor cerâmico que transfere energia entre fluxos de alta e baixa pressão, otimizado para osmose reversa.	Plantas modernas de osmose reversa
DWEER (Dual Work Exchanger Energy Recovery)	Até 95	Utiliza cilindros hidráulicos para transferir energia, menos eficiente que o PX, mas ainda com boa performance.	Plantas grandes ou com fluxos constantes

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Além da economia de energia, as tecnologias de recuperação de energia também permitem que as plantas operem de maneira mais flexível, adaptando-se melhor às flutuações na demanda e nos preços da energia. Esse aumento na flexibilidade operacional também se reflete na redução do tamanho das bombas e dos componentes necessários para a operação das plantas, o que contribui para uma redução nos custos de capital (Gênesis Water Technologies, 2024) (Figura 32).

Figura 32 - Esquema do Dispositivo de Recuperação de Energia (ERD).



Fonte: Gênesis Water Tech (2024).

As tendências futuras no campo da recuperação de energia para dessalinização incluem o desenvolvimento de sistemas inteligentes de recuperação de energia, que utilizam sensores avançados e algoritmos de aprendizado automático para otimizar o desempenho em tempo real. Esses sistemas poderiam ajustar as operações conforme as condições de água de alimentação e as variações nos preços da energia, garantindo eficiência energética máxima (Li, 2024).

Outro avanço promissor é a integração de fontes de energia renovável, como a solar e a eólica, com sistemas de dessalinização. A utilização de energia renovável pode tornar as usinas de dessalinização mais autossuficientes, reduzindo a dependência de fontes de energia não renováveis e, ao mesmo tempo, diminuindo os custos operacionais e as emissões de gases de efeito estufa.

4.7 PÓS-TRATAMENTO

O pós-tratamento da água dessalinizada tem como objetivo garantir que a água produzida atenda aos padrões de qualidade exigidos para processos industriais ou para consumo humano, conforme as normas estabelecidas pela legislação brasileira. Esse processo inclui a combinação de ajustes de pH, remineralização e desinfecção, visando restaurar minerais essenciais, como cálcio e magnésio, que são removidos durante a dessalinização, além de garantir a inativação de microrganismos patogênicos presentes na água.

A água tratada através do processo de osmose reversa é de alta qualidade e pode ser considerada praticamente livre de contaminantes. Isso ocorre devido ao processo de filtração realizado pela membrana semipermeável, que retém sais, impurezas e microrganismos. A água proveniente desse processo, com qualidade superior à da água tratada convencionalmente, será encaminhada para o tanque de contato existente na Estação de Tratamento de Água (ETA) convencional, com capacidade de 500 m³, para garantir a continuidade do processo de desinfecção com cloro e fluoretação.

O tanque de contato é uma estrutura fundamental para assegurar a desinfecção adequada da água antes de sua distribuição. Ele permite que a água tratada permaneça em contato com o agente desinfetante, geralmente o cloro, por um período específico, para garantir a eficácia da desinfecção. O tempo de contato é um

fator determinante para a efetividade da desinfecção, pois é necessário que o cloro reaja adequadamente com os contaminantes biológicos, como bactérias, vírus e protozoários. A Portaria de Consolidação nº 5/2017, do Ministério da Saúde, estabelece os critérios de desinfecção e o tempo mínimo de contato exigido para garantir que a água seja segura para consumo.

Além disso, a dosagem de cloro é regulamentada pela mesma portaria, que determina a necessidade de manter uma concentração residual mínima de 0,2 mg/L e uma concentração máxima de 2,0 mg/L de cloro livre na rede de distribuição. Isso visa evitar problemas de gosto e odor na água e garantir a segurança contínua do sistema de abastecimento. O tanque de contato existente na rede de abastecimento da Costa Leste assegura o cumprimento desses parâmetros, fornecendo o tempo de retenção necessário para a desinfecção eficaz da água.

A legislação brasileira também exige a fluoretação da água para consumo humano, conforme a Lei Federal nº 6.050/1974. A concentração de flúor na água deve ser ajustada de acordo com a temperatura média anual da região, sendo recomendada uma concentração entre 0,6 mg/L e 0,8 mg/L. Esse procedimento visa à prevenção de cáries dentárias, promovendo benefícios à saúde pública.

A desinfecção adicional, por meio da manutenção de cloro residual na rede de distribuição, é uma prática essencial para garantir que a água permaneça livre de microrganismos patogênicos ao longo do sistema de abastecimento. Mesmo que a água tratada inicialmente esteja livre de contaminantes, o risco de contaminação secundária durante o transporte nas tubulações é sempre presente. A presença de biofilmes nas paredes internas das tubulações pode favorecer o crescimento de microrganismos, especialmente em sistemas antigos ou mal mantidos. A manutenção da concentração adequada de cloro residual, conforme exigido pela Portaria de Consolidação nº 5/2017, minimiza esse risco e assegura a qualidade da água até o ponto de consumo.

No caso do sistema de captação proposto para o poço de margem vertical na Armação, a água será captada do subsolo e encaminhada para o sistema de dessalinização, que utiliza módulos de Osmose Inversa. Esse tratamento resultará em água de qualidade superior, com níveis de contaminantes muito baixos. A água dessalinizada será então direcionada ao tanque de contato existente, onde passará pelo processo de desinfecção com cloro e fluoretação, conforme as normas da legislação vigente.

A utilização da infraestrutura existente da rede de abastecimento da Costa Leste permite a operação do sistema de forma eficiente, sem a necessidade de bombeamentos adicionais, o que resulta em redução nos custos operacionais e no impacto ambiental. Além disso, a proximidade ao mar e a disponibilidade de uma grande faixa de areia atuam como filtros naturais, reduzindo a carga inicial de poluentes na água captada.

A abordagem proposta assegura que a água captada seja tratada de acordo com os parâmetros exigidos pela Portaria de Consolidação nº 5/2017. Com a utilização do tanque de contato existente, o processo de pós-tratamento será realizado de maneira eficiente, garantindo a desinfecção e a fluoretação da água antes de sua distribuição, conforme as exigências da legislação. Dessa forma, o sistema de pós-tratamento contribui para a manutenção da saúde pública e para a qualidade da água fornecida à população.

5 ANTEPROJETO: DESSALINIZAÇÃO

A salinidade é um dos parâmetros mais críticos para avaliar a qualidade da água em ambientes costeiros, pois afeta diretamente a biodiversidade e a dinâmica ecológica local. Na Praia da Armação, em Santa Catarina, foi registrada uma salinidade de 2 psu (partes por mil), indicando uma menor influência de águas doces em relação a outras regiões da ilha. Essa medida foi obtida por meio de amostras de água e sedimento, conforme a metodologia de Cordazzo e Costa (1989), que utilizaram 1 grama de sedimento e 1 mililitro de água destilada para análise. Com base nesses dados, podemos prever as características da água a ser tratada e os tipos de contaminantes a serem removidos, o que orienta a escolha do processo de dessalinização mais adequado.

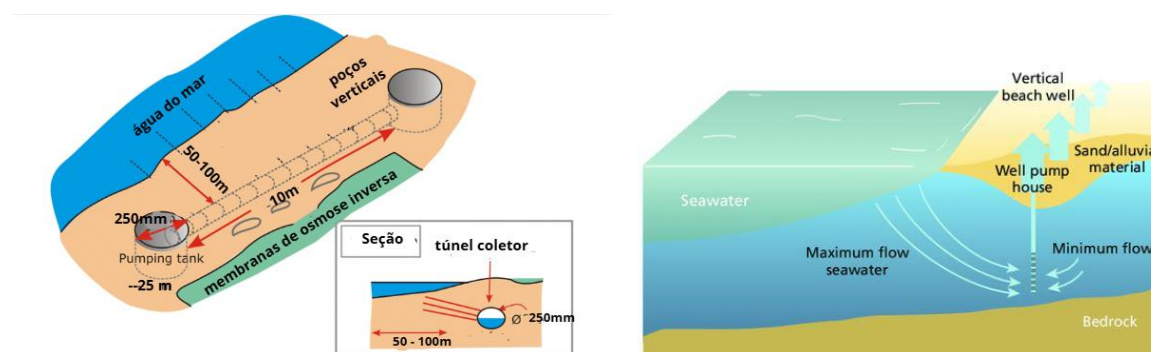
A proposta para a implementação do sistema de captação de água bruta marinha para dessalinização, como discutido anteriormente no estudo, contempla a construção de 10 poços verticais, cada um com diâmetro de 250 mm e profundidade de 25 metros, distribuídos ao longo da orla próxima à Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri, sob responsabilidade da CASAN. A água captada por esses poços será direcionada diretamente à estação de tratamento, onde passará por um pré-tratamento em margem, com o objetivo de remover sólidos suspensos e outros contaminantes presentes na água bruta antes de seguir para o processo de Osmose Inversa.

Como foi abordado anteriormente no estudo, a escolha dos poços verticais é uma decisão fundamentada em considerações técnicas e logísticas, com base nas características geológicas da região e na necessidade de evitar a aquisição de novas áreas. Essa solução otimiza o uso de terrenos já pertencentes à CASAN, simplificando o processo de licenciamento ambiental e construção, e minimizando o impacto ambiental e os custos operacionais.

O pré-tratamento em margem, conforme discutido anteriormente, foi escolhido como a estratégia mais adequada para este projeto devido à sua simplicidade e eficácia na remoção de sólidos suspensos e outros contaminantes antes que a água chegue à estação de tratamento. Este pré-tratamento será realizado por meio de sistemas de filtragem simples, que garantirão que a água esteja adequadamente preparada para o processo subsequente de Osmose Inversa.

Além de remover as impurezas, o pré-tratamento em margem também contribui para a redução da carga de sólidos na água bruta, o que facilita a operação da Osmose Inversa e melhora sua eficiência. A escolha desse método tem o benefício adicional de preservar as membranas de Osmose Inversa, evitando o desgaste precoce e garantindo maior durabilidade do sistema. Adicionalmente, a captura e o pré-tratamento com os poços verticais em margem são uma excelente opção devido à grande influência de ondas, correntes e movimentação do mar, que trazem muitos sedimentos. Esse movimento é bem filtrado pelos poços, ao contrário de uma captação superficial direta do mar, que seria mais suscetível à entrada de sedimentos e matéria orgânica indesejada (Figura 33).

Figura 33 - Esquema do sistema de captação de água do mar



Fonte: Adaptado de Pulido *et al.* (2019).

Para o projeto de dessalinização da água do mar para abastecimento da região sul da Ilha de Santa Catarina, a escolha do sistema de operação é crucial. Entre os tipos de sistemas disponíveis, destacam-se os sistemas contínuos e sistemas em lote (*batch*). A seguir, são apresentados os principais pontos que justificam a opção pelo sistema contínuo (Quadro 9):

- a) Demanda Contínua: Como a água será integrada a uma rede de abastecimento já existente, um sistema contínuo é mais adequado para atender às flutuações de demanda, especialmente durante períodos de alta necessidade de água.
- b) Eficiência Operacional: Sistemas contínuos são mais eficientes, pois funcionam de forma ininterrupta, o que reduz custos operacionais a longo prazo e aumenta a confiabilidade no abastecimento.

- c) **Qualidade da Água:** A possibilidade de monitoramento contínuo da qualidade da água e ajustes em tempo real garante que os padrões de potabilidade sejam mantidos de forma constante.
- d) **Capacidade de Produção:** O sistema contínuo pode ser dimensionado para atender a uma capacidade de 200 L/s, atendendo de forma eficaz à demanda da região.
- e) **Sustentabilidade:** Sistemas contínuos são mais sustentáveis a longo prazo, pois otimizam o uso dos recursos e contribuem para a segurança do abastecimento de água.

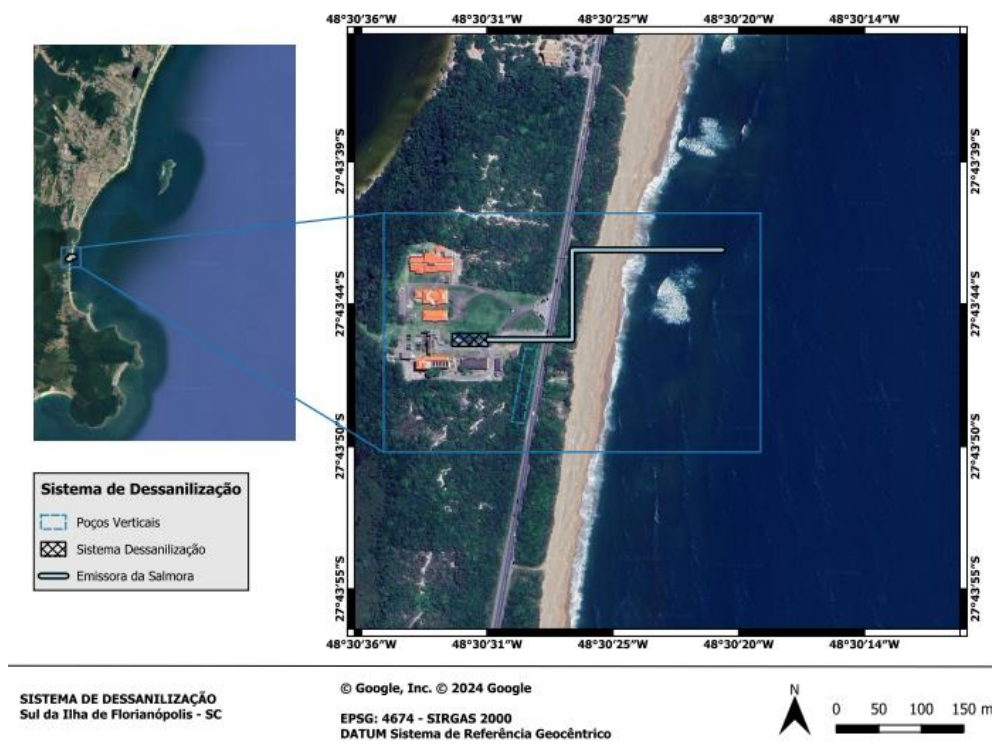
Quadro 9 - Critérios para sistemas de operação.

Critério	Sistema Contínuo	Sistema em Lote (<i>Batch</i>)
Operação	Funciona de forma ininterrupta	Opera em ciclos, processando lotes
Fluxo de Água	Constante, fornece água continuamente	Intermitente, fornece água em lotes
Eficiência de Produção	Alta, maximiza o uso da infraestrutura	Menor, devido a períodos de inatividade
Custo Inicial	Geralmente mais alto devido à complexidade	Geralmente mais baixo, sistema mais simples
Custo Operacional	Menor a longo prazo, operação constante	Maior a longo prazo devido a ciclos
Complexidade do Sistema	Maior complexidade, requer monitoramento contínuo	Menor complexidade, operação mais simples
Controle de Qualidade	Melhor controle, ajustes em tempo real	Difícil manter consistência na qualidade
Flexibilidade de Demanda	Melhor adaptabilidade a demandas variáveis	Ajustável, mas limitado a ciclos
Durabilidade das Membranas	Maior devido à operação estável	Maior desgaste devido a ciclos de liga/desliga
Consumo de Energia	Consistente, pode otimizar uso de energia	Variável, pode ser mais alto em ciclos
Aplicações Típicas	Abastecimento contínuo, grandes instalações	Aplicações menores, quando a demanda é variável

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir dos dados de PURE AQUA (2024).

A análise comparativa entre os dois sistemas destaca que o sistema contínuo é mais adequado para o projeto de dessalinização da água do mar para o abastecimento do sul da Ilha (Figura 34), visto que atende de maneira mais eficiente e flexível à demanda constante e garante uma melhor operação e controle da qualidade da água.

Figura 34 - Sugestão de layout planta de dessalinização para complementar SACLS.



Fonte: Elaborado pela Autora em qGIS v3.36 (2024).

A integração do sistema de dessalinização com a rede de abastecimento de água existente é essencial para assegurar que a água produzida atenda à demanda regional de forma eficiente. Para isso, a água tratada (permeado) será armazenada em um reservatório de 500 m³, já disponível na ETA Lagoa do Peri, que terá a função de acumular o fluxo de permeado gerado pelo sistema de Osmose Inversa, garantindo assim o fornecimento contínuo de água tratada para o abastecimento.

A instalação de válvulas de controle e medidores de fluxo será necessária para monitorar adequadamente a quantidade de água dessalinizada encaminhada ao reservatório, permitindo ajustes no fluxo conforme a demanda e a capacidade do sistema.

Além disso, poderá ser implementado um sistema de controle automatizado para monitorar, em tempo real, parâmetros como pressão, qualidade da água e fluxo de entrada e saída. O controle da qualidade da água será realizado por meio de sensores e análises regulares, a fim de garantir que a água produzida atenda aos padrões de potabilidade estabelecidos pelas normativas vigentes. Esse controle será realizado de forma integrada à operação existente na ETA Lagoa do Peri, assegurando a continuidade e a eficiência do abastecimento de água tratada.

A seguir serão avaliados os diferentes sistemas de membranas de Osmose Inversa para dois cenários de capacidade distintos, com base nas demandas específicas de cada situação: 100 L/s e 200 L/s.

5.1 PRIMEIRO CENÁRIO UF + OSMOSE REVERSA DE ÁGUA DO MAR (SWRO) – VAZÃO DE 100 L/S

A análise a seguir apresenta os dados operacionais de um sistema da DuPont, configurado para uma vazão de 100 L/s de água do mar, utilizando membranas da empresa.

No início do processo, a alimentação bruta ao sistema RO possui um fluxo de 222,2 L/s, com um Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) de 35.957 mg/L e uma pressão inicial de 0 bar. Essa água do mar, tratada em um primeiro estágio, resulta em uma alimentação líquida para o Passo 1 com um fluxo ligeiramente reduzido para 221,6 L/s, um TDS de 36.055 mg/L e uma pressão de 65,1 bar. Essa pressão é crucial para superar a osmose natural, permitindo a passagem eficiente da água através das membranas semipermeáveis.

No concentrado total do Passo 1, observamos um fluxo de 122 L/s, com um TDS elevado para 65.397 mg/L e uma pressão de 63,2 bar, representando a água que não foi purificada e que contém uma maior concentração de sólidos dissolvidos. Em contraste, o produto líquido final do sistema RO apresenta um fluxo de 100 L/s, com um TDS reduzido para 117,4 mg/L e pressão zerada, indicando que a água tratada é coletada sem resistência adicional.

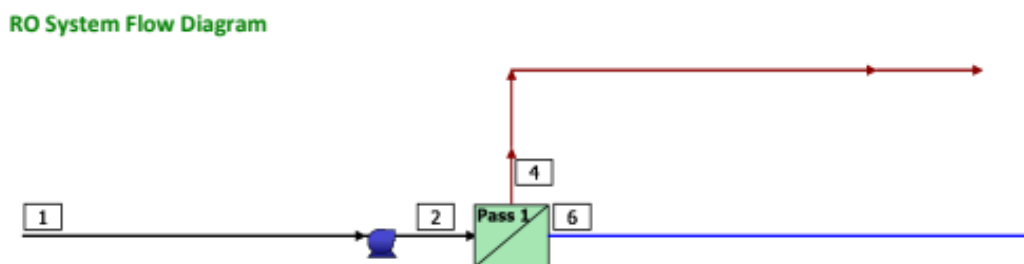
Este cenário é baseado na utilização de água do mar com ultrafiltração (UF) DuPont, garantindo que a água de alimentação possua um SDI (Índice de Densidade de Silte) inferior a 2,5. O sistema conta com 560 elementos de membranas, que proporcionam uma área total ativa de 22.891 m², permitindo uma remoção eficiente

de contaminantes. A vazão de alimentação por passagem é de 221,6 L/s, com uma pressão de alimentação necessária de 65,1 bar.

O fator de vazão por estágio é de 0,65, resultando em uma vazão de permeado por passagem de 100,0 L/s (Figura 36 & Tabela 25). O fluxo médio por passagem é de 15,7 LMH (litros por metro quadrado por hora), refletindo a eficiência do sistema. A recuperação da passagem atinge 45,1%, enquanto a diferença de pressão média (NDP) é de 28,5 bar. O sistema consome uma energia específica de 5,04 kWh/m³ e opera a uma temperatura de 20,0 °C, com um pH de 8,4.

Por fim, a recuperação total do sistema RO é de 45,0%, evidenciando a eficácia do sistema em transformar água do mar em água tratada. Esses dados são fundamentais para compreender a viabilidade econômica e ambiental do uso de tecnologia de osmose reversa (Figura 35 & Tabela 24) em regiões onde o acesso a água potável é limitado.

Figura 35 - Diagrama de fluxo do sistema de Osmose Inversa.



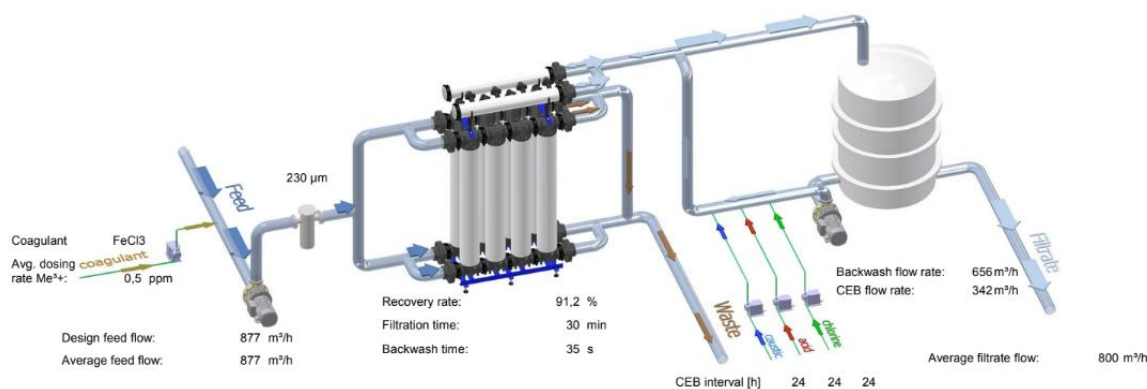
Fonte: Dupont Water Solutions (2024).

Tabela 24 - Dados de Fluxo e Qualidade da Água sistema 100 L/s.

Descrição	Fluxo (L/s)	TDS (mg/L)	Pressão (bar)
1. Alimentação Bruta ao Sistema RO	222.2	35,957	0
2. Alimentação Bruta ao Sistema RO	221.6	36,055	65.1
3. Concentrado Total do Passo 1	122	65,397	63.2
4. Produto Líquido do Sistema RO	100	117.4	0

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Figura 36 - Esquema do sistema de osmose reversa com vazão de 100 L/s.



Fonte: Exportado de Dupont Water Solutions (2024).

Tabela 25 - Configuração do sistema e as condições operacionais 100 L/s.

Tipo de Água	Água do Mar (Com UF DuPont, SDI < 2,5)
Número de Elementos	560
Área Total Ativa (m ²)	22.891,0
Vazão de Alimentação por Passagem (L/s)	221,6
TDS de Alimentação (mg/L)	36.055,0
Pressão de Alimentação (bar)	65,1
Fator de Vazão por Estágio	0,65
Vazão de Permeado por Passagem (L/s)	100,0
Fluxo Médio por Passagem (LMH)	15,7
TDS de Permeado (mg/L)	117,4
Recuperação da Passagem (%)	45,1
NDP Médio (bar)	28,5
Energia Específica (kWh/m ³)	5,04
Temperatura (°C)	20,0
pH	8,4
Dose Química	-
Recuperação do Sistema RO (%)	45
Recuperação Líquida do Sistema RO (%)	45

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Os custos associados ao uso de água em um sistema de osmose reversa (RO) são fundamentais para a análise econômica do processo. A água de alimentação não-produtiva, utilizada na Passagem 1, tem um custo unitário de \$0,14 por metro cúbico, resultando em um custo horário de \$61,49 e um custo diário de \$1.475,80. Por outro lado, o descarte de água residual gera um custo mais elevado de \$0,69 por metro cúbico, com um custo horário de \$303,07 e um custo diário de \$7.273,57. Ao

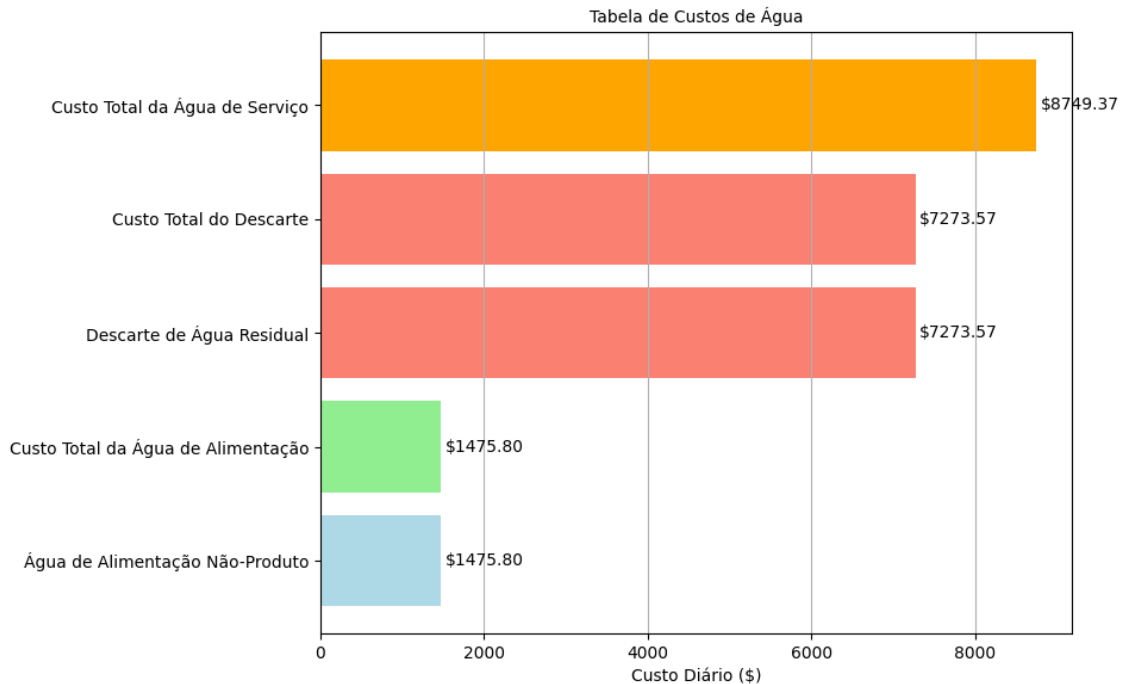
somar esses valores, o custo total diário de serviço de água atinge \$8.749,37, refletindo a importância de gerenciar esses gastos para a viabilidade econômica do sistema (Tabela 26 & Figura 37).

Tabela 26 - Custos de Água.

Descrição	Fluxo (L/s)	Custo Unitário (\$/m³)	Custo Horário (\$/h)	Custo Diário (\$/d)
Água de Alimentação Não-Produto	122,00	1,40	61,49	1.475,80
Custo Total da Água de Alimentação	122,00	-	-	1.475,80
Descarte de Água Residual	122,00	6,90	61,49	7.273,57
Custo Total do Descarte	122,00	-	303,07	7.273,57
Custo Total da Água de Serviço	-	-	303,07	8.749,37

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Figura 37 - Representação gráfica dos custos de água.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

A análise do consumo de eletricidade e os custos associados é crucial para avaliar a viabilidade econômica do processo. Os dados a seguir detalham o desempenho energético e os custos de operação do sistema.

A potência máxima do sistema é de 1,814 kW, resultando em um consumo diário de energia de 43,531 kWh. O custo unitário da eletricidade é de \$0,0900 por kWh, o que gera um custo total diário de eletricidade de aproximadamente \$3,918. A energia específica necessária para o tratamento de água é de 5,04 kWh/m³, refletindo a eficiência do sistema em converter energia em água tratada.

Especificamente para a Passagem 1, o fluxo de alimentação é de 221,62 L/s, com uma potência da bomba de 1,813.80 kW. Isso resulta em um consumo diário de energia de 43,531.20 kWh e um custo diário de \$3,917.81. Estes valores indicam a consistência do desempenho energético, uma vez que o total para a Passagem 1 e o total do sistema são idênticos, reforçando a eficácia do sistema de bombas.

No que diz respeito aos produtos químicos, o custo total para a dose de químicos foi registrado como zero, indicando que não foram utilizados aditivos químicos no processo. Assim, o custo total de utilidades e químicos diários é de \$12,667, o que inclui somente os custos de eletricidade. O custo específico da água, considerando todos os fatores, é de \$1,466 por metro cúbico, um parâmetro importante para entender a viabilidade financeira do sistema (Tabela 27).

Tabela 27 – Cenários 100 L/s sistema 1 Dupont Water Solutions (continua).

Categoria	Descrição	Valor (\$)
Dados de Eletricidade	Potência de Pico (kW)	1,814
	Energia (kWh/d)	43,531
	Custo Unitário da Eletricidade (\$/kWh)	900
	Custo Diário de Eletricidade (\$)	3,918
	Energia Específica (kWh/m ³)	5,04
Dados da Bomba	Fluxo (L/s)	221,62
	Potência (kW)	1,813,80
	Energia (kWh/d)	43,531,20
	Custo Diário de Eletricidade (\$/d)	3,917,81
Custos Químicos	Custo Unitário de Produtos Químicos (\$/kg)	0,00
	Dose (mg/L)	
	Volume (L/d)	
	Custo Diário de Produtos Químicos (\$/d)	0,00
	Custo Total de Produtos Químicos (\$/d)	0,00

Tabela 27 – Cenários 100 L/s sistema 1 Dupont Water Solutions (conclusão).

Categoria	Descrição	Valor (\$)
Custos Totais	Custo Total de Utilidades (\$/d)	0,00
	Custo Específico de Água (\$/m ³)	12,667
	Custo Diário (Água de Alimentação) (\$)	1,466
	Custo Mensal (Água de Alimentação) (\$)	1,475,80
	Custo Anual (Água de Alimentação) (\$)	44.274,00
	Custo Diário (Descarte de Água Residual) (\$)	531.288,00
	Custo Mensal (Descarte de Água Residual) (\$)	7,273,57
	Custo Anual (Descarte de Água Residual) (\$)	218.206,10
	Total Água	2.635.348,05
	Custo Diário (Eleticidade) (\$)	8,749,37
	Custo Mensal (Eleticidade) (\$)	117,54
	Custo Anual (Eleticidade) (\$)	1.446,52
	Total Utilidades	12,667,37
	Custo Mensal (Total de Utilidades) (\$)	380.011,10
	Custo Anual (Total de Utilidades) (\$)	4.629.045,05

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

De acordo com o estudo de Lermontov e Pereira (2024), foi realizado um cenário adicional para análise de custos em plantas de dessalinização utilizando diferentes marcas de membranas de Osmose Inversa. Nesse contexto, foram compilados dados de membranas de diferentes fornecedores como WINFLOWS GE, IMS Hydranautics, ROPRO Koch, LEWAPLUS Lanxess, Q+ LG Nano H2O, Toray DS Toray e ROSA Dow. O cenário proposto simula o desempenho e os custos operacionais de uma planta de dessalinização dimensionada para tratar 100 L/s (equivalente a 360 m³/h), com base nos parâmetros obtidos a partir da simulação de uma planta de maior porte, projetada para operar com 1.000 L/s.

A simulação foi adaptada para uma planta de menor capacidade (Tabela 28), permitindo a comparação do desempenho e dos custos operacionais em diferentes escalas, bem como a influência das características específicas das membranas de Osmose Inversa de diferentes fornecedores no desempenho do sistema e nos custos de operação.

Tabela 28 - Cenário 100 L/s sistema 2.

Item	% do Total	Custo Total (R\$)	Custo para 100 L/s (R\$)
Membranas	5,90	21.546.000	1.271.214
Bombas	7,90	28.849.728	1.701.138
Captação / Emissário & Rejeito	6,80	24.832.677	1.464.128
Construção Civil	16,10	58.795.016	3.468.436
Custos de Desenvolvimento e Projeto	6,80	24.832.677	1.464.128
Equipamentos e Materiais	25,50	93.122.542	5.495.430
Instalação e Serviços Diversos	7,60	27.754.169	1.636.505
Jurídico e Custos Ambientais	1,00	3.651.864	215.460
Pré-tratamento (MF/UF)	7,20	26.293.423	1.549.312
Recuperação de Energia	1,50	5.477.796	323.190
Tubulações, Conexões e Válvulas	12,30	44.917.932	2.652.078
Vasos de Pressão	1,40	5.112.610	301.644
TOTAL CAPEX	100	365.186.441	21.546.000
Custo do Terreno (R\$ 500/m²)	4,50	17.000.000	1.700.000
TOTAL INVESTIMENTO + TERRENO	104,50	382.186.441	23.246.000

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

O Sistema 1 é voltado principalmente para custos operacionais recorrentes, destacando-se pelos custos mais baixos associados ao consumo de energia elétrica e ao tratamento de água (principalmente para alimentação e descarte de água). Esse sistema é particularmente adequado para operações contínuas ou para plantas de menor escala, onde o objetivo é minimizar custos diários e maximizar a eficiência no uso de energia.

O Sistema 2 representa um cenário de alto CAPEX (investimento inicial), com significativos custos relacionados a membranas, bombas, construção civil e outros itens de infraestrutura. Este sistema é mais adequado para novos projetos ou expansões, onde os investimentos iniciais elevados são necessários para a instalação e construção da planta. O custo diário de utilidades do Sistema 2 é significativamente

mais alto em comparação ao Sistema 1, refletindo a natureza de grandes investimentos necessários para o funcionamento da planta. No entanto, esses custos podem ser diluídos ao longo do tempo à medida que a planta opera em maior capacidade e com maior escala, o que permite uma economia de escala.

Em termos de implicações técnicas e econômicas, o Sistema 1 se destaca por ser um modelo mais simples e enxuto, focado em custos operacionais diários, sendo mais adequado para operações em andamento ou para plantas de menor porte.

5.2 SISTEMA CENÁRIO 2 – VAZÃO DE 200 L/S

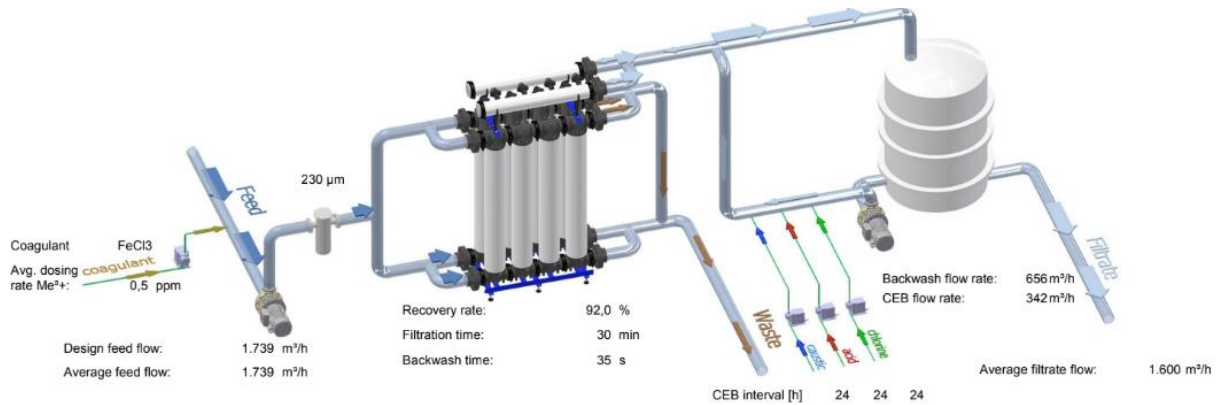
Esta seção apresenta informações detalhadas sobre o fluxo e a qualidade da água em diversas etapas do sistema de dessalinização. A tabela inclui dados da água bruta que ingressa no sistema de osmose reversa (RO), com um Total de Sólidos Dissolvidos (TDS) de 35.957 mg/L, indicando a salinidade inicial (Tabela 29). O fluxo líquido direcionado ao primeiro estágio do processo mostra um TDS ligeiramente superior, refletindo a composição da água após a primeira etapa de tratamento. O total de concentrado do estágio 1 revela a quantidade de água que permanece no sistema, apresentando um TDS elevado, enquanto o produto líquido do sistema RO exibe uma quantidade de água tratada com um TDS muito baixo, adequado para consumo humano ou uso industrial (Figura 28).

Tabela 29 - Dados de Fluxo e Qualidade da Água sistema 200 L/s sistema 1

Descrição	Fluxo (L/s)	TDS (mg/L)	Pressão (bar)
1. Água Bruta para o Sistema RO	444.5	35,957	0
2. Fluxo Líquido para Passo 1	443.3	36,055	65.1
4. Total de Concentrado do Passo 1	244	65,397	63.2
6. Produto Líquido do Sistema RO	200	117.4	0

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Figura 38 - Esquema do sistema de osmose reversa com vazão de 200 L/s



Fonte: Exportado de Dupont Water Solutions (2024).

Esta tabela fornece uma visão abrangente da configuração do sistema e das condições em que ele opera. Especifica que a água bruta utilizada é água do mar, exigindo um tratamento específico para remoção de contaminantes. O número de elementos e a área total ativa destacam a quantidade de membranas empregadas no processo, assim como a área total de filtração. Informações sobre fluxo e pressão são cruciais, pois detalham as condições operacionais necessárias para garantir a eficiência do sistema. A tabela 30 também indica a recuperação percentual da água após o tratamento, além da energia específica necessária para processar um metro cúbico de água, dados essenciais para a avaliação dos custos operacionais.

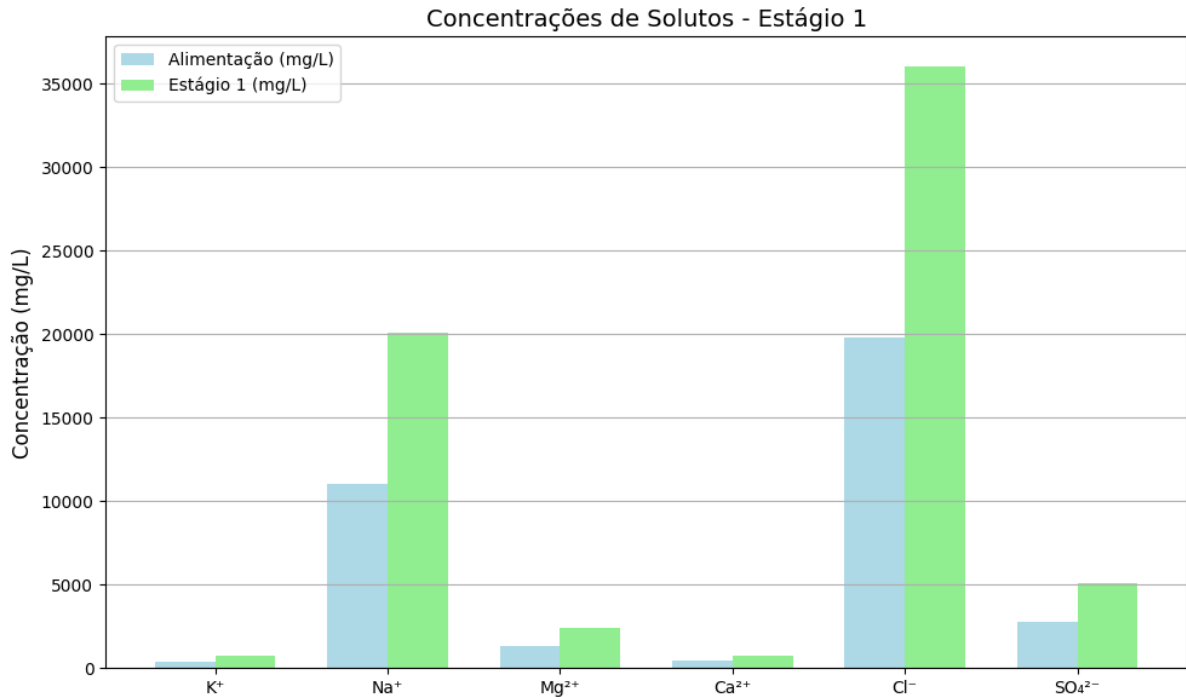
Tabela 30 - Configuração do sistema e as condições operacionais 200 L/s sistema 1

Tipo de Água	Água do Mar (Com UF, SDI < 2.5)
Número de Elementos	1120
Área Total Ativa (m ²)	45783
Fluxo de Alimentação por Passo (L/s)	443.3
Pressão de Alimentação (bar)	65.1
Fluxo de Permeado por Passo (L/s)	200
Recuperação do Passo (%)	45.10
Energia Específica (kWh/m ³)	5.04
Temperatura (°C)	20
pH	8.4

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Esta tabela fornece as concentrações de diferentes íons na alimentação e no permeado do sistema RO (Figura 39).

Figura 39 - Concentração de solutos estágio 1 - 200 L/s sistema 1.



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A tabela de ajustes químicos, são apresentados os parâmetros químicos que são monitorados e ajustados durante o processo de dessalinização (Tabela 31). O pH e os índices de saturação são fundamentais para evitar a corrosão e a incrustação nas membranas, assegurando a longevidade do sistema.

Informações sobre a força iônica e os conteúdos de bicarbonato (HCO_3) e dióxido de carbono (CO_2) ajudam a garantir a qualidade da água tratada, contribuindo para a sua estabilidade e segurança para consumo.

Tabela 31 - Ajustes químicos sistema 1 de 200 L/s

Parâmetro	Alimentação	Passo Concentrado
pH	8.4	8.3
Índice de Saturação de Langelier	1.2	1.63
Índice de Estabilidade de Stiff & Davis	0.2	0.57
Força Iônica (molal)	0.72	1.33
HCO_3 (mg/L)	97.52	175.1
CO_2 (mg/L)	0.23	0.52

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

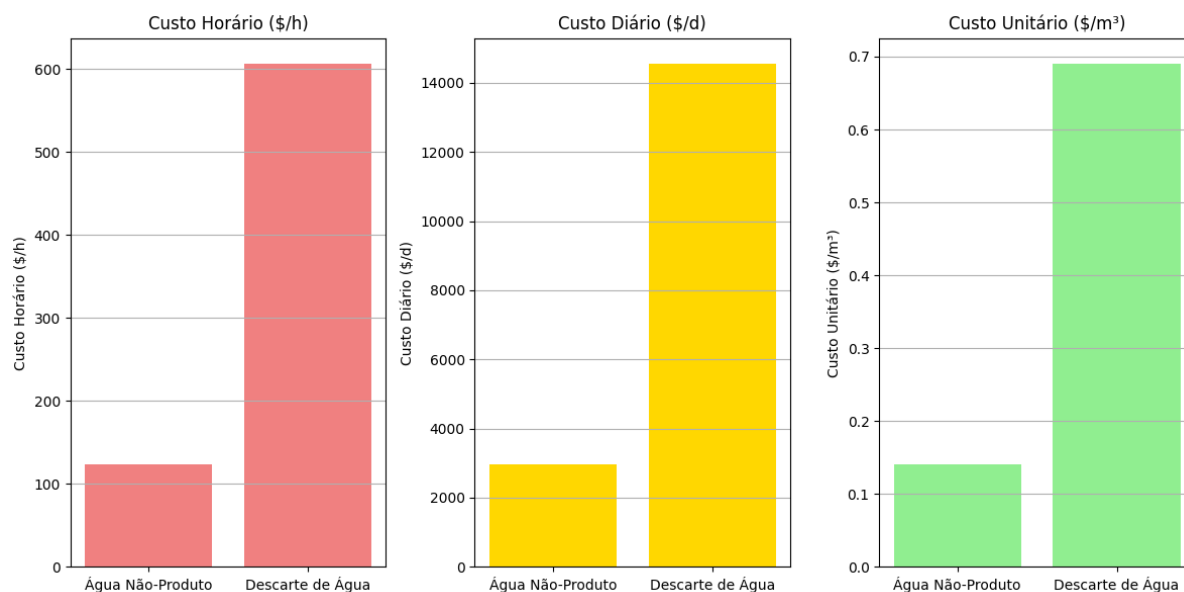
Esta seção lista os custos associados à água de serviço utilizada no processo. O custo da água de alimentação não-produtiva refere-se à água que não é convertida em produto, com detalhes sobre o custo por metro cúbico e os gastos horários, diários, mensais e anuais (Figura 40). Além disso, o custo de descarte de água residual abrange as despesas relacionadas ao tratamento e à disposição da água residual gerada, refletindo a importância de gerenciar esses custos na operação do sistema (Tabela 32).

Tabela 32 - Custos de Água de Serviço para o sistema 1 de 200 L/S

Descrição	Fluxo (L/s)	Custo Unitário ($\$/\text{m}^3$)	Custo Horário ($\$/\text{h}$)	Custo Diário ($\$/\text{d}$)
Água de alimentação não-produto	244	0.14	122.98	2951.59
Descarte de água residual	244	0.69	606.13	14547.14

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados de Dupont Water Solutions (2024).

Figura 40 - Representação gráfica dos custos relacionados ao consumo energético do sistema



Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Na tabela abaixo, temos em resumo os custos relacionados ao consumo de eletricidade para a operação do sistema (Tabela 33). Informações sobre a potência de pico necessária e o custo unitário da eletricidade por quilowatt-hora são apresentadas para oferecer uma visão clara dos gastos. O custo total de eletricidade, incluindo valores diários, mensais e anuais, é crucial para entender a viabilidade econômica do sistema e seu impacto nas despesas operacionais.

Tabela 33 - Dados custos de Eletricidade sistema 1 200 L/S

Descrição	Valor
Potência de Pico (kW)	3,628
Energia (kWh/d)	87,062
Custo da Unidade de Eletricidade (\$/kWh)	0.09
Custo de Eletricidade (\$/d)	7,836
Energia Específica (kWh/m³)	5.04

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados Dupont Water Solutions (2024).

Aqui, são apresentados os custos associados ao funcionamento das bombas, essenciais para o processo de dessalinização. A tabela (Tabela 34) fornece detalhes sobre o fluxo de água, a potência consumida e os custos relacionados à operação das bombas no primeiro estágio, e em seguida a tabela (Tabela 35), onde são listados os custos associados ao uso de produtos químicos no tratamento da água.

Tabela 34 - Sistema 1 200 L/S

Passo	Fluxo (L/s)	Potência (kW)	Energia (kWh/d)	Custo (\$/d)
Passo 1	443.25	3,627.60	87,062.40	7,835.62
Total Passo 1		3,627.60	87,062.40	7,835.62
Total do Sistema		3,627.60	87,062.40	7,835.62

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados Dupont Water Solutions (2024).

Tabela 35 - Dados custos Químicos sistema 1 200 L/S

Descrição	Valor
Custo Total de Químicos	0
Custo de Utilidade e Químicos (\$/d)	25,335
Custo Específico de Água (\$/m³)	1.466

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados Dupont Water Solutions (2024).

As tabelas a seguir reúnem todos os custos diários, mensais e anuais do sistema de dessalinização, dos sistemas 1 (Tabela 36) e 2 (Tabela 37) com o cenário de 200 L/s incluindo os custos de eletricidade, água de serviço e produtos químicos. Essa síntese oferece uma visão clara dos gastos operacionais totais, facilitando a avaliação da viabilidade financeira do sistema de dessalinização (Tabela 38 & Tabela 39).

Tabela 36 - Custos Totais Sistema 1 200 L/S

Descrição	Custo Diário (\$/D)	Custo Mensal (\$/Mês)	Custo Anual (\$/Ano)
Custo De Eletricidade	7,836	235,080.00	2,821,239.00
Custo De Água De Serviço	2,951.59 + 14,547.14 = 17,498.73	524,962.14	6,299,476.57
Custo De Utilidade E Químicos	25,335	800,050.00	9,600,600.00
Custo Total Do Sistema	50,669.73	1,560,092.14	18,721,315.57

Fonte Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 37 - Cenário 200 L/S Sistema 2 CAPEX (continua).

Item	% do Total	Custo Total (R\$)	Custo Para 200 L/S (R\$)
Membranas	5,90	21.546.000	2.542.428
Bombas	7,90	28.849.728	3.402.276
Captação / emissário & rejeito	6,80	24.832.677	2.928.256
Construção civil	16,10	58.795.016	7.268.872
Desenvolvimento e projeto	6,80	24.832.677	2.928.256
Equipamentos e materiais	25,50	93.122.542	11.124.156
Instalação e serviços diversos	7,60	27.754.169	3.268.610
Jurídico e custos ambientais	1,00	3.651.864	431.22
Pré-tratamento (mf/uf)	7,20	26.293.423	3.155.744
Recuperação de energia	1,50	5.477.796	655.296
Tubulações, conexões, válvulas	12,30	44.917.932	5.508.370
Vasos de pressão	1,40	5.112.610	622.528
Total CAPEX	100	365.186.441	43.122.000
Custo do terreno (R\$ 500/m ²)	4,50	17.000.000	3.400.000
Total investimento + terreno	104,50	382.186.441	46.522.000

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 38 – Comparação entre os sistemas 1 e 2 (200 L/S) CAPEX

Item	Sistema 1 (200 L/S)	Sistema 2 (200 L/S)
Membranas	R\$ 2.542.428,00	R\$ 1.694.932,56
Bombas	R\$ 3.402.276,00	R\$ 2.268.184,80
Captação / emissário & rejeito	R\$ 2.928.256,00	R\$ 1.952.170,60
Construção civil	R\$ 7.268.872,00	R\$ 4.847.248,00
Desenvolvimento e projeto	R\$ 2.928.256,00	R\$ 1.952.170,60
Equipamentos e materiais	R\$ 11.124.156,00	R\$ 7.416.104,00
Instalação e serviços diversos	R\$ 3.268.610,00	R\$ 2.179.074,00
Jurídico e custos ambientais	R\$ 431.220,00	R\$ 287.480,00
Pré-tratamento (mf/uf)	R\$ 3.155.744,00	R\$ 2.103.823,20
Recuperação de energia	R\$ 655.296,00	R\$ 436.864,80
Tubulações, conexões, válvulas	R\$ 5.508.370,00	R\$ 3.672.247,00
Vasos de pressão	R\$ 622.528,00	R\$ 415.019,20
Total CAPEX	R\$ 43.122.000,00	R\$ 28.430.214,00
Custo do terreno (R\$ 500/m ²)	R\$ 3.400.000,00	R\$ 2.000.000,00
Total investimento (CAPEX + terreno)	R\$ 46.522.000,00	R\$ 30.430.214,00

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 39 - Cenário 200 L/S Sistema 2 OPEX

Item	% Do Total	Custo Total (R\$)	Custo Para 200 L/S (R\$)
Custo Total Opex	100	124.034.102	16.014.217,60
Energia	50,1	62.050.411	8.100.282,39
Produtos Químicos	7,8	9.674.526	1.243.456,37
Troca De Membranas	9,4	11.676.153	1.517.129,90
Descarte	5,6	7.005.692	923.634,62
Recursos Humanos	8,1	10.008.131	1.341.848,64
Manutenção	8,9	11.075.665	1.472.403,78
Análise De Qualidade	3,2	4.003.252	528.145,49
Opex Indireto	6,9	8.540.272	1.141.247,79

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 40 - Comparativa entre os sistemas 1 e 2 (200 L/S) OPEX

Item	Sistema 1 (200 L/S)	Sistema 2 (200 L/S)
Custo total Opex	R\$ 24.806.820,40	R\$ 16.014.217,60
Energia	R\$ 12.438.288,57	R\$ 8.100.282,39
Produtos químicos	R\$ 1.936.532,79	R\$ 1.243.456,37
Troca de membranas	R\$ 2.333.443,51	R\$ 1.517.129,90
Descarte	R\$ 1.388.381,94	R\$ 923.634,62
Recursos humanos	R\$ 2.008.351,04	R\$ 1.341.848,64
Manutenção	R\$ 2.208.609,01	R\$ 1.472.403,78
Análise de qualidade	R\$ 792.218,24	R\$ 528.145,49
Opex indireto	R\$ 1.711.871,80	R\$ 1.141.247,79
Opex Por m ³ Produzido	R\$ 4,71 /m ³	R\$ 4,71 /m ³

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

O Sistema 2 de 200 L/s apresenta um custo de investimento inicial (CAPEX) significativamente mais baixo (R\$ 30.430.214) em comparação com o Sistema 1 (R\$ 46.522.000), devido à redução nos custos de membranas, bombas, construção civil e área de terreno necessária. O custo operacional anual (OPEX) também é mais baixo, totalizando R\$16.014.217,60, com destaque para a redução no consumo de energia e custos variáveis. Mesmo com a redução do CAPEX e OPEX, o custo por m³ produzido permanece o mesmo em ambos os sistemas (R\$ 4,71/m³), indicando que a economia de escala não impacta significativamente a produção unitária. Para uma operação ainda menor, o Sistema 2 de 100 L/s apresenta um custo de CAPEX de R\$21.546.000, com um OPEX reduzido proporcionalmente, tornando-o viável para demandas muito específicas ou de baixo porte.

A análise comparativa entre os Sistemas 1 (100 L/s e 200 L/s) oferece uma visão clara sobre como a escala de operação impacta o desempenho, os custos e a infraestrutura de um sistema de dessalinização baseado em osmose reversa (Tabela 40). Abaixo, discutiremos as principais diferenças entre os dois cenários, destacando tanto os aspectos operacionais quanto os custos operacionais e de capital (Tabela 42, 43, 44 & 45).

Tabela 41 - Comparação Cenários 100 L/s x 200 L/s

Parâmetro	Sistema 1 (100 L/S)	Sistema 1 (200 L/S)
Fluxo Bruto (L/S)	222,2	444,5
Tds Alimentação (Mg/L)	35.957	35.957
Pressão De Alimentação (Bar)	65,1	65,1
Produto Líquido (L/S)	100	200
Recuperação (%)	45,0	45,10
Número De Elementos	560	1120
Área Total Ativa (M²)	22.891	45.783
Custo Total Diário (\$)	8.749,37	50.669,73
Custo De Eletricidade (\$)	3.918	7.836
Custo De Água De Serviço (\$)	8.749,37	17.498,73
Custo Específico De Água (\$/m³)	1,466	1,466

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Tabela 42 – Comparação consolidada de custos e parâmetros operacionais.

Parâmetro	Sistema 1 (100 L/s)	Sistema 1 (200 L/s)
Fluxo Bruto (L/s)	222,2	444,5
TDS de Alimentação (mg/L)	35.957	35.957
Pressão de Alimentação (bar)	65,1	65,1
Fluxo Líquido para Passo 1 (L/s)	221,6	443,3
TDS Alimentação Passo 1 (mg/L)	36.055	36.055
Concentrado Passo 1 (L/s)	122	244
Produto Líquido (L/s)	100	200
Recuperação (%)	45%	45%
Número de Elementos	560	1120
Área Total Ativa (m²)	22.891	45.783
Temperatura (°C)	20	20
pH	8,4	8,4

Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

Tabela 43 – Comparação de Custos de Água de Serviço

Descrição	Sistema 1 (100 L/s)	Sistema 1 (200 L/s)
Água de Alimentação Não-Produto (L/s)	122	244
Custo Unitário Água Alimentação (\$/m ³)	0,14	0,14
Custo Horário Água Alimentação (\$)	61,49	122,98
Custo Diário Água Alimentação (\$)	1.475,80	2.951,59
Descarte Água Residual (L/s)	122	244
Custo Unitário Descarte Água (\$/m ³)	0,69	0,69
Custo Horário Descarte (\$)	303,07	606,13
Custo Diário Descarte (\$)	7.273,57	14.547,14
Custo Total Água de Serviço (\$/d)	8.749,37	17.498,73

Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

Tabela 44 – Comparação de Custos de Eletricidade

Descrição	Sistema 1 (100 L/s)	Sistema 1 (200 L/s)
Potência de Pico (kW)	1,814	3,628
Energia Diária (kWh)	43,531	87,062
Custo Unitário Eletricidade (\$/kWh)	0,09	0,09
Custo Diário Eletricidade (\$)	3.918	7.836
Custo Mensal Eletricidade (\$)	117,54	235,08
Custo Anual Eletricidade (\$)	1.446,52	2.821,24

Fonte: Elaborado pela Autora (2024)

- a) Capacidade de Abastecimento: O sistema de 200 L/s é a escolha mais adequada para atender não apenas à demanda atual, mas também à demanda futura da Costa Leste Sul de Florianópolis. O aumento da capacidade de produção de água é essencial para suportar o crescimento populacional e o desenvolvimento da região, garantindo uma oferta contínua e estável de água potável.
- b) Eficiência Energética e Sustentabilidade: A instalação de um ERD, como o iSave 70, pode ser decisiva para reduzir os custos operacionais associados ao consumo energético, especialmente em sistemas de maior capacidade, como o de 200 L/s. Com uma eficiência energética superior, o sistema poderá operar de forma mais sustentável, menos impactos ambientais e custos reduzidos ao longo do tempo.
- c) Aproveitamento da Infraestrutura Existente: A infraestrutura já disponível na região (reservatórios, terreno, rede de distribuição) é um

fator que torna a escolha do sistema de 200 L/s ainda mais vantajosa, pois permite uma expansão do abastecimento sem a necessidade de grandes investimentos em infraestrutura adicional, reduzindo os custos iniciais do projeto.

- d) **Custo Total e Viabilidade:** Embora o sistema de 200 L/s tenha custos operacionais mais elevados, a longo prazo, ele representa uma solução mais robusta e escalável, capaz de suprir a demanda futura de forma mais eficiente. O investimento inicial em um sistema de maior capacidade é compensado pela maior flexibilidade operacional e pela redução de custos futuros relacionados à infraestrutura adicional (Tabela 46).

Tabela 45 - Comparação de custos totais (OPEX + CAPEX).

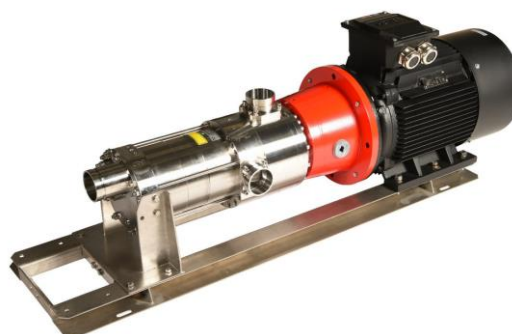
Descrição	Sistema 1 (100 L/s)	Sistema 1 (200 L/s)	Sistema 2 (200 L/s)
Custos operacionais totais (OPEX)	-	-	-
Custo Total OPEX (\$/dia)	12.667,37	25.335,00	-
Custo Total OPEX (\$/m ³)	4,71/m ³	4,71/m ³	-
Custo anual OPEX (\$)	4.629.045,05	9.600.600,00	-
Custo Total do Sistema (OPEX + CAPEX)	-	-	-
Custo Total de CAPEX (\$)	21.546.000	43.122.000	28.430.214
Custo total OPEX (\$)	4.629.045,05	9.600.600,00	16.014.217,60
Custo total anual (\$)	531.288,00	2.821.239,00	12.402.417,20
Custo total mensal (\$)	44.274,00	235.080,00	-
Custo total diário (\$)	1.475,80	7.273,57	-
Custo Total de Utilidades (\$/m ³)	1,466	1,466	-
CAPEX Detalhado (Sistema 1 vs Sistema 2)	-	-	-
Membranas	2.542.428	1.694.932	-
Bombas	3.402.276	2.268.184	-
Captação / emissário & rejeito	2.928.256	1.952.170	-
Construção civil	7.268.872	4.847.248	-
Equipamentos e Materiais	11.124.156	7.416.104	-
Instalação e Serviços Diversos	3.268.610	2.179.074	-
OPEX Detalhado (Sistema 1 vs Sistema 2)	-	-	-
Custo Total OPEX (\$/dia)	50.669,73	16.014.217,60	-
Custo de Energia (\$)	12.438.288,57	8.100.282,39	-
Custo de Produtos Químicos (\$)	1.936.532,79	1.243.456,37	-
Custo de Troca de Membranas (\$)	2.333.443,51	1.517.129,90	-

Custo de Descarte (\$)	1.388.381,94	923.634,62	-
Custo de Recursos Humanos (\$)	2.008.351,04	1.341.848,64	-
Custo de Manutenção (\$)	2.208.609,01	1.472.403,78	-
Custo de Análise de Qualidade (\$)	792.218,24	528.145,49	-

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A otimização do consumo de energia em sistemas de osmose reversa de água do mar (SWRO) pode ser significativamente aprimorada com a instalação de dispositivos de recuperação de energia (ERD) (Figura 41), especialmente em cenários com vazões de 100 L/s e 200 L/s. Um exemplo de solução viável seria a utilização do modelo iSave 70 da Danfoss, que integra trocador de pressão, bomba e motor em uma unidade compacta, proporcionando alta eficiência na recuperação de energia.

Figura 41 - iSave 70 da Danfoss ERD.



Fonte: Danfoss (2024).

Para este estudo, sugerimos o modelo iSave 70, que possui capacidade de fluxo de até 100 m³/h (aproximadamente 308 gal/min), adequado para sistemas com vazões de 100 L/s (aproximadamente 360 m³/h) e 200 L/s (aproximadamente 720 m³/h). No entanto, é importante destacar que outras soluções com características e funções semelhantes também podem ser viáveis para otimizar o consumo energético e melhorar o desempenho do sistema de osmose reversa, dependendo das especificações e necessidades de cada aplicação (Quadro 10).

Quadro 10 - Parâmetros e benefícios do dispositivo ERD.

Pressão de Entrada LP (Baixa Pressão)	Máxima de 5 bar	Eficiência na recuperação de energia do fluxo de rejeição e no retorno para o sistema.
Eficiência Energética	Recuperação de energia do fluxo de rejeição	Redução substancial no consumo de energia do sistema SWRO, melhorando a sustentabilidade operacional.
Temperatura de Operação	Entre 2°C e 35°C	Adequado para uma ampla gama de condições ambientais, inclusive locais com temperaturas elevadas.
Facilidade de Integração	Controle ativo, comissionamento e monitoramento contínuo.	Facilidade na instalação e manutenção, com ajustes rápidos para otimização do desempenho em diferentes condições
Compactação e Eficiência no Espaço	Unidade 3 em 1 (trocador de pressão, bomba e motor integrados)	Economia de espaço e redução na necessidade de componentes separados, ideal para espaços limitados.
Baixo Custo Operacional	Menor número de componentes no sistema	Redução de custos com manutenção e substituição de peças, aumentando a vida útil do equipamento.
Facilidade de Monitoramento	Monitoramento contínuo e ajuste de parâmetros operacionais	Garantia de desempenho estável, com maior controle e eficiência no processo de osmose reversa.
Flexibilidade de Instalação	Aplicável em sistemas novos e existentes, terrestres ou marítimos.	Versatilidade em diferentes tipos de instalações, tornando-o uma solução flexível para diversas necessidades.

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

A instalação de um dispositivo de recuperação de energia (ERD), como o iSave 70, resulta em uma redução significativa nos custos operacionais, especialmente no que se refere ao consumo de energia elétrica. A economia gerada ao longo de um ano pode justificar plenamente o investimento inicial na

implementação do ERD, particularmente para sistemas de maior capacidade, como o de 200 L/s, onde as economias se tornam ainda mais expressivas.

Sistema 100 L/s: A instalação do ERD no sistema de 100 L/s gera uma economia anual de \$856.222, considerando apenas a redução de custos com eletricidade. Sistema 200 L/s: No caso do sistema de 200 L/s, a economia anual alcança \$1.717.164, devido à significativa redução no custo com energia elétrica, proporcionada pelo uso eficiente da energia recuperada do fluxo de rejeição (Tabela 47).

Tabela 46 - Tabela de Estimativa de Custos com e sem ERD.

Parâmetro	Sistema 100 L/s (sem ERD)	Sistema 100 L/s (com ERD)	Economia Sistema 100 L/s	Sistema 200 L/s (sem ERD)	Sistema 200 L/s (com ERD)
Custo Diário de Eletricidade	\$3.918,00	\$1.567,20	\$2.350,80	\$7.836,00	\$3.134,40
Custo Diário Total de Operação	\$8.749,37	\$6.398,57	\$2.350,80	\$50.669,73	\$45.968,13
Custo Anual de Eletricidade	\$1.428.070	\$571.85	\$856.22	\$2.863.140	\$1.145.976
Custo Anual Total de Operação	\$3.191.572,05	\$2.338.409,05	\$853.163,00	\$18.495.942,45	\$16.795.390,45
Economia Anual com ERD	-	\$856.222,00	-	-	\$1.717.164

Fonte: Elaborado pela Autora (2024).

Além de proporcionar uma redução substancial nos custos operacionais, a instalação do ERD contribui diretamente para uma operação mais sustentável. Ao aproveitar a energia do fluxo de rejeição, o ERD não só diminui a dependência de fontes externas de energia, como também reduz a pegada de carbono do sistema. Este aumento na eficiência global do processo de osmose reversa permite que o sistema funcione de maneira mais otimizada, sem a necessidade de grandes investimentos em novas fontes de energia, o que representa uma importante vantagem tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo preliminar teve como objetivo identificar e analisar os aspectos técnicos, econômicos e ambientais necessários para viabilizar um projeto de dessalinização de água marinha por Osmose Inversa, integrado à Estação de Tratamento de Água (ETA) da Lagoa do Peri. A proposta visa complementar o abastecimento hídrico da Costa Leste Sul de Florianópolis, uma região que enfrenta desafios crescentes de segurança hídrica, especialmente em períodos de seca e aumento da demanda.

A tecnologia de Osmose Inversa foi escolhida devido à sua eficácia comprovada e aplicabilidade em larga escala para dessalinização. A capacidade planejada de 200 L/s foi determinada com base em projeções de crescimento populacional e demandas futuras, priorizando a eficiência operacional e as economias de escala. Vale ressaltar que a ETA Lagoa do Peri já havia sido projetada para uma capacidade de 400 L/s, o que permite que o sistema de dessalinização se integre à infraestrutura existente, atendendo a uma demanda futura e maximizando os recursos já disponíveis.

Para a captação de água do mar, a proposta contempla poços verticais de infiltração na Praia da Armação, que oferecem vantagens como pré-filtração natural, redução de custos operacionais e menor impacto ambiental. A análise dos dados previamente apresentados confirmou a viabilidade técnica dessa abordagem para o pré-tratamento antes da Osmose Inversa. A proposta evita interferir na estrada que separa a praia do terreno da ETA existente, além de preservar a paisagem, fauna e flora locais, sem exigir grandes obras.

A integração com a ETA Lagoa do Peri destacou-se como uma solução estratégica, devido à proximidade com o mar, à disponibilidade de terreno já preparado e à infraestrutura existente. O tanque de contato de 500 m³ da ETA pode ser aproveitado para armazenar tanto a água dessalinizada quanto a tratada convencionalmente, otimizando os recursos e promovendo flexibilidade operacional. Além disso, o sistema já possui a rede de distribuição necessária, e a qualidade da água tratada por membranas será superior, beneficiando a população.

Do ponto de vista ambiental, a salmoura gerada pelo processo de dessalinização será descartada por meio de um emissário marinho a 100 metros da linha de praia. Modelagens preliminares indicam que a dispersão será eficiente nas

condições locais, mas estudos complementares, incluindo modelagens hidrodinâmicas avançadas, são necessários para garantir a sustentabilidade ambiental do projeto. A proximidade da praia favorece o processo de diluição da salmoura, sem a necessidade de transporte ou armazenamento, aproveitando as altas correntes e ondas de dispersão.

A análise econômico-financeira mostrou que, apesar do investimento inicial ser elevado, o custo operacional por metro cúbico de água tratada é competitivo, especialmente devido à diluição dos custos fixos em sistemas de maior porte. A proximidade com o mar e a integração com a ETA existente fortalecem a viabilidade econômica e operacional, já que a infraestrutura adicional necessária seria mínima, limitando-se aos equipamentos para o sistema de membranas e dispositivos de recuperação de energia. O sistema de bombeamento pode ser alimentado com energia proveniente dos poços verticais, direcionando a água para os módulos de Osmose Inversa e, posteriormente, para o tanque de contato/recipiente. A rede de distribuição da Costa Leste Sul, já existente, também estará disponível para o fornecimento de água tratada.

Embora o estudo tenha fornecido uma base para um anteprojeto, recomenda-se:

- a) **Estudos Complementares:** Realizar análises sedimentológicas detalhadas, avaliações de impacto ambiental abrangentes e modelagens hidrodinâmicas para a dispersão da salmoura, garantindo uma avaliação mais precisa das condições locais e do impacto ambiental.
- b) **Gestão Integrada:** Implementar um modelo de gestão hídrica que combine diversas fontes de abastecimento, reduzindo a sobrecarga sobre sistemas específicos e promovendo o uso sustentável dos recursos hídricos disponíveis.
- c) **Monitoramento Contínuo:** Estabelecer programas de monitoramento ambiental e operacional para garantir a conformidade com as normas e a eficácia do sistema a longo prazo.
- d) **Replicabilidade do Projeto:** Desenvolver um plano para replicar a tecnologia em outras regiões costeiras da Ilha de Santa Catarina ou em outras partes do Brasil, aproveitando a vasta disponibilidade de água do mar. Segundo o Censo 2022, 111,28 milhões de pessoas, ou 54,8% da população, vivem a uma distância máxima de 150 quilômetros da costa, tornando a dessalinização uma

solução estratégica para integrar o abastecimento hídrico, sem sobrecarregar os sistemas frágeis e escassos de água doce.

Este estudo estabelece uma base inicial para a implementação de um sistema de dessalinização complementar na Costa Leste Sul de Florianópolis, mas destaca a importância de análises técnicas e ambientais adicionais para garantir sua eficiência, viabilidade e sustentabilidade a longo prazo. A proximidade com o mar e a infraestrutura existente tornam a ETA Lagoa do Peri um local estratégico para a implementação do sistema, e o sucesso deste modelo pode servir como referência para iniciativas semelhantes em outras regiões do país.

REFERÊNCIAS

- ABDELKAREEM, M. A. *et al.* A review of the technologies and processes for desalination. **Desalination**, v. 437, p. 145-158, 2018.
- ABDUL AZIS, N. *et al.* Environmental impacts of desalination. **Desalination and Water Treatment**, v. 10, n. 1, p. 1-10, 2000.
- ABREU DE CASTILHOS, C. **Estudo da morfodinâmica da praia**. São Paulo: Editora Universitária, 1995.
- ABREU DE CASTILHOS, J. **Estudo evolutivo, sedimentológico e morfodinâmico da Praia da Armação, Ilha de Santa Catarina**. 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia) — Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, 134 p.
- AGUDOPADRÓN, A. I. *et al.* Gerenciamento de recursos hídricos em Florianópolis/SC: estudo de caso: a Bacia da Lagoa do Peri. In: **II SEMINÁRIO NACIONAL SOBRE REGENERAÇÃO AMBIENTAL DE CIDADES ÁGUAS URBANAS II**, 2007, Londrina, PR. **Anais do II Seminário Nacional sobre Regeneração Ambiental de Cidades Águas Urbanas II**. Londrina, PR: CECCA, 2007.
- AGUS, E.; SEDLAK, D. L. Disinfection byproducts from seawater desalination: a review. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 3, p. 971-977, 2010.
- ALKAISI, N. S. *et al.* Renewable energy sources for desalination. **Renewable Energy**, v. 115, p. 108-117, 2017.
- AL-KARAGHOULI, A. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, s.l.: Elsevier, v. 24, p. 343-356, 2013.
- AMJAD, Z. **Reverse osmosis: membrane technology, water chemistry, and industrial applications**. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1993.
- AMY, G. *et al.* Membrane processes for water treatment. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 18, p. 11020-11028, 2017.
- AMY, G.; GHAFFOUR, N.; LI, Z.; FRANCIS, L.; LINARES, R. V.; MISSIMER, T.; LATTEMANN, S. Membrane-based seawater desalination: present and future prospects. **Desalination**, v. 401, p. 16–21, 2017. DOI: 10.1016/j.desal.2016.10.002.
- ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of the Southern Brazilian coast. In: **Proceedings of the Sixth International**

Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Paper No. 97, 15 p., 2003.

ARAÚJO, J. A. *et al.* Caracterização climática e dinâmica dos ventos em Santa Catarina. In: **Simpósio Nacional de Geografia**, Santa Catarina, 2003. p. 85-93.

ARAÚJO, J. S. *et al.* Dinâmica costal da Ilha de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 55, n. 1, p. 45-60, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6022:2018 - Artigos em publicações periódicas científicas - Apresentação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

BARTAK, R. *et al.* Beach Sand Filtration as Pre-Treatment for RO Desalination. **International Journal of Water Sciences**, v. 1, n. 2, 2012.

BARTAK, R. *et al.* Effects of seawater infiltration galleries on seawater quality. **Desalination**, 2012.

BASHITALSHAAER, Raed *et al.* Brine discharge from desalination plants: a modeling approach to the Red Sea and Arabian Gulf. **Desalination**, v. 259, n. 1-3, p. 129-137, 2010. DOI: 10.1016/j.desal.2009.03.018.

BENNETT, A. Renewable energy sources and desalination. **Journal of Water Resources Planning and Management**, [informações complementares necessárias].

BOLDRIN, K. V. F.; CARVALHO, A. T. Desafios e potenciais da dessalinização de água do mar para abastecimento público. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 4, p. 899-914, 2018.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento. Publicado no **Diário Oficial da União** em 18 de março de 2005.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Censo Demográfico 2022**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

BRASIL. Ministério das Cidades. **Plano Nacional de Saneamento Básico (PLANSAB)**. 2013.

BRASIL. **Portaria n.º 518/2004 do Ministério da Saúde**: procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano. Brasília: **Diário Oficial da União**, 2004.

BRASIL. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS). **Relatório de 2021**. Disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em: 9 set. 2024.

BROWN, A. C.; MCLACHLAN, A. **The Ecology of Sandy Shores**. Elsevier, 1990.

BURGDART, Tiago. **Filtração em Sedimento do Mar como Pré-tratamento à Osmose Reversa**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, 2017.

CALDERA, U.; BREYER, C. Sustainable desalination systems. **Energy Procedia**, v. 149, p. 1-8, 2019.

CASAN. **Relatório de Sustentabilidade 2022: Água e Saneamento em Santa Catarina**. Florianópolis: Companhia Catarinense de Águas e Saneamento, 2022.

CASTILHOS, J. A. de. **Estudo evolutivo, sedimentológico e morfodinâmico da Praia da Armação, Ilha de Santa Catarina**. 1995. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1995.

CAY-DURGUN, C.; LIND, M. Advances in desalination technology using membranes. **Desalination**, v. 456, p. 1-12, 2018.

CAY-DURGUN, P.; LIND, M. L. Nanoporous materials in polymeric membranes for desalination. **Current Opinion in Chemical Engineering**, v. 20, p. 19–27, 2018. DOI: 10.1016/j.coche.2018.01.001.

CERB(BA). **Manual de dessalinizador**. Companhia de Engenharia Hídrica e de Saneamento da Bahia, 2011. Disponível em: [http://www.cerb.ba.gov.br/sites/www.cerb.ba.gov.br/files/sala_de_imprensa/publicacoes/MA%20NUAL%20DESSANILIZADOR\[1\].pdf](http://www.cerb.ba.gov.br/sites/www.cerb.ba.gov.br/files/sala_de_imprensa/publicacoes/MA%20NUAL%20DESSANILIZADOR[1].pdf). Acesso em: 02 out. 2024.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Fundamentos do Controle de Poluição das Águas**. São Paulo, novembro de 2018. Disponível em: <https://saneamentoinclusivo.org.br/fonte/cetesb-fundamentos-do-controle-de-poluicao-das-aguas-2018>. Acesso em: 23 out. 2024.

COMPANHIA CATARINENSE DE ÁGUAS E SANEAMENTO (CASAN). **Relatório Anual 2024**. Disponível em: <https://www.casan.com.br>. Acesso em: 02 Nov. 2024.

COOLEY, H.; GLEICK, P.; CHRISTIAN-SMITH, J. **Uncharted waters: the new economics of water scarcity**. Oakland: Pacific Institute, 2009.

DALBOSCO, A. L. P.; BARLETTA, R. C.; FRANCO, D. **Relação entre as variações da linha de costa e as características morfodinâmicas da Praia da Armação, Ilha de Santa Catarina**. 2008. Disponível em: [URL]. Acesso em: 9 ago. 2024.

DANFOSS DO BRASIL INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. **Termos e condições gerais**. [s.l.]: Danfoss, [s.d.]. Disponível em: https://www.danfoss.com/pt-br/terms/generalinformation/#tab-danfoss_power_solutions_com%C3%A9rcio_e_ind%C3%BAstria_ltda. Acesso em: 13 nov. 2024.

DEHWAH, H.; LI, Y.; MISSIMER, T. Innovative seawater filtration techniques for desalination plants. **Water Research**, 2015a.

FARAMARZI, M. *et al.* Water scarcity and demand management in urban areas. **Water Resources Management**, v. 24, p. 1005-1018, 2010.

FAYAD, K. A.; EL-HADJ, M. Avaliação dos impactos ambientais dos processos de dessalinização. **Revista de Engenharia Ambiental**, v. 22, n. 2, p. 110-123, 2017.

FILMTEC™. **Reverse Osmosis Membranes. Technical Manual**, Version 16, February 2023.

FIPE. **Índice FipeZap**. 2024. Disponível em: <https://www.fipe.org.br/pt-br/indices/fipezap>. Acesso em: 02 nov. 2024.

FRANCO, D.; MELO FILHO, Eloi. Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, SC (2002-2005). In: **III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, Rio Grande (RS), 2008. **Anais III Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, 2008. p. 1-20.

FRENKEL, V. **Dessalinização de água do mar**. Disponível em: [URL]. Acesso em: 15 set. 2024.

GÊNESIS WATER TECHNOLOGIES. **Sistemas de recuperação de energia para dessalinização de água do mar**. 15 ago. 2024. Disponível em: <https://pt.genesiswatertech.com/blog/sistemas-de-recupera%C3%A7%C3%A3o-de-energia-para-dessaliniza%C3%A7%C3%A3o-de-%C3%A1gua-do-mar/>. Acesso em: 13 nov. 2024.

GHAFFOUR, N.; MISSIMER, T. M.; AMY, G. L. Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. **Desalination**, v. 309, n. 2013, p. 197-207, 2013.

GLOBAL WATER INTELLIGENCE. **DesalData**. Disponível em: <https://www.desaldata.com>. Acesso em: 23 out. 2024.

GOMES, R. K. **A dessalinização térmica como alternativa para abastecimento de água: estudo da técnica de dessalinização térmica e avaliação econômica preliminar**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2011.

GOOGLE EARTH. **Imagens de Satélite e Alterações de Cobertura do Solo da Região Costa Sul/Leste de Florianópolis**. 2024. Disponível em: <https://earth.google.com>. Acesso em: 15 nov. 2024.

GREENLEE, L. F.; LAWLER, D. F.; FREEMAN, B. D.; MARROT, B.; MOULIN, P. Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges. **Water Research**, v. 43, n. 9, p. 2317-2348, 2009.

GUDE, V. G. Energy consumption and recovery in reverse osmosis. **Desalination and Water Treatment**, v. 36, n. 1-3, p. 239-260, 2011.

GUDE, V. G. Energy storage for desalination processes powered by renewable energy and waste heat sources. **Applied Energy**, v. 137, p. 877-898, 2015.

GUERREIRO, J. O impacto ambiental da dessalinização no Brasil: desafios e soluções. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 14, n. 3, p. 123-136, 2009.

GW – GLOBAL WATER INTELLIGENCE. **[Referência para dados de custos]**. 2012. Acesso em: 20 out. 2024.

HEC, V. *et al.* Environmental impacts of desalination processes. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 75, p. 103-112, 2018.

HÖPNER, T.; WINDELBERG, J. Elements of environmental impact studies on coastal desalination plants. **Desalination**, v. 108, p. 11–18, 1996.

HSU, T. J.; EVANS, E. A parabolic model for shoreline change. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/324496303_Analise_hidrodinamica_e_de_transportede_sedimentos_para_elaboracao_de_alternativas_de_recuperacao_da_Praia_da_Armacao_do_Pantano_do_Sul_-_FlorianopolisSC#fullTextFileContent. Acesso em: 06 out. 2024.

INSTITUTO TRATA BRASIL (ITB). **Relatório de Investimentos em Saneamento**. 2022. Disponível em: <https://www.tratabrasil.org.br>. Acesso em: 5 out. 2024.

IPIUF – Instituto de Planejamento Urbano de Florianópolis. **Estudos sobre o Crescimento Populacional na Região Sul de Florianópolis e a Projeção de Demanda de Água**. Florianópolis, 2024.

ISLAM, R. M.; CHAUDHRY, H. M. Numerical solution of transport equation for applications in environmental hydraulics and hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 191, n. 1-4, p. 106-121, 1997.

JAMALY, M. *et al.* Advances in desalination technology. **Desalination Journal**, v. 342, p. 150-162, 2014.

JAMALY, S. *et al.* A short review on reverse osmosis pretreatment technologies. **Desalination**, v. 290, p. 83-97, 2012.

JONES, E.; QADIR, M.; VAN VLIET, M. T.; SMAKHTIN, V.; KANG, S.-M. The state of desalination and brine production: A global outlook. **Science of the Total Environment**, v. 657, p. 1343–1356, 2019.

KABIR, E. *et al.* Eco-friendly desalination processes: advances and challenges. **Desalination**, v. 495, p. 114745, 2020.

KALIDASAN, P.; ZUBAIR, M. An overview of solar energy for desalination. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 89, p. 32-42, 2018.

KALOGIROU, S. A. **Solar Energy Engineering: Processes and Systems**. Amsterdam: Elsevier, 2005.

KALOGIROU, S. **Seawater Desalination Using Renewable Energy Sources**. 2005.

KIM, Y. *et al.* Integrated approach to water desalination. **Water**, v. 11, n. 5, p. 967, 2019.

LATTEMANN, S.; HÖPNER, T. Environmental impact and impact assessment of seawater desalination. **Desalination**, v. 220, p. 1–15, 2008.

LATTEMANN, Sabine; KENNEDY, Maria D.; SCHIPPERS, Jan C.; AMY, Gary. **Global Desalination Situation**. Institute for Chemistry and Biology of the Marine Environment (ICBM), University of Oldenburg, Oldenburg, Germany; UNESCO – IHE Institute for Water Education, Delft, The Netherlands, 2009.

LAVIGNE, J.; KACZOROWSKI, T. Impacts of seawater desalination on coastal ecosystems. **Marine Pollution Bulletin**, v. 149, p. 110570, 2019.

LEE, Hyunkyung; JIN, Yongxun; HONG, Seungkwan. Recent transitions in ultrapure water (UPW) technology: Rising role of reverse osmosis (RO). **Journal of Water Process Engineering**, v. 9, p. 10-20, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.09.001>. Acesso em: 13 Nov. 2024.

LEITNER, T. Comparing desalination costs with other water supply options. **Desalination**, v. 236, n. 1-3, p. 43-52, 2009.

LERMONTOV, A.; PEREIRA, R. A. S. Avaliação conceitual dos custos de implantação e operação para plantas de dessalinização em diversas escalas. **I-028. Escola de Química da UFRJ**, 2024.

LI, Mingheng. Reducing specific energy consumption in Reverse Osmosis (RO) water desalination: An analysis from first principles. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420301071>. Acesso em: 13 Nov. 2024.

LIU, S. *et al.* Current status and future trends in desalination technology. **Desalination**, v. 494, p. 114635, 2020.

LUBRANO, C. A revolução da dessalinização de água: um estudo de caso em São Paulo. 2019. Disponível em: [URL]. Acesso em: 10 set. 2024.

MALIK, M. *et al.* Recent developments in desalination technology. **Desalination**, v. 453, p. 67-82, 2019.

MENEZES, D. A dessalinização e suas implicações no abastecimento de água: uma análise da situação atual no Brasil. **Revista de Engenharia e Gestão Ambiental**, v. 9, n. 1, p. 34-49, 2022.

MISSIMER, T. *et al.* Seawater desalination: A global outlook. **Desalination**, 2009.

MISSIMER, T.; JONES, D.; MALIVA, R. Design and operation of seawater desalination systems. **Environmental Science & Technology**, 2015.

MOFIDI, A.; GHAF FOUR, N. Environmental and social aspects of seawater desalination: a review. **Desalination**, v. 505, p. 115086, 2021.

MOLINA, M. *et al.* A review of sustainable desalination processes. **Sustainable Water Resources Management**, v. 7, p. 897-917, 2021.

MORAES, J. C. de; BRUNETTI, J. R. Impactos da dessalinização nas regiões costeiras do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 2, p. 587-599, 2019.

MURARA, P. **Variabilidade Climática e Doenças Circulatórias e Respiratórias em Florianópolis (SC): uma contribuição à Climatologia Médica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Departamento de Geociências da UFSC, Florianópolis.

MURARA, Pedro Germano; BONETTI, Carla. O clima e as doenças circulatórias e respiratórias em Florianópolis/SC. **Hygeia**, v. 9, n. 16, p. 86-102, jun. 2013.

NAKAMURA, J. *et al.* Comparativo entre tecnologias de dessalinização: Osmose Inversa e destilação. **Revista Brasileira de Engenharia e Ciência**, v. 13, n. 4, p. 53-61, 2020.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES (NAS). **Desalination: A National Perspective**. Washington, DC: National Academies Press, 2008.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Desalination: A National Perspective**. Committee on Advancing Desalination Technology, Water Science and Technology Board, National Research Council (NRC) of the U.S. National Academies, 2008.

NIMER, E. **Climatologia**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1979.

NOAH, A. *et al.* Renewable energy sources for desalination. **Desalination**, v. 423, p. 92-105, 2018.

OLIVEIRA, L. R.; VIEIRA, C. M. O papel da dessalinização na gestão hídrica do Brasil: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 3, p. 577-590, 2018.

OLIVEIRA, T. Um estudo sobre a dessalinização da água: impactos e perspectivas. In: **Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023. Anais do Congresso Brasileiro de Recursos Hídricos, 2023**. Disponível em: [URL]. Acesso em: 23 out. 2024.

OLIVEIRA, W. F. *et al.* Integrando energia solar e dessalinização: um estudo de caso. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 234-245, 2018.

PARK, C.; KIM, H.; HONG, S.; CHOI, S. I. Variation and Prediction of Membrane Fouling Index Under Various Feed Water Characteristics. **Journal of Membrane Science**, v. 284, n. 1-2, p. 248-254, 2006.

PEIXOTO, Janice Rezende Vieira. **Interação praia-duna e sua influência sobre a vegetação de duna frontal na costa leste da Ilha de Santa Catarina, SC, Brasil**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

PEM. Energy use and recovery in reverse osmosis systems. **Journal of Membrane Science**, v. 495, p. 107-118, 2015.

PEREIRA, F. R. *et al.* Desafios da dessalinização no Brasil. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 4, p. 915-927, 2018.

PETRUS, M. A.; PELAEZ, C.; MARTINEZ, C. R. Desalination: environmental impacts and sustainable technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 1072-1080, 2017.

PORTO PEREIRA, Silvano; ROSMAN, Paulo Cesar Colonna; SÁNCHEZ-LIZASO, José Luis; LIMA NETO, Iran Eduardo; GARCIA SILVA, Rodrigo Amado; RODRIGUES, Melissa. Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. **Desalination and Water Treatment**, v. 234, p. 22, Nov. 2021. DOI: 10.5004/dwt.2021.27557.

PORTO PEREIRA, Silvano; ROSMAN, Paulo Cesar Colonna; SÁNCHEZ-LIZASO, José Luis; LIMA NETO, Iran Eduardo; GARCIA SILVA, Rodrigo Amado; RODRIGUES,

Melissa. Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. **Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE)**, Fortaleza, 2021. Acesso em: 30 out. 2024.

PRIESTLEY, C.; KHALIL, A. Environmental considerations of desalination technologies. **Environmental Engineering Science**, v. 33, n. 5, p. 212-223, 2016.

PULIDO, Antônio; VALLEJOS, Ângela; SOLA, Fernando. Methods to supply seawater to desalination plants along the Spanish Mediterranean coast and their associated issues. **Environmental Earth Sciences**, v. 78, n. 10, p. 1-12, 2019. DOI: 10.1007/s12665-019-8298-9.

RAPOZO, L. F. *et al.* A água potável no Brasil: desafios e oportunidades. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 23, n. 4, p. 755-766, 2018.

RIBEIRO, D. M. A questão da água e o desenvolvimento sustentável: um estudo da dessalinização em regiões áridas. **Cadernos de Geografia**, v. 27, n. 1, p. 45-61, 2019.

RIVERA, M. R. *et al.* Environmental impact of seawater desalination in coastal areas. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 78, p. 106319, 2019.

SANTOS, J. D. *et al.* Avaliação da eficiência do processo de dessalinização por Osmose Inversa. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 239-246, 2016.

SANTUR – Secretaria de Estado de Turismo, Cultura e Esporte de Santa Catarina. **Estudos sobre a População Flutuante em Florianópolis**. Florianópolis, 2024.

SEABRA, C. *et al.* Análise da dessalinização de água do mar como solução para a escassez hídrica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 25, n. 3, p. 457-465, 2020.

SENAI CETIQT. **Dessalinização de Água: Processos e Tecnologias**. 2022. Disponível em: [URL]. Acesso em: 15 out. 2024.

SILVA, L. C. Dessalinização da água: alternativas e desafios. **Caderno de Geografia**, v. 12, n. 1, p. 89-100, 2018.

SILVA, R. S. A água no Brasil: desafios e propostas para a dessalinização. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 15, n. 1, p. 50-67, 2022.

SOUZA, L. A. *et al.* Análise de viabilidade da dessalinização como alternativa de abastecimento hídrico. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 24, n. 1, p. 123-138, 2019.

STAMM, E. The economics of desalination: water supply costs and demand management. **Water Resources Management**, v. 32, n. 2, p. 639-652, 2018.

TAYLOR, C. J. L. The effects of biological fouling control at coastal and estuarine power stations. **Marine Pollution Bulletin**, v. 53, p. 30–48, 2006.

THOMAS, R.; RIEHLE, A.; ALMAZAN, A. Desalination and sustainable development: the role of policies. **Desalination**, v. 439, p. 92-100, 2018.

TORO, A.; GARCÍA, M. Environmental assessment of seawater desalination processes. **Desalination**, v. 456, p. 1-12, 2018.

UN-ENVIRONMENT. **Desalination: A Sustainable Solution to Water Scarcity?** 2017. Disponível em: [URL]. Acesso em: 28 set. 2024.

UNESCO. **The United Nations World Water Development Report 2014: Water and Energy**. Paris: UNESCO, 2014.

UNESCO. **Water Resources Management in Brazil: Current Status and Future Directions**. 2021. Disponível em: <https://www.unesco.org>. Acesso em: 20 out. 2024.

VILLEGAS, A. Challenges of desalination in arid regions. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 14, n. 11, p. 1303, 2017.

VOUTCHKOV, N. **Desalination Engineering: Planning and Design**. McGraw-Hill, 2005.

WANG, Y.; YUAN, X.; YANG, J.; LI, Y.; ZHANG, H. Membrane fouling in seawater desalination: mechanisms and control strategies. **Environmental Science & Technology**, v. 53, n. 21, p. 12939-12951, 2019.

WISNER, B. *et al.* **At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters**. London: Routledge, 2004.

WORLD BANK. **Water in the 21st Century: The World Bank Group's Water Strategy**. 2020. Disponível em: <https://www.worldbank.org>. Acesso em: 15 out. 2024.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Desalination: What is it and How Can it Help Tackle Water Scarcity?** Publicado em 12 mar. 2024. Atualizado em 15 abr. 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/agenda/2024/04/desalination-drinking-water-water-scarcity/>. Acesso em: 26 out. 2024.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). **Guidelines for Drinking-Water Quality: Fourth Edition**. Geneva: WHO, 2011.

APÊNDICE A- CONFIGURAÇÕES CENÁRIO 100 L/S

Tabela 47 - Configurações cenário 100 L/s em concentrações (mg/L como íon)

Componente	Alimentação	Permeado	Estágio 1	Total Estágio 1
NH ₄ ⁺	0,00	0,00	0,00	0,00
K ⁺	408,4	742,4	1,83	1,83
Na ⁺	11.033	20.061	42,18	42,18
Mg ²⁺	1.314	2.392	1,15	1,15
Ca ²⁺	421,7	767,8	0,36	0,36
Sr ²⁺	8,14	14,81	0,01	0,01
Ba ²⁺	0,00	0,00	0,00	0,00
CO ₂	24,52	46,53	0,00	0,00
HCO ₃ ⁻	97,52	175,1	0,28	0,27
NO ₃ ⁻	0,00	0,00	0,00	0,00
F ⁻	1,33	2,42	0,01	0,01
Cl ⁻	19.799	36.005	69,68	69,68
Br ⁻	68,85	125,1	0,36	0,36
SO ₄ ²⁻	2.776	5.055	0,97	0,97
PO ₄ ³⁻	0,00	0,00	0,00	0,00
SiO ₂	1,00	1,82	0,01	0,01
Boro	4,59	7,91	0,56	0,56
CO ₂	0,23	0,53	0,23	0,23

Fonte: Elaborado pela Autora (2024) a partir de dados Dupont Water Solutions (2024).