



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

Conversão da energia das ondas para a dessalinização da água por osmose reversa com produção de salmoura

João Felipe do Nascimento Batista

Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro.

Orientadores:

Fernando Pereira Duda

Eliab Ricarte Beserra

Rio de Janeiro

Março de 2020



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA POR OSMOSE REVERSA COM PRODUÇÃO DE SALMOURA

João Felipe do Nascimento Batista

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Fernando Pereira Duda (Orientador)

Prof. Eliab Ricarte Beserra (Coorientador)

Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto

Rio de Janeiro

Março de 2020

Batista, João Felipe do Nascimento

Conversão da energia das ondas para a dessalinização da água por osmose reversa com produção de salmoura / João Felipe do Nascimento Batista. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2020.

IX, 55 p.: il,; 29,7cm.

Orientadores: Fernando Pereira Duda e Eliab Ricarte Beserra

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2020.

Referencias Bibliográficas: p. 51-55.

1. Dessalinização. 2. Energia de ondas marinhas. 3. Osmose. I. Duda, Fernando Pereira; Beserra, Eliab Ricarte II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Mecânica. III. Título

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus pela oportunidade, saúde, determinação e iluminação por todo meu caminho durante o curso de graduação;

A toda minha família, aos meus pais e avós por todo apoio emocional, financeiro e pela confiança no meu potencial. Aos meus irmãos Victor, João Marcos e Isabella, especialmente pelo conforto nos momentos difíceis da caminhada que nunca me permitiram desistir dos meus objetivos;

Por todo amor e carinho, a Rubia e familiares, por se tornarem parte da minha família e me receberem de braços abertos me dando suporte durante minha graduação;

A todos os amigos, agradeço por toda cumplicidade e suporte emocional;

Aos meus orientadores Eliab e Duda pela solicitude, atenção, paciência e pelos ensinamentos;

Aos professores da Escola Politécnica da UFRJ por toda solicitude, conhecimento e esforço despendidos a mim para meu crescimento pessoal e profissional.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica / UFRJ como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS PARA A DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA POR OSMOSE REVERSA COM PRODUÇÃO DE SALMORA

João Felipe do Nascimento Batista

Março/2020

Orientadores: Fernando Pereira Duda e Eliab Ricarte Beserra

Curso: Engenharia Mecânica

Através de um dispositivo para aproveitamento da energia das ondas marinhas, o estudo em questão avalia a aplicabilidade deste mecanismo a fim de suprir integralmente a demanda energética de um sistema de osmose reversa.

Este processo tem como produtos um resíduo salobro (rejeito ou concentrado) e a água dessalinizada, (permeado). Usualmente, este rejeito é descartado no mar, impactando a fauna e a flora marinha da microrregião.

Desta forma, a viabilidade comercial do resíduo salobro advindo deste processo será dissertada para suprir a demanda de aumento da produtividade das salinas.

Palavras-chave: Osmose Reversa, Dessalinização, Ondas Marinhas, Energias Renováveis, Rejeito Salobro, Concentrado.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/ UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Mechanical Engineer.

CONVERSION OF WAVES ENERGY FOR WATER DESALINATION BY
REVERSE OSMOSIS WITH SALMON PRODUCTION

João Felipe do Nascimento Batista

March/2020

Advisors: Fernando Pereira Duda and Eliab Ricarte Beserra

Department: Mechanical Engineering

Through a device for harnessing the energy of marine waves, the study in question evaluates the applicability of this mechanism in order to fully meet the energy demand of a reverse osmosis system.

This process has as products a brackish residue (waste or concentrate) and desalinated water (permeate). This waste is usually discarded in the sea, impacting the marine fauna and flora of the micro-region.

In this way, the commercial viability of the brackish residue resulting from this process will be addressed to meet the demand for increasing the productivity of the saltpans.

Keywords: Reverse Osmosis, Desalination, Marine Waves, Renewable Energies, Saline Waste, Concentrate.

Sumário

| | |
|--|----|
| 1. Introdução..... | 1 |
| 2. Dispositivo PPE | 2 |
| 2.1) Outras aplicações | 4 |
| 3. Osmose reversa | 6 |
| 3.1) Descrição | 6 |
| 3.2) Membranas..... | 7 |
| 3.2.1) Descrição e funcionamento..... | 7 |
| 3.2.2) Incrustações na membrana | 10 |
| 3.3) Pré-tratamento..... | 11 |
| 3.3.1) Processos de Filtragem | 12 |
| 3.3.2) Métodos de pré-tratamento mais utilizados | 13 |
| 4. Indústria do Sal..... | 17 |
| 4.1) Salina | 17 |
| 4.1.1) Cristalização..... | 18 |
| 4.2) Indústria salineira no Brasil..... | 18 |
| 5. Estudo de caso..... | 20 |
| 5.1) Município de Galinhos | 20 |
| 5.2) Estudo das características das ondas locais | 21 |
| 5.3) Layout da planta | 24 |
| 6. Dimensionamento de capacidade da planta | 26 |
| 6.1) Cálculo da Pressão Osmótica | 26 |
| 6.3) Bombeamento do Fluido | 28 |
| 6.3.1) Dispositivo de bombeamento de água | 28 |
| 6.3.2) Configuração do Dispositivo PPE | 30 |
| 6.3.3) Dimensionamento do pistão..... | 32 |
| 6.3.4) Produção volumétrica diária | 33 |
| 6.4) Forças atuantes no Flutuador [32] | 35 |
| 6.4.1) Força de empuxo [32] | 35 |

| | |
|---|----|
| 6.4.2) Pressão das ondas [32] | 37 |
| 6.4.3) Forças de amortecimento hidrodinâmicas [32]..... | 43 |
| 7. Definição dos parâmetros de trabalho | 45 |
| 7.1) Escolha da membrana..... | 45 |
| 7.2) Volume de bombeamento | 46 |
| 7.3) Cálculo da concentração do rejeito..... | 47 |
| 8. Conclusões e recomendações | 49 |
| 9. Bibliografia..... | 51 |

Nomenclatura

- **Alimentação (vazão: m³/h ou gpm):** quantidade de água introduzida na membrana ou no sistema de membranas.
- **Concentrado ou rejeito (vazão: m³/h ou gpm):** quantidade de água que sai da membrana e que possui uma concentração de sais superior à concentração da água de alimentação.
- **Permeado (vazão: m³/h ou gpm):** quantidade de água purificada produzida pelo sistema de membranas.
- **Taxa de recuperação (%):** porcentagem da água de alimentação que é convertida em permeado.
- **Taxa de rejeição (%):** porcentagem de soluto removida pela membrana ou pelo sistema de membranas.
- **Taxa de passagem (%):** o oposto da taxa de rejeição, é a porcentagem de soluto que passou pela membrana e permaneceu no permeado.
- **Flux (L/m²h ou gfd):** razão de permeado por unidade de área da membrana

1. Introdução

A fim de converter o potencial energético das ondas marinhas em outras formas de energia, o conceito de um dispositivo capaz de aproveitar o movimento oscilatório das ondas é utilizado neste estudo para suprir a demanda energética de uma planta de osmose reversa.

A partir da demanda de aumento da produtividade de uma salina, surge a possibilidade de alinhar a utilização do dispositivo em questão para fazer osmose reversa e, a partir do produto salobro, atender o interesse comercial da salina. Sendo assim, o rejeito salobro advindo da osmose reversa e até então tratado como rejeito, ganha potencial valor comercial. Além disso, surge uma diretriz para substituir a energia elétrica como fonte motriz da operação de uma planta de dessalinização por um dispositivo que não demanda energia elétrica para realização do mesmo processo, onde a eletricidade pode representar até 50% dos custos operacionais.

Vale frisar que o objetivo do estudo em questão é abordar a viabilidade energética do sistema como um todo, discutindo possibilidades do layout da planta e definindo alguns parâmetros de operação que seriam utilizados na planta de dessalinização. Desta forma, não faz parte dos objetivos deste trabalho avaliar o funcionamento estrutural do sistema em questão, tampouco projetar o dispositivo de conversão, muito menos dos equipamentos de osmose reversa.

2. Dispositivo PPE

Estima-se que a produção atual de água potável através da dessalinização (22 milhões de metros cúbicos de água por dia) requer cerca de 203 milhões de toneladas de petróleo por ano. Frente à preocupação mundial com a emissão de poluentes e consequências dessas ações no cenário global, impactando diretamente a fauna e flora no planeta, é extremamente desejável e necessário que alternativas sustentáveis possam adentrar ao cenário da indústria global; seja para o tratamento de água ou qualquer outra atividade que ocasione impactos ambientais. [1]

Dessa forma, se a dessalinização realizada através de tecnologia convencional é uma alternativa pouco viável que seja feita em escala, a dessalinização alimentada por fontes alternativas de energia, por outro lado, possui potencial de desenvolvimento e deve ser explorado cada vez mais pelas universidades e centros de pesquisa.

Consoante a essa necessidade, nota-se que muitas áreas que sofrem com escassez de água possuem uma localização geográfica que corrobora com a ideia trabalhada nesse projeto. Este estudo se direciona em extrair da água do mar um resíduo mais salobro - com maior densidade de sal - para posterior utilização e otimização do processo de mineração do sal marinho em salinas. Não obstante, quando é feita essa dessalinização, além do produto salobro, que é nosso enfoque, também obtemos uma água dessalinizada em certo grau, a depender do tipo de membrana utilizada, que pode ser aproveitada para distribuição em comunidades que possuem essa demanda de consumo. Esse produto dessalinizado pode ser utilizado para irrigação, sanitarismo, higiene, indústrias, dentre outras necessidades e até mesmo consumo próprio, a depender da qualidade da dessalinização obtida. O processo de dessalinização feito atualmente possui um custo muito elevado, pois demanda um consumo extremo de energia elétrica para o processo de osmose reversa.

Sendo assim, conseguimos alinhar três frentes de interesse que poderiam se beneficiar da operação do projeto proposto: a demanda por água em locais com escassez de água doce; a diminuição drástica no consumo de energia demandado para a dessalinização no projeto; a otimização do processo de mineração de sal marinho para salinas da região. Esse projeto, especificamente, tem um enfoque de atuar na região

Norte do Rio Grande do Norte, onde encontra-se um ambiente com características extremamente favoráveis para a implementação desse sistema: uma costa com ondas de altura média suficiente; uma comunidade pequena que poderia ser beneficiada com a parte da água dessalinizada do processo e uma salina próxima à região se beneficiando do produto salobro para seu processo de mineração de sal marinho.

Frente à essa demanda, o projeto em questão se embasa na utilização de um conversor de energia para aproveitamento das ondas como força motriz, em desenvolvimento no Programa de Planejamento Energético (PPE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Segue um esboço do dispositivo na Figura 1 abaixo:

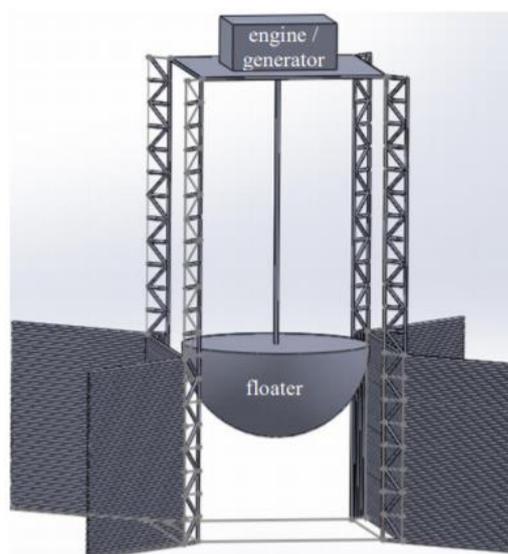


Figura 1 - Dispositivo de conversão de energia de ondas marinhas desenvolvido pelo PPE (Fonte: [2])

Supõe-se um corpo rígido flutuante em que a maior parcela esteja submersa e em oscilação vertical, acompanhando o movimento das ondas. O flutuador é guiado por uma estrutura que restringe e torna negligenciável os movimentos em outras direções.

Assume-se, portanto, que o movimento do conversor devido à ação das ondas ocorre apenas em um único grau de liberdade, verticalmente, movimento este conhecido na indústria naval como arfagem ou heave. A interação entre o objeto e as ondas incidentes causa um distúrbio no movimento natural das ondas com a passagem de energia para o corpo oscilante e, devido a isso, forças atuarão no corpo flutuador. [3]

O modelo foi desenhado para ser implantado em regiões muito próximas da costa (zonas *nearshore*), antes da formação da zona de surf. Antes de continuar seria interessante fazer uma breve citação sobre o ambiente *nearshore*.

Quando citamos uma região *nearshore*, admite-se que estão localizados em águas relativamente intermediárias entre rasas e profundas, a algumas centenas de metros da costa, geralmente em profundidades inferiores a um quarto do comprimento da onda, o que seria algo entre 10 e 25 metros. Dispositivos nessa faixa do mar geralmente ficam ancorados ao leito marinho se utilizando de uma base inercial ou *heave plate*, que mantem o corpo fixo. A base inercial desenvolvida para este dispositivo garante que esta permaneça estática e forneça as forças de reação para o flutuador. Também há casos de conversores presos ao leito marinho. A desvantagem é a mesma dos dispositivos de costa, onde o contato das ondas com o leito marinho reduz sua energia, o que limita o potencial energético. [3]

Essa proximidade do ambiente *nearshore* possibilita uma redução nos equipamentos e materiais de instalação e no transporte do fluido para a terra com consequências sobre o custo de operação e instalação, além de possuir uma influência direta na perda de carga do transporte da água se comparada aos modelos de conversão ditos *offshore*.

2.1) Outras aplicações

Além da finalidade proposta para o dispositivo mencionado anteriormente, observamos que ele possui uma ampla aplicabilidade no âmbito da conversão da energia das ondas. Desta forma, no caso estudado, essa energia seria convertida em energia de pressão, de modo que ela fosse suficiente para vencer as perdas de cargas e demais obstáculos dissipativos, além da própria pressão demandada para o processo da osmose reversa propriamente dito.

Não obstante, a princípio nada impede que o mecanismo de funcionamento mecânico do dispositivo trabalhe de forma a gerar outros tipos de energia. Alguns projetos, já em andamento, avaliam a possibilidade para a conversão do movimento vertical da boia para obtenção de energia elétrica, resumidamente, se utilizando de um

sistema pinhão-cremalheira para conversão do movimento vertical do êmbolo, em movimento e rotação de um eixo para geração de energia elétrica.

Também vem sendo estudado a possibilidade de bombear a água do mar utilizando o mecanismo do dispositivo como uma bomba alternativa, de modo que esse fluido seja bombeado até uma certa altura e armazenado em forma de energia potencial gravitacional. Posteriormente, essa energia pode ser convertida em energia elétrica utilizando o mesmo princípio físico aplicado em micro usinas hidroelétricas.

Utilizar as ondas como fonte de energia renovável possui vantagens significativas sobre outros métodos, como por exemplo:

- As ondas do mar oferecem a maior densidade energética dentre as fontes de energia renováveis. As ondas são geradas por ventos, que por sua vez são gerados pela energia solar. A intensidade da energia solar, que vai de 0,1 a 0,3 kW por metro quadrado de superfície horizontal é convertida em uma intensidade média de fluxo de potência de 2 a 3 kW por metro quadrado de um plano perpendicular à direção de propagação da onda logo abaixo da superfície da água;

- As ondas podem viajar grandes distâncias com pouca perda energia;

- É relatado por estudos que os dispositivos de energia de ondas podem gerar energia em até 90% do tempo, em comparação com 20 a 30% do tempo para dispositivos de energia eólica e solar. [1]

Desta forma, a aplicabilidade do projeto em questão se estende de maneiras ainda imensuráveis. Sendo assim, possui grande potencial para a criação e desenvolvimento de uma solução não apenas sustentável, mas escalável de geração de energia e outras utilidades para o futuro.

3. Osmose reversa

3.1) Descrição

Antes de introduzirmos o conceito de Osmose reversa, é interessante primeiramente abordar o conceito da osmose propriamente dita.

A osmose é um processo natural que ocorre entre dois meios separados por uma membrana semipermeável com concentrações de solução diferentes. Sendo assim, uma diferença de pressão entre as paredes dessa membrana surge de modo que o fluido do meio menos concentrado atravessa a membrana impulsionado por este gradiente de pressão, denominado pressão osmótica. Quando o equilíbrio de concentração é atingido, a diferença de pressão existente entre os dois fluidos acaba e, por conseguinte, o processo natural de osmose também se encerra. Podemos observar o mecanismo da osmose x osmose reversa na Figura 2 abaixo:

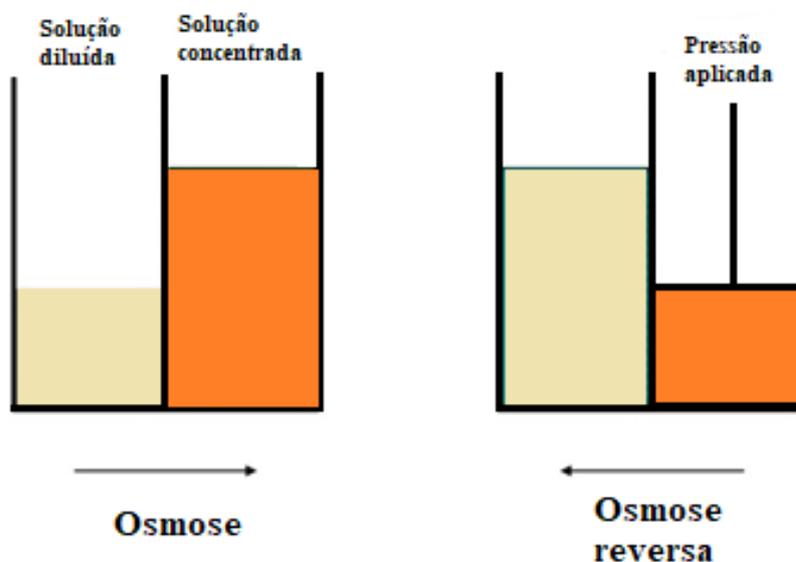


Figura 2 - Comparação entre os processos de osmose x osmose reversa

Por outro lado, quando este mesmo sistema possui uma pressão externa forçada, é possível reverter esse processo, de modo que o caminho de passagem de fluido ocorre da maneira inversa, ou seja, o fluido do meio mais concentrado passa para o meio

menos concentrado, através da membrana, deixando para trás os minerais e particulados dissolvidos nessa solução; este processo é denominado de osmose reversa (OR).

Segundo Oristanio et. al (2006, p. 9) [4]:

O sistema de osmose reversa é um processo que tem a capacidade de remover sólidos dissolvidos na água com eficiência altíssima. É possível obter de forma simples e contínua, água puríssima com salinidade próxima a água destilada. Os usos da osmose reversa no tratamento de água são diversos (referências):

- Dessalinização de água do mar: Tanto para consumo humano quanto para outros processos, a membrana de Osmose Reversa pode reduzir a concentração de cloreto de sódio de 35.000 mg/L para 350 mg/L.
- Irrigação: Um dos problemas da agricultura é a acumulação de sais no solo em função da irrigação com água de rios ou poços. A partir de certo patamar os sais tornam-se nocivos às plantações. A Osmose Reversa é capaz de remover este excesso de sais de forma economicamente viável.
- Alimentação de caldeiras: Caldeiras exigem água puríssima, pois a evaporação da água causa a incrustação da superfície dos tubos pelos sólidos presentes na mesma, reduzindo a transferência de calor, aumentando o consumo de combustível e o risco de explosões. A osmose reversa, assim como a troca iônica, tem sido o tratamento mais utilizado nestes casos.
- Produção de produtos químicos: Hospitais, conglomerados farmacêuticos e laboratórios utilizam o processo de Osmose Reversa para garantir a máxima pureza em seus produtos. Processos de hemodiálise são alimentados com água desmineralizada ou destilada [4].

3.2) Membranas

3.2.1) Descrição e funcionamento

As pesquisas sobre OR começaram na década de 50, na Universidade da Flórida. No início os estudos se utilizaram de uma membrana de acetato de celulose. Hoje em dia foram desenvolvidos diversos tipos de membrana, com materiais diferentes, cada

uma com certo grau de filtração e características próprias, a depender da necessidade de sua aplicação. As propriedades das membranas variam das mais diversas formas, como:

- Textura: densas ou porosas;
- Origem: naturais ou artificiais;
- Composição: orgânicas ou inorgânicas;
- Estrutura: homogêneas ou assimétricas;
- Forma: plana, tubular, espiral. [5]

As membranas semipermeáveis de osmose-reversa são compostas de três camadas, conforme demonstrado na Figura 3: a primeira é um suporte de poliéster, que garante a resistência mecânica do conjunto; a segunda é uma camada de polisulfona com característica de membrana de ultra filtração, cujo objetivo é funcionar como suporte para a fixação da terceira camada. A terceira camada é a membrana de osmose, uma película ultrafina de poliamida que estabelece a barreira de rejeição dos sais. Todo esse conjunto possui cerca de 0,1 mm e consistência e aparência de uma folha de papel. [4]

Em sistemas comerciais, as membranas de osmose reversa são dispostas na conformação em espiral (elementos). O arranjo em espiral oferece a vantagem e permitir agregar uma grande área de membranas em um pequeno volume e simplicidade de construção e instalação. Desta forma, duas folhas de membranas são unidas com uma tela em seu interior e suas laterais coladas. A partir daí, são enroladas ao redor de um tubo e separadas externamente por mais uma tela. Uma das telas forma o canal de coleta de permeado, a outra, o canal de alimentação. A Figura 3 a seguir mostra um esquema representativo das camadas da membrana:

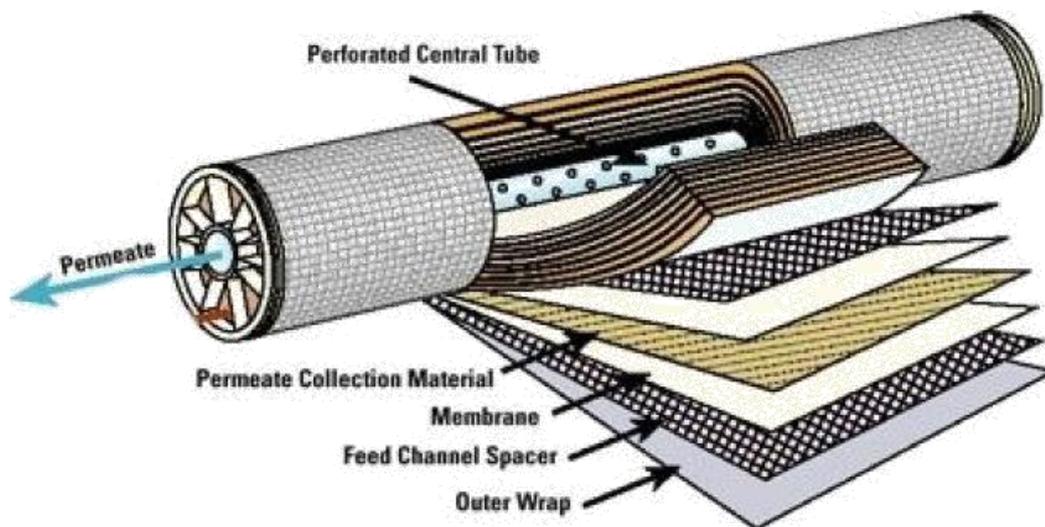


Figura 3 - Montagem de uma membrana de Osmose Reversa (Fonte: [6])

A taxa com a qual o fluido atravessa a membrana é proporcional ao quanto o diferencial de pressão exercida excede o diferencial da pressão osmótica natural. Grande parte da energia requerida no processo está associada à pressurização inicial da água de alimentação. Quanto maior o grau de salinidade da água, maior a quantidade de energia demandada para superar a pressão osmótica. [7]

Estas membranas são geralmente operadas através de fluxo tangencial. Nesta modalidade, a solução circula paralelamente à membrana. Parte da água é permeada (atravessa as membranas) e o restante, incluindo os sólidos remanescentes, são arrastados e levados para fora dos filtros criando uma segunda saída conhecida como concentrado ou rejeito.

Posteriormente, quando fizermos a avaliação sobre qual membrana será utilizada, utilizaremos como opções as membranas para uso industrial que, de maneira geral, são: 2521, 4021, 4611, 4040 e 8040 [8].

3.2.2) Incrustações na membrana

O depósito de impurezas nas membranas, também conhecido em inglês como “*fouling*”, é considerado como o acúmulo de material na superfície de membranas e nos espaçadores e muitas vezes pode se tornar irreversível.

Este acúmulo leva à deterioração física e química das membranas pela abrasão e oxidação das camadas poliméricas e o aumento das pressões em virtude da maior resistência da água em atravessar a membrana. Também é comum o aumento da passagem de sais uma vez que a concentração no interior dos módulos passa a ser maior. O depósito em membranas depende da qualidade da água de alimentação no sistema sendo, na grande maioria das vezes, ocasionado por sais insolúveis (fenômeno conhecido como *scaling*), substâncias coloidais e matéria orgânica. É interessante ressaltar que a formação destes depósitos é facilitada pela geometria dos elementos de membranas, onde a água de alimentação deve passar por estreitos canais formados pelos espaçadores de alimentação que agem como uma espécie de filtro.

Além desse tipo de incrustação, também existe o depósito de resíduos biológicos, como de microrganismos dentre outros. O depósito biológico (conhecido como *biofouling*, em inglês) é o tipo de depósito mais preocupante na operação de sistemas de osmose reversa alimentados com águas de superfície e de reuso. A água bruta contém diversos tipos de microrganismos, como bactérias, algas, fungos e vírus. A principal diferença entre os microrganismos e partículas não vivas é a habilidade dos microrganismos de se reproduzir e formar um biofilme na superfície da membrana. Ao entrar em um sistema de osmose reversa, os microrganismos encontram uma grande superfície de membrana onde o efeito da concentração-polarização proporciona uma maior concentração de nutrientes dissolvidos, formando um ambiente adequado para a formação do biofilme.

O depósito biológico em membranas reduz drasticamente o desempenho das membranas de osmose, causando o aumento da pressão diferencial no canal de alimentação (diferença de pressão no canal de alimentação entre a entrada e a saída do elemento de membrana). Em casos extremos, o entupimento do canal de alimentação por biofilmes microbianos pode causar o colapso telescópico e danos mecânicos nos elementos de membrana, além da redução do fluxo nas membranas. Este tipo de

depósito pode ocorrer também do lado do permeado da membrana, contaminando a água tratada. A formação do biofilme ocorre em três etapas: adesão, crescimento e desprendimento. Este processo pode ser observado no esquema da Figura 4 a seguir:

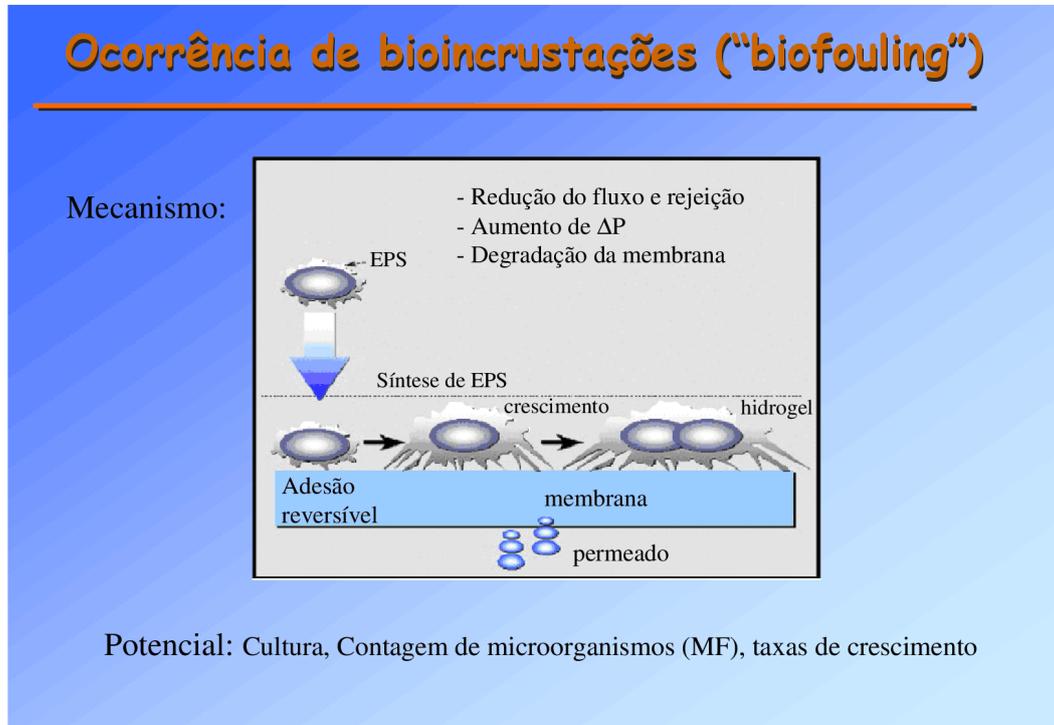


Figura 4 - Etapas de desenvolvimento do biofilme (Fonte: [9])

3.3) Pré-tratamento

Consoante aos motivos listados anteriormente, as plantas de osmose reversa precisam prever e contar com um sistema de pré-filtragem da água que será dessalinizada. Sendo assim, o pré-tratamento atua como inibidor do potencial de incrustação, aumentando a vida da membrana da osmose inversa e, conseqüentemente, a eficiência do processo, minimizando o *fouling* na superfície da membrana. [10]

Sendo assim, este estudo também tem por objetivo discutir e avaliar a viabilidade da pré-filtragem associada às necessidades dos objetivos iniciais. Alguns pontos importantes sobre a maneira de implementar esse sistema de filtragem na planta.

3.3.1) Processos de Filtragem

A filtragem é o nome genérico dado a todos os processos de filtração. Dependendo da espessura dos poros usados no processo, esta tecnologia é categorizada como ultra filtração, osmose reversa, osmose inversa e nano filtração. Abaixo de 40 μm as partículas não podem mais serem vistas a olho nu. A filtragem pode ser classificada como: [5]

- Micro filtração: aquela que retém partículas de dimensão entre 0,1 e 1 μm ;
- Ultra filtração: retenção de partículas de 0,01 a 0,1 μm ;
- Nano filtração: retenção de partículas de 0,001 a 0,1 μm ;
- Osmose reversa: retenção de partículas de dimensão inferior a 0,001 μm .

Usualmente, os indicadores de partículas suspensas utilizadas na indústria de OR são turbidez e Silt (Índice de densidade, SDI). Os limites máximos são: turbidez de 1 NTU e SDI de 4. [11] Um sistema operando continuamente com turbidez ou SDI em valores próximos aos limites desses valores indicados, pode resultar em incrustações significativas na membrana. Dessa forma, para operação confiável e a longo prazo da unidade de OR, os valores médios de turbidez e SDI na água de alimentação não devem exceder 0,5 NTU e 2,5 unidades SDI, respectivamente [11].

A depender da qualidade da água a ser tratada, diversos tipos de tratamentos podem ser aplicados. Dessa forma, abaixo segue uma lista destes tratamentos que podem ser utilizados: [11]

- Remoção de partículas grandes utilizando um filtro grosso;
- Desinfecção da água através da cloração;
- Clarificação com ou sem uso de floculação;
- Clarificação e redução de dureza usando tratamento com cal;
- Filtração média;
- Redução da alcalinidade através do controle de PH;
- Adição de inibidor de incrustações;
- Redução de cloro livre usando bissulfito de sódio ou filtros de carvão ativado;
- Esterilização da água usando radiação UV;
- Remoção final de partículas suspensas usando filtros de cartucho.

3.3.2) Métodos de pré-tratamento mais utilizados

3.3.2.1) Convencional

Inicialmente é utilizado um coagulante na água a ser tratada, posteriormente a floculação, sedimentação das partículas maiores e, por fim, a passagem por filtros de areia, antracito ou granada, onde as partículas menores são removidas. Este é um método muito utilizado em diversos lugares para o tratamento de água. Este método demonstra eficiência na remoção de matéria coloidal, contudo pouco eficiente na remoção de bactérias e compostos orgânicos ou inorgânicos dissolvidos. [4]

Não obstante, a necessidade de áreas de instalação maiores em relação a sistemas mais modernos, altos custos de operação e a baixa eficiência na remoção de partículas dissolvidas, microrganismos e carbono orgânico são desvantagens apresentadas nesse processo [12]. A utilização de coagulantes como sulfato de alumínio ou cloreto férrico gera lodo, um passivo ambiental que deve ser tratado e disposto adequadamente. Em um de seus estudos, realizado em 2004, *a American Water Works Association* [13] considera insuficiente o uso exclusivo de pré-tratamento, pelo método convencional, em sistemas de osmose reversa. [4]

3.3.2.2) Microfiltração e ultrafiltração

Sistemas de microfiltração e ultrafiltração têm se demonstrado as opções mais modernas no pré-tratamento para sistemas de osmose reversa. Possuem uma alta eficiência na remoção de sólidos em suspensão e colóides [14] além de ocuparem pouco espaço e permitirem a operação automatizada. Os sistemas de micro e ultrafiltração também são baseados em membranas, assim como a Osmose Reversa, apresentam diversas opções de configurações, desde o formato de placas com operação por sucção até o uso de fibras ocas em vasos pressurizados. Todavia, nem a micro nem a ultrafiltração são capazes de separar íons. As desvantagens nos sistemas de micro e ultrafiltração ficam por conta de seus elevados custos de implantação e operação, além

da remoção insuficiente dos causadores de depósito biológico nas membranas. Neste tipo de pré-tratamento, há também a geração de rejeito, que requer descarte adequado.

3.3.3.3) Tratamento Biológico

O tratamento convencional ou por membranas de micro ou ultrafiltração não têm a capacidade de remover o material biodisponível presente na água de alimentação, principal responsável pela ocorrência do depósito biológico na superfície das membranas de osmose reversa [15]. Este é o principal diferencial do tratamento biológico, que atua justamente na remoção dos constituintes orgânicos da água de alimentação, mesmo na presença de baixíssimas taxas de carbono orgânico total (TOC).

Os sistemas biológicos mais utilizados no pré-tratamento de sistemas de osmose reversa são os biorreatores de membrana (MBR) principalmente em sistemas alimentados com água de reuso.

Estes sistemas apresentam altas taxas de remoção de: TOC, demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), além da degradação biológica de compostos farmacêuticos [16]. A principal desvantagem destes sistemas é a ineficácia na remoção de material particulado, de sais inorgânicos e de compostos dissolvidos não biodegradáveis, além da alta sensibilidade dos reatores às variações de pH, oxigênio dissolvido (OD), temperatura e fontes de carbono, que influenciam no crescimento e manutenção dos microrganismos responsáveis pela degradação biológica.

3.3.3.4) Condicionamento químico

O condicionamento químico, geralmente utilizado em combinação ou como parte dos sistemas de pré-tratamento citados anteriormente, é uma prática comum no controle dos agentes causadores de depósitos em membranas. Dentre os compostos químicos mais utilizados estão os anti-incrustantes, cujo objetivo é reduzir a colmatação por deposição de sulfatos e carbonatos. Os anti-incrustantes são substâncias químicas, do grupo dos fosfonatos, dosadas na alimentação da osmose reversa em concentrações

muito pequenas (da ordem de 3ppm). Apresentam como característica negativa o potencial incremento do depósito biológico por possuírem em sua composição, nutrientes para o crescimento bacteriano [17]. Outros compostos amplamente utilizados são oxidantes à base de cloro e outros agentes como os peróxidos. Estes produtos permitem a remoção de diversos componentes da água de alimentação, como a matéria orgânica, metais oxidáveis e a desinfecção para controle do fouling biológico, porém, ao mesmo tempo, são prejudiciais aos sistemas de osmose reversa pois agredem a camada polimérica das membranas, devendo ser removidos antes que cheguem à osmose reversa [18].

O condicionamento químico é um processo caro. Além de exigir cuidados com o controle contínuo da dosagem, uma vez que as características da água não são constantes ao longo do tempo, são necessários serviços laboratoriais e, principalmente, cuidados com a segurança dos trabalhadores, armazenamento e transporte. Agentes oxidantes como o cloro e peróxidos são considerados substâncias perigosas, oferecem tanto riscos ocupacionais quanto riscos ambientais.

Dadas as possibilidades apresentadas anteriormente para o pré-tratamento da água, podemos observar que as possibilidades são numerosas e, devido a isso, que a escolha deve ser norteada mediante as necessidades do projeto. Certamente do ponto de vista de preservação da membrana osmótica, seria extremamente interessante que o maior número de processos fossem feitos até que fosse obtida uma solução livre de qualquer tipo de impureza. Não obstante, esse estudo visa a escolha de um projeto onde o custo benefício X eficiência seja otimizado. Além da preocupação financeira, é interessante que a área utilizada para a implementação de todo o sistema de osmose reversa seja a menor possível de modo a causar o mínimo de impacto no ambiente no qual ele seja instalado.

Dessa forma, segundo dados obtidos por um estudo realizado por Daniela Romão de Oliveira sobre o pré tratamento para o sistema de osmose inversa, o emprego da microfiltração é tecnicamente viável quando há muito material em suspensão. Sendo assim, a necessidade de filtração para o projeto é suprida, pois o método mencionado permite uma filtração relativamente refinada, o que se adequa à demanda em questão. [19]

É fato que quanto maior o grau de filtração obtido na pré filtração, maior a vida das membranas osmóticas e menor seria o custo de manutenção. Além disso, há uma preocupação associada ao poder de sucção do dispositivo. É fundamental avaliarmos a potência disponível oferecida pela boia em interação com as ondas de modo que ela seja grande suficiente para pré filtrar e ainda possuir potencia líquida para realização do processo da osmose reversa propriamente dito.

4. Indústria do Sal

4.1) Salina

Uma salina é uma área de produção de sal marinho pela evaporação da água do mar ou de lagos de água salgada. O sal marinho formado na salina é uma rocha sedimentar química, que tem origem na precipitação, quando esta sofre evaporação. As salinas, embora sejam um habitat artificial elaborado pelo Homem há milhares de anos, constituem verdadeiros santuários de biodiversidade, permitindo um equilíbrio notável entre o aproveitamento econômico de um recurso e a conservação de valores naturais.

Até chegar ao sal grosso, a produção passa por 4 etapas:

- A água fica num grande reservatório de onde é bombeada dos moinhos para os decantadores. Ali passa pela primeira fase de evaporação para sair do grau de salinidade de 5 para 15.

- É desviada para os evaporadores que são tanques menos profundos.

- Quando a água atinge os graus de 17 a 19 de salinidade, surge o primeiro subproduto, o sulfato de cálcio, que é vendido para a indústria de cimento para a transformação em gesso.

- A água restante vai então para os cristalizadores, que são os tanques bem rasos e retangulares, símbolo das salinas. Ali os cristais de sal grosso começam a se formar, quando a água alcança o grau 25 de salinidade [20].

Quando a solução atinge esse grau de salinidade, ocorre o processo de cristalização. Um tópico é dedicado a explicar melhor sobre esse processo logo abaixo. Após a formação desses cristais, a água é drenada e bombeada novamente para o mar e o sal precipitado nos tanques de evaporação permanece.

A próxima etapa da produção consiste na lavagem desse sal, com uma água salgada para que o sal cristalizado não se dissolva na água e apenas as impurezas indesejadas sejam removidas. Nesta lavagem, impurezas insolúveis como areias, restos vegetais, cálcio e magnésio são eliminados e é obtido um sal com aproximadamente 99,7% de pureza.

4.1.1) Cristalização

A Cristalização é uma operação de separação onde, partindo de uma mistura líquida se obtêm cristais de um dos componentes da mistura, com 100% de pureza. Na cristalização criam-se as condições termodinâmicas que levam as moléculas a aproximarem-se e a agruparem-se em estruturas altamente organizadas, os Cristais. Por vezes, as condições operatórias não permitem obter cristais 100% puros verificando-se a existência, nos cristais, de inclusões (impurezas) de moléculas que também têm grande afinidade para o soluto [21].

A forma de atingir a sobressaturação num cristalizador, partindo de uma solução saturada do componente a separar, pode ser diversa:

- Arrefecimento da solução saturada;
- Evaporação do diluente da solução saturada;
- Adição de um segundo solvente (anti-solvente) que reduz a solubilidade do soluto (drowning);
- Promoção de uma reação química que leva à precipitação do soluto;
- Alteração do pH do meio.

O mais comum a nível industrial é que a cristalização ocorra devido ao arrefecimento ou evaporação da solução mãe. Nestes casos a cristalização acontece, muitas vezes, nas paredes do cristalizador, em particular na superfície dos permutadores, dado ser aí que a sobressaturação surge primeiro [21].

4.2) Indústria salineira no Brasil

A indústria salineira do Brasil é uma atividade secular. O Rio Grande do Norte concentra a maior parte da produção de sal do país. A sua área de atuação é composta por 35 salinas situadas no semiárido brasileiro, nos municípios de Mossoró, Grossos, Areia Branca, Macau, Porto do Mangue, Guamaré e Galinhos, denominada região da

Costa Branca. Por ano, de acordo com a Siesal/RN, o Estado do Rio Grande do Norte produz aproximadamente 6 milhões de toneladas de sal marinho. O Estado é responsável por 95% da produção nacional, empregando aproximadamente 60 mil pessoas em 30 empresas.

É notável a importância socioeconômica da indústria do sal no Brasil, especialmente no estado do RN. Em contrapartida, há muito questionamento sobre os impactos ambientais causados pela atividade salineira, principalmente pelo fato de que as salinas demandam grandes áreas para sua atividade.

Para uma salina aumentar sua produtividade existem basicamente duas maneiras de se fazer isto: a primeira consiste em expandir sua área, aumentando o número de represas de sal, e, por conseguinte, sua produção; a outra maneira é conseguir reduzir o tempo demandado para que a evaporação ocorra nessas represas de modo que demande menos tempo para ocorrer a evaporação até o grau de salinidade desejado. Não obstante, a primeira hipótese sugerida esbarra em restrições socioambientais, o que de fato é algo relevante e suficiente para que esta hipótese seja praticamente descartada. Por outro lado, trabalhar com a segunda hipótese pareceu algo plausível do ponto de vista econômico, dado que durante a osmose reversa, o produto salobro (altamente concentrado de sal) que usualmente seria descartado por plantas de osmose reversa, seria de interesse econômico das salinas. Portanto, este estudo é motivado pela hipótese de se agregar valor comercial a um produto que até então é tratado como dejetos e descartado no mar. Além disso, contempla a possibilidade de se efetivar a substituição de um processo que até então demanda enorme quantidade de energia elétrica (consoante ao citado, aproximadamente 50% do custo operacional da planta) por um método 100% limpo.

Para tanto, nosso estudo busca viabilizar uma maneira de aperfeiçoar o processo de produção na salina. Conforme citado anteriormente, o método utilizado pelas salinas para a obtenção do sal é através da evaporação, que em média duram 6 meses até que a concentração de salinidade na água esteja no valor ideal para que ocorra o processo de cristalização do sal. Sendo assim, o produto salobro gerado pela osmose reversa está numa concentração de sal muito acima da água do mar o que reduz o tempo necessário para que a solução atinja o grau de salinidade ideal por evaporação, otimizando a produtividade da salina.

5. Estudo de caso

5.1) Município de Galinhos

Nosso estudo está focado para a implementação no município de Galinhos RN. Este município possui aproximadamente 340 Km² e uma população de 2786 habitantes, segundo estimativa do IBGE em 2019. Por se tratar de uma região com muitas salinas em seu entorno, nosso objetivo se encaixa perfeitamente com a região, haja vista que parte da água dessalinizada pode ser encaminhada para o município de Galinhos, cuja demanda de água é relativamente pequena, e a parte salobra encaminhada para as salinas em suas redondezas, que é o foco deste estudo.

Abaixo, na Figura 5, temos o município de Galinhos em destaque dentro do estado do Rio Grande do Norte.



Figura 5 - Mapa de Galinhos RN (Fonte: [22])

Apesar do nosso estudo não estar voltado para o abastecimento hídrico da região, é interessante introduzirmos alguns fatos socioeconômicos do município em questão, haja vista que se trata de uma população carente, com salário médio de aproximadamente 1,7 salários mínimos dentre os trabalhadores formais, os quais representam apenas 27,6% da população regional. [23]

O panorama se demonstra mais crítico quando observamos o percentual de esgotamento sanitário adequado, que está avaliado em 0,9%, se tornando um dos mais

precários dentre os 5570 municípios brasileiros, ocupando a 5440ª posição no ranking. [23]

Dessa forma observamos que o estudo em questão pode agregar bastante à região, de forma que todo produto advindo da osmose reversa do nosso sistema será aproveitado; parte para as salinas (produto salobro), outra parte para abastecimento hídrico da região. Ainda que a qualidade da água produzida não fosse própria para consumo humano, ela poderia ser distribuída para outras finalidades como uso doméstico, irrigação, uso sanitário, dentre outros, de modo que os custos municipais para uso de água possam ser reduzidos e redistribuídos para outras necessidades da população local.

A demanda hídrica no Nordeste, em especial no interior da região, não é nenhuma novidade. Devido ao clima semiárido local, as condições pluviométricas regionais não favorecem o abastecimento de água da população que, frequentemente, necessitam andar dezenas de quilômetros diariamente para obtenção de água. Todavia, o Governo criou há 20 anos a Operação Carro-Pipa - gerida e operacionalizada pelo Exército Brasileiro - atendendo aproximadamente 1.7 milhão de pessoas em 500 municípios diferentes da região Nordeste e Norte de Minas Gerais [24]. Sendo assim, a água dessalinizada advinda do processo da osmose reversa poderá contar com a Operação Carro Pipa para fazer esta distribuição de água na região em questão.

5.2) Estudo das características das ondas locais

A estimativa da capacidade energética da região necessita de alguns parâmetros das ondas locais para que possa ser calculado seu potencial. Desta forma, para a definição dos dados do mar do município de Galinhos - RN, utilizaremos como referência o site GWS - Global Wave Statistics [25], onde o globo terrestre é subdividido em pequenos retângulos (Figura 6) com informações de ondas e ventos médios das regiões que possuem semelhança climatológica. Observa-se que tanto o sítio de Pecém como o sítio da região de Galinhos - RN, encontram-se na área 66. Por conseguinte, conclui-se que, por estarem influenciadas pelos mesmos fenômenos

climatológicos, há similaridade entre os dois mares, tornando possível a utilização dos registros apresentados por Beserra em relação ao sitio de Pecém [26].

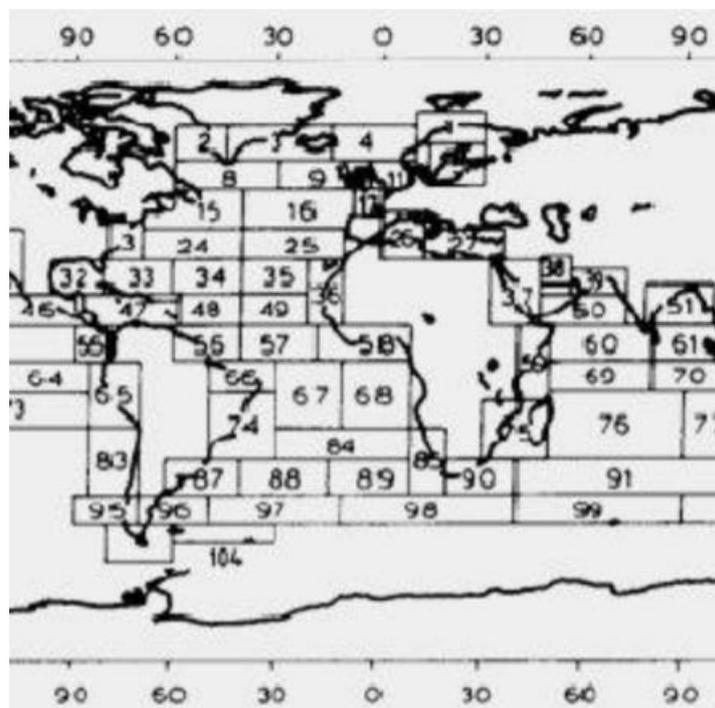


Figura 6 - Ilustração das regiões definidas pelo GWS (Fonte: [25])

Por outro lado, vale ressaltar que para o funcionamento do projeto em si, é necessário que medições sejam feitas no local de instalação do sistema. Desta forma, por utilizarmos dados estatísticos de uma região similar ao invés da região abordada, adotaremos como padrão assumir premissas relativamente conservadoras do ponto de vista das alturas e períodos de onda. Sendo assim, os resultados obtidos no estudo em questão sustentam uma garantia confiável de capacidade energética local.

Segundo o gráfico da Figura 7, explicitado a seguir, observamos que mais de 95% das ondas estão dentro de um limite de até 2 m de altura. Também consideraremos uma onda de altura de 1,2 m, pois está entre as alturas de onda mais frequentes do local e, além disso, com o sistema projetado para trabalhar nessa altura de onda, todas as ondas maiores que esse valor estarão suprindo a demanda.

Consoante ao dissertado acima, observamos no gráfico da Figura 8 as frequências dos períodos de onda. Para a escolha de um período de onda, vale frisar que,

do ponto de vista energético, o mais interessante para o projeto seria que o local tivesse o menor período de onda possível, de modo que ao longo de um determinado período de tempo teríamos mais ondas passando pelo dispositivo, aumentando a produtividade da planta.

Desta forma, será adotado o valor de 9 segundos para o período de onda como parâmetro; assim, garante-se que o sistema estará trabalhando em 70% do tempo de operação nas condições produtivas em valor igual ou acima do valor considerado – o que do ponto de vista de produtividade não possui impactos negativos.

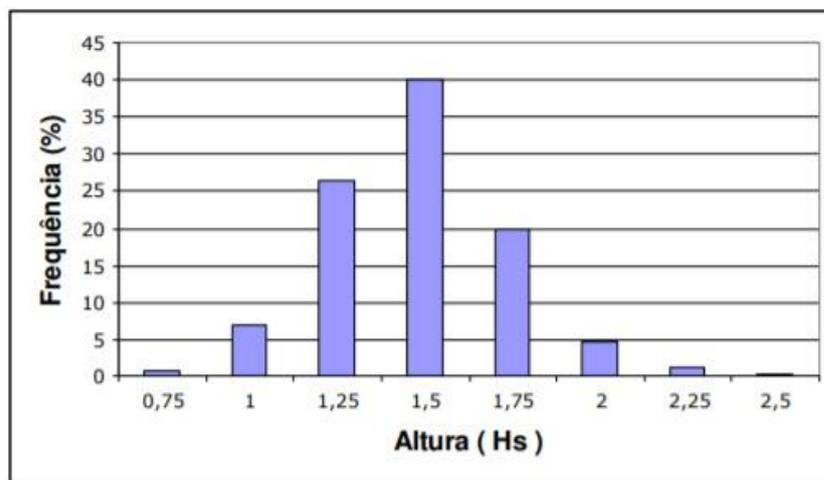


Figura 7 - Distribuição de frequência altura das ondas (Fonte: [26])

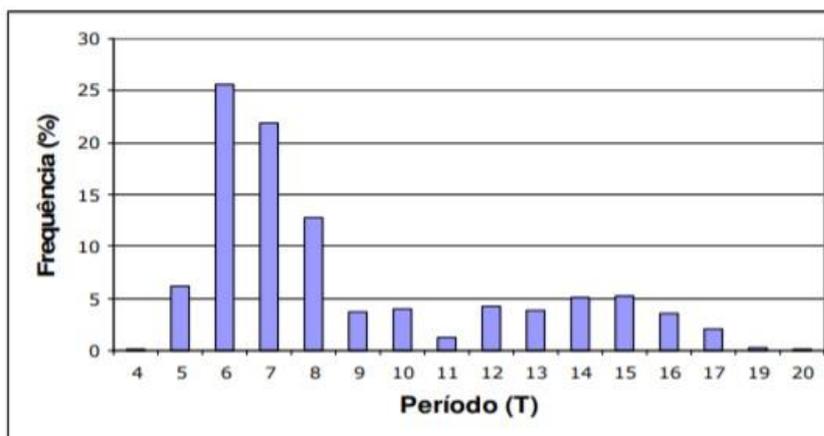


Figura 8 - Distribuição de frequência dos períodos de onda (Fonte: [26])

5.3) Layout da planta

O sistema completo de uma planta de Osmose Reversa possui basicamente 5 sistemas: [27]

1. Pré filtro de sedimentos de 5 microns: para reter resíduos sólidos maiores e retirar substâncias orgânicas até 5 micras.
2. Filtro de Carvão Block: retém cloro e outros elementos, eliminando odores, cor e gosto (deixando a água realmente pura: inodora, incolor e insípida).
3. Coluna de polimento: responsável por reduzir a condutividade.
4. Membrana de Osmose: responsável pelo processo de osmose reversa propriamente dito, cuja função é separar os sais dissolvidos na água da água em si.
5. Lâmpada UV para purificação de água na saída do equipamento.
6. Bomba de alta pressão: responsável por fornecer energia de pressão necessária para vencer a pressão osmótica do fluido.

Consoante vimos acima e ao comentado no capítulo 3, no processo de osmose reversa é recomendável que seja feito uma pré filtração da água, de modo que o máximo de impurezas seja retirado para que o processo de fouling da membrana osmótica seja o mínimo possível, diminuindo a manutenção do equipamento e, por conseguinte, o custo operacional da planta. Como o objetivo do nosso estudo não é produzir água potável, grande parte do sistema mencionado acima se torna desnecessária e, portanto, não faria sentido investir dinheiro, tempo e espaço para montar uma planta de osmose reversa completa.

Dessa forma, dos seis componentes citados dentro da planta completa, nosso caso demandaria basicamente entre dois a três tipos de elementos: o filtro, a bomba, e a membrana osmótica. Também podemos contemplar a hipótese simplificadora de não utilizar o filtro no sistema, o que acarretaria um maior processo de fouling da membrana osmótica, consoante ao dissertado no capítulo 3.2.2 e, conseqüentemente, maior custo de manutenção pela necessidade de troca da membrana com maior frequência.

Este estudo tem como foco entender a viabilidade energética do dispositivo PPE para fornecer a energia de pressão demandada para realização do processo de osmose

reversa, de forma que focaremos inicialmente em estabelecer uma planta mais simplória, sem contemplar a necessidade de uma pré filtragem (Figura 11) para o processo de osmose reversa. Não obstante, fica como sugestão para um estudo futuro a análise sobre a inserção de um filtro na planta de osmose reversa, contemplando a possibilidade de utilizar o mesmo dispositivo PPE para fazer a pré filtragem e a osmose reversa concomitantemente, ou a possibilidade de uma estrutura em série no processo, de modo que um dispositivo seja dedicado ao sistema de pré filtragem e outro para a osmose reversa. A seguir na Figura 9, Figura 10 e Figura 11 seguem três esquemas de plantas possíveis das possibilidades comentadas acima:

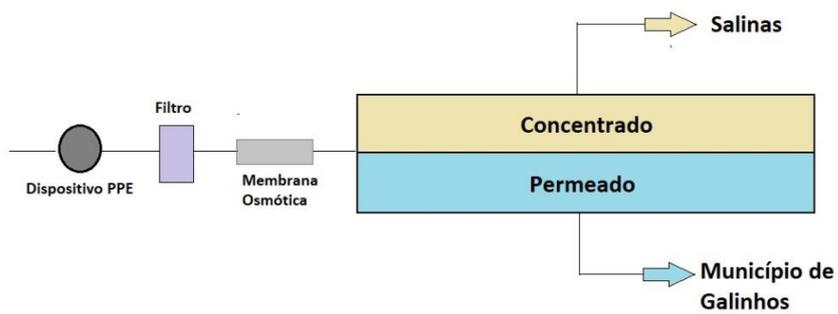


Figura 9- Sistema com pré filtragem (Bomba única)

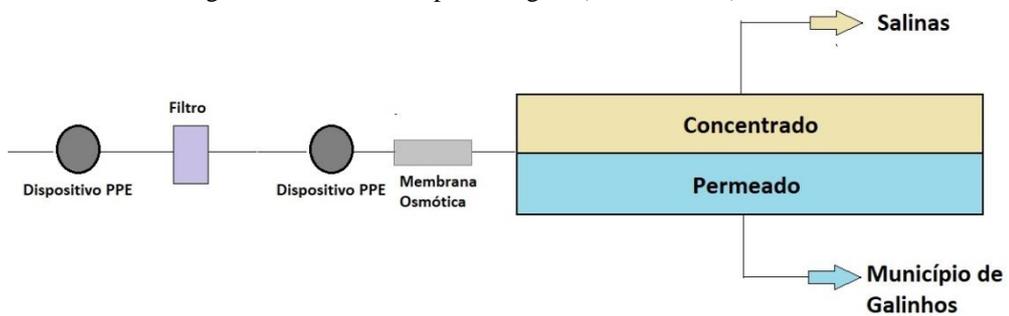


Figura 10 - Sistema com pré filtragem (arranjo em série)

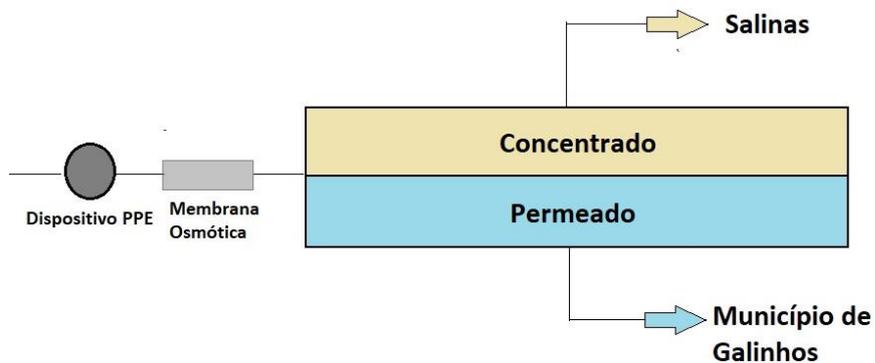


Figura 11 - Sistema simplificado (sem pré filtragem)

6. Dimensionamento de capacidade da planta

6.1) Cálculo da Pressão Osmótica

Usualmente, para dimensionamento de uma planta de osmose reversa, parte-se de uma determinada demanda volumétrica de água para que, a partir desta demanda, o número de membranas seja calculado assim como a potência demandada da bomba, levando-se em conta a perda de carga envolvida no processo, o que depende de alguns fatores geométricos específicos de cada planta.

Contudo, conforme mencionamos acima, nosso objetivo é entender se o potencial energético de pressão do dispositivo PPE é capaz de fornecer pressão suficiente para a planta de osmose reversa de modo que, futuramente, a partir destes dados, possa ser feito um estudo para atender uma demanda hídrica específica, seja do produto filtrado ou do produto salobro.

Conforme comentamos no capítulo 3, para que a osmose reversa aconteça, a pressão exercida pela bomba deve superar a pressão osmótica. Em termos teóricos, a pressão osmótica do fluido pode ser calculada a partir da concentração de sais dissolvidos na água, cujo valor é obtido experimentalmente e aplicado na Equação 1:

$$P_{osm} = 1,19 (T + 273) * \Sigma(Wi) \quad [28] \quad (1)$$

onde P_{osm} é a pressão osmótica (psi); T é a temperatura do fluido em °C e $\Sigma(Wi)$ é o somatório da concentração molal dos constituintes da solução. [28]

Apesar da quantidade total de sais dissolvidos na água do mar variar entre diferentes regiões geográficas e profundidades na coluna de água, esses sais mantêm suas proporções aproximadamente constantes em todos os oceanos. A constância relativa das proporções dos íons dissolvidos na água do mar é conhecida como Princípio

de Marcet ou Lei das Proporções Constantes. De acordo com Millero (2006), as proporções entre os principais íons dissolvidos na água do mar são as seguintes: [29]

Tabela 1 - Concentração de sais na água do mar (Fonte: [29])

| Íon | Símbolo | Concentração (g/kg) | Proporção (%) |
|--------------|---------------------------------|---------------------|----------------|
| Cloreto | Cl ⁻ | 19,3529 | 55,056 |
| Sódio | Na ⁺ | 10,7838 | 30,678 |
| Sulfato | SO ₄ ²⁻ | 2,7124 | 7,716 |
| Magnésio | Mg ²⁺ | 1,2837 | 3,652 |
| Cálcio | Ca ²⁺ | 0,4121 | 1,172 |
| Potássio | K ⁺ | 0,3991 | 1,135 |
| Bicarbonato | HCO ₃ ⁻ | 0,1070 | 0,304 |
| Brometo | Br ⁻ | 0,0672 | 0,191 |
| Carbonato | CO ₃ ²⁻ | 0,0161 | 0,046 |
| Estrôncio | Sr ²⁺ | 0,0079 | 0,022 |
| Borato | B(OH) ₄ ⁻ | 0,0079 | 0,022 |
| Fluoreto | F ⁻ | 0,0013 | 0,004 |
| Total | | 35,1514 | 100,000 |

Desta forma, a partir da conversão dos dados da Tabela 1 para composição molal, quando aplicados na Equação 1, a pressão osmótica da água do mar é de aproximadamente 440,878 psi, o que corresponde a aproximadamente 30 atm.

O valor demonstrado acima é apenas uma referência de como pode ser calculado o valor da pressão osmótica de uma solução. Não obstante, para o sistema que estamos trabalhando, a faixa de operação das membranas de osmose reversa disponíveis no mercado trabalham com o valor de operação de aproximadamente 40 atm [30]. Sendo assim, para que o aproveitamento energético operacional da membrana seja o mais eficiente possível, o parâmetro que será adotado no estudo em questão se adequará as recomendações do fabricante da membrana selecionada no capítulo 7.

Os dados apresentados neste estudo são embasados em teorias que, para aplicação em um projeto real, demandariam vários experimentos feitos em laboratório para compreender e mensurar as variáveis envolvidas. Para isso, o cálculo das perdas de carga envolvidas no sistema depende de outras variáveis que ainda não estão definidas como: a geometria dos tubos, número de conectores (curvas, emendas, válvulas, etc), geometria de entrada, rugosidade interna, material, dentre outras. Para tanto, utilizaremos o valor de 40 atm como uma pressão parâmetro para basear nossos cálculos, de modo que este valor contemple uma margem de segurança considerável para as possíveis perdas de carga mencionadas.

6.3) Bombeamento do Fluido

Após entendermos como o movimento vertical será realizado pelo sistema (dissertado no tópico 2.2), é importante que façamos um breve comentário sobre o mecanismo de bombeamento da água do mar que utilizaremos neste estudo. Consoante ao comentado anteriormente, o processo de osmose reversa demanda uma pressão muito grande para acontecer, de modo que é necessária a escolha de um dispositivo capaz de fornecer energia suficiente para o sistema.

Usualmente, as plantas de Osmose reversa contam com um sistema de bombas hidráulicas para fornecer energia ao fluido no processo. Essas bombas são alimentadas por energia elétrica, e como demandam uma quantidade de energia muito grande, encarecem o processo tornando o sistema pouco aplicável em larga escala.

Por outro lado, o movimento linear do sistema estudado nos possibilita pensar a possibilidade de instalarmos um dispositivo semelhante a um cilindro hidráulico que tem como finalidade transformar a força aplicada no eixo do pistão em energia de pressão no fluido dentro da cavidade.

6.3.1) Dispositivo de bombeamento de água

A ideia do design e mecanismos apresentados a seguir é inspirada nas bombas alternativas de pistão, amplamente utilizadas no mercado, juntamente com o funcionamento de um cilindro hidráulico.

Inicialmente, a ideia de trabalhar com bombas hidráulicas já disponíveis no mercado parecia viável. Todavia, as bombas comercializadas foram projetadas para trabalhar com força motriz elétrica, de modo que a adaptação para o estudo em questão ficaria muito trabalhoso e talvez pouco eficiente. Devido a relativa simplicidade do mecanismo utilizado, foi desenvolvido um conceito do dispositivo para este caso em específico, de modo que possa ser otimizada a energia transferida pelo Flutuador.

A princípio, a intenção é projetar um mecanismo que trabalhe semelhante ao funcionamento de cilindros hidráulicos. Na Figura 12 a seguir, podemos observar um esboço do dispositivo mencionado:

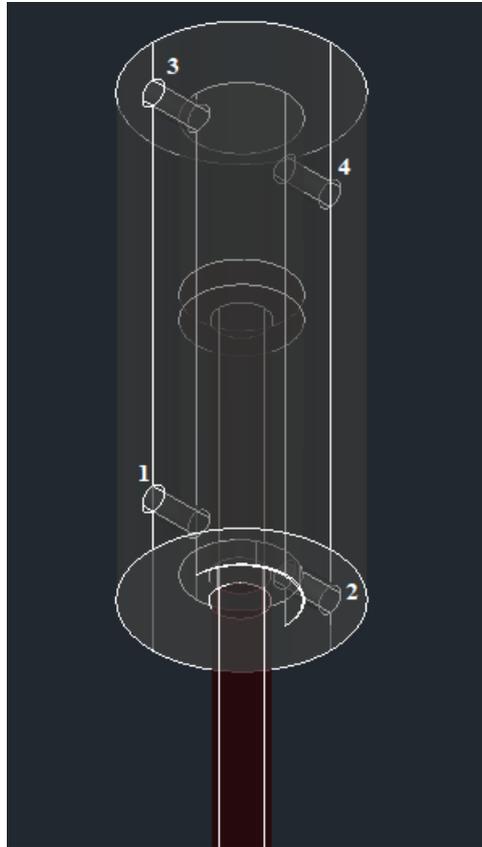


Figura 12 - Dispositivo conversor de energia em funcionamento (Fonte: projeto autoral)

A cavidade do pistão tem um determinado volume, calculado pelo produto entre a área da seção transversal ao eixo e seu deslocamento vertical. Pelo Princípio do Deslocamento de Arquimedes, sabemos que um corpo mergulhado num líquido desloca uma quantidade de líquido igual ao volume imerso [31].

No estudo em questão, a força motriz que deslocará o pistão será advinda das forças resultantes no flutuador do dispositivo PPE; quando uma onda passar pelo dispositivo, o mesmo terá uma resultante vertical para cima, haja vista que as guias da estrutura restringem o movimento do flutuador em um grau de liberdade; já a força da gravidade atuando sobre o Flutuador é responsável pelo movimento descendente.

Sendo assim, durante o movimento ascendente, o pistão fará deslocamento positivo na bomba, fornecendo energia cinética e potencial ao fluido pelo duto de

exaustão (saída 3, Figura 12) enquanto o duto de admissão de água salgada, representado na Figura 12 pelo número 4, estará bloqueado por um válvula de controle. Concomitantemente, pelo vácuo gerado na cavidade oposta do cilindro, ar será succionado pelas entradas 1 e 2, ilustradas na Figura 12, para compensar o deslocamento do pistão.

De forma semelhante, no movimento descendente, o duto 3 estará bloqueado enquanto o duto 4 admite água salgada; enquanto isso, os dutos 1 e 2 ficarão livres para exaurir o ar existente na cavidade oposta do pistão.

No próximo tópico (6.4) faremos a introdução das forças resultantes no flutuador com base na altura média, período e tempo de onda da região estudada. Assim, será possível fazermos uma análise da viabilidade potencial da planta para suprir a demanda energética necessária para realização da osmose reversa.

Os valores, cálculos e gráficos foram efetuados por Thiago Evangelista do Carmo, que faz um estudo com o mesmo dispositivo sob as mesmas condições de contorno; não obstante, possui um viés diferente, de modo que aproveitaremos os valores encontrados por este para darmos sequência ao nosso trabalho.

6.3.2) Configuração do Dispositivo PPE

Conforme introduzido previamente, o dispositivo PPE faz parte de um amplo estudo para aproveitamento da energia das ondas marinhas. Desta forma, nos primeiros estudos, o projeto foi concebido para que o eixo acoplado ao Flutuador ficasse acima dele, conforme demonstrado na Figura 1. Contudo, fizemos alguns questionamentos sobre qual configuração seria mais eficiente. Deste questionamento levantamos duas hipóteses:

- 1- Manter a configuração inicial com o eixo voltado para cima, de modo que todo o sistema de conversão ficasse acima do nível da água, conforme Figura 1.

- 2- Utilizar o eixo voltado para a parte inferior do Flutuador, de modo que o sistema ficaria submerso, com exceção do Flutuador que está apenas parcialmente dentro da água, consoante ilustrado na Figura 13.

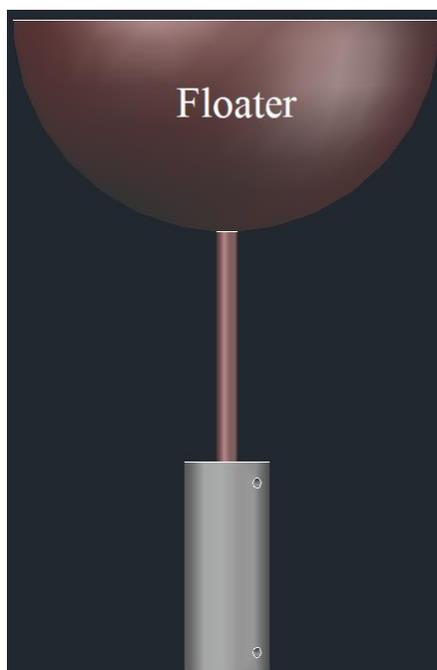


Figura 13 - Configuração 2

Conforme comentamos no Capítulo 2.2, nosso dispositivo será instalado numa zona *Nearshore*, depois da chamada “zona de surf”, o que, neste local específico, corresponde a 3 km da costa. Nessa distância, a profundidade média é de 12 m. Dessa forma, nossa limitação para movimento vertical do mecanismo é menor que 12 m, o que limitaria muito a efetividade do projeto na Configuração 2, haja em vista que existe uma variação de maré, o que pode aumentar mas, em contrapartida, diminuir essa profundidade. Desta forma, devido a essa limitação, nossa escolha foi manter a Configuração 1, adotada nos projetos anteriores.

Antes de prosseguirmos é importante frisar que o projeto do eixo que liga o flutuador ao pistão ainda necessita ser validado em relação aos esforços sofridos. Análise de esforços no eixo se fazem necessárias para que as dimensões que serão levadas em conta para efeito de cálculo façam sentido do ponto de vista da segurança e funcionamento apropriado do dispositivo. Não obstante, o foco deste estudo é entender

a viabilidade energética do aproveitamento das ondas para o processo de osmose reversa, de modo que faremos a abstração desses cálculos estruturais e deixar como sugestão para estudos futuros.

6.3.3) Dimensionamento do pistão

Para que possamos selecionar o tipo de membrana que utilizaremos no sistema, precisamos primeiramente analisar as dimensões do pistão e do cilindro. A partir destes valores, será possível estimar uma pressão de trabalho aproximada utilizando como base as forças calculadas no próximo tópico (6.4).

Sendo assim, a partir do gráfico da Figura 15, observamos que as forças atuantes no sistema estão no intervalo de 30 kN a 100 kN. A partir da Equação 2, fizemos uma simulação que está representada na Tabela 2 abaixo para saber o valor da pressão atingida em função da força aplicada e do diâmetro do pistão.

$$Press\tilde{a}o = \frac{For\tilde{c}a}{\tilde{A}rea} = \frac{4F}{\pi D^2} \quad (2)$$

Tabela 2 - Pressão interna disponibilizada pelo pistão (atm)

| P (atm) | Diâmetro (m) | | |
|--------------------------|---------------------|-------------|------------|
| Força da onda (N) | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 30.000 | 38 | 17 | 9 |
| 40.000 | 50 | 22 | 13 |
| 50.000 | 63 | 28 | 16 |
| 60.000 | 75 | 34 | 19 |
| 70.000 | 88 | 39 | 22 |
| 80.000 | 101 | 45 | 25 |
| 90.000 | 113 | 50 | 28 |
| 100.000 | 126 | 56 | 31 |

De acordo ao dissertado anteriormente, buscamos uma pressão igual ou superior a 40 atm. Pela Tabela 2, observamos que este valor é alcançado em uma faixa bem

definida; quando utilizado o diâmetro de 0,1 m e força maior ou igual a 30 kN ou quando o diâmetro for de 0,15 m, com forças a partir de 70kN, aproximadamente. Por outro lado, vale ressaltar que os valores contemplados para o diâmetro são muito desproporcionais ao tamanho do Flutuador, de modo que devido aos esforços sofridos, o eixo do pistão pode não suportar tamanho desgaste.

Fica como sugestão para um estudo futuro a análise de esforços do eixo para definir se as dimensões encontradas para atender à demanda de pressão são suficientes para resistir ao desgaste.

6.3.4) Produção volumétrica diária

Utilizando a abstração dos cálculos dos esforços sobre o eixo do pistão, fizemos uma tabela para esboçar o volume bombeado diariamente de acordo com o diâmetro do pistão e a altura de onda. Adotamos uma onda de 9 segundos de modo a não superestimar a capacidade produtiva da planta. Desta forma, o valor encontrado pode ser utilizado como um parâmetro para a capacidade diária, não obstante permite que a produção seja consideravelmente maior que o valor encontrado. Na Tabela 3 podemos observar uma estimativa de bombeamento variando o diâmetro do pistão e a altura de onda. Seguindo o padrão conservador adotado até o momento no projeto, foi definida a utilização do diâmetro de 0,1 m para os cálculos subsequentes. Não obstante, consoante ao demonstrado anteriormente, a utilização de 0,15 m para o diâmetro também é plausível, o que resultaria em maior volume bombeado apesar da queda de pressão resultante do aumento da área transversal do pistão. Desta forma, para estudos futuros, fica a sugestão de avaliação do aumento do diâmetro para 0,15 m, caso seja necessário e suficiente do ponto de vista estrutural.

Sendo assim, para o cálculo do volume bombeado, utilizamos a Equação 3:

$$V = n \cdot A \cdot \frac{\sum h \cdot f}{\sum f} \quad (3)$$

Onde,

V = Volume bombeado

A = área superficial do pistão

h = Altura da onda

f = frequência da respectiva altura de onda

n = 9600 (número de ondas de 9s incidentes em 24 horas)

Tabela 3 - Capacidade volumétrica de bombeamento (m^3/dia)

| 9 s Hs(m) | Diâmetro do pistao (m) | | |
|--------------|------------------------|------|-----|
| | 0,1 | 0,15 | 0,2 |
| 0,75 | 57 | 127 | 226 |
| 1,00 | 75 | 170 | 302 |
| 1,25 | 94 | 212 | 377 |
| 1,50 | 113 | 254 | 452 |
| 1,75 | 132 | 297 | 528 |
| 2,00 | 151 | 339 | 603 |
| 2,25 | 170 | 382 | 679 |
| 2,50 | 188 | 424 | 754 |

Consoante ao demonstrado no gráfico da Figura 7, a frequência da altura das ondas não é constante, de modo que foi decidido calcular uma média ponderada do volume bombeado utilizando as frequências como peso das respectivas alturas de onda - consoante ao demonstrado na Equação 3 - resultando em aproximadamente $112 m^3/dia$ de capacidade de bombeamento.

| | |
|---|-----|
| Estimativa da capacidade de bombeamento (m^3/dia) | 112 |
|---|-----|

Por outro lado, veremos nos próximos tópicos que o aproveitamento da força das ondas para o processo da osmose reversa em si será restrito a alguns fatores limitantes referentes à capacidade da membrana osmótica. Desta forma, a capacidade de produção de agua dessalinizada será inferior à capacidade de bombeamento volumétrico do sistema, haja vista que o sistema poderá contar com perdas além do percentual da vazão de alimentação que sairá como rejeito nos produtos.

No próximo tópico (6.4) serão demonstrados os cálculos feitos para encontrar as forças atuantes na boia. Esses cálculos foram feitos por Thiago Evangelista do Carmo (2020) [32] em seu estudo que também trabalha com o mesmo dispositivo mas com um viés diferente de aproveitamento do potencial energético. Como nossos estudos estão

contemplando princípios similares, os dados analisados referente às ondas locais são equivalentes.

6.4) Forças atuantes no Flutuador [32]

6.4.1) Força de empuxo [32]

A força de empuxo é caracterizada como uma força vertical ascendente, decorrente da imersão parcial ou total de um corpo em um fluido. Tal força é resultante da diferença de pressão hidrostática exercida pelo fluido ao longo da superfície do objeto imerso. A magnitude da força de empuxo é equivalente ao peso do volume do fluido deslocado e pode ser calculada mediante a Equação 4 [33]:

$$F_{buoy} = -\rho_{fluido} \cdot V_{desl} \cdot g \quad (4)$$

Onde:

F_{buoy} = força de empuxo;

ρ_{fluido} = densidade do fluido;

V_{desl} = volume de fluido deslocado;

g = aceleração da gravidade

Dessa forma, consideramos que a força de empuxo é responsável por equilibrar o corpo na água, de modo que ela seja de módulo igual ao da força gravitacional atuante. Sendo assim, temos a Equação 5:

$$F_{buoy} = -m_f \cdot g \quad (5)$$

Onde m_f (Kg) é a massa do corpo flutuante.

Logo, temos a Equação 6:

$$-\rho_{fluido} \cdot V_{desl} \cdot g = -m_f \cdot g \quad (6)$$

Simplificando a expressão acima, temos a Equação 7:

$$V_{desl} = \frac{m_f}{\rho_{fluido}} \quad (7)$$

O volume submerso V_{sub} do flutuador será, portanto, igual ao volume de água deslocado V_{desl} . Na Equação 8, temos:

$$V_{sub} = V_{desl} \quad (8)$$

Um parâmetro relevante para o estudo em questão é a altura h que o flutuador estará inserido na água após o equilíbrio estático do corpo. Sendo assim, na Equação 9:

$$V_{sub} = \pi h^2 \left(\frac{3r-h}{3} \right) \quad (9)$$

Desse modo, a partir das equações 5, 6 e 7, obtemos a Equação 10:

$$\pi h^2 \left(\frac{3r-h}{3} \right) = \frac{m_f}{\rho_{fluido}} \quad (10)$$

Onde r é o raio do flutuador.

O flutuador semi-esférico possui uma massa aproximada de 15.000 Kg e raio de 7,5 metros. Para efeito de cálculo, podemos fazer uma aproximação para a massa específica da água do mar de 1000 kg/m^3 . Desta forma, temos a Equação 11:

$$\pi h^2 \left(\frac{3 \times 7,5 - h}{3} \right) = \frac{15000}{1000} \quad (11)$$

Como resultado dessa expressão, utilizando o software Mathematica, obtemos que o nível da água h na face externa do flutuador é de aproximadamente 2,4 metros.

Este parâmetro é fundamental para o cálculo da pressão das ondas sobre o flutuador que será descrito no próximo tópico.

6.4.2) Pressão das ondas [32]

Além da força de empuxo resultante da diferença de pressão hidrostática do fluido ao longo da superfície do corpo, também observamos nos flutuadores a influência de forças hidrodinâmicas decorrentes da incidência das ondas. Como já mencionado anteriormente, a forma mais precisa de se obter informações a respeito das forças hidrodinâmicas seria através da realização de um experimento em escala reduzida, no entanto, devido a ausência desses dados experimentais, utilizaremos uma abordagem teórica para a obtenção de uma estimativa do comportamento dessa força de natureza hidrodinâmica.

Para a determinação da pressão hidrodinâmica exercida pela interação entre as ondas e o flutuador utilizaremos a fórmula de Morison, como proposto por LOK (2010). Tal método contempla a teoria de Froude-Krylov, com correções referentes aos efeitos das forças de arrasto e das massas adicionadas em decorrência das distorções do fluxo no entorno do flutuador. Essa metodologia é aplicável para estruturas com dimensões significativamente inferiores ao comprimento da onda incidente, como discutido por GODA (2000) e SARPKEYA (1981). A fórmula de Morison para a determinação da pressão hidrodinâmica exercida em coordenadas cartesianas é expressa na Equação 12 [33]:

$$p_w(x, y, z) = \frac{\rho g H}{2} \cdot \frac{\cosh kz}{\cosh kd} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (12)$$

Onde:

p_w = pressão hidrodinâmica;

ρ = densidade da água;

H = altura da onda;

g = aceleração da gravidade;

d = profundidade;

w = frequência angular da onda;

k = número da onda.

O número de onda pode ser calculado mediante a relação de dispersão linear a seguir na Equação 13 [33]:

$$w^2 = g \cdot k \cdot \tanh(kd) \quad (13)$$

A frequência de incidência das ondas é um parâmetro continuamente variável, dependente de uma ampla diversidade de fatores. Seria computacionalmente muito dispendioso e desnecessário analisar a pressão das ondas para todas as frequências de onda possíveis. Assim sendo, para efeito de cálculo, utilizaremos a frequência média mais evidenciada nos sítios estudados como valor de base para as nossas estimativas. Analisando o regime de ondas apresentado por Silva [34] para cada sítio, obtivemos uma frequência angular média padrão de $\bar{w} = 0,7 \text{ rad/s}$. Como discutido anteriormente, a profundidade média \bar{d} da região em que serão implementados os alternadores é de 12 metros, de modo a comportar com segurança o flutuador oscilante.

Substituindo os valores mencionados na equação acima e utilizando o software Mathematica, obtemos, na Equação 14, um número de onda k de aproximadamente 0,07.

$$k = 0,07 \quad (14)$$

Para a nossa aplicação, onde o corpo flutuante apresenta formato semiesférico, torna-se recomendável a utilização das coordenadas polares. Sendo assim, consoante ao ilustrado na Figura 14, cada coordenada cartesiana é escrita conforme as Equações 15, 16 e 17:

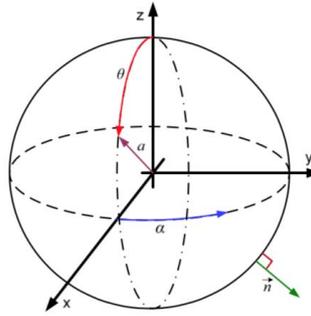


Figura 14 - Coordenadas polares (Fonte: [33])

$$x = a \sin \theta \cos \alpha \quad (15)$$

$$y = a \sin \theta \sin \alpha \quad (16)$$

$$z = a \cos \theta + z_0 \quad (17)$$

Onde a é o raio da esfera e z_0 é a profundidade do centroide da esfera..

Reescrevendo a equação para a distribuição da pressão em coordenadas polares, temos a Equação 18 [33]:

$$p_w(\theta, \alpha, a) = \frac{pgH}{2} \cdot \frac{\cosh k(a \cdot \cos \theta + z_0)}{\cosh kd} \cdot ka \cos(ka \sin \theta \cos \alpha - wt + \varphi) \quad (18)$$

Como o deslocamento do flutuador é limitado apenas ao eixo vertical, devido à restrição imposta pelo contato entre o sistema de roletes acoplado ao flutuador e a torre de treliça, somente a força vertical atuante será considerada. Essa força ascendente é obtida pela integração da equação da distribuição de pressão hidrodinâmica ao longo da superfície do flutuador na Equação 19.

$$F_{FK,Z} = \iint p_w \cdot n_z \, dS \quad (19)$$

Onde $n_z = \cos \theta$.

Substituindo as expressões na equação acima e expandindo a integral obtemos uma expressão para a obtenção da força ascendente de Froude-Krilov $F_{FK,z}$ atuante no corpo flutuante semi esférico de raio a , com centroide na profundidade z_0 e em águas com profundidade média d . A força mencionada é, portanto, estimada na Equação 20 [33]:

$$F_{FK,z} = \frac{\rho g H a^2}{2 \cosh kd} \int_{\theta=\theta_0}^{\pi} (\cosh[k(a \cos \theta + z_0)] \cos \theta \sin \theta * 2. [\int_0^{\pi} \cos(ka \sin \theta \cos \alpha - wt + \varphi) d\alpha]) d\theta \quad (20)$$

Onde θ_0 pode ser obtido através da Equação 21:

$$\theta_0 = \cos^{-1} \left(\frac{d-z_0}{a} \right) \quad (21)$$

Onde z_0 é a posição vertical do centro do flutuador semiesférico com relação ao nível do solo (nível de referência), podendo ser obtido por meio da Equação 22:

$$z_0 = (a - h) + d \quad (22)$$

$$z_0 = (7,5 - 2,4) + 12$$

$$z_0 = 17,2 \text{ metros}$$

De posse do valor de z_0 , e dos demais parâmetros como $d = 12 \text{ metros}$ e $h = 2,4 \text{ metros}$, obtemos na Equação 23:

$$\theta_0 = 1,532 \text{ rad} \quad (23)$$

Para o caso de uma esfera totalmente submersa teríamos $\theta_0 = 0$, no entanto, como nosso corpo flutuante consiste de uma semiesfera, o valor de θ_0 fica restrito ao seguinte intervalo na Equação 24:

$$\frac{\pi}{2} \leq \theta_0 \leq \pi \quad (24)$$

Vale salientar que a expressão da pressão hidrodinâmica exercida pelas onda só é válida para situações em que o corpo flutuante esteja parcialmente ou totalmente submerso (caso extremo), sendo a pressão considerada nula caso o corpo flutuante perca o contato com a água. Entretanto, para o nosso estudo, consideraremos que o flutuador se encontrar sempre parcialmente submerso.

Como já citado anteriormente, a presença do corpo flutuante parcialmente submerso resulta em uma distorção do fluxo no entorno do flutuador, implicando em uma força de adição de massa que modifica ligeiramente a expressão de Froude-Krilov. Para incrementar o efeito da perturbação mencionada, um fator de correção de força C_{FK} é incorporado à expressão de Froud-Krilov, resultando na equação corrigida de Morison [35]. O valor do fator de correção C_{FK} é dependente das características geométricas do flutuador e do grau de perturbação do fluxo no entorno do corpo flutuante. Para o flutuador semiesférico adotado nesse projeto o C_{FK} sugerido é 0.7, valor obtido da comparação com testes experimentais [35]. Portanto, a equação corrigida de Morrison pode ser expressa na Equação 25:

$$F_{FK,z} = C_{FK} \cdot \frac{\rho g H a^2}{2 \cosh kd} \int_{\theta=\theta_0}^{\pi} (\cosh[k(a \cos \theta + z_0)] \cos \theta \sin \theta * 2 \cdot [\int_0^{\pi} \cos(ka \sin \theta \cos \alpha - wt + \varphi) d\alpha]) d\theta \quad (25)$$

A altura de onda H assim como a frequência angular das ondas w , também é uma grandeza variável. No entanto, em nosso estudo utilizaremos como valor de referência a altura de onda de 1,2 metros, por ser a altura de onda mais frequente nos sítios analisados.

Substituindo todos os valores obtidos e discutidos anteriormente na equação acima, obtemos a Equação 26:

$$F_{FK,z} = 0,7 \cdot \frac{997 \times 9,8 \times 1,2 \times 7,5^2}{2 \cosh(0,07 \times 12)} \int_{1,532}^{\pi} (\cosh[0,07(7,5 \cos \theta + 17,2)] \cos \theta \sin \theta * 2 \cdot [\int_0^{\pi} \cos(0,07 \times 7,5 \sin \theta \cos \alpha - 0,7t) d\alpha]) d\theta \quad (26)$$

Resolvendo a equação acima para diferentes valores de t , obtemos, com auxílio do software Mathematica, a força de pressão ascendente exercida pela pressão das ondas no corpo flutuante em estudo ao longo do período de incidência da onda. Devido ao tempo de processamento consideravelmente amplo, em virtude da complexidade da equação, o intervalo de incidência da onda foi discretizado em subintervalos de 0.5 segundos.

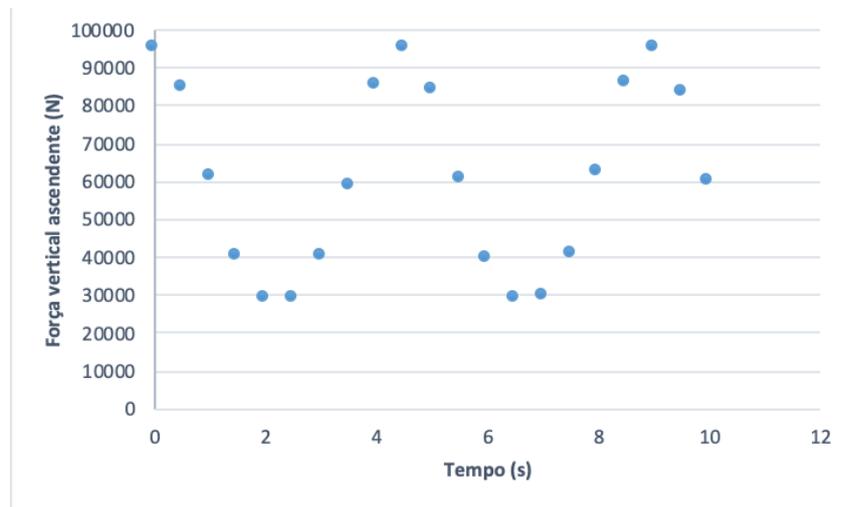


Figura 15 - Força vertical ascendente (N) em função do tempo (s). (Fonte: [32])

Como era de se esperar, observamos na Figura 15 que a força vertical ascendente exercida pela pressão das ondas no corpo flutuante apresenta caráter senoidal, compatível com a natureza oscilatória das ondas. Observamos também que, segundo esse modelo, a força exercida pela pressão das ondas atinge valores próximos a 100kN, o equivalente a aproximadamente 10000kg/f.

Como já mencionado anteriormente, neste modelo, a força do empuxo apenas equilibra a força peso do flutuador, enquanto que a força exercida pela pressão das ondas proporciona o deslocamento vertical corpo flutuante. Logo, força exercida pela pressão das ondas estará relacionada com a capacidade de bombeamento do dispositivo de conversão de energia das ondas adotado. Utilizaremos os dados das forças obtidos

nessa seção para a realização de estimativas da capacidade de bombeamento dos conversores nas seções seguintes.

Vale salientar que os valores aqui adotados são apenas estimativas teóricas, utilizadas diante da ausência de testes experimentais mais precisos. O desenvolvimento de um protótipo em escala reduzida e a obtenção de dados experimentais deve ser um estudo a ser realizado futuramente, de modo a propiciar estimativas mais precisas para o modelo em escala real. Fica como sugestão para projetos futuros a realização desse estudo, de modo a complementar e enriquecer o estudo de caso aqui desenvolvido e apresentado.

6.4.3) Forças de amortecimento hidrodinâmicas [32]

Um terceiro tipo de força que pode ser evidenciada em atuação no corpo flutuante é a forças de amortecimento viscoso, a qual também podem ser compreendida como força de arrasto. Tal força é exercida sobre o corpo como uma função da densidade do fluido, da geometria do corpo e da velocidade relativa evidenciada entre o fluído e o corpo totalmente ou parcialmente imerso. A força de amortecimento viscoso atuante sobre um corpo flutuante pode ser estimada na Equação 27 [33]:

$$F_d = -\frac{1}{2} C_d \cdot p \cdot A \cdot v \cdot |v| \quad (27)$$

Onde:

F_d = força de amortecimento viscoso;

p = densidade do fluido;

C_d = coeficiente de arrasto;

v = velocidade relativa entre o corpo flutuante e o meio.

O sinal negativo indica que a força de amortecimento viscoso sempre se opõe ao movimento do corpo, caracterizando-se assim como uma oposição ao movimento. Além disso, observamos que quanto maior a velocidade relativa entre o corpo e o fluido, maior a intensidade da força de arrasto exercida.

No entanto, a velocidade relativa entre o corpo e o fluido é extremamente difícil de ser prevista, uma vez que a excitação do flutuador também depende de fatores variáveis como a altura da onda incidente e o período da onda. Para cada onda incidente o corpo flutuante apresentará uma resposta específica, com um RAO (response amplitude operators) correspondente. Além disso, devido ao caráter senoidal das ondas incidentes e a perturbação do meio decorrente da presença do flutuador, a geometria submersa do flutuador torna-se de difícil previsão.

O RAO é uma grandeza adimensional que representa o grau de excitação do corpo flutuante diante da incidência de uma onda senoidal. Um RAO igual a 1 corresponde ao cenário em que o corpo flutuante apresenta uma amplitude de movimento equivalente ao da onda incidente, enquanto que um RAO menor ou maior do que 1 indica que a amplitude do flutuador é inferior ou superior a amplitude da onda incidente, respectivamente. Estudos realizados em laboratório com flutuadores em escala reduzida demonstram que o RAO depende não apenas das características das ondas incidentes, como também da geometria do corpo, apresentando valores variáveis [2].

Para efeito de estudo, consideraremos nesse momento que o corpo flutuante desenvolve um movimento sincronizada com as ondas incidentes, apresentando uma excitação aproximadamente instantânea e com RAO igual a 1. Desse modo, faremos a abstração de cenário ideal em que a força de arrasto mencionada pode ser negligenciada. No entanto, é importante ressaltar a necessidade de um aprofundamento no estudo do comportamento hidrodinâmico do flutuador como uma etapa subsequente a esse estudo de caso.

7. Definição dos parâmetros de trabalho

7.1) Escolha da membrana

Dentre os diversos modelos possíveis de membranas, optamos pela utilização da membrana SWC6 MAX, fabricada pela Hydranautics, que é projetada para trabalhar com água do mar. Segue abaixo as especificações da membrana [30]:

| Membrane Element | | SWC6 MAX |
|--|--|---|
| Performance: | | |
| | Permeate Flow: | Low Pressure: 6,600 gpd (25 m ³ /d) |
| | Salt Rejection: | High Flow: 13,200 gpd (50 m ³ /d) |
| | Boron Rejection (Typical) [†] : | 99.6% (99.4 % min) |
| | Applied Pressure: | 83.0% |
| | | 600 psi (4.1 MPa) |
| | | 91.0% |
| | | 800 psi (5.4 MPa) |
| Type | | |
| | Configuration: | Spiral Wound |
| | Membrane Polymer: | Composite Polyamide |
| | Membrane Active Area: | 440 ft ² (40.8m ²) |
| Application Data* | | |
| | Maximum Applied Pressure: | 1200 psig (8.27 MPa) |
| | Maximum Chlorine Concentration: | < 0.1 PPM |
| | Maximum Operating Temperature: | 113 °F (45 °C) |
| | pH Range, Continuous (Cleaning): | 2-11 (1-13)* |
| | Maximum Feedwater Turbidity: | 1.0 NTU |
| | Maximum Feedwater SDI (15 mins): | 5.0 |
| | Maximum Feed Flow: | 75 GPM (17.0 m ³ /h) |
| | Minimum Ratio of Concentrate to Permeate Flow for any Element: | 5:1 |
| | Maximum Pressure Drop for Each Element: | 15 psi |
| * The limitations shown here are for general use. For specific projects, operating at more conservative values may ensure the best performance and longest life of the membrane. See Hydranautics Technical Bulletins for more detail on operation limits, cleaning pH, and cleaning temperatures. | | |

Figura 16 - Catálogo membrana SWC6 MAX (Fonte: [30])

Conforme explicitado no catálogo da Figura 16, a membrana possui limitações de operação. Desta forma, nosso sistema precisa operar numa faixa de pressão que compreenda um valor mínimo de 40 atm ou 600 psi e delimitado por um valor máximo de pressão suportado pela membrana, que é de 80 atm ou 1200 psi, aproximadamente.

Por outro lado, quando analisamos o gráfico das pressões atingidas pelo sistema, observamos que certos momentos as pressões podem exceder em demasia o valor

máximo de pressão suportado de 1200 psi. Por isso, o sistema contará com uma válvula de exaustão manométrica de modo a não permitir que a pressão interna no flange de exaustão do sistema exceda o valor máximo permitido.

Sendo assim, o sistema começará a fazer osmose reversa quando a força fornecida pelas ondas for igual ou superior a 30.000 N e limitada pelo valor de 65.000 N, quando a pressão interna atinge o valor de 1200 psi.

7.2) Volume de bombeamento

Definidos os parâmetros de dimensão do pistão e pressão de operação, calcularemos o volume de bombeamento do fluido.

Parâmetros estabelecidos:

- H = 1,5 m (altura da onda)
- D = 0,1 m (diâmetro do pistão)
- P_{máx}: 1200 psi (pressão máxima de operação)
- P_{mín}: 600 psi (pressão mínima de operação)

Sendo assim, como a cavidade interna do dispositivo possui formato cilíndrico, temos que o volume de líquido bombeado será igual ao deslocamento vertical do pistão vezes a área da superfície circular do pistão. Assim, temos na Equação 28:

$$V = H\pi r^2 \quad (28)$$

$$V = 1,5 \cdot \pi \cdot 0,05^2$$

$$V = 0,011780972 \text{ m}^3/\text{onda}$$

No local estudado, consoante ao comentado anteriormente, utilizaremos um período de onda de 9 segundos, de modo que ao longo de um dia inteiro, teríamos aproximadamente 9600 ondas incidentes. Desta forma, podemos considerar que o dispositivo possui capacidade de bombeamento de aproximadamente 112 m³/dia.

De acordo com a literatura, a taxa de recuperação para membranas que atuam com água do mar é de 45% [36]. Então podemos calcular o fluxo de permeado (Q_p) através da Equação 29, onde Q_a é a vazão de alimentação e r a taxa de recuperação:

$$Q_p = Q_a \cdot r = 112 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \cdot 0,45 = 50,4 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \quad (29)$$

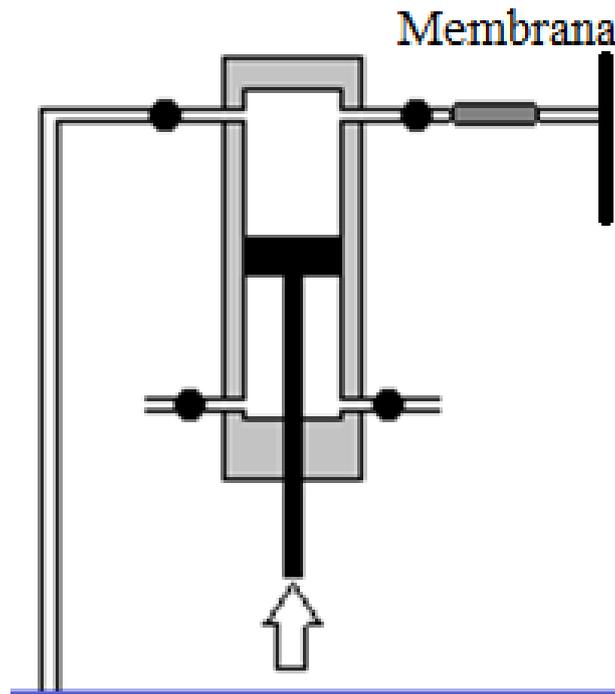


Figura 17 - Layout final do dispositivo (Fonte: projeto autoral)

7.3) Cálculo da concentração do rejeito

Dada a vazão de permeado de 50,4 m³/dia, podemos encontrar a vazão de concentrado (Q_c) a partir da Equação 30 a seguir:

$$Q_c = Q_a - Q_p = 112 \left(\frac{m^3}{dia} \right) - 50,4 \left(\frac{m^3}{dia} \right) = 61,6 \left(\frac{m^3}{dia} \right) \quad (30)$$

Portanto, temos 61600 *litros* de rejeito por dia.

De acordo com a Tabela 1, a concentração de sais na água do mar é de $35 \left(\frac{g}{kg}\right)$, sendo, por conseguinte, sua densidade igual a $1,035 \left(\frac{kg}{l}\right)$, ou seja, aproximadamente igual a $1 \left(\frac{kg}{l}\right)$. Assim, em 112000 litros disponibilizados na alimentação, temos aproximadamente 3920 toneladas de sal.

A concentração de sal na saída da membrana pode ser calculada utilizando o valor da taxa de rejeição encontrada no catálogo do item 7.1 [30], que é 99,8%. Logo, aplicando este percentual, temos na Equação 31:

$$m_{sal\ rejeito} = 0,998 \cdot 3920 (t) = 3912,16 t \quad (31)$$

Para o cálculo da concentração de sal diluída no rejeitado, fazemos na Equação 32:

$$\frac{m_{sal\ rejeito}}{massa\ de\ rejeito} = \frac{3912160 (g)}{61600 (kg)} = 63,5 \frac{g}{kg} \quad (32)$$

Sendo assim, o valor da concentração do rejeito é de $63,5 \frac{g}{kg}$, que representa um aumento da concentração em 81% em relação à água do mar *in natura*.

8. Conclusões e recomendações

A partir dos fatos citados, este trabalho propõe uma alternativa virtuosa para o resíduo salobro da osmose reversa agregando potencial valor comercial para este produto que hoje é tratado como dejetivo. Além disso, explora o potencial de uma fonte energética integralmente limpa, de modo que seja uma solução ambientalmente correta e economicamente explorável.

Desta forma, concluímos que o dispositivo tratado no estudo, juntamente ao mecanismo desenvolvido ao longo do trabalho, possui potencial para operação a fim de corresponder às expectativas iniciais. Vale frisar que os valores encontrados representam apenas uma estimativa do potencial energético do método abordado, onde algumas premissas foram assumidas inicialmente e sugeridas como tema para estudos futuros mais detalhados a fim de corroborar com as proposições assumidas neste trabalho.

Sendo assim, os resultados encontrados corroboram que o valor da concentração da água do mar (35g/kg) que hoje é utilizado como ponto de partida na maioria das salinas pode ser substituído em parte pelo resíduo salobro advindo da osmose reversa realizada pelo dispositivo PPE. Os cálculos demonstram a possibilidade de um aumento de aproximadamente 81% do valor da concentração mássica de sais dissolvidos na água. Desse modo, podemos esperar que o tempo necessário para atingir o ponto de cristalização do sal será menor que o tempo demandado por uma salina em operação atualmente.

Conforme sugerido ao longo do trabalho, alguns estudos se fazem necessários a fim de validar a implementação e execução do projeto em questão. É sabido que para a execução do conceito proposto, são necessárias análises sobre a possibilidade de inserção de um sistema de pré tratamento na planta a fim de evitar danos e prolongar a vida das membranas osmóticas. Além disso, a análise da configuração do sistema mais eficiente também é necessária de modo a aproveitarmos ao máximo o potencial energético das ondas locais.

Outro ponto necessário é a validação referente aos esforços sofridos pelo eixo do dispositivo, contemplando os possíveis materiais para confecção do Flutuador, haja

vista que a carga atuante atinge valores relativamente elevados; a dimensão do eixo quando comparada ao diâmetro do Flutuador exprime um contraste elevado, o que reforça ainda mais a necessidade deste estudo sugerido. Consoante ao citado anteriormente, a medição dos dados das ondas da região na qual o sistema será implementado é sugerida, haja vista que apesar de Pecém de Galinhos estarem situados numa região de semelhança marítima, pode haver uma relativa discrepância nos valores de altura e período das ondas adotados.

Outra hipótese que pode ser avaliada em estudos futuros é a implementação de um arranjo em série de membranas, de modo que o sistema faça a dessalinização do próprio rejeito salobro produzido pela primeira membrana; desta forma, ao final do processo seria possível obter maior quantidade de água dessalinizada além de um rejeito mais concentrado do que o rejeito resultante do primeiro processo de osmose reversa.

9. Bibliografia

1. BACKER, E. D. A. **Aproveitamento da Energia das Ondas Para Bombeamento Eficiente e Dessalinização da Água do Mar**. Projeto de Graduação - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro; disponível em <http://monografias.poli.ufrj.br/index.php>, p. 14-15. 2017.
2. BESERRA, E. R. et al. **Development of a near shore WEC for the Brazilian coast**. EWTEC - COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2019.
3. BESERRA, E. R. **Caderno de Energia - Desenvolvimento de dispositivos de conversão de energias marinhas**. COPPE. Rio de Janeiro, p. 1-54. 2017. (V. N. 5 Disponível em http://www.ppe.ufrj.br/tempsite/ppe/images/cenergia/ce_site5.pdf).
4. ORISTANIO, B. D. S.; PEIG, D. B.; SARTORI LOPES, M. A. **Desenvolvimento de um sistema de pré-tratamento para osmose reversa**. Projeto de Graduação - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2008.
5. FERRARO, R. J. S. **Sistema de Osmose Reversa**. Projeto de Graduação - Universidade São Francisco. Campinas; disponível em <http://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/1524.pdf>, p. 18-19. 2008.
6. LENNTECH. Processos de Osmose Inversa Dessalinização. Disponível em: <https://www.lennotech.com.pt/processos/mar/osmose-inversa/processos-osmose-inversa-dessalinizacao.htm>. Acesso em: 12 mar. 2020.
7. CHARCOSSET, C. A review of membrane processes and renewable energies. **Desalination**, Lyon, 245, 15 Setembro 2009. 214-231.
8. B FILTERS - TRATAMENTO DE ÁGUA. **Osmose Reversa**: como funciona essa tecnologia para filtração da água. Disponível em: <https://bfilters.com.br/osmose-reversa-tratamento-de-agua/>. Acesso em: 27 jan. 2020.
9. **Docsity - Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Engenharia de Produção**, 2010. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/biofouling-em->

membranas/4733073/>. Acesso em: 12 mar. 2020.

- 10 AL-MALEK, S.; AGASHICHEV, S. P.; ABDULKARIM, M. **Techno-economic aspects of conventional pretreatment before reverse osmosis (Al-Fujairah Hybrid Desalination Plant)**. International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse. Singapura: [s.n.]. 2005.
- 11 LENNTECH. Pretreatment, 2001. Disponível em: <<https://www.lenntech.com/Data-sheets/Getting%20the%20most%20out%20of%20your%20RO.pdf>>. Acesso em: 20 Janeiro 2020.
- 12 REDONDO, J. A. Brackish - Sea and wastewater desalination. **Desalination**, Rheinmünster, 138, 20 Setembro 2001. 29-40.
- 13 GABELICH, C. J. et al. Reverse Osmosis pretreatment: Challenges with conventional treatment. **AWWA Annual Conference & Exposition**, 2004. 149-168.
- 14 BREHANT, A.; BONNÉLYE, V.; PEREZ, M. Comparison of MF/UF pretreatment with conventional filtration prior to RO membranes for surface seawater desalination. **Desalination**, Paris, 144, 10 Setembro 2002. 353-360.
- 15 WEND, C. F. et al. Pretreatment for membrane water treatment systems: a laboratory study. **Water Research**, Novembro 2002. 3367–3378.
- 16 CHEN, T. K.; CHEN, J. N. Combined membrane bioreactor (MBR) and reverse osmosis (RO) system for thin-film transistor-liquid crystal display TFT-LCD, industrial wastewater recycling. **Water Science and Technology**, Taiwan, 50, 2004. 99-106.
- 17 VROUWENVELDER, J. et al. Biofouling potential of chemicals used for scale control in RO and NF membranes. **Desalination**, Nieuwegein, 132, 20 Dezembro 2000. 1-10.
- 18 GLATER, J.; HONG, S. K.; ELIMELECH, M. The search for a chlorine-resistant reverse osmosis membrane. **Desalination**, 95, Julho 1994. 325-345.
- 19 DE OLIVEIRA, D. R. **Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando**

- . **a microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas [Rio de Janeiro] 2007**. Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro, (COPPE/UFRJ,M.Sc., Engenharia Química, 2007) - disponível em <http://portal.peq.coppe.ufrj.br/>. Rio de Janeiro, p. 108. 2007.
- 20 WIKIPEDIA. **Salina**. Disponível em: <https://pt.wikipedia.org/wiki/Salina#cite_ref-.1>. Acesso em: 05 Dezembro 2019.
- 21 **Portal Laboratórios Virtuais de Processos Químicos**. Disponível em: <http://labvirtual.eq.uc.pt/siteJoomla/index.php?option=com_content&task=view&id=42&Itemid=159>. Acesso em: 5 Dezembro 2019.
- 22 WIKIPEDIA. **Galinhos**. Disponível em: <<https://pt.wikipedia.org/wiki/Galinhos>>. Acesso em: 14 Janeiro 2020.
- 23 IBGE. IBGE - Galinhos, RN, 2017. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rn/galinhos/panorama>>. Acesso em: 14 Janeiro 2020.
- 24 BARRETO, L. Ministério da Defesa, 2019. Disponível em: <<https://www.defesa.gov.br/noticias/57291-operacao-carro-pipa-beneficia-quase-2-milhoes-de-pessoas>>. Acesso em: 01 mar. 2020.
- 25 GLOBAL WAVE STATISTICS. **GWS**. Disponível em: <<http://www.globalwavestatisticsonline.com/>>. Acesso em: 29 Fevereiro 2020.
- 26 BESERRA, E. R. **Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro - Disponível em <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp040806.pdf>. Rio de Janeiro. 2007.
- 27 MAJOP. Osmose Reversa - Conheça este processo de purificação de água. **Majop**. **Produtos para Suinocultura**. Disponível em: <<http://www.majop.com.br/html/artigos.html>>. Acesso em: 14 Janeiro 2020.
- 28 HYDRANAUTICS. **Terms and Equations of Reverse Osmosis**, 23 Janeiro 2001. Disponível em: <<https://www.lenntech.com/Data-sheets/Hydranautics-Terms->

- . Equations-RO.pdf>. Acesso em: 05 Fevereiro 2020.
- 29 WIKIPEDIA. **Água do Mar**. Disponível em: . <https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%81gua_do_mar>. Acesso em: 14 Janeiro 2020.
- 30 DESAL MEMBRANES PRODUCTS. **SWC6-MAX, Seawater Desalination, Reverse Osmosis, SWC Rejection**. Disponível em: <<https://www.lenntech.com/Data-sheets/Hydranautics-SWC6-MAX-L.pdf>>. Acesso em: 3 Março 2020.
- 31 STEFANELLI, E. Bomba Alternativa a Pistão. **Eduardo J. Stefanelli**. Disponível em: <<https://www.stefanelli.eng.br/bomba-alternativa-pistao/>>. Acesso em: 15 Janeiro 2020.
- 32 DO CARMO, T. E. **Armazenamento de energia das ondas e conversão em hidroeletricidade**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Engenharia Mecânica. Rio de Janeiro. 2020.
- 33 LOK, K. S. L. **Optimisation of the Output of a Heaving Wave Energy Converter**. . University of Manchester. Manchester. 2010.
- 34 SILVA, D. G. P. **Potencial de geração de energia por fontes renováveis para estações estratégicas e isoladas de sinalização náutica da marinha do Brasil**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - Disponível em <http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/publicacoes/dissertacoes/2015-2>. Rio de Janeiro. 2014.
- 35 CHAKRABART, S. K. **Hydrodynamics of Offshore Structures**. 1. ed. . Southampton: WIT Press, 1987.
- 36 LENNTECH. Improving the Reverse Osmosis Recovery Rate. Disponível em: . <<https://www.lenntech.com/systems/reverse-osmosis/ro/reverse-osmosis-recovery-rate.htm>>. Acesso em: 13 Março 2020.
- 37 CPB EDUCACIONAL. Osmose e a água do planeta. **CPB Educacional**. Disponível em: <<https://educacional.cpb.com.br/conteudos/conhecimento-conteudos/osmose-e>

a-agua-do-planeta/>. Acesso em: 14 Janeiro 2020.

38 METCALF; EDDY. **Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos**. 5. ed. . [S.l.]: McGraw Hill Education, 2016. 1167 p.

39 PROCEL INDÚSTRIA. **Bombas Guia Básico**. Brasília: Instituto Euvaldo Lodi, . 2009.

40 KHARODAWALA, M. Quora. **What is the difference between reverse osmosis and forward osmosis?**, 2017. Disponível em: <<https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-reverse-osmosis-and-forward-osmosis>>. Acesso em: 24 Fevereiro 2020.

41 HYDROFINITY. **Why Desalination is Not the Answer to the World's Water Issues**, 2018. Disponível em: <<https://www.hydrofinity.com/blog/why-desalination-is-not-the-answer-to-the-worlds-water-issues>>. Acesso em: 09 Agosto 2019.

42 SCHUTZ, F.; MASSUQUETTI, ; ALVES, T.. Demanda e oferta energética: uma perspectiva mundial e nacional para o etanol. **Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas, UFSM**, Santa Maria, v. 16, p. 3167-3186, Novembro 2013. ISSN 16.

43 BRAGA, Á. A. P. **Redução em Escala de um Conversor de Energia das Ondas**. Projeto de Graduação - Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro; disponível em <http://monografias.poli.ufrj.br/index.php>. 2019.