



Universidade Federal  
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

## **VIABILIDADE DE DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR ATRAVÉS DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR UM CONVERSOR DE ENERGIA DE ONDA.**

Danilo Ribeiro da Silva Corrêa

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

Orientador: Segen Farid Estefen

Co-orientador: Milad Shadman

Rio De Janeiro

Setembro de 2021

VIABILIDADE DE DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR ATRAVÉS DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA  
POR UM CONVERSOR DE ENERGIA DE ONDA

Danilo Ribeiro da Silva Corrêa

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA NAVAL  
E OCEÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO  
PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO NAVAL E  
OCEÂNICO.

Examinada por:



---

Prof. Segen Farid Estefen, Ph.D



---

Prof. Milad Shadman, D.Sc



---

Prof. Carlos Antônio Levi da Conceição, Ph.D.



---

Prof. Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

SETEMBRO DE 2021

**Corrêa, Danilo Ribeiro da Silva**

**Viabilidade de dessalinização da água do mar através de energia elétrica gerada por um conversor de energia de onda/ Danilo Ribeiro da Silva Corrêa– Rio de Janeiro: UFRJ/ESCOLA POLITÉCNICA, 2021.**

**IX, p.: 39, il.; 29,7 cm**

Orientador: **Segen Farid Estefen**

Co-orientador: **Milad Shadman**

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Naval e Oceânica, 2021.

Referências Bibliográficas: p. **45-48.**

1. Dessalinização. 2. Conversor de energia de ondas. 3. Sistemas renováveis. I. Estefen, Segen Farid et al. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia Naval e Oceânica. III Viabilidade de dessalinização da água do mar através de energia elétrica gerada por um conversor de energia de onda.

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por ter me guiado até aqui. Sua presença e amor me conduzem em toda minha trajetória, principalmente nos momentos de dificuldade e dúvida, me sustentando para continuar seguindo em frente.

Aos meus pais, Aladim (Em memória), Walkyrio e Rosa, que nunca mediram esforços para me apoiar, incentivando meus estudos e dando suporte para as minhas escolhas. Vocês são o alicerce de tudo que eu já conquistei e ainda vou conquistar. Obrigado por toda dedicação e renúncias em prol da nossa família.

À minha irmã Beatriz, que tem todo o meu orgulho, admiração e gratidão, e que me apoia de forma incondicional em tudo. Meu amor por ela está acima de qualquer palavra.

À minha esposa Michelle, que acreditou no meu potencial em momentos que nem eu mesma acreditei. Obrigado por ser meu conforto nos momentos de aflição, pela compreensão nas minhas ausências, pelo apoio e companheirismo irrestritos.

Aos professores do curso de Engenharia Naval e Oceânica, em especial aos meus orientadores Segen e Milad, a quem sou imensamente grato pela oportunidade de desenvolver este projeto final sob seus ensinamentos, paciência e sabedoria, sempre extremamente solícitos e presentes nos momentos que precisei. Aos professores convidados Carlos Levi e Rafael Malheiros, por todo o auxílio prestado para a realização deste trabalho.

À UFRJ, a Universidade do Brasil, pela oportunidade de aprender. Concluir a graduação no Fundão sempre foi um sonho pessoal e tenho imenso orgulho desta instituição pública de excelência e referência a nível mundial constituir parte da minha história.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenharia Naval e Oceânica.

## VIABILIDADE DE DESSALINIZAÇÃO DA ÁGUA DO MAR ATRAVÉS DE ENERGIA ELÉTRICA GERADA POR UM CONVERSOR DE ENERGIA DE ONDA

Danilo Ribeiro da Silva Corrêa

Setembro/2021

Orientador: Segen Farid Estefen  
Co-Orientador: Milad Shadman

Curso: Engenharia Naval e Oceânica

A população mundial já percebeu que é necessário uma mudança na matriz energética predominante, por isso fontes de combustíveis fósseis estão perdendo cada vez mais espaço, enquanto fontes de energia renovável estão recebendo mais atenção. Dentre as fontes de energia renovável, a água é um recurso que ganha destaque devido a sua abundância, dois terços do planeta terra é composto por água, entre rios, oceanos e etc. É notório o poder energético que os oceanos têm, entretanto, a forma de usufruir disto é o que vem motivando diversos estudos. No que tange a dessalinização da água do mar, sabe-se que métodos de integração flexíveis (fisicamente) e variadas estratégias de implantação podem fornecer importantes benefícios ambientais, hídricos e sociais, promovendo assim a sustentabilidade no binômio água-energia. Este trabalho concentrará esforços para investigar o grande potencial da energia oceânica gerada para a dessalinização da água do mar, de forma indireta, em termos de energia elétrica gerada através de ondas de gravidade incidentes, que fica em torno 7kW, na costa do Rio de Janeiro. Com essa potência instalada é possível produzir  $0,6 \text{ m}^3 / \text{h}$  de água potável a um custo nivelado em torno de  $23 \text{ \$} / \text{m}^3$ .

Palavras-chave: Dessalinização; energia renovável; ondas de gravidade; custo nivelado.

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

VIABILITY OF DESALINIZATION OF SEA WATER THROUGH ELECTRIC ENERGY GENERATED BY A WAVE ENERGY CONVERTER

Danilo Ribeiro da Silva Corrêa

September/2021

Advisor: Segen Farid Estefen

Co-advisor: Milad Shadman

Course: Naval and Ocean Engineering

The world population has already realized that a change in the predominant energy matrix is needed, that's why fossil fuel sources are losing more and more space, while renewable energy sources are receiving more attention. Among the renewable energy sources, water is a resource that stands out due to its abundance, two thirds of the planet earth is composed of water, among rivers, oceans and so on. The energy power that the oceans have is notorious, however, the way to take advantage of this is what has been motivating several studies. Regarding seawater desalination, it is known that flexible integration methods (physically) and varied implementation strategies can provide important environmental, water and social benefits, thus promoting sustainability in the water-energy binomial. This work will concentrate efforts to investigate the great potential of oceanic energy generated for the desalination of seawater, indirectly way, in terms of electrical energy generated through the incident gravity waves, which is around 7kW, off the coast of Rio de Janeiro. With this installed capacity it is possible to produce 0.6 m<sup>3</sup>/h of freshwater at a levelized Cost of around 23\$ / m<sup>3</sup>.

Keywords: Desalination; renewable energy; gravity waves; level cost.

# Sumário

Lista de Figuras.....	8
Lista de Tabelas.....	9
1. Introdução.....	1
2. Revisão Bibliográfica e Referencial Teórico.....	2
2.1 Energia de Onda.....	2
2.1.1 Tipos de Conversores de Ondas (WECs).....	2
2.1.2 Sistema Ilha Rasa.....	8
2.1.3 Características do Conversor.....	8
2.1.4 Características do Local.....	12
2.2 Tecnologias de Dessalinização.....	15
2.2.1 Osmose Reversa.....	15
2.2.2 Eletrodialise, ED.....	16
2.2.3 Compressão mecânica de vapor, MVC.....	17
3. Objetivo.....	18
4. Metodologia.....	18
4.1 Geração de Energia.....	18
4.1.1 Controle de Latching.....	18
4.1.2 Sistema de tomada de força (PTO).....	20
4.1.3 Modelo wave-to-wire.....	21
4.2 Dessalinização.....	23
5. Resultados.....	24
5.1 Sistema Ilha Rasa.....	24
5.1.1 Custo de geração de energia.....	26
5.2 Dessalinização.....	27
5.2.1 Custo total de geração de água doce.....	30
6. Conclusão.....	31
7. Orientação para pesquisas e desenvolvimentos futuros.....	34
8. Referência Bibliográficas.....	36

## Lista de Figuras

Figura 1: Fluxo de energia das ondas nos oceanos da Terra .....	2
Figura 2: WEC Impulsionado pela Flutuabilidade .....	4
Figura 3: WEC Autorreferenciado .....	5
Figura 4: WEC Coluna de água oscilante .....	6
Figura 5: WEC Atenuador .....	6
Figura 6: WEC Terminador.....	7
Figura 7: WEC Terminador.....	7
Figura 8: Representação geométrica 3D da boia oscilatória [7].....	9
Figura 9: WEC Ponto de absorvedor COPPE nearshore [7].....	10
Figura 10: Modelo genérico do ponto de absorvedor COPPE nearshore WEC [7] .....	10
Figura 11: Sistema de tomada de força (PTO) do WEC ponto absorvedor COPPE nearshore [7].....	12
Figura 12: Localização aproximada do WEC absorvedor pontual COPPE nearshore (fonte: google maps).....	12
Figura 13: Distribuição de Probabilidade Conjunta (%) para a região nearshore do Rio de Janeiro [7] .....	13
Figura 14: Densidade espectral média ( $m^2 / Hz$ ) [8].....	14
Figura 15: Osmose Reversa RO [16].....	16
Figura 16: Eletrodialise ED [16] .....	17
Figura 17: Compressão mecânica de vapor MVC [16].....	17
Figura 18: Esquemática do controle de latching [22] .....	19
Figura 19: Combinação de energia das ondas e processos de dessalinização [16] .....	23
Figura 20: a) Gráficos de interação entre a condição predominante de mar e a boia.[7]	25
Figura 21: Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE.....	28
Figura 22: Características do Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE. [34] .....	29
Figura 23: Dimensões do Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE. [34] .....	29

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Categorias de Conversores de Ondas .....	3
Tabela 2: Classificação WECs .....	8
Tabela 3: Frequência entre 7 e 13s .....	14
Tabela 4: Resultados - COPPE nearshore WEC .....	25
Tabela 5: Custo CAPEX .....	26
Tabela 6: Custo OPEX .....	26
Tabela 7: Custo total .....	26
Tabela 8: Custo nivelado por geração de energia – LCOE .....	27
Tabela 9: Características da geração de energia .....	28
Tabela 10: Custo Nivelado por geração de água doce – LCOF .....	30
Tabela 11: Custo de geração de água doce por osmose reversa .....	31
Tabela 12: Custo Nivelado por geração de água doce – LCOF para 2 dessalinizadores	31
Tabela 13: Resultados - COPPE nearshore WEC .....	32
Tabela 14: Resultados dessalinizador .....	33

## 1. Introdução

Com o passar dos anos a população mundial vem entendendo e aceitando cada vez mais que não é possível depender apenas do combustível fóssil. Em primeiro lugar, combustível fóssil uma hora vai acabar, mesmo que demore muitos anos, porém o mesmo é finito. Em segundo lugar, a poluição gerada por esta matriz energética é muito alta, é possível notar isto através da influência que isto tem nas mudanças climáticas.

Com isso, o mundo, de uma forma geral, está tendo mais atenção para matrizes energéticas menos poluentes, sustentáveis, confiáveis e abundantes. Os oceanos são uma solução, interessante e tentadora, para ser analisada.

Os oceanos tem sido foco de muito estudo quando se trata de energia. Isto se dá primeiramente pela sua abundância, 70% da superfície do globo é água do mar. Em seguida, porque, os fenômenos naturais provenientes dos mesmos, como correntes, marés, ondas de gravidade, diferentes taxas de salinidade e temperatura, que são resultados da influência da energia solar e do ciclo da lua, tem um potencial enérgico muito notável. Dito isso, diferentes estratégias vêm sendo propostas visando a exploração dessa energia, levando em consideração os fenômenos descritos [1].

O processo de formação dos fenômenos naturais nos oceanos, do ponto de vista de geração de energia, é bem interessante em comparação com a capacidade de geração de energia, por exemplo, eólica; isto porque, além da densidade de massa da água ser quase 1000 vezes a densidade do ar, as ondas de gravidade transportam, por dias, com o mínimo de dissipação, a energia dos ventos e tempestades, resultantes da radiação solar incidentem, na maior parte das vezes, no meio do oceano. Portanto, a energia a se obter, transportada pelas ondas de gravidade até a região costeira, torna-se mais previsível e mais confiável.[1]

A energia das ondas de gravidade se distribuí em todo o globo. Locais com mais incidência de ventos geram mais ondas de gravidade, uma vez que estes dois fenômenos têm interação entre si. Isto faz com que, dependendo de como o vento atue, as ondas de gravidade tenham maior período e maior altura, logo sendo mais ou menos energéticas.

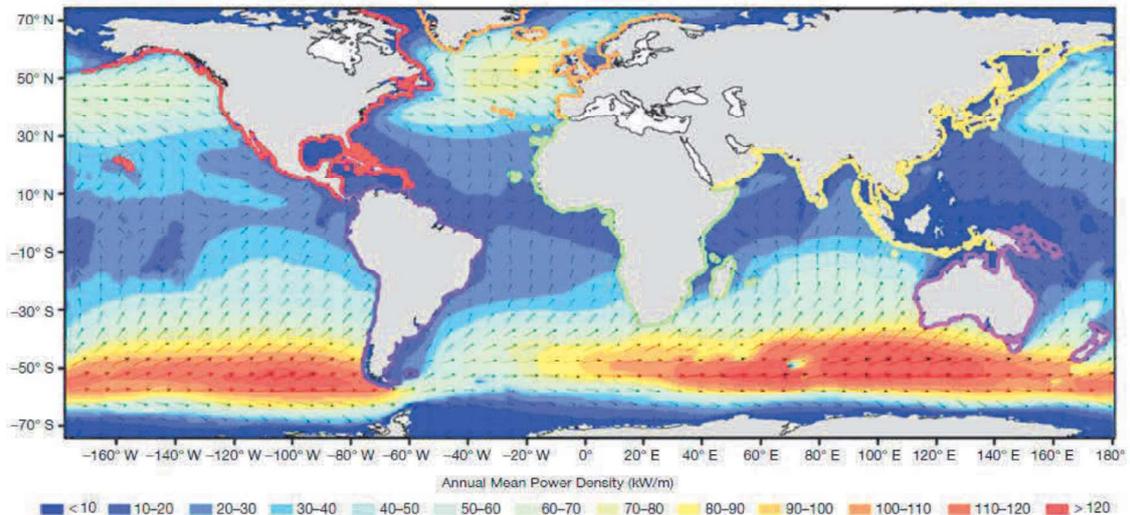


Figura 1: Fluxo de energia das ondas nos oceanos da Terra [2]

O movimento das ondas do oceano pode ser aproveitado para produzir água doce usando uma combinação de energia das ondas e sistema de dessalinização. O potencial para usar a energia das ondas como fonte de energia é enorme; foi estimado em 8.000–80.000 TWh / ano [2]. O alto potencial em combinação com a proximidade da fonte de energia e do produto final torna a energia das ondas uma técnica promissora para alimentar sistemas de dessalinização.

A escassez de água é um problema global agravante; bilhões de pessoas sofrem de escassez de água pelo menos algumas partes do ano [3]. A escassez de água é comum em áreas remotas, por exemplo, nas ilhas [4]. As indústrias e a produção de energia podem depender de uma grande quantidade de água limpa [5]. O acesso à água potável está no cerne do desenvolvimento sustentável, induzindo o crescimento social, econômico e ambiental [5]. A meta das Nações Unidas para o acesso à água doce, descrita na Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, é “garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos” [6].

## 2. Revisão Bibliográfica e Referencial Teórico

### 2.1 Energia de Onda

#### 2.1.1 Tipos de Conversores de Ondas (WECs)

Nesta seção, antes mesmo de estudar diretamente dos tipos de conversores, é importante pontuar e detalhar, de forma breve, que a melhor forma de classificar um conversor de ondas é utilizando a palavra *categorias* de conversores. Isto porque, além

do tipo, evidentemente, há a física envolvida em como o conversor opera.

Normalmente, um conversor de onda é tipificado em uma das seguintes opções [1]:

- Dispositivos Oscilantes de coluna de água (OWC)
- Point Absorbers
- Overtopping (galgamento)
- Atenuador

Entretanto, ao observar a tabela 1 é possível entender que, por exemplo, “point absorber”, “attenuator” e “Terminator” são descrições geométricas das configurações do dispositivo; enquanto “oscillating wave cylinder”, “overtopping” e “heave” são movimentos para coleta de energia. Os dispositivos de “overtopping” são descritos geometricamente como dispositivos terminadores, e os dispositivos de colunas de água oscilantes são geometricamente absorvedores de ponto [1].

É importante entender que essas combinações são ambíguas e não únicas, por exemplo, os absorvedores pontuais não indicam como o dispositivo se move nem as forças que o impulsionam. Ao final desta seção será apresentado uma tabela com alguns exemplos de WEC e suas respectivas classificações completas.

<i>Driving force</i>	<i>Reaction force</i>	<i>Geometry</i>	<i>Motion</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>● Buoyancy</li> <li>● Particle motion</li> <li>● Static pressure</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Ground-referenced</li> <li>● Self-referenced</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Point absorber</li> <li>● Attenuator</li> <li>● Terminator</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Heave</li> <li>● Surge</li> <li>● Pitch</li> <li>● Overtopping</li> <li>● Oscillating water cylinder</li> </ul>

*Tabela 1: Categorias de Conversores de Ondas*

Forças motrizes para os WECs incluem flutuabilidade, movimento de partículas e pressão estática. Os WEC impulsionados pela flutuação possuem uma boia na superfície livre da água. A reserva de flutuabilidade desta boia conduz forças seguindo o movimento das ondas, o que significa que fica alternando entre cristas e cavados. Vale ressaltar algumas características importantes deste movimento. Primeiro, as partículas abaixo da superfície de uma onda viajam aproximadamente em órbitas elípticas. Segundo, a energia cinética proveniente do avanço das ondas é transformada em energia potencial devido ao movimento que a boia executa. Terceiro, abaixo de uma onda de superfície, há uma variação aproximadamente senoidal da pressão estática que pode causar forças nos WECs [1].

Uma geometria WEC pode ser descrita como [1]:

a) Absorvedor Pontual, onde o comprimento de onda é grande em relação as dimensões do dispositivo, nas dimensões horizontal, longitudinal e transversal, possibilitando o movimento de subida e descida da boia em função das características físicas locais de um comprimento de onda, cristas e cavados.

b) Atenuador, onde as dimensões do dispositivo são longas na direção em que a onda se propaga.

c) Terminador, onde a dimensão mais longa, em relação as outras dimensões, está na direção das cristas das ondas. Observe que a dimensão mais longa, não na direção em que a crista da onda se propaga e sim na direção da crista da onda em uma situação estática, com outras palavras na direção da amplitude da crista.

Os movimentos de WEC são geralmente oscilantes. Oscilação vertical, subida e descida de uma boia, point absorber. Inclinação, rotação em torno de um eixo paralelo à crista da onda ou movimento de inclinação horizontalizado, ou seja, a maior dimensão está no sentido da propagação da onda e a oscilação da inclinação horizontal do corpo acontece quando mesmo atinge cada crista e cavado. Alguns WECs permanecem relativamente estacionários e usam os movimentos da água, como nos tipos de overtopping, onde as ondas quebram no topo do dispositivo; e nos tipos de cilindro de água oscilante, onde a água oscila dentro de uma câmara. [1]

Os dispositivos atualmente conhecidos podem ser categorizados usando as descrições acima. Para comparação, em termos de semelhança e diferença, serão apresentados alguns dispositivos de conversão de energia das ondas.

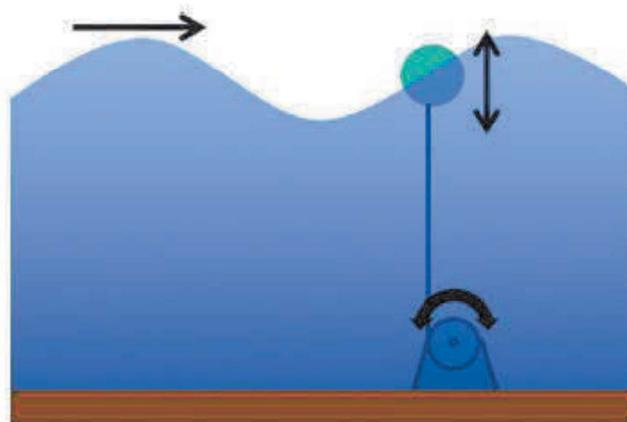


Figura 2: WEC Impulsionado pela Flutuabilidade [1]

A figura 2 ilustra um WEC impulsionado por uma boia. À medida que a boia sobe e desce, de acordo com o movimento das ondas, a haste faz com que o PTO execute um movimento oscilatório, periódico, rotacional, desta forma gerando energia. Mas o custo e dificuldade de ancoragem rígida para o fundo do mar pode ser desafiador. O WEC da AquaHarmonics é um exemplo deste tipo de dispositivo. [1]

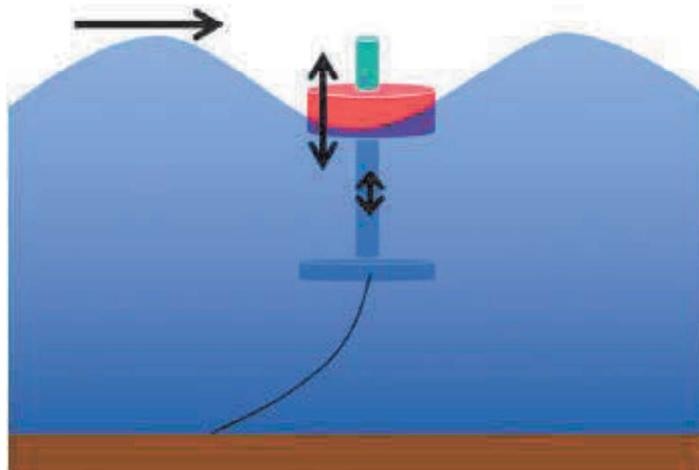


Figura 3: WEC Autorreferenciado [1]

Este seria um exemplo de um WEC autorreferenciado com a força motriz em função da flutuabilidade de uma boia que dependendo da relação diâmetro da boia x comprimento de onda, ele pode atuar como um absorvedor pontal, que é o esperado. Isto é, pode extrair energia de uma largura de crista incidente que é mais larga que o diâmetro do corpo. [1]

Com um flutuador que segue a superfície da onda e uma haste que permanece relativamente estacionária (haste + heave plate), e um sistema de tomada de força (PTO) que extrai energia dos movimentos de elevação relativa resultantes da subida e descida do flutuador nas cristas e cavados. [1]

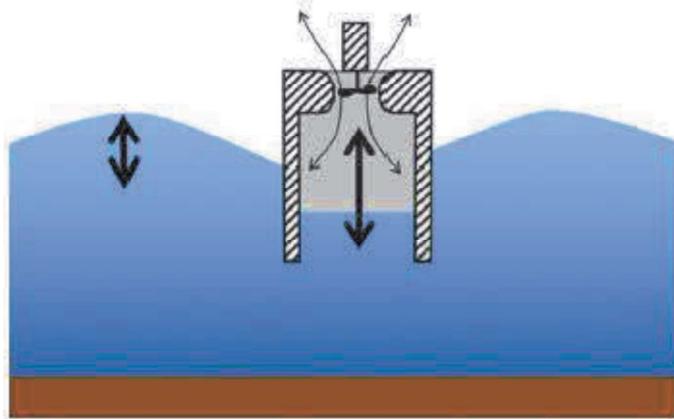


Figura 4: WEC Coluna de água oscilante [1]

A figura 4 mostra um conversor do tipo absorvedor pontual, autorreferenciado que tem como força motriz a pressão estática do fluxo de ar resultante do movimento induzido em heave do flutuador pelas ondas. Esse tipo de WEC tem como características ter o canal de captação submerso e uma turbina que extrai energia do fluxo de ar oscilante. É importante entender que a coluna de água funciona como um pistão dentro câmara comprimindo o ar para fora e expandindo o ar para dentro, como uma espécie de vácuo. O mesmo trabalha melhor quando otimizado para operar em ressonância, desta forma a amplitude de crista é maior dentro da câmara do que fora. No entanto, vale destacar que é um pouco mais difícil trabalhar com o fluxo de ar oscilante.[1]

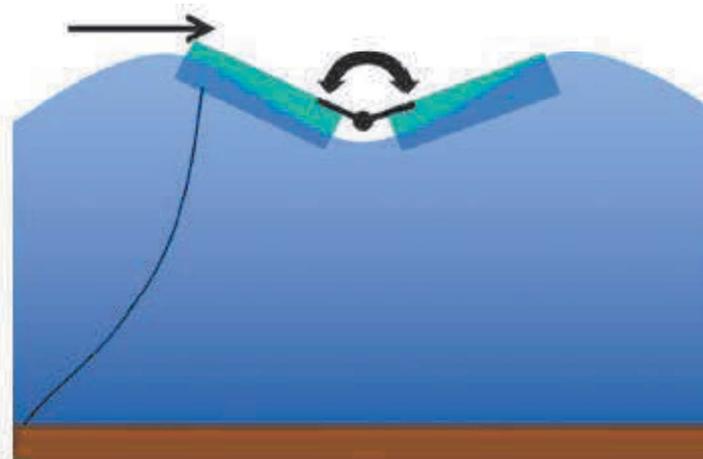


Figura 5: WEC Atenuador [1]

Ondas induzem movimentos de inclinação horizontal relativa nas dobradiças, onde tomadas de força (PTO) puxam energia dos movimentos. O WEC Pelamis é um exemplo de atenuador, o mesmo consiste em uma série de seções cilíndricas flutuantes unidas como uma serpente de metal. [1]



Figura 6: WEC Terminador [1]

A figura 6 ilustra um tipo de dispositivo com referencial de movimento no solo que usa o movimento de partículas de uma onda de água em toda a sua extensão vertical, com a finalidade de oscilar de forma rotacional o PTO e desta forma gerar energia. O Oyster WEC é um exemplo de um terminador de pitch WEC com referencial de movimento no solo. [1].

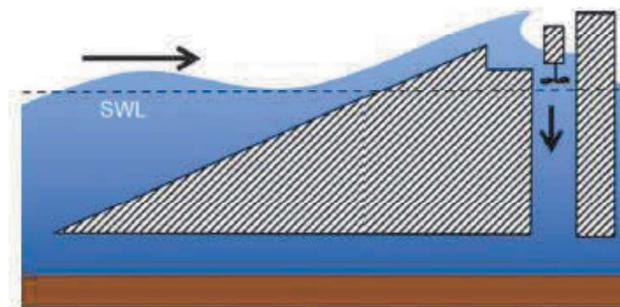


Figura 7: WEC Terminador [1]

A figura 7 mostra como um dispositivo de galgamento utiliza a estrutura física, através de uma rampa inclinada, para atenuar o movimento das partículas de água, forçando as ondas a romperem o topo do dispositivo. O dispositivo então extrai a energia potencial de um reservatório de água elevado acima do nível de água parada (SWL). O Wave Dragon é um exemplo desse tipo. [1].

Após ilustrado as principais categorias de WEC, atendendo ao que foi dito no início desta seção, observe abaixo a tabela 2 com a classificação completa dos WEC apresentados:

Fig	Geometry	Motion	Driving Force	Reaction Force
2	Point Absorber	Heave	Buoyancy	Ground-referenced
3	Point Absorber	Heave	Buoyancy	Self-Referenced
4	Point Absorber	Oscillating water cylinder	Buoyancy Static Pressure	Self-Referenced
5	Attenuator	pitch	Buoyancy	Self-Referenced
6	Terminator	pitch	Particle motion	Ground-referenced
7	Terminator	Overtopping	Particle motion	Self-Referenced

*Tabela 2: Classificação WECs*

### 2.1.2 Sistema Ilha Rasa

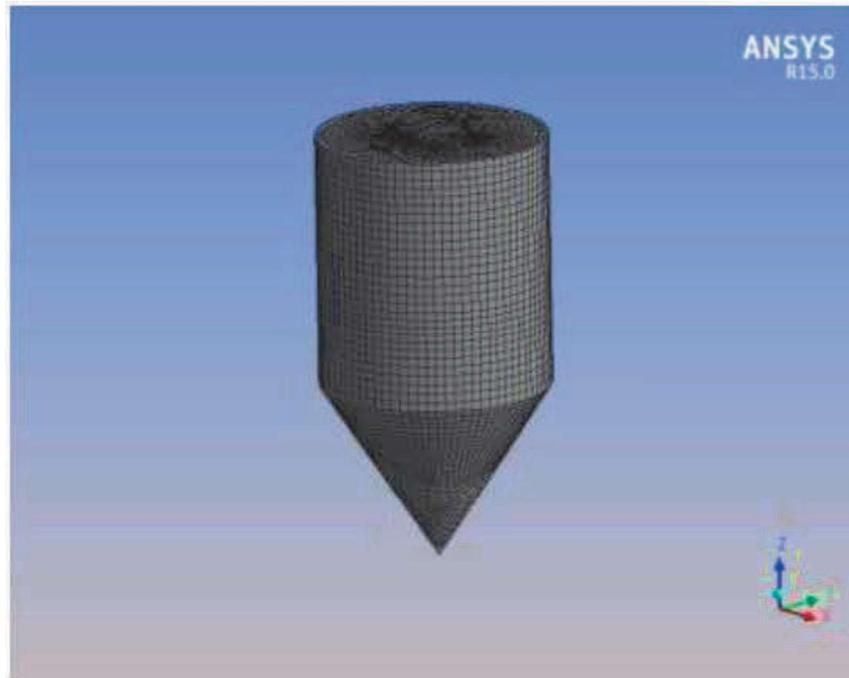
O sistema Ilha Rasa é na verdade a segunda geração de um conversor de energia de ondas brasileiro proposto pela COPPE / UFRJ. Este WEC, diferente do primeiro que foi instalado no porto do Pecém no Ceará, será instalado próximo ao litoral do Rio de Janeiro na Ilha Rasa. O WEC de segunda geração proposto pela COPPE /UFRJ é categorizado como um absorvedor pontual de superfície, quanto a sua geometria, com força motriz impelida por um flutuador que descreve o movimento induzido em heave pelas ondas, e referenciado no solo, próximo à costa. O sistema PTO é uma combinação de uma caixa de engrenagens e um sistema de gerador rotacional que é usado na indústria de turbinas eólicas [7]. Nas próximas duas seções deste capítulo serão abordadas, de forma detalhada, as características do conversor de ondas e características do local em que o mesmo será instalado. Vale destacar que foi utilizado como referência o trabalho do SHADMAN, 2017 [7] para as demais seções deste capítulo.

### 2.1.3 Características do Conversor

Como dito na seção 2.1.2, o COPPE nearshore WEC é categorizado como um absorvedor pontual de superfície, quanto a sua geometria, com força motriz impelida por um movimento induzido em heave de uma boia oscilante pelas ondas do mar. A estrutura física do COPPE nearshore WEC pode ser dividida em quatro diferentes partes, boia flutuante, colunas de deslizamento da boia, base de fixação do WEC e sistema de tomada de força (PTO).[7]

A boia oscilante tem a geometria física de um cilindro com a extremidade inferior em formato cônico, com a finalidade de diminuir a pressão de estagnação dinâmica pontual na superfície inferior quando deslocado no sentido para baixo em direção ao leito marinho. Este formato cônico também diminui a resistência de pressão viscosa na

separação da camada limite, bem como ocorre com a geometria de um navio (perfil de calda do navio que se assemelha a um perfil de asa), quando o deslocamento é no sentido para cima. Em outras palavras esse tipo de formato(cônico), na extremidade inferior, suaviza o movimento, possibilitando maior ganho de energia durante o movimento oscilatório, quando comparado com uma superfície plana.[7]



*Figura 8: Representação geométrica 3D da boia oscilatória [7]*

O COPPE nearshore WEC tem como estrutura suporte quatro colunas fixas, formando um tipo de prisma quadrangular, onde a boia tem liberdade de deslizar nos sentidos para cima e para baixo, descrevendo um movimento induzido em heave pelas ondas, através de oito rolamentos, quatro em cada extremidade, instalados nos vértices das extremidades superior e inferior (acima da seção cônica) do cilindro, como pode ser visto na figura 9. Para as colunas descritas acima é necessário chamar atenção para uma característica muito importante que pode influenciar diretamente no resultado do sistema. O diâmetro de cada coluna deve ser pequeno o suficiente para que não ocasione interferência no comprimento de onda ou qualquer flexão das mesmas em torno das próprias colunas, ou seja, não se deve permitir difração.[7]

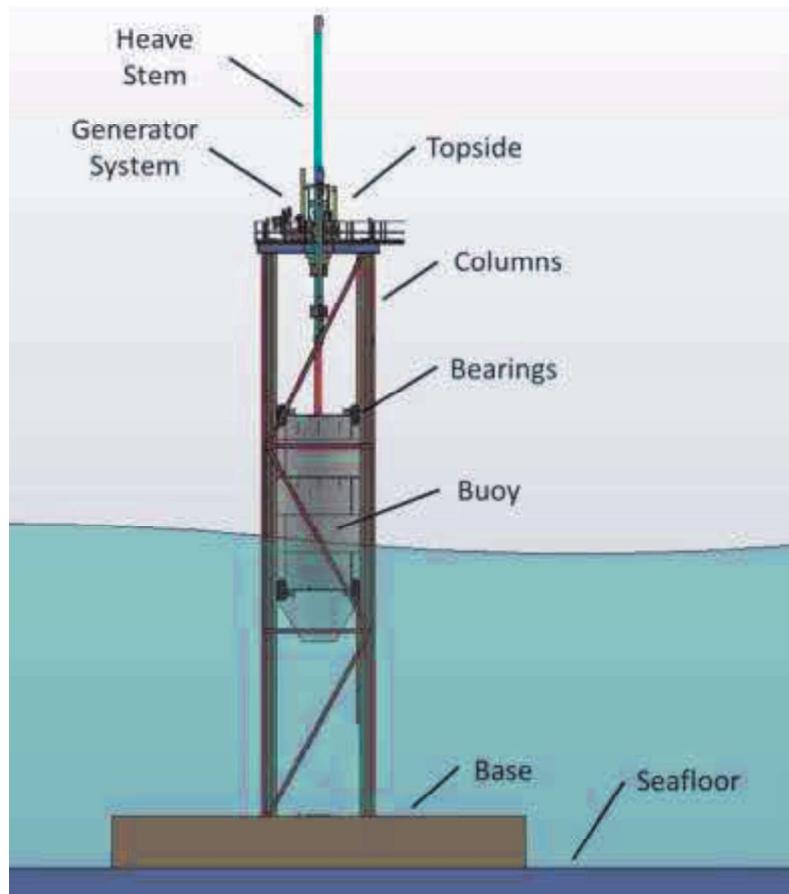


Figura 9: WEC Ponto de absorvedor COPPE nearshore [7]

A base de fixação do sistema é feita de concreto fixada no leito marinho, caracterizando um sistema referenciado no solo, e serve como base para a fixação das colunas de suporte.

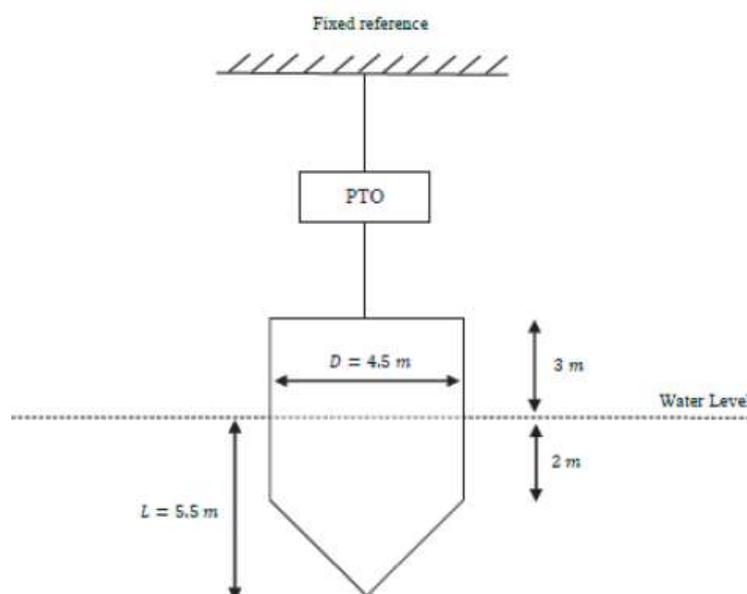


Figura 10: Modelo genérico do ponto de absorvedor COPPE nearshore WEC [7]

O sistema de tomada de força (PTO) do COPPE nearshore WEC é ilustrado na figura 11. Este é composto por alguns elementos de simples entendimento, acoplados de forma comum a um eixo de rotação, com uma extremidade alimentada pelo movimento induzido de heave pelas ondas do mar e na outra extremidade alimentando um gerador de energia elétrica.

O primeiro elemento do sistema PTO é a haste movida pela boia do COPPE nearshore WEC, “buoy stem”. Esta haste é conectada a uma polia (pulley), para desta forma a energia cinética proveniente das ondas do mar, em um primeiro momento transformada em energia potencial da boia, seja finalmente transformada em energia rotacional no eixo. Porém, é importante destacar que a energia rotacional é obtida através do movimento de rotação da polia, que é resultante do movimento de heave da boia, o que a priori seria um problema, uma vez que a natureza desse movimento é oscilatório, o que significa dizer que a polia irá rodar para os dois sentidos, horário e anti-horário, e este movimento será transmitido para o eixo do PTO acoplado à mesma. Para solucionar esse problema é necessário o uso de um sistema de contra recuo (Backstop), que é capaz de receber a energia rotacional nos dois sentidos, na sua entrada, e garantir o sentido de rotação constante em sua saída.

Após esse elemento, os outros dois próximos na linha são empregados com finalidade de amplificar a energia rotacional fornecida até o presente momento, o que significa dizer, aumentar a rotação do eixo. O primeiro elemento que é utilizado como um amplificador é uma caixa de expansão, que é composta por engrenagens de diferentes diâmetros que fazem este papel de entregar em sua saída uma rotação maior do que na entrada, “Speed Multiplier”. O segundo elemento é um volante sólido cilíndrico que é acoplado ao eixo e tem por finalidade amplificar a inércia rotacional.

Em questão da localização deste PTO dentro do sistema, é possível identificar na figura 9, o mesmo fica localizado no convés superior do COPPE nearshore WEC [7].

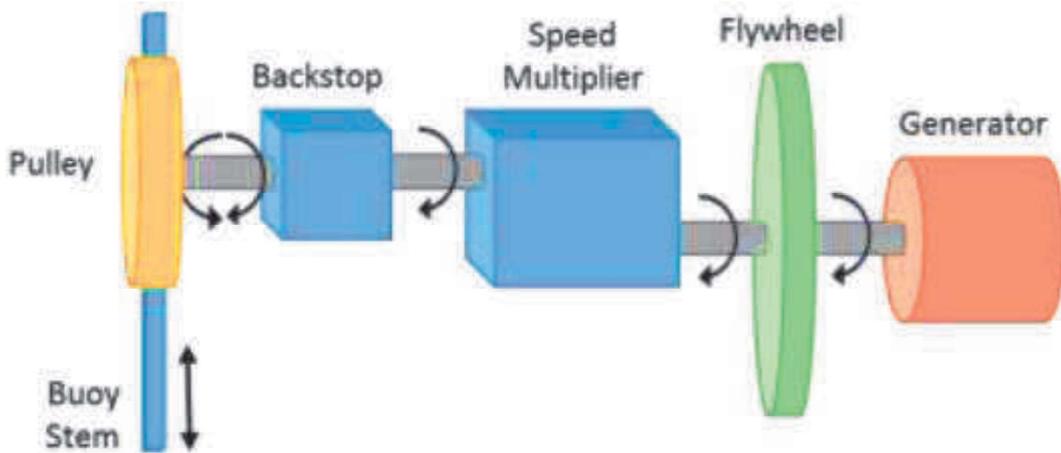


Figura 11: Sistema de tomada de força (PTO) do WEC ponto absorvedor COPPE nearshore [7]

### 2.1.4 Características do Local

O local marítimo considerado para a instalação do WEC é na cidade do Rio de Janeiro, considerando que o mesmo precisa ficar perto da costa e que as praias da cidade são um cartão postal tanto do ponto de vista turístico, como do ponto de vista ambiental, a melhor localização encontrada, por mais que seja perto da costa não é exatamente na praia ou próximo a rochas costeiras, e sim próximo a uma pequena ilha chamada “Ilha Rasa”. A localização da instalação pode ser vista na figura 12, que é uma ilustração do google maps e mostra tanto a Ilha Rasa como o ponto de instalação do COPPE nearshore WEC em amarelo. No ponto de instalação foi possível verificar uma profundidade de cerca de 20m e uma distância de 14 km da praia de Copacabana do Rio de Janeiro.[7]



Figura 12: Localização aproximada do WEC absorvedor pontual COPPE nearshore (fonte: google maps)

A figura 13 mostra a distribuição de probabilidade conjunta (JPD), que representa o perfil de incidência de ondas na costa do Rio de Janeiro [7]. O gráfico é apresentado com a altura significativa de onda ( $H_s$ ) no eixo vertical “y”, do lado esquerdo, e o período pico no eixo horizontal “x”; no meio do gráfico são as probabilidades de ocorrência desses dois fenômenos combinados. No eixo vertical na parte direita do gráfico é apresentado uma escala monocromática que facilita a identificação de onde ocorre as maiores incidências dos dois fenômenos descritos anteriormente.

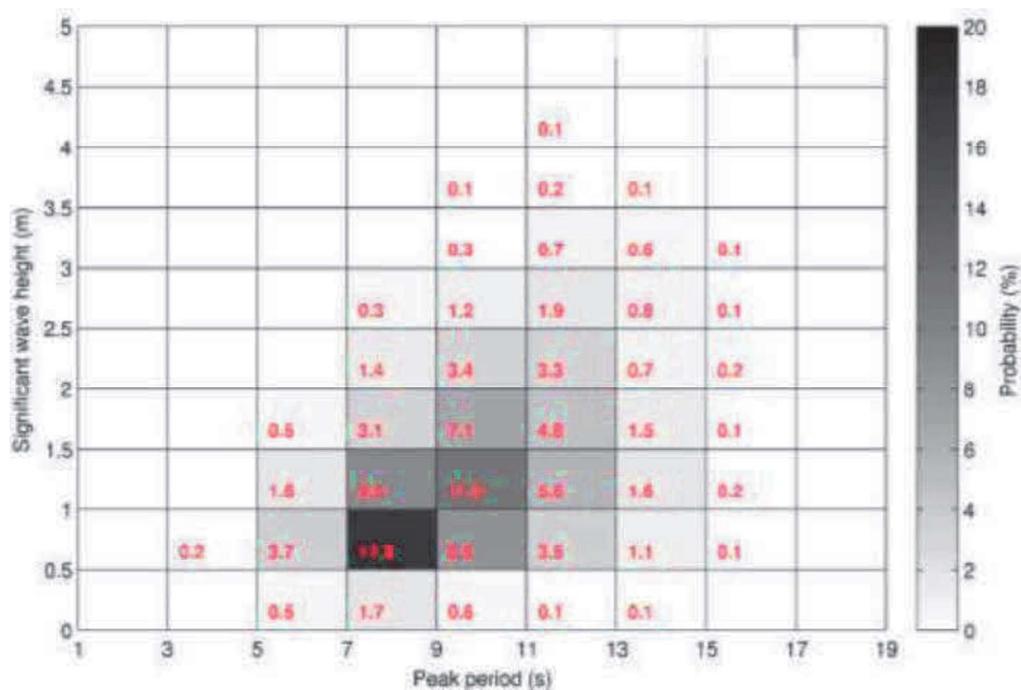


Figura 13: Distribuição de Probabilidade Conjunta (%) para a região nearshore do Rio de Janeiro [7]

Ao fazer análise do gráfico, é possível obter algumas conclusões de forma rápida. É possível verificar que a incidência de ondas com altura significativa maior do que  $H_s = 3$  metros é quase nula, beirando os 2%, isto considerando todos os ranges de período de pico juntos, entretanto essas ondas não devem ser desprezadas para simulações e otimizações da geração de energia no conversor de energia de onda. Outra conclusão é que há um outlier de incidência de ondas de 17,3% compreendido entre os períodos de picos 7 e 9 segundos para um  $H_s$  entre 0,5 e 1 metro. É possível concluir também que há uma predominância na incidência de ondas compreendida nos períodos de pico entre 7 e 13 segundos com ocorrência total de 86%. Na tabela 3 é mostrado a probabilidade total de incidência de cada altura significativa ( $H_s$ ) de onda [7].

Frequência entre 7-13s	
Hs (m)	Probabilidade (%)
0 - 0,5	2,4
0,5 - 1	29,3
1 - 1,5	26,4
1,5 - 2	15
2 - 2,5	8,1
2,5 - 3	3,4
3 - 3,5	1
3,5 - 4	0,3
>4	0,1
Total	86,00

Tabela 3: Frequência entre 7 e 13s

Com base na análise gráfica acima, o autor SHADMAN, 2017 [7] apresenta como resultado altura significativa média de onda de  $H_s = 1,33\text{ m}$ , e o período de pico de onda foi  $T_p = 9,7\text{ s}$ . O mesmo ainda apresenta o espectro de energia média das ondas, este com base no hindcast das ondas de 2006 a 2010 para a região costeira do Rio de Janeiro, vide Figura 14.

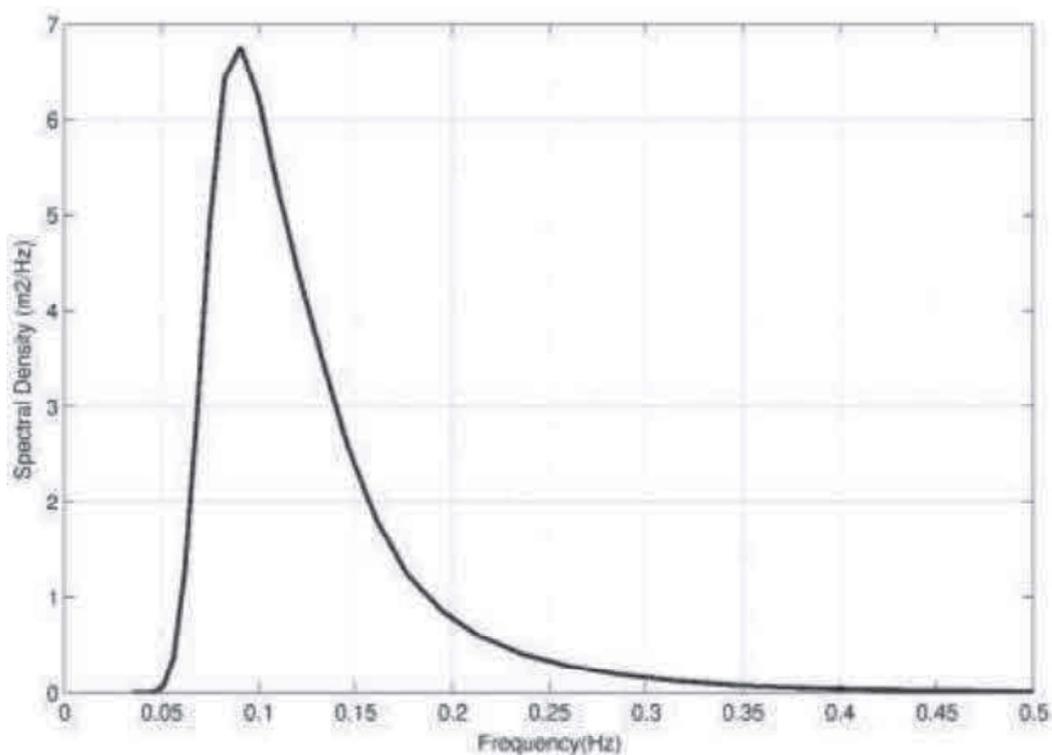


Figura 14: Densidade espectral média ( $\text{m}^2 / \text{Hz}$ ) [8]

Com base no gráfico, é possível perceber que a característica espectral primária

determinada a partir do espectro médio, que tem como pico 0,0908  $Hz$  (11 s), é a presença de grandes quantidades de energia em uma frequência entre 0,076 e 0,14  $Hz$  (7,14 e 13,16 s). [7]

## **2.2 Tecnologias de Dessalinização**

A dessalinização pode desempenhar um papel na abordagem da questão da escassez de água. O processo de dessalinização, onde a água potável limpa é produzida a partir da água do mar ou salobra, é realizado com o uso de membranas ou por processo térmico [9]. Uma maneira de garantir um processo sustentável é usar uma fonte de energia renovável para alimentar a planta de dessalinização. O uso de fontes de energia renováveis para alimentar uma usina de dessalinização e cobrir uma demanda de água doce tem vários benefícios em comparação com o uso de combustíveis fósseis, ou para o transporte de água doce em caminhões ou navios. As fontes de energia renováveis são mais amigáveis ao meio ambiente e os preços podem ser menores dependendo do projeto do conversor de energia [10,11].

A energia das ondas pode conduzir o processo de dessalinização de duas maneiras: indireta ou diretamente. A energia das ondas do mar pode ser convertida em eletricidade para alimentar a usina de dessalinização (indiretamente) ou pode converter o movimento oscilatório em pressão e assim executar o processo de dessalinização diretamente.

Existem vários processos de dessalinização já conhecidos. Os três mais interessantes para combinar com a energia das ondas são:

- Osmose reversa RO
- Eletrodialise ED
- Compressão Mecânica de vapor MVC

Uma vez que esses processos são acionados por energia mecânica (RO e MVC), onde há mudança de fase na dessalinização, ou energia elétrica (ED) que não há mudança de fase.

### **2.2.1 Osmose Reversa**

Mesmo que o termo pareça complexo, é bastante fácil explicar o processo de osmose reversa. Basicamente, a solução de água salgada é forçada através de uma

membrana que filtra o sal para produzir água dessalinizada. Os orifícios da membrana são grandes o suficiente para permitir a passagem das moléculas de água, mas são muito pequenos para permitir que as moléculas de sal fluam com elas. O produto da osmose reversa é, de um lado, água doce, e do outro, o resíduo que é denominado concentrado ou salmoura que possui alta salinidade, figura 15 [12]. Existem dois principais desafios que devem ser considerados ao se trabalhar com técnica de osmose: incrustação da membrana e gerenciamento do concentrado [13]. O primeiro desafio, incrustação da membrana, pode ser mitigado com pré-tratamento correto da água do mar [14]. Já o segundo desafio é um pouco mais complexo, uma vez que por vários anos tinha-se como prática despejar o concentrado no mar; no entanto, à medida que foram surgindo novas pesquisas e estas mostrando os efeitos negativos no meio ambiente, foi desenvolvida outras soluções visando o cuidado que se deve ter com o concentrado resultante do processo. É possível encontrar algumas soluções em [15].

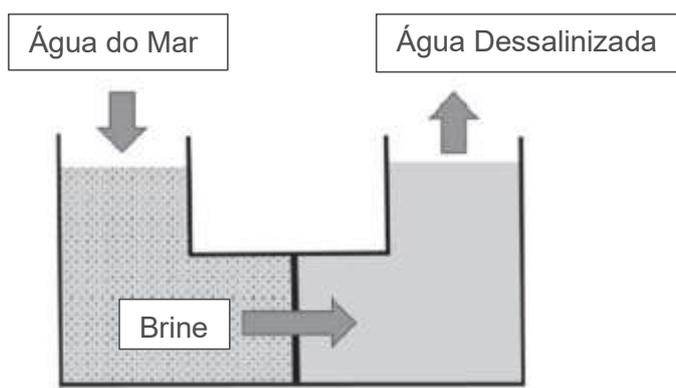


Figura 15: Osmose Reversa RO [16]

### 2.2.2 Eletrodialise, ED

A água salgada inclui íons de sal; portanto, por meio da aplicação de um campo elétrico, é possível separar o sal da água, o que é realizado no processo de dessalinização denominado eletrodialise ou ED [9], figura 16. Membranas de troca iônica [17], membranas de troca aniônica e membranas de troca catiônica, são colocadas entre os ânodos e os cátodos; ao aplicar um campo elétrico, os íons positivos e negativos se movem para os ânodos e cátodos, respectivamente, criando salmoura e água doce [18]. A salinidade da água doce pode ser variada com ED [17].

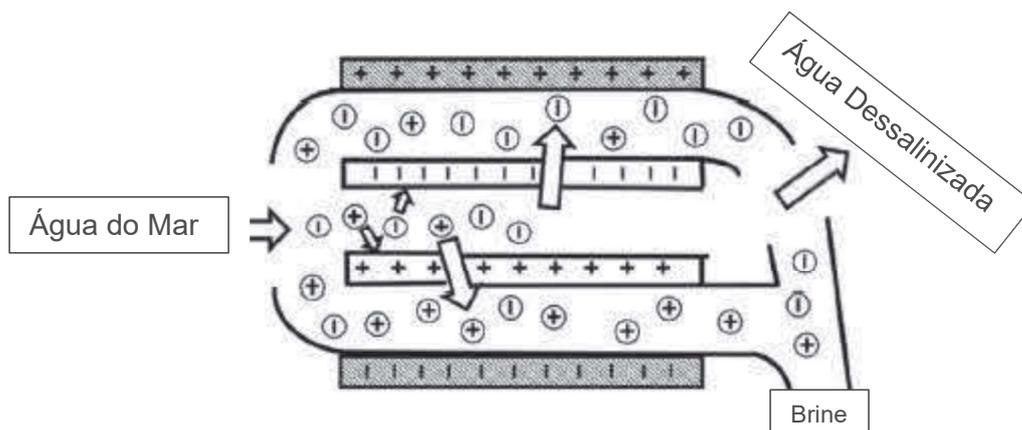


Figura 16: Eletrodialise ED [16]

### 2.2.3 Compressão mecânica de vapor, MVC

A compressão mecânica de vapor ou MVC é um processo térmico, onde a água de alimentação é evaporada para se livrar do sal, figura 17. A água de alimentação é primeiramente pré-aquecida e, em seguida, pulverizada através dos tubos de evaporação, onde a água é evaporada [9]. O vapor flui por um desembaçador para o compressor, onde é superaquecido. Após isto, o vapor flui através de tubos de condensação e condensa [19]. O calor de diferentes estágios do processo é reutilizado para aquecer outras partes do processo [20]. O processo MVC precisa de energia principalmente para alimentar o compressor, mas também os aquecedores, as bombas e assim por diante [21].

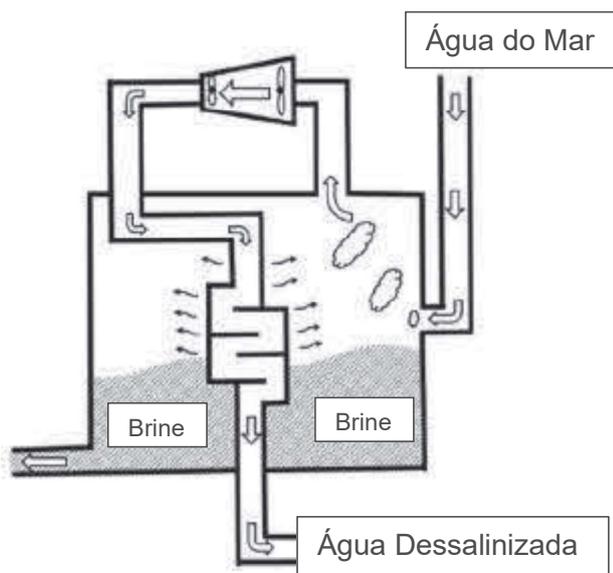


Figura 17: Compressão mecânica de vapor MVC [16]

### **3. Objetivo**

O principal objetivo do presente trabalho é verificar a viabilidade técnica e econômica da geração de água potável utilizando energia elétrica proveniente do COPPE nearshore WEC absorvedor pontual na região costeira do Rio de Janeiro.

Para este estudo será utilizado os resultados provenientes da geração de energia do conversor com controle de latching adaptativo.

Como resultado final espera-se verificar se a energia elétrica gerada é capaz de suprir a demanda de um dessalinizador RO (osmose reversa) comercial, e se é viável economicamente fazer esse acoplamento de forma indireta, ou seja, energia elétrica gerada pelo conversor alimentando o dessalinizador.

### **4. Metodologia**

#### **4.1 Geração de Energia**

Nesta seção será apresentada a explicação teórica, levando em consideração os modos operacionais de funcionamento do sistema, as condições operacionais limitantes, as suposições feitas e uma visão geral do modelo wave-to-wire utilizado para fazer a análise numérica do sistema.

Como dito em seções anteriores, o sistema absorvedor pontual COPPE nearshore WEC é composto pelo conversor de onda acoplado a um subsistema de tomada de força (PTO).

##### **4.1.1 Controle de Latching**

No conversor de onda tem-se uma boia com diâmetro de 4 metros, calado de 5 metros e com massa de 60 toneladas com suporte final em uma base de concreto, que descreve um movimento oscilatório induzido em heave pelas ondas incidentes. Além disso, esta boia transfere a energia obtida da energia cinética das ondas, para uma polia por meio de uma haste. Sobre esta boia é aplicado um controle de latching através de um sistema hidráulico, livre de qualquer tipo de alimentação elétrica, que nada mais é do que o travamento da boia nos momentos de amplitude máxima, ou seja, quando a

velocidade é zero; com a finalidade de igualar sua fase de velocidade com a fase de velocidade da onda de superfície incidente, configurando um o fenômeno de ressonância entre a boia e a onda incidente. Abaixo segue uma representação ilustrativa de como funciona o latching.[7]

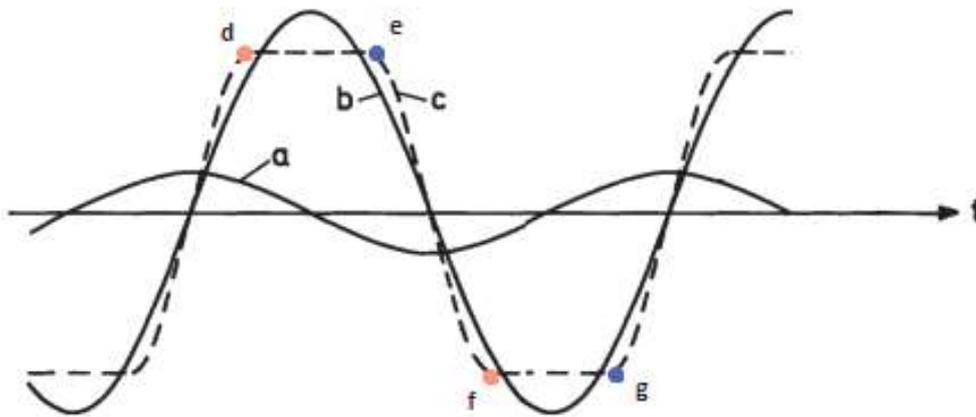


Figura 18: Esquemática do controle de latching [22]

Onde:

“a” é a elevação das ondas em função do tempo.

“b” é o deslocamento ótimo da boia.

“c” é o deslocamento real da boia, onde a posição da boia é fixada (partes horizontais da curva) durante os intervalos controlados de cada ciclo da onda.

Conforme explicado anteriormente, o travamento da boia acontece nos momentos de pico e cavado, o tempo de travamento é  $t_e - t_d$ , ou seja, a boia é travada nos pontos laranjas,  $t_d$  e  $t_f$  e destravada nos pontos azuis,  $t_e$  e  $t_g$ , desta forma equalizando a fase da boia com a fase da onda, fazendo com que a oscilação da boia fique em ressonância com a onda incidente, desta forma, configurando uma captação de energia amplificada [22].

Para o cálculo do tempo de acionamento do controle de latching é necessário considerar ocorrências não previstas anteriormente da incidência de onda, para que desta forma o modelo seja mais realista possível, uma vez que é extremamente difícil prever a ocorrência de uma onda irregular de forma exata, teria que ter um controle das tomadas de decisão de travamento quase que instantâneo com o momento em que a onda incidisse no corpo. Sendo assim como modelo não preditivo foi utilizado a simplificação proposta por SHENG et al. 2014 [23]:

$$\text{Tempo de Duração do latching (cada extremidade)} = \frac{(T_{\text{onda}} - T_{\text{boia}})}{2} \quad (4.1)$$

Onde o tempo de duração do latching é representado pela diferença no eixo horizontal "x" do gráfico  $t_d - t_e$  e  $t_r - t_g$ .

#### 4.1.2 Sistema de tomada de força (PTO)

As características do PTO do sistema COPPE nearshore WEC absorvedor pontual já foram descritas no final da seção 2.1.3. Portanto, nesta seção o foco será em apresentar os modos e restrições operacionais.

Este PTO é classificado como eletromecânico, uma vez que há parte e componentes do sistema que são mecânicos e há o gerador elétrico rotativo. Para o funcionamento deste PTO há dois modos operacionais característicos. Primeiro, é importante destacar a restrição operacional para o sistema mecânico e para o gerador elétrico.[7]

Para o sistema mecânico, a restrição está na velocidade de rotação que a boia é capaz de entregar ao eixo, o eixo só é ativado se a velocidade de rotação fornecida pela boia for maior do que a velocidade de rotação já existente no eixo, caso isso não aconteça o PTO não é ativado e a boia oscila sem gerar carga para o sistema.[7]

Para o sistema elétrico, a restrição está no range de rotações entregue ao gerador elétrico. O gerador só começa a produzir energia elétrica a partir de  $RPM_{\min} = 20\text{rpm}$  e só é capaz de produzir energia elétrica até  $RPM_{\max} = 450\text{rpm}$ , o que resulta na produção de uma potência máxima de saída de  $48 \text{ kW}$ . Qualquer outra rotação fora deste intervalo a energia produzida é zero.

Com as restrições apresentadas pode-se definir os modos operacionais [7]:

1º modo operacional:

$V_{\text{boia}} > V_{\text{eixo}}$  ; A boia aciona o PTO;

$RPM_{\min} < RPM_{\text{eixo}} < RPM_{\max}$  ; Há geração de energia elétrica por parte do conjunto eletromecânico, ou seja, volante mais gerador.

$RPM_{min} > RPM_{eixo}$  ou  $RPM_{eixo} > RPM_{max}$  ; O PTO é acionado, porém não há geração de energia elétrica.

2º modo operacional:

$V_{boia} < V_{eixo}$  ; A boia não aciona o PTO

$RPM_{min} < RPM_{eixo} < RPM_{max}$  ; Há geração de energia elétrica se a velocidade de rotação do volante e do gerador estiver dentro da faixa operacional, porém neste caso acontece o desacoplamento do sistema, após o componente contra recuo, note que neste caso o desacoplamento não é físico.

$RPM_{min} > RPM_{eixo}$  ou  $RPM_{eixo} > RPM_{max}$  ; Neste caso também ocorre o desacoplamento bem como no anterior, porém não há geração de energia pois o sistema está fora da faixa de rotação operacional do gerador.

#### **4.1.3 Modelo wave-to-wire**

Para fazer simulações numéricas de como o sistema COPPE nearshore WEC absorvedor pontual vai funcionar, e também para otimiza-lo, foi desenvolvido o modelo wave-to-wire, que é um código executável *Fortran*, e detalhado em SHADMAN, 2017 [7]. No entanto nesta seção será apresentado uma visão geral e abrangente do modelo.

O modelo se chama *Wave-to-wire*, pois recebe energia de onda e fornece energia elétrica. O mesmo faz o mapeamento das sub-rotinas do sistema COPPE nearshore WEC absorvedor pontual e como elas interagem entre si. Observa-se que são muito importantes as informações das interações das sub-rotinas que tem ligação com as cargas provenientes do meio ambiente, inputs. Isto se dá, pois se espera que as outras informações importantes, de outputs, estejam mais aderentes, possíveis, a realidade. Para garantir precisão nas informações de saída, é necessário atender algumas premissas iniciais. As suposições feitas têm como objetivo tornar as simulações mais realistas possíveis.

O código usa a teoria linear de hidrodinâmica, considerando a força na boia não linear devido a viscosidade do escoamento ao redor do corpo. Isso é muito importante quando o controle de latching é aplicado, uma vez que ao fazer isso a amplitude de oscilação da boia é aumentada devido a energia potencial, por consequência sua velocidade também. Com isso a velocidade relativa entre as partículas da água e do

corpo também aumenta. Ao não considerarmos o efeito viscoso o resultado da produção de energia elétrica seria superestimado. Lembrando que a boia só tem um grau de liberdade para executar o movimento vertical, heave [7]

Outra suposição, é a utilização de um sistema de conversão (PTO) mecânico, considerando seus limites físicos e práticos como foi mostrado na seção 4.1.2 [7].

Outra consideração, importante é que o sistema não pode oscilar livremente, em outras palavras, a boia não pode ter uma amplitude maior do que o seu limite físico, isso deve ser aplicado no modelo numérico através do controle *End-stop*. Para esse sistema é considerado 3 metros para a amplitude máxima de oscilação da boia [7].

Como se trata de um modelo numérico, é importante apresentar a equação dinâmica considerada nas simulações [7]. Usando a segunda lei de newton temos:

$$M \ddot{x} = F_r \quad (4.2)$$

$$(M + A_{33}(\infty)) \cdot \ddot{X}_3 = F_{e,3} - \int_{-\infty}^t f_{r,3}(t - \tau) \cdot \dot{X}_3(\tau) \cdot d\tau + F_{h,3} + F_{PTO} + F_{Latching} + F_V + F_{end-stop} \quad (4.3)$$

Onde:

$M$  – Massa da boia

$A_{33}$  – Massa adicional

$\ddot{X}_3$  – Aceleração da boia em heave

$F_{e,3}$  – Força da excitação de onda em heave

$\int_{-\infty}^t f_{r,3}(t - \tau) \cdot \dot{X}_3(\tau) \cdot d\tau$  – Efeito de memória, que é utilizado para considerar as velocidades das ondas geradas pelo movimento vertical da boia.

$F_{h,3}$  – Força de restauração, considera o efeito da gravidade e do empuxo

$F_{PTO}$  – Força do PTO e do sistema hidrodinâmico

$F_{Latching}$  – Força que precisa ser aplicada para travar a boia

$F_V$  – Força da viscosidade, equação de Morison

$F_{end-stop}$  – Força do end – stop, força para limitar a amplitude da boia

É imprescindível o uso de todas essas forças na modelagem *Wave-to-wire* para que tenhamos um resultado mais realista possível.

## 4.2 Dessalinização

A combinação de energia das ondas e tecnologias de dessalinização é brevemente mostrada na Figura 19.

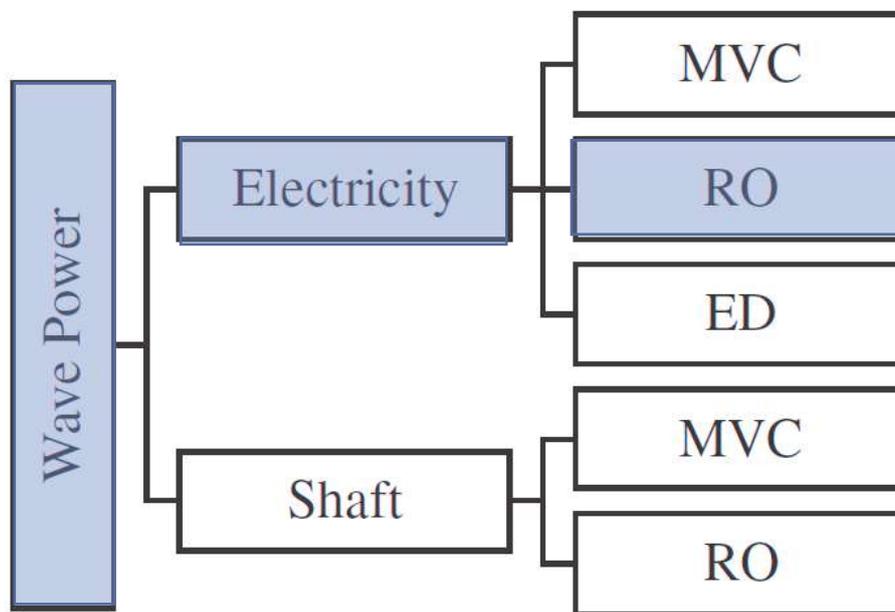


Figura 19: Combinação de energia das ondas e processos de dessalinização [16]

Para o presente trabalho, é adotado um corpo ativado por ondas, que é apresentado na seção 2.1.2, gerando energia elétrica para alimentar um dessalinizador que é composto por uma bomba para pressurizar a água do mar através de uma membrana de osmose reversa (RO), desta forma caracterizando um processo de dessalinização indireto, como sinalizado em azul, no caminho superior da Fig.19.

É importante evidenciar que para o presente trabalho não foi utilizado nenhum processo de simulação para a obtenção de uma membrana ou dessalinizador ótimo, uma vez que a ideia deste não é propor um dessalinizador ou uma membrana otimizada, ou até mesmo verificar o potencial de geração de permeado de uma membrana específica. No entanto é válido apresentar a formulação utilizada para o cálculo de tal, afim de mostrar como funciona o processo, matematicamente, de dessalinização por osmose reversa (RO) de forma indireta.

O processo de osmose reversa (RO), que gera fluxo de permeado através de uma membrana, pode ser simulado utilizando um modelo de solução-difusão. O modelo assume que o resultado da diferença entre a pressão de condução líquida, que é igual à pressão de alimentação de entrada ( $\Delta\rho$ ), e a diferença na pressão osmótica ( $\Delta\pi$ ) sobre a membrana é o fator principal de maior influência no fluxo de permeado  $Q_p$ . [24]

$$Q_p = A_\omega A_m (\Delta\rho - \Delta\pi) \quad (4.4)$$

onde  $A_\omega$  é o coeficiente de permeabilidade, dependendo da permeabilidade da membrana, temperatura e fator de incrustação, e  $A_m$  é a área de superfície ativa da membrana. Além disso, com base no modelo, a concentração de soluto no permeado pode ser expressa como:

$$C_p = \frac{C_m}{\frac{A_\omega}{B_s}(\Delta\rho - \Delta\pi) + 1} \quad (4.5)$$

Onde  $C_m$  é a concentração de soluto na membrana (lado da água do mar) e  $B_s$  é o parâmetro de transporte do soluto.

Como informação adicional, a *DuPoint Water Solution* criou um software chamado “WAVE” onde é possível fazer simulações com base nos parâmetros  $A_\omega$ ,  $B_s$  e pressão osmótica da membrana a ser analisada. Desta forma possibilitando o estudo de possíveis análises e otimizações de sistemas de dessalinização. [24, 25]

## 5. Resultados

### 5.1 Sistema Ilha Rasa

Começando pelo fator meio ambiente, para condição predominante de mar foi encontrado altura significativa média de  $H_s = 1,33 \text{ m}$ , e o período de pico da onda foi  $T_p = 9,7 \text{ s}$ . [7]

Para a boia é importante pontuar que, como a mesma tem diâmetro pequeno em relação aos comprimentos de onda, assume-se que não há efeito de difração. O valor máximo do amortecimento hidrodinâmico é  $6,5 \text{ kN/(m/s)}$  que ocorre na frequência  $\omega = 1,26 \text{ rad/s}$  ( $T \approx 5 \text{ s}$ ). A frequência natural da boia é  $\omega = 1,57 \text{ rad/s}$  e seu período natural

é  $T = 4s$ , que corresponde ao valor de RAO (Response amplitude operator) de elevação máxima 4,7 como é possível ver no gráfico abaixo [7]:

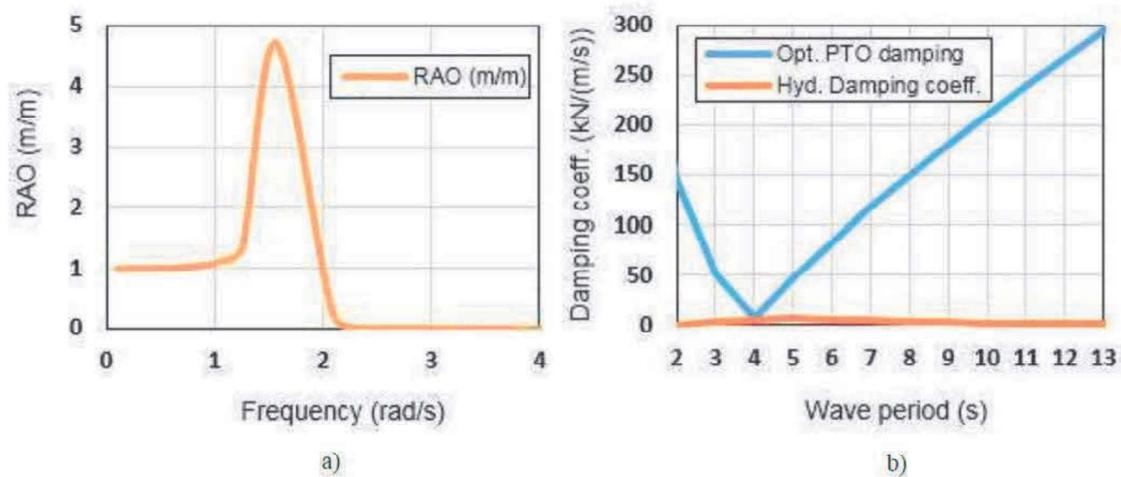


Figura 20: a) Gráficos de interação entre a condição predominante de mar e a boia.[7]

Para o gerador elétrico, destaca-se que o mesmo tem dois modos operacionais como perfil de funcionamento e que os dois são limitados por faixa de velocidade de rotação. O gerador só trabalha gerando potência dentro da seguinte faixa de rotação 20 – 450 rpm, que tem como resultante uma potência gerada máxima de 48kW.

Para sintetizar os resultados encontrados no estudo do absorvedor pontual COPPE nearshore WEC, foi feita a tabela 4 com os principais resultados.

Resultados - COPPE nearshore WEC	
Altura significativa média ( $H_s$ )	1,33 m
Período de pico da onda ( $T_p$ )	9,7 s
Frequência natural da boia ( $\omega$ )	1,57 rad/s
Período natural da boia ( $T$ )	4 s
Faixa de rotação do gerador	20 - 450 rpm
Limite operacional de potência gerada	48 kW
Fator de Capacidade	31 %
Energia elétrica produzida por ano	63 MWh/ano
Eficiência média do <i>wave-to-wire</i>	13 %
Potência total instalada	23 kW
Potência Real produzida anualmente	7 kW

Tabela 4: Resultados - COPPE nearshore WEC

### 5.1.1 Custo de geração de energia

Para o cálculo do custo da geração de energia é necessário entender como é dividido o custo de um projeto. Um projeto de escala substancial é dividido em *CAPEX* (Capital Expenditure) e *OPEX* (*Operational expenditure*).

*CAPEX* – É todo o custo envolvido no projeto até o momento da instalação do mesmo. Está inserido nisto custo de compra de material e equipamentos, custo de fabricação, custo de transporte, custo HH (homem-hora) e o próprio custo de instalação in situ.

*OPEX* – É todo o custo operacional que surge decorrente do funcionamento do projeto. Está inserido nisto, custo de abastecimento, custo de manutenção e custo de reparo.

Para o sistema COPPE nearshore WEC foi feito uma estimativa de custo de *CAPEX* e *OPEX* em MATOS, 2021 [26] com base nas referências [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33] não considerando os custos do sistema PTO.

Custo de CAPEX	
Descrição	Custo (R\$)
Custo de aquisição da Boia	R\$ 450.339,21
Custo de aquisição do pistão	R\$ 8.962,07
Custo de aquisição da tubulação	R\$ 166.495,29
Custo do suporte	R\$ 600.000,00
Custo do desenvolvimento	R\$ 18.773,90
Custo de instalação	R\$ 603.000,00
Custo de transporte	R\$ 603.000,00
Seguro	R\$ 12.515,93
Contingências	R\$ 62.579,66

Tabela 5: Custo CAPEX

Custo de OPEX	
Descrição	Custo (R\$)
Custo de manutenção	R\$ 151.539,96

Tabela 6: Custo OPEX

Custo total	
Custo total	R\$ 2.677.206,02

Tabela 7: Custo total

Uma vez em posse do custo de CAPEX e OPEX, é possível fazer o cálculo do custo nivelado de energia produzida (LCOE) NEARY et al, 2014 [27]. Nessa expressão, há a presença da taxa de desconto aplicada na correção do custo operacional ao longo do tempo e na vazão anual, que aqui será considerada como sendo 12%. A vida útil dos sistemas foi considerada como sendo 20 anos [26].

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{Energia\ prod.\ por\ ano}{(1+r)^t}} \quad (5.1)$$

Onde:

n – É a vida útil do sistema, nesse caso n = 20

r – Taxa de desconto, que traz valor futuro para valor presente, r = 12%

$\sum_{t=1}^n \frac{OPEX}{(1+r)^t}$  – Custo operacional ao longo da vida útil.

$\sum_{t=1}^n \frac{Energia\ prod.\ por\ ano}{(1+r)^t}$  - Energia produzida ao longo da vida útil.

Aplicando os valores das tabelas 4, 5 e 6 na formulação apresentada, tem-se que o LCOE é:

Custo Nivelado por geração de energia - LCOE	
Reais (R\$)	7772,5 R\$/MWh
Dolar (\$)	1500 \$/MWh

Tabela 8: Custo nivelado por geração de energia – LCOE

Vale destacar que esses resultados podem ter variações de acordo com o câmbio local.

## 5.2 Dessalinização

Uma vez obtido os outputs da energia elétrica gerada pelo conversor de onda COPPE nearshore WEC, e considerando que a salinidade da água do mar na costa do Rio de Janeiro é de 35g sal por litro de água, temos o seguinte cenário.

O absorvedor pontual COPPE nearshore WEC trabalhando em situação real, ou

seja, com ondas irregulares e com controle de latching adaptável ACCDL com as seguintes especificações de geração de energia:

Resultados - COPPE nearshore WEC	
Energia elétrica produzida por ano	63 MWh/ano
Potência Real produzida anualmente	7 kW

*Tabela 9: Características da geração de energia*

Para a potência de 7kW, foi encontrado dois dessalinizadores RO (osmose reversa), o que está demonstrado abaixo, Aqua-Base YC5 300L/h SLCE e o Dessalinizador Range SD11- 403 que tem capacidade de geração de água doce maior (500L/H, 200L/H a mais), porém este requer um suprimento energético exatamente de 7kW; para uma situação ideal seria ótimo, porém trazendo para um escopo realista, o sistema COPPE nearshore WEC teria que ter um fator de capacidade constante acima dos 30%, que pode não ser o que ocorrerá, ainda mais se tratando de uma fonte energética imprevisível, incidência de perfis de onda.



*Figura 21: Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE*

Equipamentos contidos no dessalinizador RO (osmose reversa) [34]:

- Bomba de alimentação
- Bomba de alta pressão Cat Pumps
- Membranas de alta rejeição
- Filtro de 20 e 5 microns
- Dispositivos de segurança de alta e baixa pressão
- Válvula reguladora
- Medidores de alta e baixa pressão
- Controle automático de salinidade.

- H-meter
- Medidor de vazão de água doce

Características técnicas do dessalinizador:

YC/YK Range							
Capacity	Model	Voltage			Electricity consumption	Weight	
		Battery	Single phase	Three phase			
60 L/h	YC1	N.A.	115 or 230 V		1.5kW	61 kg	
	YK1					52 kg	
120 L/h	YC2				1.5kW	69 kg	
	YK2						60 kg
180 L/h	YC3				400 or 440 V	2kW	77 kg
	YK3						68 kg
240 L/h	YC4		2kW	85 kg			
	YK4			76 kg			
300 L/h	YC5		230 V	3kW	95 kg		
	YK5		86 kg				

Figura 22: Características do Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE. [34]

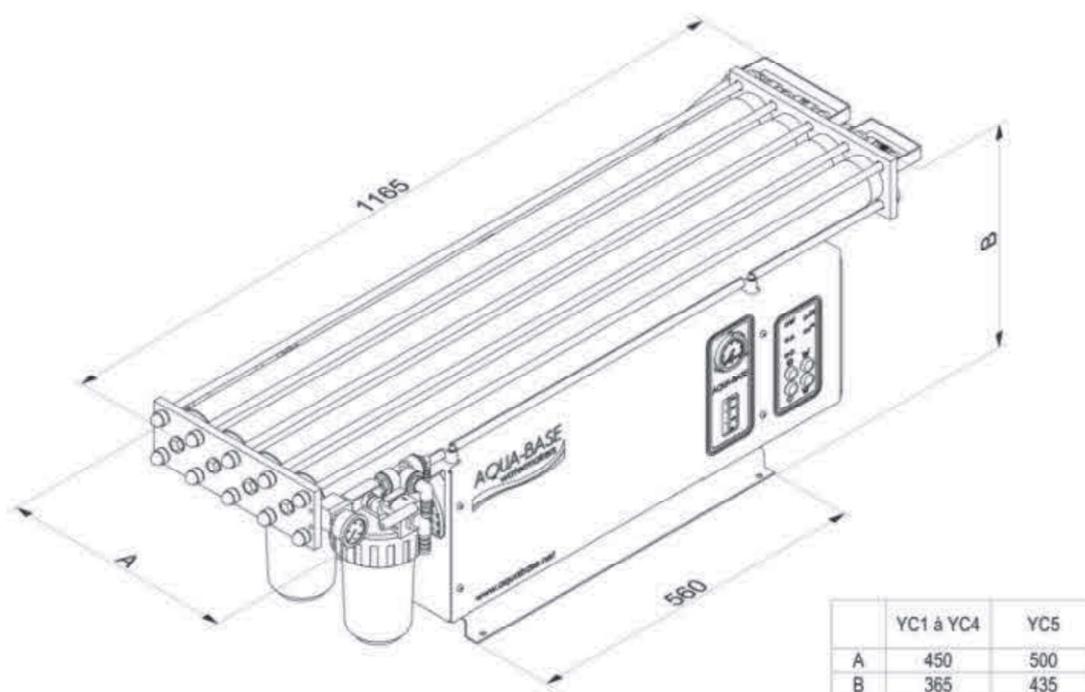


Figura 23: Dimensões do Dessalinizador Aqua-Base YC5 300L/h SLCE. [34]

Para este dessalinizador, é possível notar que a capacidade de geração de água potável é bem menor do que o suprimento energético fornecido pelo sistema COPPE nearshore WEC. Com alimentação de 3kWh de potência é capaz de produzir 300L/h

[26], o que significa dizer que é capaz de produzir 0,3m<sup>3</sup>/h ou 7,2m<sup>3</sup>/24h. Desta forma, chega-se ao quociente de 2.628m<sup>3</sup>/ano (365 dias).

### 5.2.1 Custo total de geração de água doce

Para o cálculo do custo total de geração de água doce, foi considerado o custo de aquisição do equipamento como sendo o CAPEX e para o OPEX foi feito uma estimativa de 20% desse custo. O custo de aquisição do equipamento é de \$27.267,58; em real R\$141.791,42 a depender do câmbio [34].

Em termos práticos o CAPEX<sub>d</sub> e o OPEX<sub>d</sub> do dessalinizador foram somados ao CAPEX<sub>w</sub> e ao OPEX<sub>w</sub> do conversor de onda. O denominador ao invés considerar a energia produzida por ano, considerou a quantidade de m<sup>3</sup> (metros cúbicos) produzidos por ano. Então o LCOF (Levelized Cost of Freshwater) ficou:

$$LCOF = \frac{(CAPEX_w + CAPEX_d) + \sum_{t=1}^n \frac{(OPEX_w + OPEX_d)}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{\text{Água doce prod. por ano}}{(1+r)^t}} \quad (5.2)$$

Onde:

n – É a vida útil do sistema, nesse caso n = 20

r – Taxa de desconto, que traz valor futuro para valor presente, r = 12%

Água doce produzida por ano – 2628 m<sup>3</sup>/ano

Tem-se:

Custo Nivelado por geração de água doce - LCOF	
Reais (R\$)	204 R\$/m <sup>3</sup>
Dólar (R\$5,20)	40 \$/m <sup>3</sup>

Tabela 10: Custo Nivelado por geração de água doce – LCOF

Uma vez que o custo estimado para produção de água doce dessalinizada pelo método de osmose reversa no Brasil, mais precisamente no Rio de Janeiro gira em torno de [35]:

Custo de geração de água doce por osmose reversa		
Método	Fonte	Custo
Osmose Reversa	Rede elétrica	6,22 - 7,71 R\$/m <sup>3</sup>
Osmose Reversa	Painéis fotovoltaicos	12,47 - 25,67 R\$/m <sup>3</sup>

*Tabela 11: Custo de geração de água doce por osmose reversa*

Foi feito uma estimativa utilizando LCOF para dois dessalinizadores (idênticos) ao invés de um, como calculado anteriormente. Isto só é possível, pois a potência fornecida pelo COPPE nearshore WEC é de 7kW e o consumo de cada dessalinizador é de 3kW.

Custo Nivelado por geração de água doce - LCOF	
Reais (R\$)	121 R\$/m <sup>3</sup>
Dólar (R\$5,20)	23,3 \$/m <sup>3</sup>

*Tabela 12: Custo Nivelado por geração de água doce – LCOF para 2 dessalinizadores*

Como esperado o resultado foi melhor, uma vez que a potência gerada é mais bem aproveitada quando usado dois dessalinizadores.

Vale destacar dois parâmetros que devem ser verificados de forma cuidadosa quando se fala em geração de água doce pelo método de osmose reversa. O aproveitamento da potência gerada pelo WEC deve ser o maior possível e o preço do dessalinizador que vai ser adquirido. Pois estes têm influência direta no custo nivelado da água gerada – LCOF.

## 6. Conclusão

Para ondas regulares, tem-se que a geração de energia através de ondas sofre uma boa influência do Cx (coeficiente multiplicador de velocidade). Foi possível observar que para maiores valores de Cx foi obtido forças mais altas na boia do WEC, o que propicia mais produção de energia na faixa de períodos e onda predominantes. Porém foi evidenciado que ao aplicar um controle de latching (CDL) houve uma amplificação excessiva na velocidade de rotação ultrapassando o limite operacional do PTO, fazendo com que a geração de energia fosse zero. Porém para solucionar esse problema ou reduzir esse efeito, foi proposto um controle de latching adaptativo (ACCDL). Esse controle apresenta como principal diferença o travamento da boia, ou não, dependendo

da velocidade limite do gerador, ou seja, se a velocidade do gerador ainda não atingiu a velocidade limite naquele momento a boia é travada para atingir a mesma fase da onda; caso o gerador já tenha atingido sua velocidade limite naquele momento o travamento não se aplica. Esse mecanismo proporciona um maior nível de potência média para os estados de mar com período de pico maiores que 6 segundos.

Para ondas irregulares, do ponto de vista da análise da produção de energia anual (AEP), o controle de latching adaptativo (ACCDL) proporciona melhora significativa quando Cx é intermediário ou baixo, principalmente na faixa de ondas predominantes; e assim como para ondas regulares, mantém velocidade de rotação no range operacional do gerador, conseqüentemente produzindo energia de forma mais estável. Aqui é importante destacar que ACCDL também diminui significativamente a força imprimida pelo sistema hidráulico na boia para efetuar o travamento da mesma nas amplitudes mais elásticas, o que pode resultar em facilidade na implementação, reduzindo custos. Vale destacar que mesmo com essas vantagens a geração máxima de energia ocorre em estados de mar próximo ao período natural da boia ( $T = 4s$ ) que está fora da faixa predominante dos períodos de onda ( $7 - 13s$ ).

<b>Resultados - COPPE nearshore WEC</b>	
Calado no local de instalação	20 m
Distância da costa	14 km
Altura significativa média (Hs)	1,33 m
Período de pico da onda (Tp)	9,7 s
Frequência natural da boia ( $\omega$ )	1,57 rad/s
Período natural da boia (T)	4 s
Faixa de rotação do gerador	20 - 450 rpm
Limite operacional de potência gerada	48 kW
Fator de Capacidade	31 %
Energia elétrica produzida por ano	63 MWh/ano
Eficiência média do <i>wave-to-wire</i>	13 %
Potência total instalada	23 kW
Potência Real produzida anualmente	7 kW
LCOE (reais)	7.772,50 R\$/MWh
LCOE (dólar = R\$5,20)	1.500 \$/MWh

*Tabela 13: Resultados finais - COPPE nearshore WEC*

Após as informações e resultados referentes ao perfil de comportamento operacional do COPPE nearshore WEC, foi possível selecionar, comercialmente, o dessalinizador com os resultados informados na tabela 11.

Resultados - Dessalinizador	
Modelo	Aqua-Base YC5 SLCE
Peso (cada)	95 kg
Consumo Elétrico (cada)	3 kW
Voltagem (cada)	230 V
Capacidade de geração individual	0,3 m <sup>3</sup> /h
Capacidade de geração total	0,6 m <sup>3</sup> /h
Capacidade de geração total por ano	5.256 m <sup>3</sup> /ano
LCOF (reais)	121 R\$/m <sup>3</sup>
LCOF (dólar = R\$5,20)	23,3 \$/m <sup>3</sup>

Tabela 14: Resultados finais - Dessalinizador

A fim de contextualizar com a rotina da população do Brasil, foi feito um breve estudo em relação ao consumo médio de água do brasileiro. Segundo dados do *Instituto trata Brasil* [37] o consumo é de 153,9 L / habitante / dia. Destaca-se que este consumo não considera o consumo de água através da ingestão. Seguindo a recomendação da *Sociedade Brasileira de Nefrologia* [38], cada pessoa deve beber 30ml de água por quilograma (Kg), por dia. Considerando que a população brasileira tem como peso médio 75kg, o consumo de água diária seria em torno de 2,25 L. Somando esses 2,25 L ao consumo 153,9 L, tem-se o resultado de 156,2 L / habitante / dia. Note que não há diferenciação entre a água própria para ingestão e a água para consumo na rotina, uma vez que, a água produzida pelo dessalinizador é qualificada para ambos.

Considerando as informações descritas anteriormente, tanto na tabela 14, quanto no parágrafo anterior, conclui-se que esse sistema, dessalinizador alimentado indiretamente (eletricamente) pelo COPPE nearshore WEC, é capaz de suprir a demanda de 92 pessoas anualmente. Admitindo que uma família é composta por 4 pessoas, constata-se que o volume ofertado de água doce supri a necessidade de 23 casas anualmente.

Além disso, foi feita uma comparação com custo nivelado da produção de água dessalinizada de forma convencional, ou seja, através de combustível fóssil. No artigo de referência é considerado o volume de água dessalinizada produzida por dia em m<sup>3</sup> para locais de difícil acesso e que tenham escassez de água potável, como ilhas remotas. O custo de produção de água potável para pequenos sistemas de dessalinização (até 1000 m<sup>3</sup> por dia) é de 3,20 \$/m<sup>3</sup>. [39]

É importante levantar uma breve discussão sobre modularização de dessalinizadores de osmose reversa (RO) que requerem menor potência operacional. Ao utilizar dois dessalinizadores de 3kW ao invés de um de 7kW foi percebido que é possível executar a operação de dessalinização em um range maior, isto porque quando o conversor de ondas fornecer uma potência de 4kW ainda será possível manter a operação, porém com apenas um dessalinizador de 3kW produzindo menos volume de água doce. Pensando desta forma é possível diluir / modularizar a potência de 7kW fornecida pelo conversor de ondas em sete, nove, quinze, ou mais dessalinizadores de 1kW, visto que desta forma a produção de água doce seria ainda menos intermitente, uma vez que, mesmo quando o conversor de ondas fornecesse apenas 1kW de potência, seria possível obter água doce. Além do fator de segurança operacional, por meio de redundância do sistema, ser potencializado.

Com base nesse estudo, a dessalinização autônoma movida a energia de ondas pode ser uma alternativa viável e sustentável, do ponto de vista técnico, aos sistemas de dessalinização mais comumente usados, que muitas vezes incluem combustíveis fósseis. Este estudo comprova, também, a capacidade de geração de água doce na costa do Rio de Janeiro, mesmo que em pequena escala, e custo não competitivo, ainda; o que pode ser atribuído a “maturidade tecnológica” do uso da conversão da energia de onda em relação a outras fontes de energias renováveis, em outras palavras, ainda há muito espaço para otimizações de materiais e métodos de aplicação, tanto nos WECs quanto nos dessalinizadores e suas interligações. Isto impacta diretamente no custo nivelado final da produção de água doce.

## **7. Orientação para pesquisas e desenvolvimentos futuros**

É válido para pesquisas futuras, fazer a análise do projeto geral, instalações, interligações entre os equipamentos, WEC + dessalinizador + transporte de energia + transporte de água, armazenamento de energia gerada e de água doce, viabilidade de tubulação e cabeamento no leito marinho interligando o sistema à costa.

É interessante também, fazer o estudo da geração de água doce de forma direta, ou seja, o conversor de energia de onda alimentando o dessalinizador com pressão ao invés de energia elétrica no sistema Ilha Rasa. Além de considerar o mesmo estudo em outras localidades na costa do Brasil.

Com a finalidade de aumentar o volume de água doce gerado, com a mesma potência elétrica fornecida pelo WEC, é interessante considerar dois ou mais tipos de

processos de dessalinização “acoplados” trabalhando em conjunto. Complementando, para o aumento do volume de água doce gerado, porém com foco na continuidade da produção, destaca-se um estudo que relaciona custo de aquisição de dessalinizadores com menor requisito operacional elétrico, porém em maior quantidade, com a capacidade de produção de água doce de forma mais contínua, como foi explicado ao final do capítulo 6.

## 8. Referência Bibliográfica

- [1] DRB Kraemer and ME McCormick, Ocean Wave-Energy Conversion, Elsevier, 2018, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11490-3>
- [2] IEA-OES Executive Committee, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems Annual Report 2007, 27 (2007).
- [3] M.M. Mekonnen, A.Y. Hoekstra, Four billion people facing severe water scarcity, Sci. Adv. 2 (2016) 1–6, <http://dx.doi.org/10.1126/sciadv.1500323>.
- [4] Q. Chen, Y.Y. Liu, C. Xue, Y.L. Yang, W.M. Zhang, Energy self-sufficient desalination stack as a potential fresh water supply on small islands, Desalination 359 (2015) 52–58, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.010>.
- [5] UN-Water, Water for a sustainable world, The United Nations World Water Development Report 2015, 2015, [http://dx.doi.org/10.1016/S1366-7017\(02\)00004-1](http://dx.doi.org/10.1016/S1366-7017(02)00004-1).
- [6] United Nations General Assembly. Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development. 2015.
- [7] Shadman, Milad. Application of the latching control on a wave energy converter. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2017.
- [8] Estefen SF, Costa PR, Ferreira R, Lourenco MI, Martins M, Castello X, et al. Relatório -7 do projeto de implantação de conversor nearshore para geração de eletricidade pelas ondas do mar - PENO-12754 2014.
- [9] H.T. El-Dessouky, H.M. Ettouney, Fundamentals of Salt Water Desalination, Elsevier, 2002.
- [10] W. Lai, Q. Ma, H. Lu, S. Weng, J. Fan, H. Fang, Effects of wind intermittence and fluctuation on reverse osmosis desalination process and solution strategies, Desalination 395 (2016) 17–27, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.019>.
- [11] M.A. Eltawil, Z. Zhengming, L. Yuan, A review of renewable energy technologies integrated with desalination systems, Renew. Sust. Energ. Rev.

- [12] S.A.R.O.S. Desalination, SAROS – Turning Waves into Fresh Water, <https://sarosdesalination.com/>, (2020), Accessed date: 07 September 2021.
- [13] S.H. Joo, B. Tansel, Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: a review, *J. Environ. Manag.* 150 (2015) 322–335, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.027>.
- [14] S. Jamaly, N.N. Darwish, I. Ahmed, S.W. Hasan, A short review on reverse osmosis pretreatment technologies, *Desalination* 354 (2014) 30–38, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.09.017>.
- [15] A. Pérez-González, A.M. Urtiaga, R. Ibáñez, I. Ortiz, State of the art and review on the treatment technologies of water reverse osmosis concentrates, *Water Res.* 46 (2012) 267–283, <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2011.10.046>.
- [16] Leijon, J., & Boström, C. (2018). Freshwater production from the motion of ocean waves – A review. *Desalination*, 435, 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.10.049>
- [17] A.H. Galama, M. Saakes, H. Bruning, H.H.M. Rijnaarts, J.W. Post, Seawater pre-desalination with electrodialysis, *Desalination* 342 (2014) 61–69, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2013.07.012>.
- [18] A.H. Galama, G. Daubaras, O.S. Burheim, H.H.M. Rijnaarts, J.W. Post, Seawater electrodialysis with preferential removal of divalent ions, *J. Membr. Sci.* 452 (2014) 219–228, <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2013.10.050>.
- [19] S.H. Mounir, M. Feidt, C. Vasse, Thermoeconomic study of a system for pollutant concentration with mechanical vapour compression, *Appl. Therm. Eng.* 25 (2005) 473–484, <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2004.05.011>.
- [20] H. Ettouney, Design of single-effect mechanical vapor compression, *Desalination* 190 (2006) 1–15, <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.08.003>.
- [21] D. Zejli, A. Ouammi, R. Sacile, H. Dagdougui, A. Elmidaoui, An optimization model for a mechanical vapor compression desalination plant driven by a wind/PV hybrid system, *Appl. Energy* 88 (2011) 4042–4054,

<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.031>.

[22] BUDAL, K.; FALNES, J. (1982) Wave power conversion by point absorbers: A Norwegian project, *International Journal of Ambient Energy*, 3:2, 59-67, <https://doi.org/10.1080/01430750.1982.9675829>

[23] SHENG, W.; ALCORN, R.; LEWIS, A.; On improving wave energy conversion, part I, Optimal and Control technologies, *Renewable Energy*, Volume 75, 2015, Pages 922-934, ISSN 0960-1481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.048>.

[24] Sarai Atab, M.; Smallbone, A.; Roskilly, A. An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination* 2016, 397, 174–184. [CrossRef]

[25] DOWWater & Process Solutions. DOWWater Solution Design Software. Available online: <https://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/design-software> (accessed on 12 September 2021).

[26] Matos, Mateus Nehrer N. N. Projeto de um sistema de bombeamento de água alimentado mecanicamente por um conversor de energia de onda, Tese (graduação) - UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Naval e Oceânica, 2021

[27] NEARY V. S., PREVISIC M., JEPSEN R. A., LAWSON M. J., YU Y., COPPING A. E., et al., 2014, Methodology for Design and Economic Analysis of Marine Energy Conversion (MEC) Technologies, SANDIA REPORT (SAND2014-9040), Sandia National Laboratories (The United States Department of Energy).

[28] CHOZAS J. F., KOFOED J. P., JENSEN N. E. H. User guide – The COE Calculation Tool for Wave Energy Converters (Version 1.6, April 2014). Dep Civ Eng Aalborg Univ Aalborg, Denmark, DCE Tech Reports; No 161 2014.

[29] TORRE-ENCISO Y., MARQUÉS J., MARINA D. Mutriku-First year review. Proc. 4th Int. Conf. Ocean Energy, Dublin: 2012.

[30] INGRAM D., SMITH G., BITTENCOUNT-FERREIRA C., SMITH H. Protocols for the Equitable Assessment of Marine Energy. The Institute for Energy Systems, School of Engineering, The University of Edinburgh; 2011.

doi:<https://www.era.lib.ed.ac.uk/handle/1842/7638>.

[31] Ocean Energy Systems (OES), International levelised cost of energy for ocean energy technologies. 2015.

[32] NIELSEN K. Report T02-0.0 Development of Recommended Practices for Testing and Evaluating Ocean Energy Systems, OES-IA. Annex II Extension Summary Report 2010.

[33] RUI Z., METZ P. A., REYNOLDS D., CHEN G., ZHOU X., 2011, Regression models estimate pipeline construction costs, Oil Gas J;109(14):120–7.

[34] <https://slice-watermakers.com/desalinador/aqua-base-y/>

[35] <https://app.uff.br/riuff/handle/1/852>

[36] JOURNÉE JMJ, MASSIE W. W. Offshore hydromechanics. 2001:570. doi:10.1016/S0013-4686(01)00879-9.

[37] <https://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/agua>

[38] <https://www.sbn.org.br/>

[39] Karagiannis, I. C., & Soldatos, P. G. (2008). Water desalination cost literature: review and assessment. Desalination, 223(1-3), 448–456. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.02.071>