

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO — CAMPUS MACAÉ  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCAS MARTINS MALTEZ

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ENERGÉTICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM  
PROJETO DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS NA CIDADE DE MACAÉ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MACAÉ - RJ

2021

ANÁLISE DE VIABILIDADE ENERGÉTICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM  
PROJETO DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS NA CIDADE DE MACAÉ

Lucas Martins Maltez

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado na Universidade Federal do Rio  
de Janeiro – Campus Macaé como parte dos  
requisitos necessários à conclusão do curso  
de Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dsc. Rafael Malheiro  
da Silva do Amaral Ferreira

Macaé – RJ

2021

# **ANÁLISE DE VIABILIDADE ENERGÉTICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM PROJETO DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS NA CIDADE DE MACAÉ**

Lucas Martins Maltez

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO – CAMPUS MACAÉ, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO CIVIL.

Examinado por:

---

Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira, D.Sc.  
Prof. Adjunto, UFRJ/Macaé (Orientador)

---

Matheus Ferreira de Barros, M.Sc.  
Prof. Assistente, UFRJ/Macaé

---

Milad Shadman, D.Sc.  
Prof. Visitante, COPPE/UFRJ

MACAÉ, RJ – BRASIL

JULHO de 2021

Maltez, Lucas Martins

Análise de viabilidade energética para implantação de um projeto de captação de energia das ondas na cidade de Macaé/ Lucas Martins Matez. – Macaé: UFRJ / Engenharia Civil, 2021.

XVI, 111. il.; 29,7 cm.

Orientador: Prof. Dsc. Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira.

Projeto de Graduação – UFRJ / Macaé / Curso de Engenharia Civil, 2021.

Referências Bibliográficas: p. 101-106

1.Introdução. 2. Referencial teórico. 3. Metodologia. 4. Resultados e discussões. 5. Conclusão.

I. Clima de ondas de Macaé, II. Energia das ondas, III. Conversores de energia das ondas.

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família, minha base, sem a qual eu jamais teria chegado até aqui e a minha namorada, que esteve ao meu lado durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Ricardo e Cíntia, por investirem em mim e em minhas irmãs, parte de suas vidas, possibilitando assim todas as nossas conquistas.

As minhas irmãs, Karina, Helena e Júlia por estarem sempre ao meu lado, vibrando a cada conquista e me amparando a cada queda.

Ao Luiz Carlos, por sua parceria, calma e paciência inabalável ao lidar com cada um da família.

A minha sobrinha Carolina, que mesmo ainda sendo muito nova, trouxe imensa alegria e amor à toda família, tornando momentos difíceis mais suportáveis e leves.

A minha namorada Ramila, que esteve presente em todo desenvolvimento desse trabalho, me dando força nos momentos mais difíceis e sempre acreditando em mim e na minha capacidade.

A cada amigo que eu fiz nesse árduo período de graduação, em especial aos meus amigos Carlos Roberto, Caio Porto, Pedro Lucena e Nicolas Araújo, por cada noite virada estudando juntos, cada ideia trocada, pelo suporte e amizade que foram essenciais e me deram força para ir até o fim desta jornada.

A cada professor e servidor da UFRJ – Macaé, que de alguma forma contribuiu com a minha formação, em especial ao meu orientador, Rafael Malheiro, por todo suporte e conhecimento passado, por se mostrar sempre disponível, me incentivar e, mesmo durante a pandemia, se preocupar com os alunos e com a instituição, proporcionando meios para continuidade de trabalhos e pesquisas fundamentais para nossa formação.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e evolução como pessoa.

Obrigado!

Resumo do Projeto de Graduação apresentado ao Curso de Engenharia Civil / UFRJ – Campus Macaé, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Civil.

## **ANÁLISE DE VIABILIDADE ENERGÉTICA PARA IMPLANTAÇÃO DE UM PROJETO DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS NA CIDADE DE MACAÉ**

Lucas Martins Maltez

Julho/ 2021

Orientador: Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

O presente trabalho tem como intuito avaliar a viabilidade energética de um projeto de captação de energia das ondas com capacidade de produzir energia elétrica o suficiente para iluminar, durante a maior parte do ano, as orlas das principais praias da cidade de Macaé - RJ. Dessa forma, foi apresentada uma nova perspectiva em energias renováveis, em uma cidade que se destaca por ser um polo de produção de combustíveis fósseis. Através de uma extensa pesquisa bibliográfica, foram levantados dados do clima de ondas predominante na cidade e, a partir desses dados, foi estimado o potencial teórico de onda disponível em três diferentes profundidades de acordo com cada estado de mar que ocorre ao longo do ano. Sendo obtidos, desse modo, potenciais de onda de aproximadamente 0,48 GW, 0,39 GW e 0,18 GW, respectivamente, em águas profundas, intermediárias e rasas, considerando os 23 km de costa da cidade. Além disso, foi realizada uma análise comparativa entre conversores de energia das ondas, através do método de cruzamento de dados de matrizes de potência dos dispositivos com diagramas de dispersão do clima de ondas local. A partir dos indicadores de desempenho energético obtidos, foi possível definir quais conceitos de dispositivos de conversão melhor se adaptam ao regime de ondas local e atendem à demanda elétrica anual estimada para o projeto, de cerca de 0,7 GWh. Os conversores com maior produção anual geraram entre 8 e 17 GWh, dependendo do local de instalação.

**Palavras chave:** Clima de ondas de Macaé. Energia das ondas. Conversores de energia das ondas.

Abstract of Undergraduate Project presented to Curso de Engenharia Civil / UFRJ – Campus Macaé, as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Civil Engineer.

## **ENERGY FEASIBILITY ANALYSIS FOR THE IMPLEMENTATION OF A WAVE ENERGY CAPTURE PROJECT IN THE CITY OF MACAÉ**

Lucas Martins Maltez

Julho / 2021

Advisor: Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

The present work aims to assess the energy feasibility of a wave energy harvesting Project, suitable of generating enough electricity to provide street lighting to the shores of the main beaches of the city of Macaé during most of the year. In this matter, a new perspective of renewable energies was presented as a way of complementing the electric matrix, in a city that stands out for being a center for the production of fossil fuels. Through extensive and deep bibliographical research, data of the prevailing wave climate in the city of Macaé were collected, and from these data, the theoretical wave potential, available at three different depths, was estimated according to each sea state that occurs throughout the year. In this way, wave potentials of approximately 0.48 GW, 0.39 GW, and 0.18 GW are obtained, respectively, in deep, intermediate, and shallow waters, considering the 23 km of the city's coastline. In addition, a comparative analysis between wave energy converters was performed, through the method of crossing power matrix data of devices, with dispersion diagrams that represent the local wave climate. Finally, based on the energy performance parameters, it was possible to define which conversion device concepts best adapt to the local wave climate, meeting 0,7 GW, which is the estimated electrical demand for the Project. The converters with higher annual production, generates between 8 and 17 GWh, depending on the installation site.

**Keywords:** Macaé wave climate. Wave power. wave energy converter.

## Lista de Figuras

Figura 1 – Matriz elétrica mundial em 2018.....	17
Figura 2 – Matriz elétrica brasileira em 2020.....	18
Figura 3 – Configuração circular da movimentação das partículas de água em uma onda que transmite energia ao longo de uma interface líquido-gás. ....	22
Figura 4 – Esquema com a representação dos principais componentes de onda. ...	23
Figura 5 – Distribuição de energia de ondas superficiais para cada classificação ....	24
Figura 6 – Esquema do Ciclo de formação e quebra das ondas de vento. ....	25
Figura 7 – Elementos do processo de formação de ondas e <i>swell</i> . ....	26
Figura 8 – Representação da onda senoidal de comprimento L. ....	27
Figura 9 – Esboço de onda senoidal para definição de energia potencial da onda...	29
Figura 10 – Representação de uma situação real para superfície de mar. ....	31
Figura 11 – ilustrações que representam as condições de vento para: (A) Bom Tempo; (B1) Mau Tempo associado a ocorrência de ciclones e (B2); Mau Tempo associado a ocorrência de anticiclones.....	36
Figura 12 – Interação das partículas de onda com o fundo de acordo com a profundidade. ....	38
Figura 13 – Esquema geométrico da lei de Snell aplicada a refração de ondas. ....	39
Figura 14 – Localização dos diferentes tipos de conversores de onda de acordo com a profundidade. ....	42
Figura 15 – Classificação dos conversores de energia de ondas de acordo com seus princípios de funcionamento.....	43
Figura 16 – Distribuição média anual do potencial teórico das ondas no mundo em kW/m de frente de onda. ....	45
Figura 17 – Potencial médio em kW/m da costa brasileira.....	47
Figura 18 – Módulos da usina de ondas piloto, desenvolvida pela COPPE/UFRJ no Porto do Pécem.....	48
Figura 19 – Imagem do tanque de simulações marítimas do LabOceano da COPPE/UFRJ.....	49
Figura 20 – Conversor <i>Nearshore</i> com potência de 80 kW do projeto da COPPE/UFRJ para Ilha Rasa. ....	49
Figura 21 – Fluxograma das etapas adotadas na metodologia do trabalho. ....	51

Figura 22 – Localização do município de Macaé. ....	52
Figura 23 – Vista superior de parte do litoral macaense. ....	52
Figura 24 – Localização e limites da bacia de campos. ....	53
Figura 25 – Esquema da instalação dos arrecifes de amplificação (ARAM-1) e de dissipação (ARAM-2), associados a unidade de geração de energia (UGE). ....	54
Figura 26 – Orla das principais praias de Macaé: a) Praia Campista; b) Praia dos Cavaleiros; c) Praia do Pecado .....	55
Figura 27 – Localização dos campos de Marlim e Barracuda em relação à Macaé..	57
Figura 28 – Boia meteo-oceanográfica usada na Bacia de Campos.....	57
Figura 29 – Diagrama de dispersão para situação de Bom tempo.....	58
Figura 30 – Diagrama de dispersão para situação de Bom tempo com <i>Swell</i> . ....	59
Figura 31 – Diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudoeste. ....	59
Figura 32 – Diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudeste. ....	60
Figura 33 – Localização dos pontos de simulação de dados em águas intermediárias e rasas. ....	63
Figura 34 – Exemplo de cruzamento de dados entre matrizes para estimativa da produção de conversores.....	65
Figura 35 – Imagem e ilustração do Dispositivo Aquabuoy.....	68
Figura 36 – Matriz de potência do Aquabuoy.....	69
Figura 37 – Protótipo do dispositivo Oceantec sendo testado.....	69
Figura 38 – Matriz de potência do Oceantec.....	70
Figura 39 – Protótipo do dispositivo Pelamis P750. ....	70
Figura 40 – Matriz de potência do dispositivo Pelamis P750. ....	71
Figura 41 – Protótipo do Wave Dragon sendo testado.....	71
Figura 42 – Matriz de potência do dispositivo Wave Dragon. ....	72
Figura 43 – Ilustração do dispositivo Wavestar em funcionamento.....	72
Figura 44 – Matriz de potência do dispositivo Wavestar. ....	73
Figura 45 – Ilustração do dispositivo CETO instalado na Australia. ....	74
Figura 46 – Matriz de potência do dispositivo CETO. ....	74
Figura 47 – Protótipo do OE Buoy sendo testado. ....	75
Figura 48 – Matriz de potência do dispositivo OE Buoy. ....	75

Figura 49 – Ilustração do sistema de conversão de energia do dispositivo Oyster ...	76
Figura 50 – Matriz de potência do dispositivo Oyster.....	76
Figura 51 – Piloto de um dispositivo SSG sendo testado na Noruega.....	77
Figura 52 – Matriz de potência do dispositivo SSG.....	77
Figura 53 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com <i>Swell</i> em águas profundas. ....	79
Figura 54 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de sudoeste e Mau tempo de sudeste em águas profundas. ....	80
Figura 55 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências em águas profundas.....	81
Figura 56 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com <i>Swell</i> em águas intermediárias.....	81
Figura 57 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de sudoeste e Mau tempo de sudeste em águas intermediárias. ....	82
Figura 58 – Histograma de distribuição do potencial de onda do total de ocorrências em águas intermediárias .....	83
Figura 59 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com <i>Swell</i> em águas rasas. ....	83
Figura 60 – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de Sudoeste e Mau tempo de Sudeste em águas rasas. ....	84
Figura 61 – Histograma de distribuição do potencial de onda do total de ocorrências em águas rasas.....	85
Figura 62 – Potenciais médios de onda por categoria de mar em diferentes profundidades.....	87
Figura 63 – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Oceantec.....	96
Figura 64 – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para Aquabuoy. ....	97
Figura 65 – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Pelamis P750.....	98
Figura 66 – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Oyster. ....	100

## Lista de Tabelas

Tabela 1 – Potencial energético teórico das ondas por região em GW.....	45
Tabela 2 – Capacidade instalada de dispositivos de captação de energia das ondas kW por país da OES em 2016.....	46
Tabela 3 – Perdas médias percentuais de altura significativa nos pontos de águas rasas e intermediarias em relação aos pontos de águas profundas. ....	64
Tabela 4 – Resumo das características dos dispositivos analisados .....	78
Tabela 5 – Dados do consumo energético da iluminação das praias Campistas, Cavaleiros e Pecado. ....	85
Tabela 6 – Percentual de ocorrências em relação ao tempo de coleta de dados e meses por ano de cada estado de mar. ....	86
Tabela 7 – Potencial médio de onda para cidade de Macaé.....	88
Tabela 8 – Energia gerada pelos conversores <i>Offshore</i> . ....	89
Tabela 9 – Energia gerada pelos conversores <i>Nearshore</i> . ....	90
Tabela 10 – Fator de capacidade e energia absorvida por unidade de massa dos dispositivos <i>Offshore</i> . ....	91
Tabela 11 – Fator de capacidade e energia absorvida por unidade de massa dos dispositivos <i>Nearshore</i> .....	92
Tabela 12 – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor OceanTec. ....	95
Tabela 13 – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Aquabuoy.....	96
Tabela 14 – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Pelamis P750.....	98
Tabela 15 – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Oyster. ....	99

## LISTA DE SÍMBOLOS

$H$	Altura de onda (m)
$L$	Comprimento de onda (m)
$T$	Período de onda (s)
$f$	Frequência de onda ( $s^{-1}$ )
$\eta$	Elevação da superfície do mar (m)
$a$	Amplitude de onda (m)
$k$	Número de onda
$\omega$	Frequência angular de onda ( $Rads^{-1}$ )
$c$	Velocidade de fase ( $ms^{-1}$ )
$E_p$	Energia potencial
$g$	Aceleração da gravidade local ( $ms^{-1}$ )
$\bar{Z}$	Centro de gravidade da coluna de fluido infinitesimal (m)
$h$	Profundidade local (m)
$\rho$	Massa específica da água do mar ( $kgm^{-3}$ )
$u$	Velocidade horizontal da partícula de água
$w$	Velocidade vertical da partícula de água
$E_c$	Energia cinética
$E$	Energia total
$E_L$	Energia total pela largura da onda
$S(f)$	Espectro de frequência
$S(f, \theta)$	Espectro direcional
$\theta$	Direção de propagação
$\alpha$	Fase da onda
$\sigma^2$	Variância do espectro direcional
$P$	Potencial energético de onda ( $kW/m$ )

$C_g$	Velocidade de grupo ( $\text{ms}^{-1}$ )
$P_0$	Potencial energético para ondas monocromáticas
$T_e$	Período de energia (s)
$m_n$	Momento espectral de ordem n
$H_s$	Altura significativa (m)
$H_0$	Altura em águas profundas (m)
$K_s$	Coefficiente de empinamento
$\beta$	Ângulo entre isóbata e crista de onda (Rad)
$K_r$	Coefficiente de refração
$b$	Distância entre raio de ondas adjacentes (m)
$\sigma$	Frequência relativa de onda que se move com a corrente
$T_p$	Período de pico (s)
$E_0$	Energia gerado pelo conversor em um intervalo de tempo (kWh)
$\Delta T$	Intervalo de tempo de funcionamento do conversor (h)
$P_e$	Elementos da matriz de potência do conversor
$p$	Elementos da matriz/diagrama de dispersão
$F_c$	Fator de capacidade
$P'_0$	Potência nominal do dispositivo conversor
$E_{el}$	Energia elétrica consumida pela iluminação (kWh)
$P_l$	Potência elétrica da das lâmpadas (kW)
$\Delta t$	Intervalo de tempo de funcionamento da lâmpada (h)

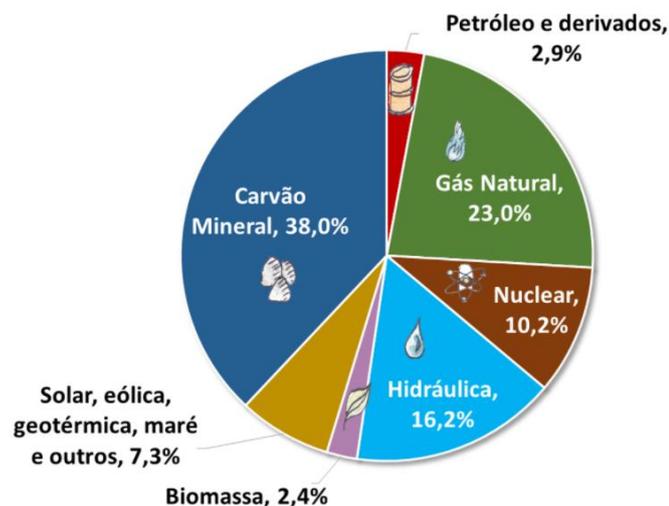
## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>17</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	19
1.2	OBJETIVOS .....	20
<b>1.2.1</b>	<b><i>Objetivo geral.....</i></b>	<b>20</b>
<b>1.2.2</b>	<b><i>Objetivos específicos.....</i></b>	<b>20</b>
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>	<b>22</b>
2.1	ORIGEM E FORMAÇÃO DAS ONDAS OCEÂNICAS .....	22
2.2	FORMAÇÃO DAS ONDAS SUPERFICIAIS DE VENTO.....	24
2.3	ENERGIA E POTENCIAL DE ONDA.....	26
<b>2.3.1</b>	<b><i>Teoria linear de onda.....</i></b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b><i>Energia potencial e cinética .....</i></b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b><i>Espectro de onda.....</i></b>	<b>31</b>
<b>2.3.4</b>	<b><i>Obtenção do potencial energético.....</i></b>	<b>32</b>
2.4	CLIMA DE ONDAS .....	34
2.5	TRANSFORMAÇÃO DA ONDA COM A PROFUNDIDADE .....	37
2.6	TECNOLOGIAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS .....	41
2.7	A ENERGIA DAS ONDAS NO CONTEXTO MUNDIAL E NACIONAL .....	44
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>50</b>
3.1	ÁREA DE ESTUDO .....	51
3.2	DEMANDA ENERGÉTICA DE PROJETO.....	54
3.3	DADOS DO CLIMA DE ONDAS DA REGIÃO .....	56
3.4	ESTIMATIVA DO POTENCIAL TEÓRICO DE ONDA DISPONÍVEL.....	60
3.5	ESTIMATIVA DO POTENCIAL TEÓRICO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES .....	61
3.6	ESTIMATIVA DO POTENCIAL EXTRAÍDO PELOS DISPOSITIVOS .....	64

3.7	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO	66
<b>3.7.1</b>	<b><i>Dispositivos Offshore</i></b>	<b>68</b>
<b>3.7.2</b>	<b><i>Dispositivos Nearshore</i></b>	<b>73</b>
<b>3.7.3</b>	<b><i>Dispositivo Onshore</i></b>	<b>76</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>79</b>
4.1	POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA POR OCORRÊNCIA	79
<b>4.1.1</b>	<b><i>Potencial energético de onda em águas profundas</i></b>	<b>79</b>
<b>4.1.2</b>	<b><i>Potencial energético de onda em águas intermediarias e rasas</i></b>	<b>81</b>
4.2	CÁLCULO DA DEMANDA DE PROJETO	85
4.3	TEMPO DE PERMANÊNCIA DAS CATEGORIAS DE MAR DA BACIA DE CAMPOS	86
4.4	POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO DE ONDA	86
4.5	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDA	88
<b>4.5.1</b>	<b><i>Total de energia gerada por cada dispositivo</i></b>	<b>89</b>
<b>4.5.2</b>	<b><i>Desempenho dos dispositivos no clima de ondas de Macaé</i></b>	<b>90</b>
<b>4.5.3</b>	<b><i>Comparativo entre energia gerada pelos dispositivos de melhor desempenho e a demanda de projeto</i></b>	<b>94</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>101</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>105</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo a Empresa de pesquisa elétrica (EPE, 2018) a matriz elétrica mundial se baseia essencialmente em combustíveis fósseis. Em 2016, esse tipo de combustível representava cerca de 66% de toda produção de energia elétrica dos países, como mostra a figura 1. Além disso, com o aumento da população mundial, a demanda por energia elétrica tende a aumentar de forma acelerada. A projeção, de acordo com a U.S. Energy Information Administration's (EIA, 2020), é de que a produção mundial de eletricidade aumente em cerca de 1,8% ao ano até 2050, com fontes não renováveis se mantendo como maior parcela da matriz.

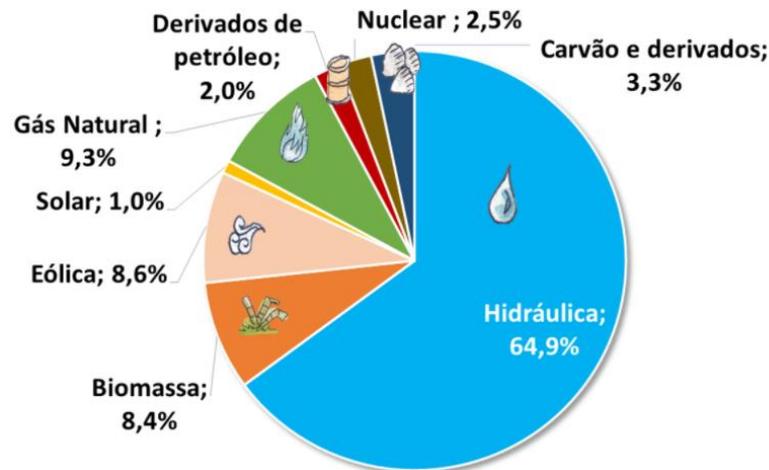


**Figura 1** – Matriz elétrica mundial em 2018.  
**Fonte:** EPE, 2021.

Sabe-se que a queima de combustíveis fósseis gera uma série de problemas. De acordo com Goldemberg (2015), situações como a exaustão das reservas naturais de combustíveis com o passar das décadas, a degradação da saúde e condições ambientais como poluição atmosférica, chuva ácida e aquecimento global são problemas inerentes a uma matriz energética fortemente dependente desse tipo de combustível.

Esse cenário impulsiona a busca por uma matriz energética mais diversificada e sustentável em todo o mundo. O Brasil, por exemplo, destaca-se internacionalmente por possuir um grande potencial hidroelétrico; sendo assim, como pode ser visto na figura 2, cerca de 83% de sua eletricidade é gerada por fontes consideradas renováveis (EPE, 2021). No entanto, nota-se que sua matriz elétrica é extremamente

dependente de uma única fonte, tornando-o, assim, vulnerável a todas suas variabilidades naturais.



**Figura 2** – Matriz elétrica brasileira em 2020.  
Fonte: EPE, 2021.

Existem diversas fontes de energia renovável bastante estudadas no Brasil e no mundo, como solar, eólica e de biocombustível, porém, um importante potencial energético pouco explorado atualmente são as energias oceânicas. O planeta Terra possui aproximadamente 360,63 milhões km<sup>2</sup> de área coberta por mares e oceanos, o que representa cerca de 71% da superfície terrestre (DUARTE, 1999). Essa enorme quantidade de água possui grande capacidade de armazenar energia de diversas formas, dentre as quais estão as ondas, que são um resultado da ação dos ventos na superfície da água.

A energia das ondas possui um enorme potencial pois, uma vez criadas, as ondas podem viajar milhares de quilômetros em alto mar praticamente sem perdas de energia. Além disso, as ondas possuem alta densidade energética podendo chegar a ter de 15 a 20 vezes mais energia disponível por metro quadrado de área de captação do que a energia solar e eólica. Pode-se pensar nas ondas como uma forma concentrada da energia solar, uma vez que esta última, a partir do aquecimento desigual da superfície da terra, é responsável por gerar os ventos. (CRUZ; SARMENTO, 2004; MUETZE; VINING, 2006; PRUDELL et al., 2010).

Apesar do extenso litoral brasileiro, com mais de 8500 km e cerca de 60 milhões de habitantes segundo IBGE (2010), pouco se investe no potencial energético das ondas, limitando assim, o desenvolvimento de tecnologias e estudos que diminuam os custos de implantação e viabilizem a instalação de usinas ondomotrizes nos municípios litorâneos do país. Alguns fatores que podem justificar esse fato são a

grande disponibilidade hidroelétrica nos rios brasileiros, que torna outros tipos de energia renovável menos atrativas aos investidores, e a baixa altura média das ondas representando, assim, moderado recurso energético disponível na costa país.

Entretanto, segundo Estefen (2004), mesmo que as alturas de onda típicas do litoral brasileiro não apresentem valores energéticos elevados, a regularidade das ondas e a pequena probabilidade de eventos naturais com capacidade de destruição dos dispositivos de captação e conversão, indicam a possibilidade de um aproveitamento economicamente viável, dependendo da tecnologia empregada.

O cenário brasileiro para a energia das ondas, de maneira geral, possui uma boa perspectiva de crescimento, no entanto, ainda precisa transpor uma importante barreira tecnológica e de disseminação de conhecimento, já que seus principais projetos estão em fase de protótipo e ainda existe uma grande carência na área de coleta de dados de onda, um fator primordial no longo caminho a ser percorrido para tornar o preço da energia economicamente viável (TOLMASQUIM, 2016).

Portanto, torna-se evidente a necessidade de projetos e pesquisas que fomentem o desenvolvimento e a exploração do potencial das ondas da costa brasileira, buscando alcançar uma maior segurança energética através da diversificação e da complementação da matriz elétrica nacional de maneira sustentável. Dessa forma, diferentes mecanismos que visem a promoção de alternativas mais viáveis, assim como objetivem trazer maior visibilidade para o progresso das energias das ondas, devem ser instigados, tornando possível um real aproveitamento desse potencial energético limpo e renovável.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Conhecida internacionalmente como a “Capital do Petróleo”, a cidade de Macaé se desenvolveu de forma acelerada a partir da década de 70, com o início da exploração de petróleo e a instalação da Petrobras na região. A partir disso, a tímida economia do município, baseada na agropecuária, passou a contar com um avançado e tecnológico parque industrial petrolífero, o que trouxe um grande crescimento econômico, populacional e urbano; e tornou Macaé um foco de produção de riqueza no estado do Rio de Janeiro, com uma população estimada em mais de 250 mil habitantes pelo IBGE (2019).

Diante da relevância da cidade no cenário brasileiro, esse trabalho visa trazer um estudo inicial sobre as condições e possibilidades de implementação de dispositivos para o aproveitamento da energia das ondas, expondo uma nova perspectiva em energias renováveis para a região e a oportunidade de um projeto pioneiro no Brasil, em uma área que se destaca por ser o foco nacional na produção de combustíveis fósseis.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

- Fazer a análise da viabilidade energética da implantação de um projeto de captação de energia das ondas na cidade de Macaé, com capacidade de fornecer energia elétrica o suficiente para iluminação das orlas das praias Campista, Cavaleiros e Pecado.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Fazer um levantamento do clima de ondas da região litorânea do município;
- Analisar o potencial energético das ondas disponível região de interesse;
- Realizar Análise comparativa no clima de ondas de Macaé, do desempenho dos dispositivos de captação de energia de onda em estágio de desenvolvimento mais avançado no cenário mundial.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

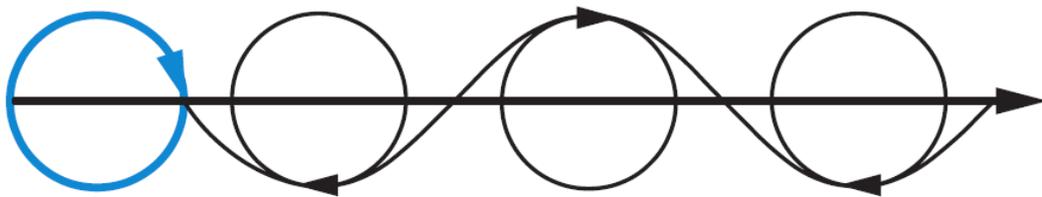
Este trabalho divide-se em 5 capítulos: Introdução, Referencial teórico, Metodologia, Resultados e discussões e Conclusão. O presente capítulo, apresenta uma introdução ao tema escolhido, a justificativa da escolha do objeto do trabalho e os objetivos gerais e específicos a serem alcançados. O segundo capítulo, apresenta referências na literatura dos principais conceitos adotados no trabalho a respeito da captação da energia das ondas e da climatologia de ondas da região de estudo. No terceiro capítulo, são abordadas as metodologias utilizadas para obtenção dos resultados e cumprimento dos objetivos propostos. No quarto capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das pesquisas e cálculos realizados, assim como a análise e interpretação dos mesmos. Por último, no quinto capítulo é

apresentada a conclusão do trabalho, juntamente com sugestões para futuras pesquisas.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ORIGEM E FORMAÇÃO DAS ONDAS OCEÂNICAS

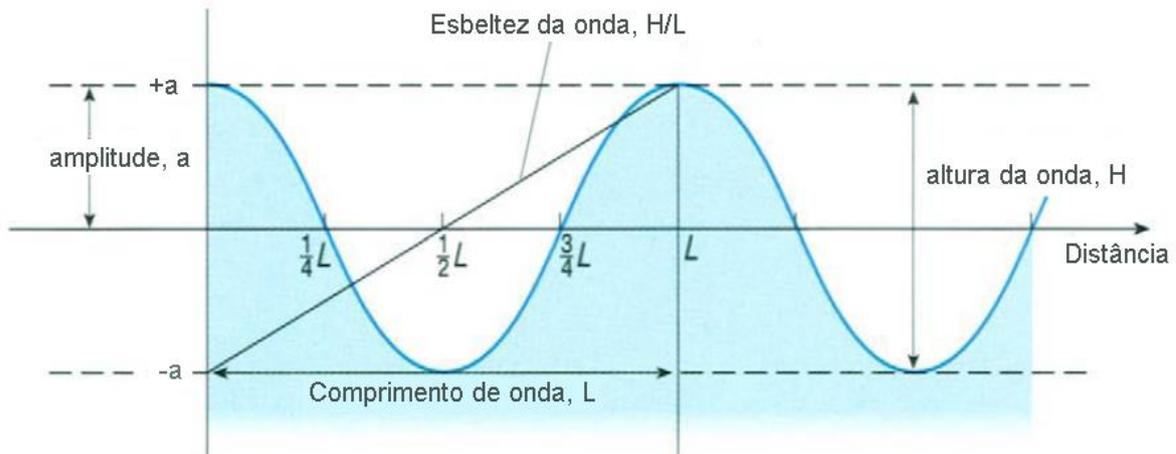
De acordo com Trujillo e Thurman (2016), as ondas são energia em movimento; elas transmitem energia de uma região para outra através de movimentos cíclicos em um meio material e todas começam como pequenas perturbações causadas por uma força externa. As ondas oceânicas, por sua vez, são resultado da ação de uma força perturbadora que transmite energia para superfície aquática. Tal energia se propaga pelo meio enquanto as partículas de água sofrem um movimento orbital circular, essa configuração (figura 3) é típica para ondas na interface de fluidos com diferentes densidades, que é o caso das ondas nos mares e oceanos.



**Figura 3** – Configuração circular da movimentação das partículas de água em uma onda que transmite energia ao longo de uma interface líquido-gás.

**Fonte:** Trujillo e Thurman, 2016

Para o entendimento da formação e da dinâmica de ondas nos mares e oceanos, é importante conhecer as principais características que descrevem uma onda (figura 4). São elas: a altura ( $H$ ), que é a distância na vertical entre a crista e o cavado; a amplitude de onda ( $a$ ), que é a metade de  $H$ ; o comprimento de onda ( $L$ ), que é a distância horizontal entre duas cristas (ou dois cavados); a esbeltez, que é a altura sobre o comprimento de onda ( $H/L$ ). O intervalo de tempo entre duas cristas (ou dois cavados) é o período ( $T$ ) geralmente medido em segundos; e o número de cristas que passam em um determinado ponto em um segundo é chamado de frequência ( $f$ ) (WRIGHT; COLLING; PARK, 1999).



**Figura 4** – Esquema com a representação dos principais componentes de onda.

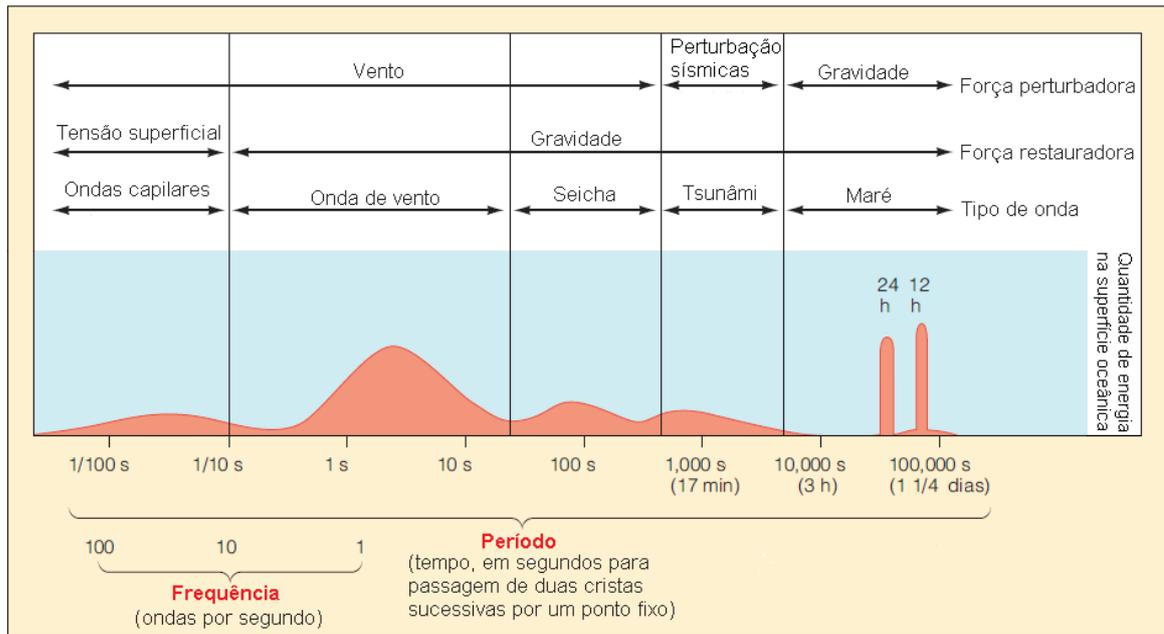
**Fonte:** Adaptado de Wright, Colling e Park, 1999.

As ondas são classificadas pelas suas características físicas. Os principais fatores levados em consideração são o período, o tipo de força perturbadora que as cria e a força restauradora, a qual é responsável por fazer com que a superfície da água volte ao seu estado inicial, possibilitando o movimento oscilatório das ondas (GARRISON, 2011).

A maior parte das ondas oceânicas são causadas pelas forças dos ventos, porém existem outros tipos de ondas causadas por distintas formas de forças perturbadoras. A maré é um exemplo de onda causada pela força gravitacional exercida pela lua e pelo do sol na Terra; ela concentra sua energia em grandes períodos de 12 e 24 horas. Já os tsunamis são ondas causadas por grandes eventos sísmicos e, assim como as marés, possuem grande comprimento de onda e períodos muito altos quando comparados aos das ondas mais comuns (TRUJILLO; THURMAN, 2016).

Segundo Wright, Colling e Park (1999), as ondas de maior relevância para estudo de energias são as ondas superficiais com comprimento de onda maior que 1,7 cm e que possuem como principal força restauradora a gravidade, sendo conhecidas, portanto, como ondas de gravidade.

Neste trabalho serão consideradas as ondas de gravidade superficiais cuja força perturbadora é o vento. Esse tipo de onda é o que representa a maior quantidade de energia entre as ondas oceânicas, como pode ser observado na figura 5, que mostra a concentração de energia em função do período, força perturbadora e força restauradora de cada tipo de onda.



**Figura 5** – Distribuição de energia de ondas superficiais para cada classificação  
**Fonte:** Adaptado de Garrison, 2011

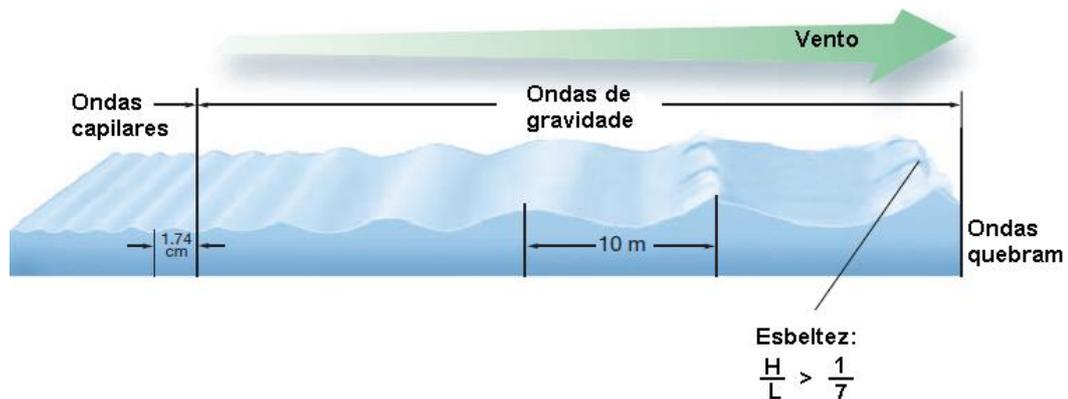
## 2.2 FORMAÇÃO DAS ONDAS SUPERFICIAIS DE VENTO

Ondas de vento são formadas pela transferência de energia do vento que sopra na superfície oceânica, para a água. Esse tipo de onda tem, em sua maioria, menos de 3 m de altura e comprimento de onda entre 60 e 150 m (GARRISON, 2011)

De acordo com Trujillo e Thurman (2016), as ondas de vento possuem um “ciclo de vida” específico, mostrado na figura 6. Esse ciclo se inicia em regiões oceânicas de alta incidência de ventos e termina com a dissipação da energia adquirida com o colapso da onda. As ondas podem viajar enormes extensões de água desde sua origem até sua quebra, que pode ocorrer próximo ao continente ou até mesmo em alto mar, liberando nessas regiões a energia acumulada através dos ventos.

O ciclo de formação das ondas pode ser descrito da seguinte forma: o vento começa a soprar sobre a superfície oceânica, inicialmente calma e, quando ele ultrapassa a velocidade de 1 m/s, começam a surgir pequenas deformações na superfície aquática, as chamadas ondas capilares, que são pequenas irregularidades na superfície da água e facilitam a interação entre o vento e o mar, fazendo com que mais energia seja captada. Conforme a velocidade do vento se intensifica, as ondas de vento crescem, ganham energia e aumentam sua velocidade, gerando um gradativo incremento de sua altura e comprimento. Quando a velocidade da onda é aproximadamente igual à velocidade do vento, o crescimento se interrompe, pois já

não existe troca de energia e, dessa forma, a onda atinge seu tamanho máximo para aquela situação de vento. As ondas formadas podem viajar milhares de quilômetros até um local de dissipação de energia, como as praias; algumas ondas chegam a quebrar em alto mar quando sua esbeltez ultrapassa a razão de 1/7, perdendo a estabilidade (TRUJILLO; THURMAN, 2016; WRIGHT; COLLING; PARK, 1999)

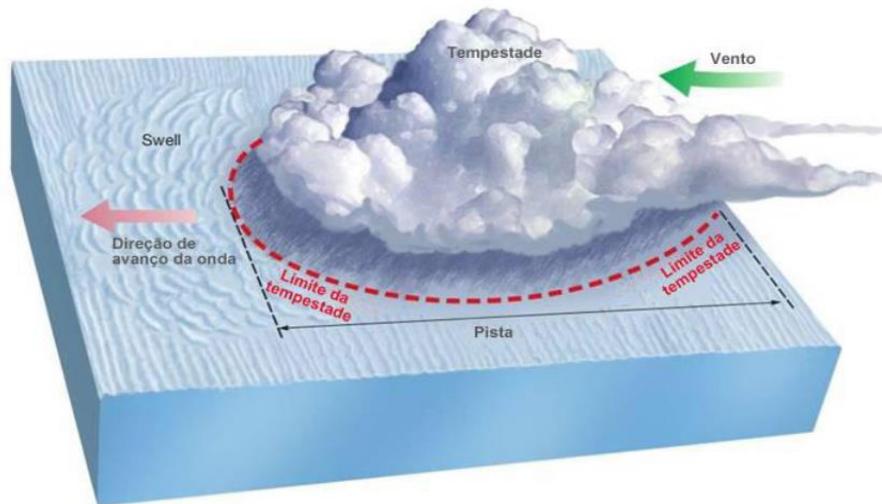


**Figura 6** – Esquema do Ciclo de formação e quebra das ondas de vento.  
**Fonte:** Adaptado de Trujillo e Thurman, 2016.

Segundo Garrison (2011), existem três principais fatores que influenciam no desenvolvimento das ondas e na quantidade de energia que elas irão transportar, são eles: a velocidade do vento, o tempo de incidência do vento e a pista de vento, que é a extensão da área de atuação do vento no oceano. As dimensões da onda formada são diretamente proporcionais a esses fatores, ou seja, quanto maior a pista, a velocidade e o tempo de incidência do vento, maior será a onda formada.

A formação das ondas ocorre em áreas de tempestade e grande incidência de vento, conhecidas como pistas, podendo ficar a milhares de quilômetros dos continentes; essas áreas são caracterizadas pela grande agitação marítima e pela existência de ondas com grandes variedades de períodos e comprimentos de onda. Ao deixarem a área de formação, as ondas passam por um fenômeno denominado dispersão, o qual ocorre devido a diferença de velocidade entre elas. As ondas de maior comprimento viajam mais rápido, enquanto as de menor comprimento são mais lentas, e isso faz com que elas se agrupem em trens de ondas uniformes e simétricas, os chamados *swells*; esses elementos viajam enormes distâncias a partir da área de tempestade até as costas quase sem perda energética. Quando a área de formação se encontra próximo a costa tem-se ondulações irregulares chamadas de *Sea* ou *Mar local*. (TRUJILLO; THURMAN, 2016).

A figura 7 ilustra a formação das ondas e a dispersão delas com a formação do *swell*.



**Figura 7** – Elementos do processo de formação de ondas e *swell*.  
**Fonte:** Adaptado de Trujillo e Thurman, 2016.

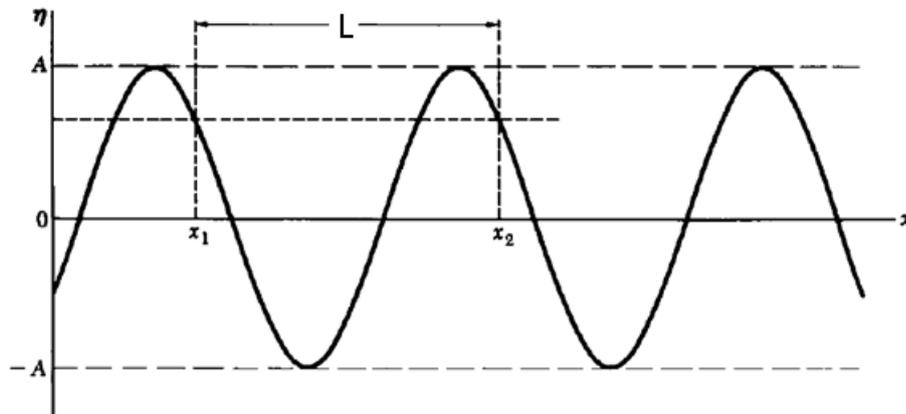
## 2.3 ENERGIA E POTENCIAL DE ONDA

Para encontrar o potencial energético fornecido pelas ondas é necessário a utilização de equações que fornecem tal potencial em função dos parâmetros de onda. A seguir são descritas as teorias e desenvolvimentos matemáticos, que fundamentam a equação utilizada para a estimativa do potencial energético de onda no presente trabalho.

### 2.3.1 Teoria linear de onda

Muitas ondas no mundo real oscilam periodicamente, ou seja, são ondas periódicas que podem ser representadas por funções periódicas. Entre as funções periódicas, as senoidais, que são representadas por senos (ou cossenos), são as que possuem as propriedades matemáticas de menor complexidade. Além disso, funções periódicas de formato arbitrário ou funções aperiódicas podem ser representadas de forma aproximada pela superposição de funções senoidais (ELMORE; HEALD, 1969).

A figura 8 mostra a representação de uma onda senoidal de comprimento  $L$ .



**Figura 8** – Representação da onda senoidal de comprimento  $L$ .

**Fonte:** Adaptado de Elmore e Heald, 1969.

Sendo assim, a onda senoidal pode ser escrita da seguinte forma (ELMORE; HEALD, 1969) :

$$\eta(x, t) = a \cos(\kappa x - \omega t) \quad (2-1)$$

Onde  $\eta$  é a elevação da superfície da onda do mar e  $a$  é a amplitude da onda dada por:

$$a = \frac{H}{2} \quad (2-2)$$

A frequência angular ( $\omega$ ) é definida por:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2-3)$$

Enquanto  $k$  que representa o número de onda é dado por:

$$\kappa = \frac{2\pi}{L} \quad (2-4)$$

A velocidade ( $c$ ) da onda senoidal pode ser escrita como:

$$c = \frac{L}{T} \quad (2-5)$$

Ou

$$c = \frac{\omega}{\kappa} \quad (2-6)$$

### 2.3.2 Energia potencial e cinética

O estudo da dinâmica de propagação da energia de uma onda é de grande importância para a determinação do potencial energético disponível para dispositivos de captação de energia de ondas. O total de energia que uma onda carrega consiste em dois tipos principais, a energia potencial, resultante do deslocamento de uma massa de água a partir de uma posição de equilíbrio contra a ação de um campo gravitacional; e a energia cinética, resultante da movimentação das partículas do fluido (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

A energia potencial de uma coluna de fluido infinitesimal de massa  $dm$  em uma onda senoidal por unidade de área superficial (figura 9) pode ser escrita como (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$d(Ep) = dm g \bar{z} \quad (2-7)$$

Onde  $g$  é a aceleração da gravidade local e  $\bar{z}$  representa o centro de gravidade da massa que pode ser representado por:

$$\bar{z} = \frac{h + \eta}{2} \quad (2-8)$$

Onde  $h$  é a profundidade local.

O diferencial de massa por unidade de comprimento  $dm$  é:

$$dm = \rho(h + \eta) dx \quad (2-9)$$

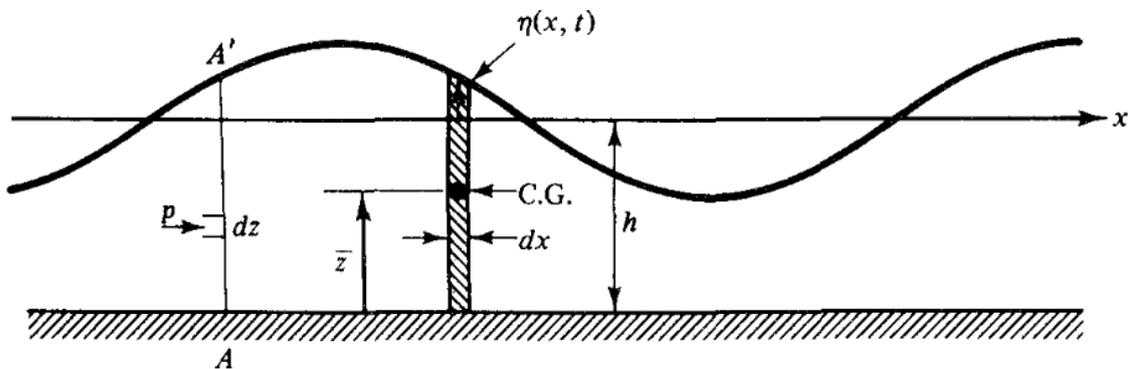
Onde  $\rho$  é a massa específica da água.

A energia potencial média de um comprimento de onda para uma onda progressiva de altura  $H$  é então (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$E_p = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} d(Ep) = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h + \eta)^2}{2} dx \quad (2-10)$$

$$= \frac{\rho g}{L} \int_x^{x+L} \left[ \frac{1}{2} (h^2 + 2\eta h + \eta^2) \right] dx \quad (2-11)$$

$$E_p = \frac{\rho g}{L} \left( \frac{1}{2} h^2 L + h \int_x^{x+L} \eta dx + \frac{1}{2} \int_x^{x+L} \eta^2 dx \right) \quad (2-12)$$



**Figura 9** – Esboço de onda senoidal para definição de energia potencial da onda.

Fonte: Dean e Dalrymple, 1991.

Substituindo-se a equação (2-1) na equação (2-12) e realizando a integração obtém-se:

$$E_p = \rho g \frac{h^2}{2} + \rho g \frac{H^2}{16} \quad (2-13)$$

A energia potencial da onda é calculada a partir da diferença da energia com a presença de onda e sem a presença de onda na superfície, sendo assim a primeira parte da equação (2-13) que representa a energia potencial sem a presença de elevação na superfície é subtraída, obtendo-se:

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (2-14)$$

A energia cinética associada a uma parcela infinitesimal de fluido de massa  $dm$  pode ser escrita como (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$d(E_c) = dm \frac{(u^2 + w^2)}{2} = \rho dx dz \frac{u^2 + w^2}{2} \quad (2-15)$$

Onde  $u$  e  $w$  são, respectivamente, os componentes de velocidade horizontal e vertical da partícula sob a onda, e são dadas por:

$$u = a\omega \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh(kh)} \cos(kx - \omega t) \quad (2-16)$$

$$w = a\omega \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh(kh)} \sin(kx - \omega t) \quad (2-17)$$

Para encontrar a energia cinética média por unidade de área superficial, a equação (2-15) deve ser integrada em relação a uma profundidade média e a um comprimento de onda, assim, obtém-se (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$E_c = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (2-18)$$

A partir da substituição das equações (2-16) e (2-17) na equação (2-18), a integral pode ser escrita como:

$$E_c = \frac{\rho}{2L} \left( \frac{gHk}{2\omega \cosh(kh)} \right)^2 \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} [\cosh^2 k(h+z) \cos^2(kx - \omega t) + \sinh^2 k(h+z) \sin^2(kx - \omega t)] dz dx \quad (2-19)$$

Realizando a integração e simplificando os resultados obtém-se:

$$E_c = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (2-20)$$

A energia total por unidade de área superficial em sistemas conservativos é dada pela soma da energia cinética com a energia potencial que possuem a mesma magnitude (DEAN; DALRYMPLE, 1991). Assim, realizando a soma da equação (2-14) com a equação (2-20), obtém-se:

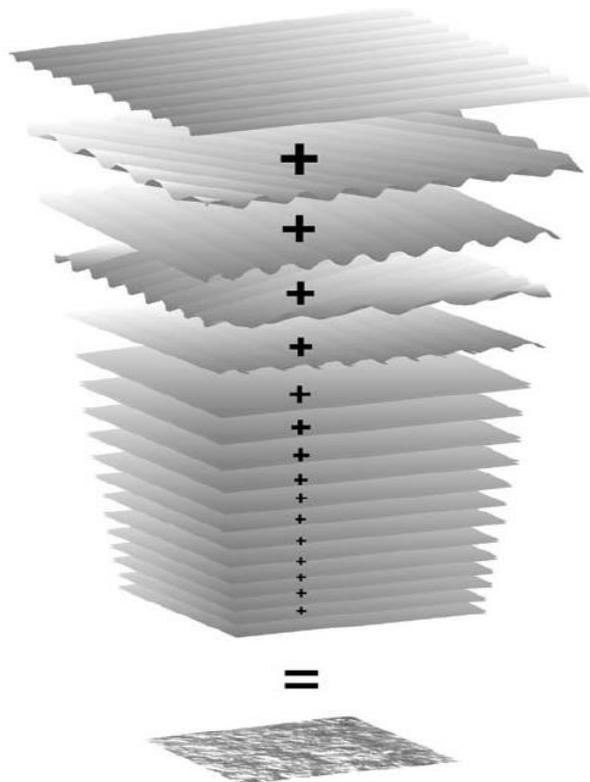
$$E = E_c + E_p = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (2-21)$$

A energia total de onda por unidade de largura é simplesmente a inclusão do comprimento de onda ( $L$ ):

$$E_L = \frac{\rho g H^2}{8} L \quad (2-22)$$

### 2.3.3 Espectro de onda

As ondas de gravidade geradas pelo vento têm como característica marcante a irregularidade, esse fato se deve ao complexo processo de formação com a transferência de energia da atmosfera terrestre para o oceano. Sendo assim, na análise do registro de uma boia, que guarda a variação da elevação da superfície marítima em um determinado período de tempo, pode-se notar uma mistura de ondas de diferentes direções e com variados períodos, alturas e comprimentos de onda, como mostrado na figura 10, que apresenta como seria uma situação real para superfície oceânica (CARVALHO, 2010; PARENTE et al., 2015)



**Figura 10** – Representação de uma situação real para superfície de mar.

**Fonte:** Holthuijsen, 2007.

Uma descrição mais completa e aproximada da realidade das condições de onda de uma determinada região pode ser obtida aproximando o registro da elevação da superfície, obtido por uma boia, como a soma de um grande número de ondas

harmônicas estatisticamente independentes (uma série de Fourier). Dessa forma, considera-se a elevação da superfície oceânica como um processo estocástico, ou seja, os componentes de onda se comportam de forma randômica (HOLTHUIJSEN, 2007).

A equação a seguir mostra o somatório dos componentes de onda para a representação de um estado de mar real (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$\eta(x, y, t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \underline{a}_{i,j} \cos(\omega_i t - k_i x \cos \theta_j - k_i y \sin \theta_j + \underline{\alpha}_{i,j}) \quad (2-23)$$

Onde  $\theta$  representa a direção da onda e  $\alpha$  o componente de fase o sublinhado indica que são variáveis randômicas.

A partir do somatório dos componentes de onda harmônica, com a transformada de Fourier, podem ser construídos os espectros de onda, os quais podem ser utilizados para avaliar como a energia se distribui ao longo das frequências, no caso do espectro unidimensional ( $S(f)$ ); ou como a energia se distribui ao longo das frequências de acordo com cada direção, no caso do espectro direcional ( $S(f, \theta)$ ) (CARVALHO, 2010).

A densidade de energia de acordo com a frequência ( $f$ ) e direção ( $\theta$ ) é dada pela variância do espectro direcional  $S(f, \theta)$  e pode ser escrita como (ASSIS, 2010)

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta \quad (2-24)$$

Já o espectro unidimensional ( $s(f)$ ), pode ser escrito em relação ao espectro direcional como (ASSIS, 2010):

$$S(f) = \int_0^{2\pi} S(f, \theta) d\theta \quad (2-25)$$

#### 2.3.4 Obtenção do potencial energético

Como as ondas viajam grandes distâncias até quebrarem, fica evidente que ocorre uma transferência de energia para fora da área de geração. A taxa com a qual

essa energia é transferida é chamada de fluxo médio de energia ou Potencial energético ( $P$ ), podendo ser definido como (DEAN; DALRYMPLE, 1991):

$$P = EC_g \quad (2-26)$$

Onde  $C_g$  é a velocidade com a qual a energia é transmitida, chamada de velocidade de grupo, que é escrita da seguinte forma:

$$C_g = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \frac{L}{T} \quad (2-27)$$

Onde o comprimento de onda ( $L$ ) pode ser escrito como (CORNETT, 2008):

$$L = T \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (2-28)$$

Dessa forma, o potencial energético  $P_0$  para ondas simples monocromáticas é calculado através da seguinte equação (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013):

$$P_0 = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (2-29)$$

Para um estado real da superfície marítima, o fluxo médio de energia ou potencial energético é calculado a partir da variância do espectro direcional de energia  $S(f, \theta)$  da seguinte forma (CORNETT, 2008):

$$P = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(f, h) S(f, \theta) df d\theta \quad (2-30)$$

A energia de onda por unidade de comprimento de crista de onda transmitida por ondas irregulares pode ser obtida de forma aproximada pela equação (CORNETT, 2008):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2 \quad (2-31)$$

Onde  $T_e$  é o período de energia que é o período de uma única onda senoidal com a mesma energia do estado de mar e  $H_s$  é altura significativa (média de altura de 1/3 das ondas mais altas), os dois parâmetros podem ser definidos através dos momentos espectrais ( $m_n$ ) obtidos através da integração dos espectros como mostra a equação 2-33 (MØRK et al., 2010):

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^n S(f, \theta) df d\theta \quad (2-32)$$

O período de energia  $T_e$ , definido em termos do momento espectral, é dado por (CORNETT, 2008):

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0} = \frac{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} f^{-1} S(f, \theta) df d\theta}{\int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) df d\theta} \quad (2-33)$$

E a altura significativa é dada pela expressão:

$$H_s = 4,004 \sqrt{m_0} \quad (2-34)$$

Sendo  $g$  a gravidade local aproximada para 9,81 m/s<sup>2</sup> e  $\rho$  a densidade da água, igual a 1025 kg/m<sup>3</sup>. Substituindo esses valores na equação (2-31) tem-se a potência de onda expressa em kW/m através da seguinte equação (ASSIS, 2010):

$$P(kW/m) = 0.4906 H_s^2 T_e \quad (2-35)$$

## 2.4 CLIMA DE ONDAS

O clima de ondas é um fenômeno com grande variabilidade, diretamente ligado aos sistemas meteorológicos e padrões de circulação do vento na atmosfera. Dessa forma tende a ser diferente de acordo com cada região, sendo um fator de extrema relevância para um empreendimento de conversão de energia de ondas (CARVALHO, 2010).

Conhecer os padrões do regime de ondas, é condição fundamental na avaliação de fontes de energia, e no projeto e classificação de dispositivos para qualquer conceito de engenharia no mar. Tais padrões se relacionam diretamente com

o potencial local e com a ocorrência de eventos extremos. Sendo assim é possível projetar dispositivos e instalações preparados para tais eventos, e que se mantenham econômicos e capazes de sustentar uma produção estável de energia em condições médias (BESERRA et al., 2007; FLEMING, 2012).

Para descrição do clima de ondas, utilizam-se parâmetros estatísticos e espectrais, como a altura de onda significativa ( $H_s$ ), período de energia ( $T_e$ ) e período de pico ( $T_p$ ). A altura significativa como citado na seção anterior, corresponde à média da terça parte maior da distribuição de frequências da altura de onda, que se aproxima da altura estimada por um observador ao analisar um estado de mar. O período de energia ( $T_e$ ), é um parâmetro espectral, que pode ser interpretado fisicamente como o período de uma única onda senoidal de altura  $H_s$ , e com a mesma energia do Estado de Mar. Já o período de pico ( $T_p$ ), é o valor máximo encontrado no espectro ou o valor máximo de uma categoria de mar. (HOLTHUIJSEN, 2007; MELO, 2012; VICINANZA; CONTESTABILE; FERRANTE, 2013)

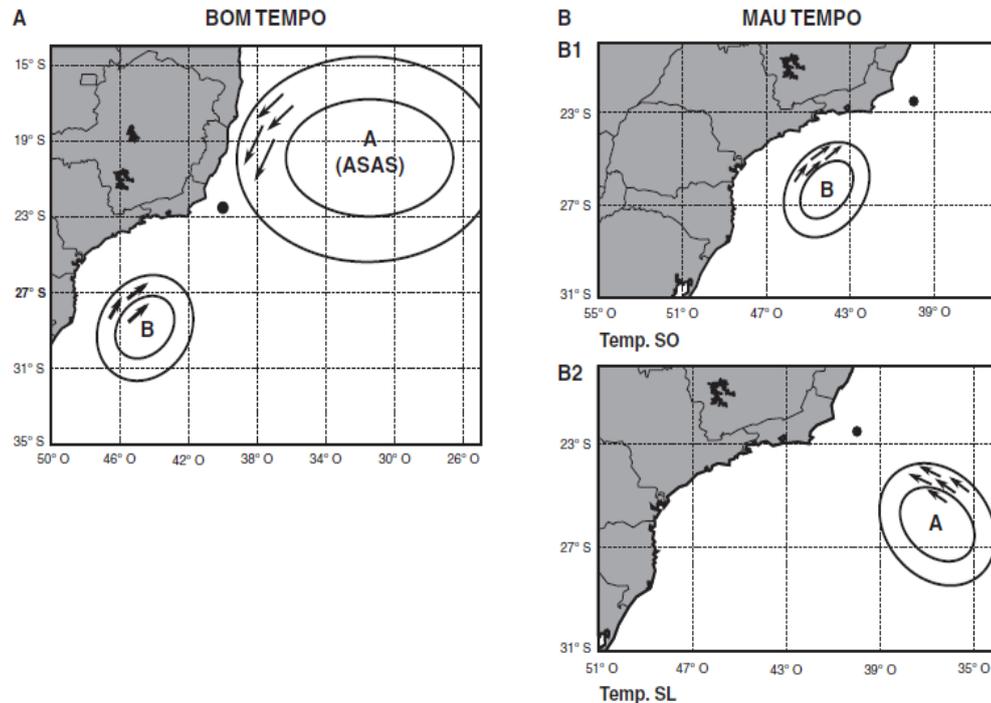
A cidade de Macaé fica localizada na bacia sedimentar de Campos, uma região que possui um complexo clima de ondas. As ondas que atingem essa área estão estritamente relacionadas aos campos de ventos gerados pelos sistemas meteorológicos que ocorrem no atlântico sul (ANDRADE, 2014).

Para contornar a complexidade do regime de ondas da região, Pinho (2003) propôs uma classificação dos estados de mar predominantes de acordo com os sistemas meteorológicos que dominam a circulação dos ventos em cada situação de mar. Dessa forma, foi possível subdividir toda dinâmica meteoceanográfica da área em quatro categorias distintas de mar, são elas: Bom Tempo, Bom Tempo com *Swell*, Mau Tempo de Sudoeste e Mau Tempo de Sudeste (PARENTE et al., 2015).

De acordo com Parente et al.(2015), a área sofre influência marcante do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) que varia sua posição entre os meses de verão e inverno, gerando ventos originários do quadrante Norte-Leste, caracterizando uma situação de Bom Tempo. Tal condição também pode ocorrer em conjunto com a atuação de um ciclone mais ao sul, gerando um *swell* que pode atingir a Bacia de Campos. A região também recebe frentes frias, antecedendo a chegada de um ciclone ou anticiclone que mudam os ventos trazendo ondulações maiores e condições mais severas do que nas condições de Bom Tempo. A figura 11 mostra os

estados de mar de Bom Tempo com a presença de Ciclone; Mau Tempo com a presença de Ciclone; e Mau Tempo com a presença de Anticiclone.

A seguir são apresentadas, de forma individual, as condições de mar da Baía de Campos de acordo com os trabalhos de Pinho (2003) e Parente et al. (2015).



**Figura 11** – ilustrações que representam as condições de vento para: (A) Bom Tempo; (B1) Mau Tempo associado a ocorrência de ciclones e (B2); Mau Tempo associado a ocorrência de anticiclones.

**Fonte:** Parente et al.,2015.

- Situação de Bom Tempo:

É uma condição de Mar local recorrente, correspondendo a um percentual de 27,68% do total do registro de ondas obtido. É definida por ondas predominantemente do quadrante Norte-Leste (principalmente Nordeste). Sofre influência da presença constante na costa brasileira do Anticiclone do atlântico Sul (AAS) que, de acordo com seu posicionamento, gera ventos de grande intensidade com a mesma direção das ondulações.

- Situação de Bom Tempo com *Swell* :

Nesse tipo de situação, além da predominância de ondas de Nordeste geradas mais próximas a costa pela circulação da AAS, pode ser notada, com certa frequência, a ocorrência de *swell* com direção sul que, diferente do Mar local citado anteriormente, se forma longe da costa. Muito frequente, esse tipo de mar representa um percentual de a 29,20% em relação a todos os registros.

Essa situação pode preceder a aproximação de uma frente fria devido a movimentação de um ciclone ou anticiclone, em que o *swell* gerado se desloca com maior velocidade que a frente fria, chegando antes à Bacia de Campos. Também pode ser gerada por um ciclone no sul do atlântico sul que não chega à bacia.

- Situação de Mau Tempo de sudoeste:

Situação menos constante, com 19,65% das ocorrências. Se caracteriza por ser precedida de uma frente fria de sudoeste, com ventos que podem chegar a 25 m/s. É gerada por um ciclone extratropical que vem do sul da Argentina e avança para menores latitudes, trazendo nebulosidade e chuvas. E gera, portanto, as condições mais severas de mar registradas com alturas significativas que podem chegar ao dobro das alturas em condições de Bom Tempo. As ondulações geradas possuem direção que varia de acordo com o vento, sendo assim, com a entrada da frente fria, pode-se observar ondas de sudoeste e, posteriormente, de sul, sudeste e leste até a situação de Bom Tempo se reestabelecer.

- Situação de Mau Tempo de Sudeste:

É a situação de Mau Tempo que ocorre com mais frequência, correspondendo a 23,47% do total de ocorrências medidas e se caracteriza por ser a evolução de uma situação de Mau Tempo. Ocorre quando, após a entrada de uma frente fria e do ciclone extratropical, chegam à Bacia de Campos Anticiclones formados na zona subtropical (anticiclone polar), produzindo ventos e ondas inicialmente de sul-sudeste para leste e, posteriormente, de nordeste-norte até se fundir com o ASAS.

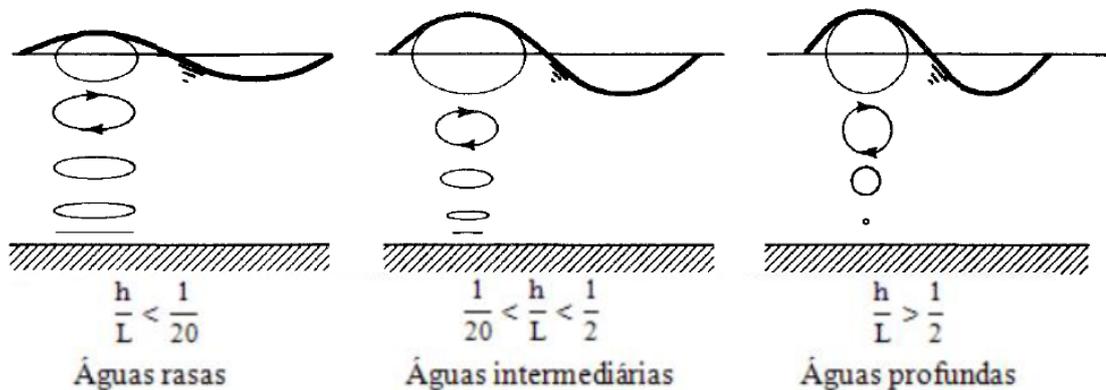
## 2.5 TRANSFORMAÇÃO DA ONDA COM A PROFUNDIDADE

Segundo Garrison (2011), uma onda se move em águas profundas no oceano quando a razão entre a profundidade em que ela se encontra e seu comprimento é maior que  $1/2$  e, quando a razão se encontra entre  $1/20$  e  $1/2$ , considera-se que a onda se encontra em águas intermediárias; já para razões menores que  $1/20$ , considera-se que a onda viaja em águas rasas.

Em águas consideradas profundas, onde não ocorre interação das partículas que formam orbitais com o fundo, as ondas de gravidade se comportam praticamente

de maneira homogênea e podem ser satisfatoriamente descritas pela teoria linear de onda, também conhecida como teoria de pequena amplitude (AIRY, 1845).

A maior parte das características de uma onda oceânica depende da relação entre o seu comprimento e a profundidade em que se encontra. O comprimento determina a extensão das órbitas circulares das partículas de água que formam a onda, enquanto a profundidade determina o formato dessas órbitas, que são circulares apenas em águas profundas (GARRISON, 2011). A figura 12 esquematiza como ocorre esse processo de mudança dos formatos dos orbitais de acordo com cada profundidade relativa.



**Figura 12** – Interação das partículas de onda com o fundo de acordo com a profundidade.

**Fonte:** Dean; Dalrymple, 1991.

De acordo com a teoria linear de onda, a relação entre o comprimento de onda e a profundidade pode ser descrita pela equação 2-28. A teoria descreve, ainda, importantes transformações na altura e direção das ondas causadas pela mudança de profundidade, as quais serão mostradas a seguir.

*Shoaling* ou empinamento: é a tendência do incremento da altura ( $H$ ) para manutenção do fluxo energético, quando as ondas se aproximam da zona de arrebatamento, devido à diminuição da velocidade de propagação (HOLTHUIJSEN, 2007).

O coeficiente de empinamento ( $K_s$ ) a ser aplicado na altura inicial pode ser calculado pela equação abaixo (KAMPHUIS, 2000):

$$\frac{H}{H_0} = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{n} \frac{1}{\tanh kh}} = K_s \quad (2-36)$$

Onde  $H_0$  é a altura de onda em águas profundas,  $H$  é a altura na profundidade desejada e  $n$  é um parâmetro tabelado em Kamphuis (2000, p. 35).

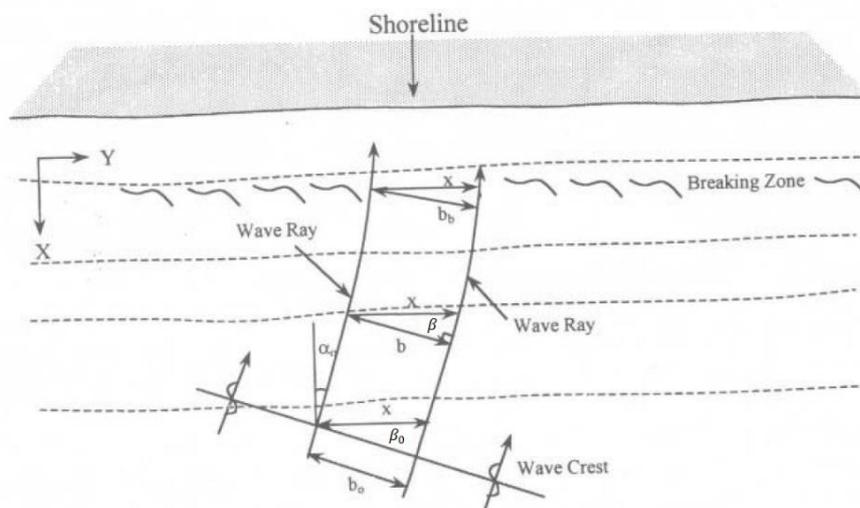
Com a diminuição da velocidade de propagação, além do empinamento ocorre a modificação da direção de propagação da onda, um fenômeno análogo ao que ocorre em ondas sonoras e eletromagnéticas, conhecido como refração. Esse fenômeno é responsável pela desaceleração de partes da onda que chegam primeiro às isóbatas, fazendo com que a crista da onda se alinhe paralelamente a essas e a onda passe a se propagar perpendicularmente à linha de costa, mudando sua altura e direção (GODA, 2000).

Para uma linha de costa reta o suficiente, o coeficiente de refração pode ser calculado a partir lei de *Snell*, de acordo com esquema geométrico apresentado na figura 13, dadas as seguintes equações (KAMPHUIS, 2000):

$$\frac{\sin \beta}{\sin \beta_0} = \frac{C}{C_0} = \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (2-37)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{b_0}{b}} = \sqrt{\frac{\cos \beta_0}{\cos \beta}} \quad (2-38)$$

Onde  $\beta$  representa o ângulo entre a linha isóbata e a crista da onda,  $b$  é a distância entre raios de onda adjacentes, o subscrito “0” representa os parâmetros em águas profundas e, finalmente,  $K_r$  representa o coeficiente de refração.



**Figura 13** – Esquema geométrico da lei de Snell aplicada a refração de ondas.  
**Fonte:** Kamphuis, 2000.

Dessa forma, para os casos mais particulares, onde a teoria linear de onda pode ser usada, a altura ( $H$ ) na profundidade desejada pode ser calculada a partir da altura em águas ( $H_0$ ) profundas através da seguinte equação (KAMPHUIS, 2000):

$$H = H_0 K_s K_r \quad (2-39)$$

Quando as ondas começam a se aproximar da costa e a profundidade em relação ao fundo oceânico decresce, a batimetria do fundo e, em menor intensidade, as correntes, nível da maré e o vento passam a interferir de forma significativa nos parâmetros das ondas. Com isso, os efeitos não lineares passam a ter maior importância e devem ser levados em consideração através de outros métodos e modelos matemáticos com maior precisão e complexidade de cálculo. Para tanto, podem ser utilizadas as equações de Boussinesq ou as equações de balanço de energia espectral, as quais são uma base para simulação computacional de ondas. Estas consideram, implicitamente, além das transformações de onda já descritas com a teoria de pequena amplitude, uma série de transformações como: reflexão, difração e, principalmente, a dissipação de energia e as interações não lineares entre ondas, representando uma importante ferramenta numérica para o cálculo de ondas em diversas profundidades (HOLTHUIJSEN, 2007; KAMPHUIS, 2000; REGO et al., 2015).

A equação do balanço de energia espectral utilizada para modelar as ondas na costa, que leva em consideração os efeitos não lineares, é apresentada a seguir (HOLTHUIJSEN, 2007):

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial C_{g,x} N}{\partial x} + \frac{\partial C_{g,y} N}{\partial y} + \frac{\partial C_{\theta} N}{\partial \theta} + \frac{\partial C_{\sigma} N}{\partial \sigma} = \frac{S}{\sigma} \quad (2-40)$$

Onde o termo  $S$ , do lado direito da igualdade, representa efeitos de geração, dissipação e interações não lineares entre ondas. O primeiro termo do lado esquerdo da igualdade se refere à variação da densidade local de energia; os dois termos seguintes representam a propagação de energia nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente. O quarto termo se refere às variações da frequência devido as diferenças de profundidade e aos campos de corrente e, finalmente, o quinto termo representa a

refração induzida pelas mudanças da batimetria marítima e pelos campos de corrente (REGO et al., 2015).

## 2.6 TECNOLOGIAS DE CAPTAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Para aproveitar a energia das ondas, são necessários dispositivos responsáveis por converter parte da energia que passa por eles. Tais dispositivos, conhecidos como WEC (Wave Energy Converter), transformam a energia potencial e/ou cinética presentes nas ondas, de maneira dispersa, em uma forma de energia mecânica ideal para o acionamento de geradores elétricos (CUNHA et al., 2017).

Ao longo de décadas de estudo e desenvolvimento, surgiram diferentes conceitos capazes de lidar com o desafio tecnológico que é a extração de energia das ondas. Atualmente, existem inúmeros protótipos que não são necessariamente concorrentes diretos, uma vez que, devido a variabilidade dos climas de ondas e dos parâmetros de mar, dificilmente todos dispositivos convergirão para um único conceito (CRUZ; SARMENTO, 2004; LÓPEZ et al., 2013)

Devido à grande variedade de dispositivos, torna-se fundamental estabelecer critérios de classificação para as diferentes tecnologias. O critério de classificação adotado na maioria das referências leva em consideração a distância da costa em que cada dispositivo é instalado, agrupando-os dessa forma em (CRUZ; SARMENTO, 2004):

- Dispositivos Costeiros (*Onshore*)
- Dispositivos próximos a costa (*Nearshore*)
- Dispositivos afastados da costa (*Offshore*)

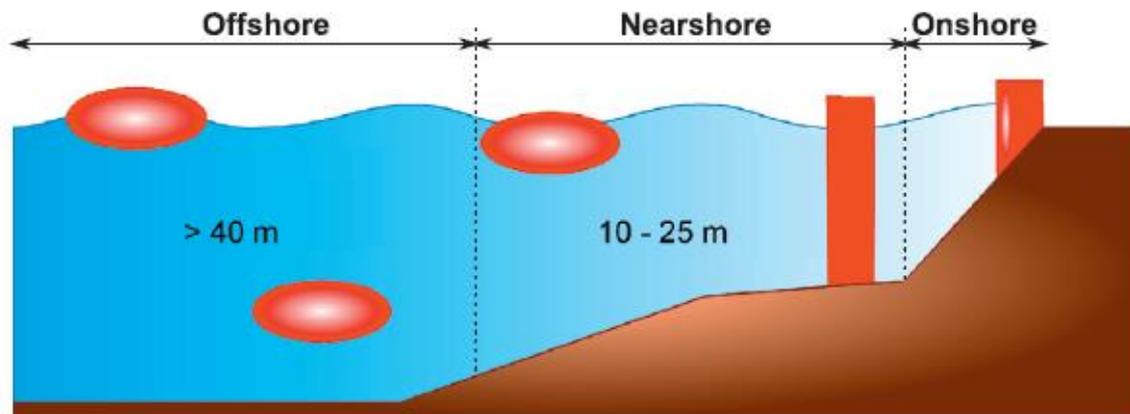
A principal diferença entre os dispositivos próximos da costa e os afastados são as profundidades envolvidas, e não necessariamente a distância entre os dispositivos e a linha de costa.

Os Dispositivos *Onshore* ficam fixos ou incorporados à costa ou em estruturas costeiras. As vantagens desses tipos de conversores são a fácil instalação e manutenção devido à acessibilidade. No entanto, próximo à costa, o regime de ondas é menos energético e existe a dificuldade de encontrar locais adequados para implementação desses sistemas.

Os Dispositivos *Nearshore*, por sua vez, são instalados a algumas centenas de metros da costa, em profundidades entre 10 e 25 m. Geralmente, suas estruturas

repousam no fundo do mar, evitando amarrações; em alguns casos, essas estruturas também são flutuantes.

Finalmente, os dispositivos *Offshore*, também chamados de dispositivos de terceira geração, são conversores geralmente instalados em águas com mais de 40 m de profundidade, longe da costa, construídas em estruturas flutuantes ou submersas ancoradas ao fundo do mar. Devido a sua localização, podem explorar estados de mar com elevada energia, porém, precisam ser resistentes a eventos extremos. Além disso, a distância em relação a costa dificulta processos de manutenção e transporte de energia captada (LÓPEZ et al., 2013). A figura 14 ilustra o posicionamento dos dispositivos de acordo com a classificação supracitada.



**Figura 14 – Localização** dos diferentes tipos de conversores de onda de acordo com a profundidade.

Fonte: Adaptado de López *et al.*, 2013.

De acordo com Aderinto e Li (2018), outra forma de classificar os conversores de energia das ondas é a partir dos princípios utilizados para capturar a energia do mar, sendo eles:

- Coluna d'água oscilante, CAO (OWC – *Oscilating water column*)
- Corpos flutuantes (*Oscillating Body Systems*)
- Galgamento (*Overtopping devices*)

Para Cruz e Sarmiento (2004), estas duas classificações podem ser associadas de forma coerente e lógica, como pode ser visto nas descrições a seguir.

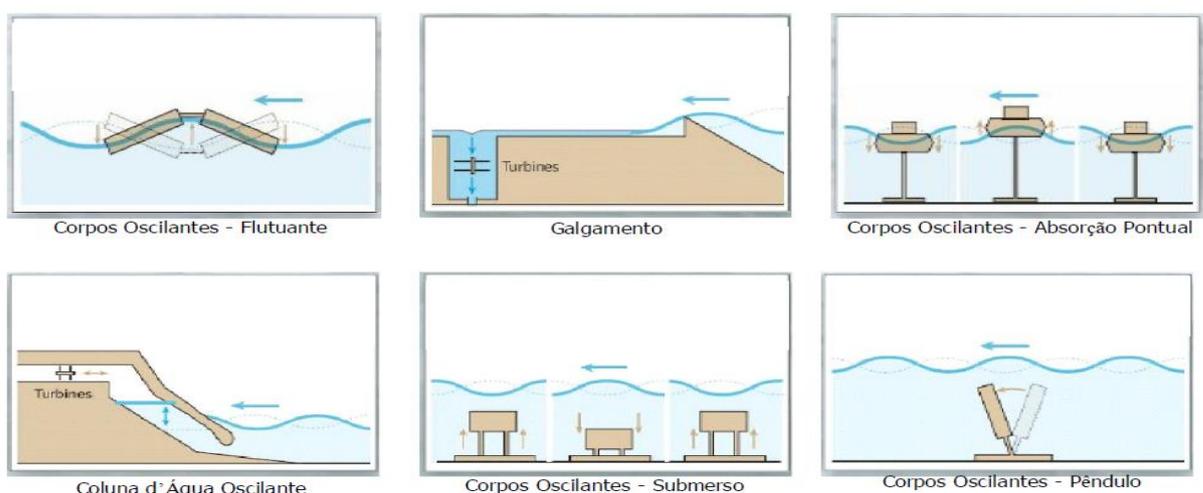
Os conversores de coluna d'água oscilante (CAO) são dispositivos costeiros e representam um dos conceitos mais famosos em relação à conversão de energia das ondas. Consistem em uma estrutura parcialmente submersa equipada com duas

aberturas que permitem a compressão e descompressão do ar. A incidência das ondas provoca um aumento no nível d'água e força o ar a passar por uma turbina que aciona um gerador de eletricidade. Esse mecanismo funciona em sentido duplo, com o nível d'água tanto subindo quanto descendo dentro da estrutura. (MUSTAPA et al., 2017; PAREDES, 2008).

Os dispositivos do tipo corpos flutuantes podem ser usados tanto *Nearshore* quanto *Offshore*. Possuem como princípio de funcionamento a oscilação dos corpos flutuantes provocadas pelas ondas, que acionam um sistema hidráulico produzindo energia elétrica. São classificados como absorvedores pontuais, em que o flutuador se move verticalmente ou em seu próprio eixo; progressivos, em que o movimento é realizado por toda estrutura, ou submersos, que captam a energia a partir dos movimentos de rotação e translação da estrutura (RONCHI; SCHAEFFER, 2013).

Por fim, tem-se os conversores do tipo Galgamento. Esse tipo de dispositivo trabalha de forma semelhante a uma usina hidroelétrica. Assim, as ondas incidem sobre uma rampa coletora que direciona a água a um reservatório, o qual, quando completamente cheio, é liberado, acionando turbinas e gerando eletricidade. Podem ser dispositivos costeiros, *Nearshore* e até mesmo *Offshore*, entretanto, são mais comumente implantados em profundidades *Nearshore* (MUETZE; VINING, 2006).

A figura 15 mostra um esquema com os princípios de funcionamento de cada conversor, conforme descrito anteriormente.



**Figura 15 –** Classificação dos conversores de energia de ondas de acordo com seus princípios de funcionamento.

**Fonte:** Souza, 2011.

## 2.7 A ENERGIA DAS ONDAS NO CONTEXTO MUNDIAL E NACIONAL

O estudo da energia das ondas e de seu aproveitamento é bastante recente. Segundo Cruz e Sarmiento (2004), apesar dos primeiros sistemas de aproveitamento das energias das ondas serem do século XVIII, a primeira utilização de maior relevância foi apenas em meados do século XX no Japão, quando o comandante Yoshio Masuda iniciou o desenvolvimento de boias de sinalização marítima, que eram alimentadas pelos movimentos das ondas.

Após o choque petrolífero de 1973 e com os estudos pioneiros de Stephen Salter, a energia das ondas passou a ser vista com maior interesse por alguns países que possuíam características geográficas naturais favoráveis e algum tipo de déficit energético, como Reino Unido, Noruega, Dinamarca, Suécia, Portugal, EUA, China, Índia e Japão. Esses países começaram a desenvolver programas de caráter governamental e fomentaram o desenvolvimento de instituições para estudo desse tipo de energia (CRUZ; SARMENTO, 2004).

Entretanto, o interesse por essa energia limpa voltou a diminuir ao longo dos anos e só retornou com maior destaque ao cenário mundial décadas depois. De acordo com Falnes (2007), com a queda do preço do barril de petróleo no início da década de 80, os investimentos nas energias das ondas foram drasticamente reduzidos, limitando os avanços na área. Mais recentemente, seguindo o Protocolo de Kyoto para a redução das emissões de  $CO_2$ , a busca por energias sustentáveis fez a energia das ondas voltar a ser ponto de interesse por parte de diversos países.

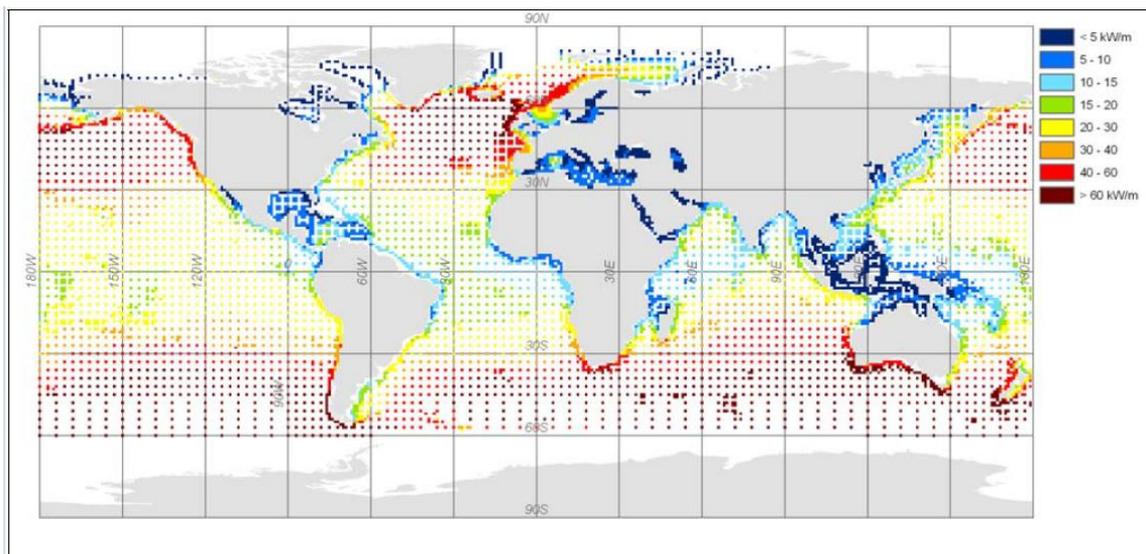
Tal interesse se justifica pelo notável potencial global teórico atribuído as ondas que é de cerca de 3TW distribuídos pelos continentes, como mostra a Tabela 1; esse valor se equipara ao potencial médio anual consumido mundialmente (MØRK et al., 2010).

A figura 16 mostra o recurso energético das ondas, em que o potencial de cada área é representado em kW por metro de frente de onda. Esses valores representam o Potencial médio anual de energia que atravessa cada metro de frente de onda.

**Tabela 1** – Potencial energético teórico das ondas por região em GW.

Região	P(GW)
Europa (N e O)	289
Mar Mediterrâneo e Arquipelagos	148
América do Norte	242
América Central	171
América do Sul	526
África	422
Ásia	547
Austrália, Nova Zelândia e Polinésia	637
Outros	4
<b>Total</b>	<b>2986</b>

Fonte: Adaptado de Mørk et al., 2010.



**Figura 16** – Distribuição média anual do potencial teórico das ondas no mundo em kW/m de frente de onda.

Fonte: Mørk et al., 2010.

Hoje, apesar de ainda muito incipientes, projetos de energia proveniente das ondas são desenvolvidos em inúmeros países. Em 2001, foi criada a Ocean Energy Systems (OES), um programa da International Energy Agency (IEA) concebido com objetivo de fomentar o desenvolvimento e a exploração das energias oceânicas no mundo com a colaboração de 25 países. O programa facilita o intercâmbio de informações e o progresso de tecnologias, estimulando a implementação em escala e diminuindo, assim, os custos para a captação dessas energias (OES, 2019).

A tabela 2 apresenta uma lista com os países participantes da OES de 2016 que possuem projetos ou dispositivos de captação de energia das ondas instalados com valores relevantes no cenário mundial.

**Tabela 2** – Capacidade instalada de dispositivos de captação de energia das ondas kW por país da OES em 2016.

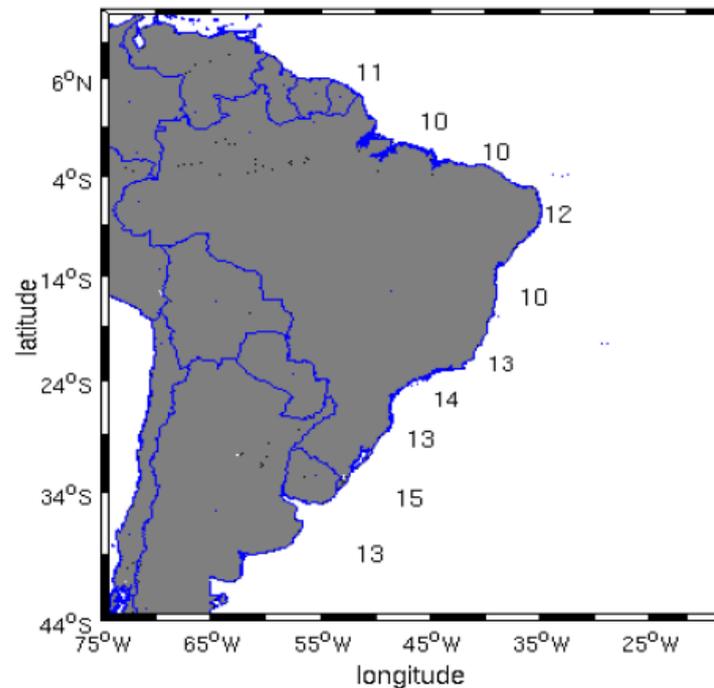
Países	Capacidade Instalada (KW)	Capacidade de projetos futuros (KW)
Bélgica	-	100
Canadá	11	-
China	700	-
Dinamarca	13	38
Irlanda	-	5000
Itália	150	-
Coreia	665	300
Noruega	200	-
México	-	200
Nova Zelândia	20	-
Portugal	400	350
Espanha	526	7
Suécia	3200	-
Reino Unido	3730	40000
EUA	30	1835

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nos dados de OES (2014, 2016).

O potencial energético disponível nas ondas de águas brasileiras é considerado modesto, porém seu valor é de grande relevância. A costa brasileira conta com potencial de cerca de 90 GW e, segundo testes, existe a possibilidade de converter cerca de 20% desse potencial em energia elétrica, o que seria equivalente a 17% da capacidade total instalada no país (COPPE/UFRJ, 2012).

Além disso, o Brasil possui uma extensa costa e vastas áreas de mar territorial que fornecem condições naturais e boas perspectivas para o aproveitamento energético dos recursos oceânicos, o que poderá contribuir para ampliação da oferta e diversificação da matriz energética do país (CEMBRA, 2019).

Na figura 17, é mostrada a distribuição da média do potencial energético disponível ao longo do litoral brasileiro.



**Figura 17** – Potencial médio em kW/m da costa brasileira.  
**Fonte:** Carvalho, J. T., 2010.

Com objetivo de desenvolver pesquisas e projetos relacionados a energias renováveis oceânicas no Brasil, foi formado em 2001 o Grupo de Energia Renovável no Oceano (GERO). O grupo é vinculado ao Programa de Engenharia Oceânica (PENO) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e concentra os maiores esforços em desenvolvimento de projetos e trabalhos científicos em energias oceânicas. Em relação a energia das ondas, o GERO desenvolve dezenas de importantes trabalhos científicos, incluindo avaliação de recursos e tecnologias das ondas como em Shadman et al. (2019) e desenvolvimento e otimização de conversores de energia das ondas como em Estefen et al.(2010), Shadman (2017) e Wu, Levi e Estefen (2019) (GERO, [s.d.]).

Além de pesquisas e trabalhos científicos o GERO desenvolve e implementa modelos e protótipos de conversores de energia das ondas. Em 2011 a COPPE/UFRJ financiada pela Tractebel Energia S.A, construiu a primeira usina-piloto de energia das ondas da América Latina, visando expandir a matriz energética nacional e comprovar que as ondas do mar podem produzir eletricidade com confiabilidade de suprimento e a custos viáveis. A usina foi construída no porto do Pecém, a 60 km de Fortaleza no estado do Ceará, e conta com dois módulos de produção de energia como mostra a figura 18 (COPPE/UFRJ, 2012).



**Figura 18** – Módulos da usina de ondas piloto, desenvolvida pela COPPE/UFRJ no Porto do Pécem.  
**Fonte:** COPPE/UFRJ, 2012.

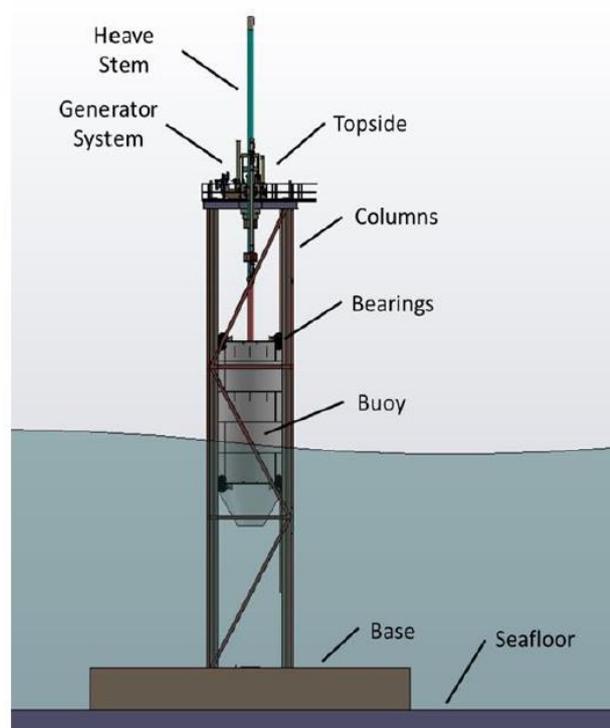
Parte do projeto da usina-piloto foi testada no Laboratório de Tecnologia Oceânica (LabOceano), onde surgiu o grupo GERO, o laboratório possui o mais profundo tanque de simulação oceânica (Figura 19) do mundo, com cerca de 23 milhões de litros de água e uma profundidade que pode chegar a 25m em seu poço central. O laboratório foi construído para suprir a demanda brasileira por ensaios e simulação em escala de tecnologias de exploração de petróleo em grandes profundidades, porém, devido a sua capacidade de simular ondas, ventos e correntes marinhas, o LabOceano representa um grande avanço para pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento das energias das ondas e das energias oceânicas em geral no Brasil (PLANETA COPPE NOTÍCIAS, 2018).

O GERO tem desenvolvido também um protótipo de dispositivo para ser instalado próximo à Ilha Rasa no litoral do Rio de Janeiro. Com uma potência de cerca de 80 kW, o protótipo é desenvolvido para ser apoiado no fundo do mar em uma profundidade de aproximadamente 16 m (CEMBRA, 2019).

A figura 20 mostra a ilustração do dispositivo do projeto da COPPE/UFRJ para Ilha Rasa.



**Figura 19** – Imagem do tanque de simulações marítimas do LabOceano da COPPE/UFRJ.  
**Fonte:** COPPE/ UFRJ, 2018.



**Figura 20** – Conversor *Nearshore* com potência de 80 kW do projeto da COPPE/UFRJ para Ilha Rasa.  
**Fonte:** Shadman e Estefen, 2018.

### 3 METODOLOGIA

Para uma melhor visualização e entendimento do processo metodológico, foi elaborado um fluxograma (figura 21) que fornece um panorama geral das etapas adotadas.

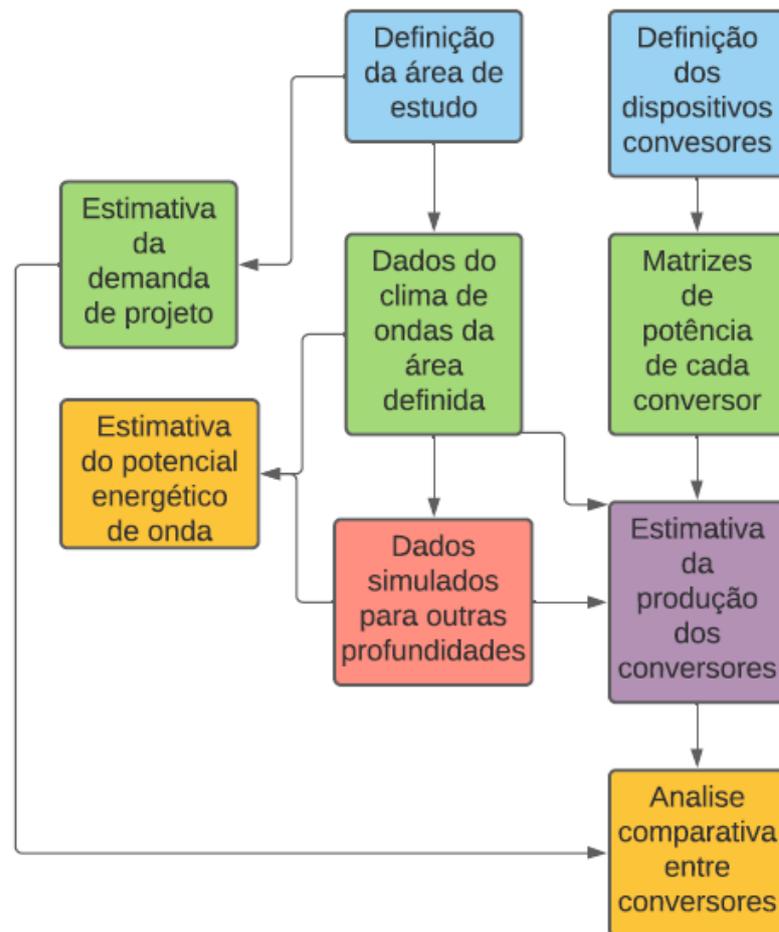
Primeiramente, foi definida a área de estudo, a Cidade de Macaé, que possui seu território na Bacia de Campos e foi escolhida devido a sua relevância e visibilidade. De maneira concomitante, foram definidos os dispositivos conversores de energia das ondas a serem estudados e suas respectivas matrizes de potência, que fornecem a potência desenvolvida pelos dispositivos de acordo com cada estado de mar.

A partir da definição da área de estudo, foi feita a estimativa da demanda energética do projeto para iluminação das principais orlas da cidade e o levantamento dos dados do clima de ondas da região. Tais dados foram colhidos *in situ*, em águas profundas e disponibilizados em Pinho (2003).

Posteriormente, a partir dos dados de Pinho (2003) e de dados de onda simulados por Rego *et al.* (2015) em outras profundidades, foi estimado o potencial teórico de onda em águas profundas intermediárias e rasas.

Na sequência, com os dados de ondas dispostos em diagramas de dispersão e com as matrizes de potência dos conversores, foi estimada a produção energética anual de cada dispositivo para as três diferentes profundidades a partir do método proposto por Babarit *et al.* (2012).

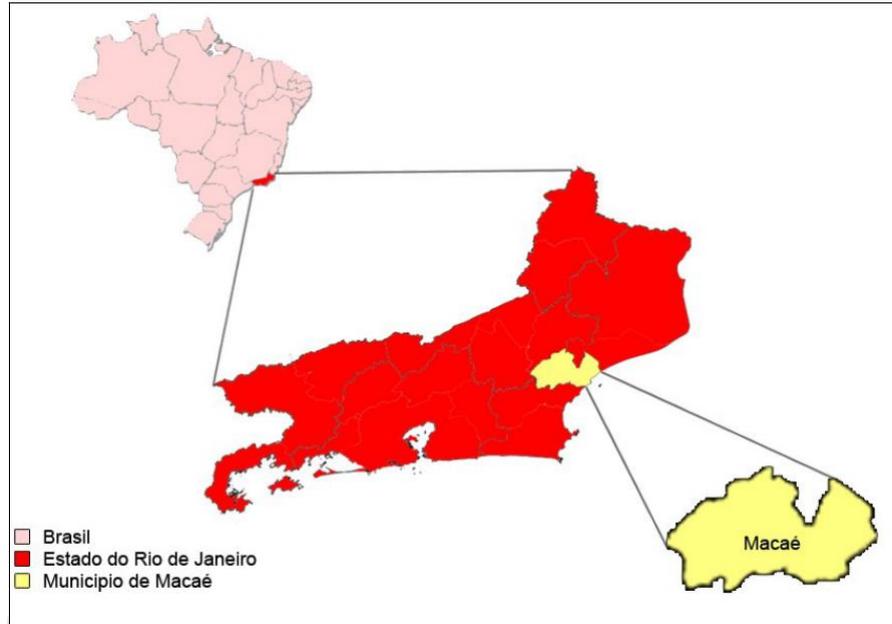
Por fim, de acordo com indicadores energéticos definidos, foi feita uma análise comparativa do desempenho dos dispositivos conversores e escolhido, dentre os verificados, o que melhor se adéqua ao clima de ondas da região de estudos e ao projeto proposto. Cada etapa e indicadores utilizados serão explicados de forma mais detalhada nas seções a seguir.



**Figura 21** – Fluxograma das etapas adotadas na metodologia do trabalho.  
**Fonte:** Pelo autor

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi escolhida com base em sua relevância e visibilidade no cenário nacional. Macaé é um dos municípios da região Norte Fluminense do estado do Rio de Janeiro (figura 22), localiza-se a cerca de 180 km da capital e destaca-se por possuir um avançado parque industrial petrolífero, responsável pelo rápido crescimento econômico e populacional da cidade.



**Figura 22** – Localização do município de Macaé.  
**Fonte:** Faria; Tougeiro, 2010.

Além do setor econômico, o município é conhecido pelas suas belezas naturais e atrativos turísticos. Com cerca de 23 km de costa, a cidade conta com dezenas de praias e um litoral bem desenvolvido, como mostra a figura 23.

Parte dos estudos desenvolvidos neste trabalho baseia-se em dados do regime de ondas predominante na Bacia de Campos, onde se localiza o território macaense. A área em questão é uma bacia sedimentar com grande relevância para a indústria do petróleo nacional, uma vez que abriga enormes depósitos de óleo e gás natural.



**Figura 23** – Vista superior de parte do litoral macaense.  
**Fonte:** Carvalho, J., 2020.

A bacia tem seu nome derivado da cidade de Campos dos Goytacazes, porém, toda atividade da indústria petrolífera teve início na cidade de Macaé, onde foi instalada a base da Petrobras (incluindo porto de Imbetiba), impulsionando o desenvolvimento de um complexo parque industrial na cidade, baseado na extração dos combustíveis fósseis.

Segundo dados do Cembra (2019), a Bacia de Campos possui cerca de 100 mil km<sup>2</sup> e se localiza em uma região que vai do centro-norte do estado do Rio de Janeiro até o sul do estado do Espírito Santo (figura 24), sendo responsável por quase 80% da produção de petróleo e gás natural do Brasil.

Devido à grande importância econômica da Bacia, a qual possui seu território predominantemente em região oceânica, diversos trabalhos foram desenvolvidos, como os de Violante-Carvalho (1998), Pinho (2003), Silva (2008) e Campos (2009). Tais trabalhos visam a determinação das condições meteorológicas e oceanográficas da região, com objetivo de prever o comportamento de ventos, ondulações e eventos extremos, facilitando, portanto, o desenvolvimento das atividades marítimas com maior segurança o desenvolvimento das atividades marítimas com maior segurança (ANDRADE, 2014).

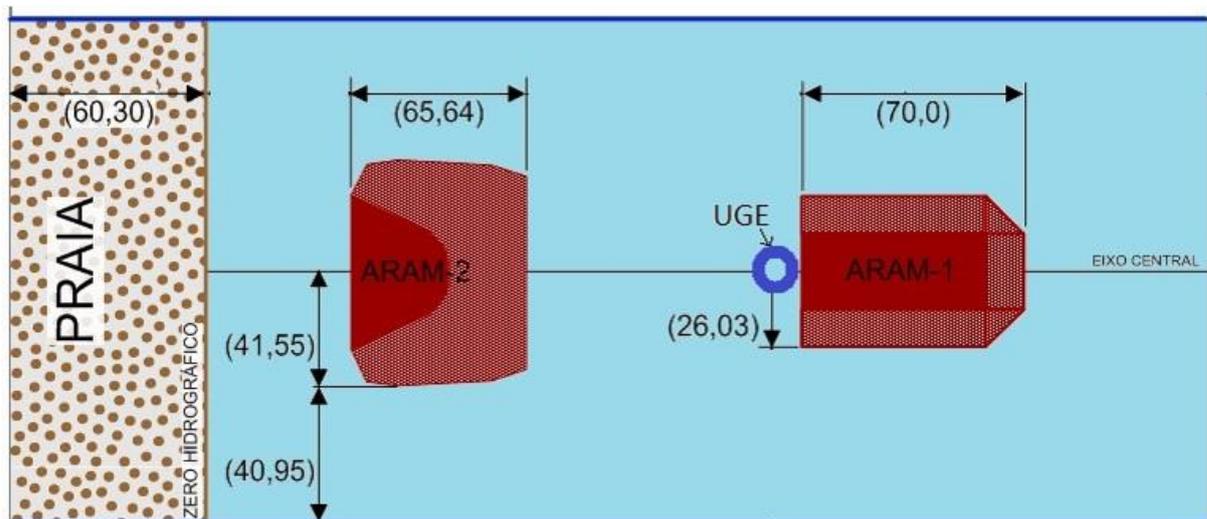


**Figura 24** – Localização e limites da bacia de campos.  
**Fonte:** Adaptado de Bastos e Luparelli, 2015.

### 3.2 DEMANDA ENERGÉTICA DE PROJETO

Antigamente conhecida como a “Princesinha do Atlântico” devido à beleza de suas praias, Macaé, além da atividade petrolífera, destaca-se no setor do turismo, atraindo, todos os anos, milhares de pessoas para o seu litoral fato que traz grande visibilidade para região.

Levando em consideração a importância do município no cenário nacional, entre julho de 2011 e abril de 2013 foi desenvolvido um projeto em parceria com a COPPE/UFRJ, e as empresas ArAM e Seahorse, solicitado pela Usina Termelétrica Norte Fluminense (UTE-NF), no âmbito do Programa de Pesquisa e desenvolvimento da ANEEL, com objetivo de desenvolver estruturas marinhas de amplificação de altura das ondas para geração de energia elétrica. O projeto consiste na instalação de dois arrecifes artificiais na praia Campista (Macaé), o primeiro para amplificar as ondas e o segundo para dissipar a energia das ondas, de forma controlada. Associados aos arrecifes, seriam instalados dispositivos conversores da energia das ondas para geração de eletricidade e iluminação da orla das praias, conforme pode ser observado na figura 25.



**Figura 25** – Esquema da instalação dos arrecifes de amplificação (ARAM-1) e de dissipação (ARAM-2), associados a unidade de geração de energia (UGE).

**Fonte :** Fundação COPPETEC (2012)

Outro aspecto interessante do projeto, seria criação de uma espécie de surfódromo, através da dissipação programada das ondas que incidem sobre essa estrutura artificial. Seria possível, ainda, a criação de uma área protegida dos processos de erosão costeira e propícia para o banho e circulação de turistas.

Portanto, a iniciativa contribuiria para a complementação da economia de um município, voltada para a exploração do petróleo, através de um demonstrativo de produção de eletricidade pelas ondas e um polo de fomento aos esportes com prancha, associados a atrações turísticas, gerando emprego e renda em demais setores da economia local (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2012)

Motivado pelo projeto supracitado, este trabalho visa associar o estudo de energia proveniente das ondas da cidade de Macaé diretamente à iluminação das orlas das principais praias da cidade. Com objetivo de resgatar e fomentar uma grande iniciativa de um projeto nunca implementado no Brasil.

Para garantir a capacidade do projeto de suprir a demanda energética de iluminação, foi necessário lançar mão dos dados de consumo dos locais de interesse. Tal levantamento foi feito no âmbito do projeto da Fundação COPPETEC (2012) e lista todos os pontos de iluminação das principais praias do município, incluindo a quantidade de postes, quantidade de lâmpadas em cada poste e o consumo de cada lâmpada.

Na figura 26 são mostradas imagens das orlas das praias em questão, são elas: Praia Campista, Praia dos Cavaleiros e Praia Pecado.



**Figura 26** – Orla das principais praias de Macaé: a) Praia Campista; b) Praia dos Cavaleiros; c) Praia do Pecado

**Fonte:** Oliveira, 2017; Silveira (2013, 2017)

A determinação do consumo de energia elétrica foi feita a partir dos potenciais entregues por cada lâmpada, obtidos no levantamento, considerando uma média diária de funcionamento de 10 horas e utilizando a equação a seguir:

$$E_{el} = P_l \cdot \Delta t \quad (3-5)$$

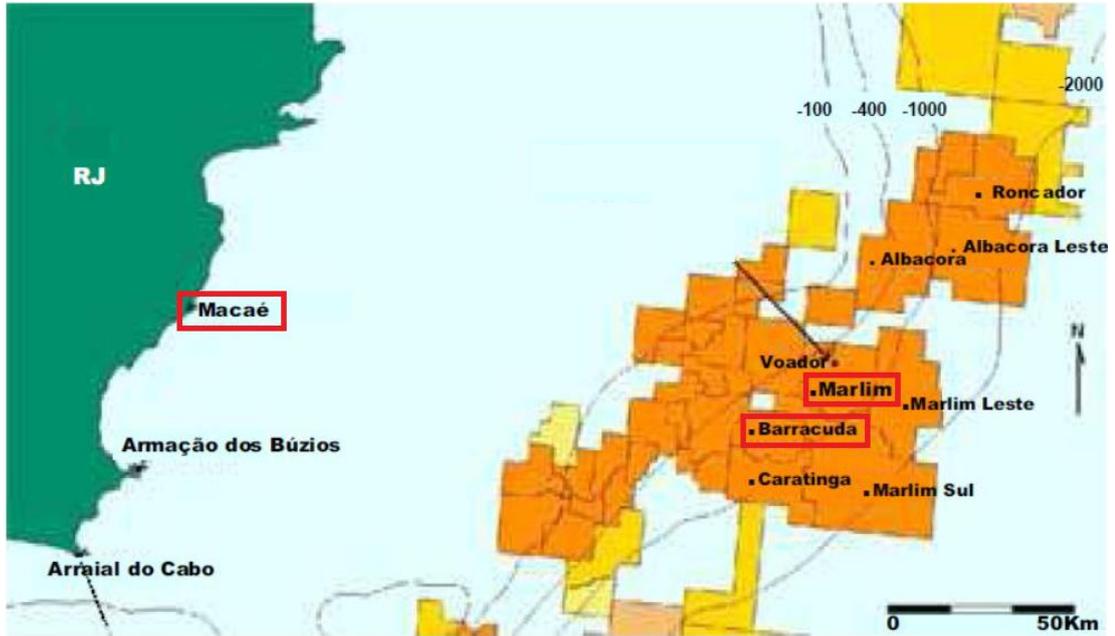
Em que  $E_{el}$  representa a energia elétrica consumida,  $P_l$  o potencial entregue pela lâmpada e  $\Delta t$  o intervalo de tempo de funcionamento da lâmpada.

Dessa forma, foi possível determinar a demanda de energia elétrica para os intervalos de interesse, considerando que o tempo de funcionamento diário de cada lâmpada é constante e que todas funcionam simultaneamente todos os dias do ano.

Após a definição da demanda de projeto, esses dados foram comparados aos dados de potencial e energia elétrica entregues pelos conversores de energia de onda previamente selecionados e simulados no clima de ondas macaense.

### 3.3 DADOS DO CLIMA DE ONDAS DA REGIÃO

Para a determinação do potencial energético disponível e análise comparativa entre conversores para o projeto de captação de energia das ondas de Macaé, fez-se necessário a caracterização do clima de ondas da região, assim como a utilização dos dados de onda geradas por ele, sendo utilizados como base os estudos de Pinho (2003) e Parente et al. (2015). Os dois trabalhos disponibilizam uma série de dados obtidos a partir do começo dos anos 1990 através dos programas de coleta de dados meteo-oceanográficos financiados pela Petrobras. Os dados foram coletados por uma boia fundeada em águas profundas, nos campos de petróleo de Marlim e Barracuda (figura 27), por um período de cerca de três anos e meio. A boia utilizada foi do tipo *heave-pitch&roll* (figura 28) que, além da elevação da superfície e direção da ondulação, é capaz de armazenar dados sobre correntes superficiais, intensidade e direção do vento, pressão atmosférica, temperatura da água e do ar, permitindo, assim, um estudo completo e de alta qualidade dos estados do mar da região.



**Figura 27** – Localização dos campos de Marlim e Barracuda em relação à Macaé.

**Fonte:** Blog da Petrobras, 2011.



**Figura 28** – Boia meteo-oceanográfica usada na Bacia de Campos.

**Fonte:** Parente et al. 2015.

O clima de ondas de uma região é geralmente descrito por um diagrama/matriz de dispersão que descreve, a longo prazo, as distribuições de alturas de onda e períodos (REIS; SANTOS, 2011). Os diagramas usados neste trabalho foram construídos por Pinho (2003) a partir da análise dos dados de ondas registrados entre

fevereiro de 1992 a janeiro de 1993 e de fevereiro de 1994 a março de 1995. Eles apresentam a distribuição conjunta dos parâmetros altura significativa ( $H_s$ ), e período de pico ( $T_p$ ).

A seguir são apresentados os diagramas de dispersão para região de Macaé, baseados na classificação dos estados de mar predominantes de acordo com os sistemas meteorológicos, como descrito na seção 2.4.

- Dados para situação de Bom Tempo:

Nessa condição, a faixa com maior número de ocorrências de  $H_s$  fica entre 1 e 2 m com  $T_p$  entre 6 e 8 s. Os valores mais altos de  $H_s$ , estão associados a pistas de formação de norte com ventos de até 14 m/s e valores de até 3 m, e os períodos máximos dificilmente ultrapassam os 11 s.

A figura 29 mostra o diagrama de dispersão para situação de Bom Tempo.

		Tp(s)											
		4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
H <sub>s</sub> (m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-1,5	12	53	62	77	30	2	1	0	0	0	0	0
	1,5-2	7	100	131	69	108	35	2	0	0	0	0	0
	2-2,5	0	6	59	107	43	16	1	0	1	1	0	0
	2,5-3	0	0	13	58	18	9	0	0	0	0	0	0
	3-3,5	0	0	2	10	3	0	0	0	0	0	0	0
	3,5-4	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 29** – Diagrama de dispersão para situação de Bom tempo.

**Fonte:** Adaptado de Pinho (2003).

- Dados para situação de Bom Tempo com *Swell*:

Nesse caso, devido à presença concomitante de um *swell* distante, os períodos de pico ( $T_p$ ) se distribuem em intervalos de maior valor, podendo variar entre 8 e 12 s e, as alturas significativas mais frequentes, entre 1.5 e 2m. Os maiores períodos significativos observados estão entre 16 e 18 s e as maiores alturas significativas estão relacionadas à pista de formação, com direção sul, e estão entre 2.5 e 3m.

A figura 30 mostra o diagrama de dispersão para situação de Bom Tempo com *Swell*.

		Tp(s)													
		4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
Hs(m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1	1	2	8	1	0	2	0	2	1	0	2	0	0	0
	1-1,5	17	61	38	33	27	28	48	43	14	6	16	1	0	0
	1,5-2	8	122	85	28	28	45	61	87	45	12	3	5	1	0
	2-2,5	1	11	38	8	6	10	12	32	36	14	4	4	2	1
	2,5-3	0	0	0	0	2	5	1	4	6	9	1	9	1	0
	3-3,5	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
	3,5-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 30** – Diagrama de dispersão para situação de Bom tempo com Swell.

Fonte: Adaptado de Pinho (2003).

- Dados para situação de Mau Tempo de sudoeste:

As ondas, nesse tipo de situação, estão relacionadas a  $H_s$  entre 2 e 3 m e maiores alturas significativas com direção de pico de sudoeste, ou seja, mesma direção de entrada do ciclone. Os períodos de pico caracterizam-se por se concentrarem em uma faixa bem maior do que de Bom Tempo, entre 8 e 12 s, com grande recorrência de períodos acima de 14 s. Os maiores valores de altura e período significativo são de aproximadamente 6 m e 16 s, respectivamente.

A figura 31 mostra o diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudoeste.

		Tp(s)													
		4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
Hs(m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,5-1	0	6	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-1,5	1	10	14	17	21	8	10	4	2	2	3	0	0	0
	1,5-2	1	7	27	33	28	16	23	30	17	5	5	2	0	0
	2-2,5	0	3	11	16	16	26	24	22	24	16	3	1	0	0
	2,5-3	0	0	4	3	9	12	26	20	9	4	1	1	2	0
	3-3,5	0	0	0	4	8	10	15	15	9	6	2	1	0	0
	3,5-4	0	0	0	1	0	9	8	6	11	10	3	1	0	1
	4-4,5	0	0	0	0	1	5	7	3	11	7	6	1	0	0
	4,5-5	0	0	0	0	0	1	2	4	1	4	3	5	0	0
	5-5,5	0	0	0	0	0	0	1	2	1	3	1	1	0	0
	5,5-6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	6-6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
	6,5-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 31** – Diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudoeste.

Fonte: Adaptado de Pinho (2003).

- Dados para situação de Mau Tempo de sudeste:

Os valores de  $H_s$  mais recorrentes estão entre 1,5 e 2,5 m, provenientes principalmente de sul e sudeste, enquanto os períodos de pico têm maior ocorrência entre 8 e 10 s e 10 e 12 s. Os maiores períodos de pico registrados tinham entre 14 e 16 s, enquanto as maiores alturas significativas registradas tinham entre 4 e 4,5 m.

A figura 32 mostra o diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudeste.

		Tp(s)													
		4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18
Hs(m)	0-0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	0,5-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1-1,5	0	4	8	6	7	8	5	5	2	2	2	0	0	0
	1,5-2	1	5	15	34	24	31	39	17	16	3	3	0	0	0
	2-2,5	0	4	8	20	35	37	32	49	30	8	2	0	0	0
	2,5-3	0	0	7	15	32	39	31	45	38	21	2	0	0	0
	3-3,5	0	0	0	3	22	14	16	28	24	16	2	0	0	0
	3,5-4	0	0	0	3	4	6	12	7	8	2	3	0	0	0
	4-4,5	0	0	0	0	0	1	7	3	1	3	3	3	0	0
	4,5-5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	5-5,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	5,5-6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6-6,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	6,5-7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

**Figura 32** – Diagrama de dispersão para situação de Mau Tempo de sudeste.

**Fonte:** Adaptado de Pinho (2003).

### 3.4 ESTIMATIVA DO POTENCIAL TEÓRICO DE ONDA DISPONÍVEL

O potencial teórico é todo potencial de onda disponível que pode ser calculado por princípios físicos a partir dos parâmetros de onda de uma área, sem levar em consideração as barreiras naturais, artificiais ou tecnológicas que limitem o aproveitamento do potencial gerado. (MØRK et al., 2010).

Para a estimativa do potencial teórico disponível na região de interesse, foram utilizados os diagramas de dispersão mostrados na seção anterior, introduzindo-se na equação 2-35 os parâmetros altura significativa ( $H_s$ ) e período de energia ( $T_e$ ).

Entretanto, os diagramas supracitados apresentam os dados em função do par  $H_s$  e  $T_p$ . Dessa forma, para encontrar a relação entre  $T_p$  e  $T_e$ , é recomendado por Melo (2012) para o caso dados utilizados aqui que se utilize a equação abaixo:

$$T_e = 0.9 T_p \quad (3-1)$$

Substituindo essa relação na equação 2-35, tem-se a seguinte equação:

$$P = 0.44 \cdot H_s^2 T_p \quad (3-2)$$

Então, o potencial total de um sítio oceânico pode ser encontrado da seguinte forma (MELO, 2012):

$$P_{total} = \sum_i 0.44 \cdot (H_s^2 T_p) i \quad (3-3)$$

Com  $i$  cobrindo todos os dados do clima de ondas disponível.

A equação 3-3 foi utilizada em cada classificação de estado de mar de forma individual, possibilitando, assim, que fosse encontrado o potencial total para toda massa de dados disponível. Também foi possível determinar os potenciais médios e totais anual e para cada classificação de mar dominante.

A apresentação dos resultados também foi feita de acordo com as classificações de mar descritas na seção 2.4, já que os dados disponíveis para o estudo do potencial não permitiram estruturá-los de forma sazonal ou mensal, como é feito tradicionalmente. Porém, a partir das estimativas de potencial feitas e dos percentuais de frequência de cada classificação, foi possível fazer toda análise teórica de viabilidade energética do projeto e ainda traçar um paralelo entre as duas formas de apresentação dos resultados obtidos a partir dos dados coletados.

### 3.5 ESTIMATIVA DO POTENCIAL TEÓRICO EM DIFERENTES PROFUNDIDADES

Como descrito na seção 2.5, quando as ondas vão se aproximando da costa e a profundidade começa a decrescer, a interação com o fundo faz com que parte da energia transportada seja dissipada, o que leva a redução da altura da onda. Dessa forma, o potencial de onda disponível tende a diminuir de acordo com a progressão das ondas em direção ao continente, especialmente em águas rasas.

Para estimar os potenciais em diferentes profundidades, portanto, é necessário lançar mão de dados de onda relacionados à batimetria de cada ponto de interesse. Segundo Assis (2010), tais dados podem ser obtidos de três maneiras principais, sendo elas: medições *In situ*, que utilizam equipamentos capazes de extrair informações diretas do local de interesse; medições remotas, com utilização de radares para obtenção dos dados e modelagens numéricas, que permitem obter informações a partir de softwares com simulações computacionais.

Nesse trabalho, as estimativas de potencial em águas profundas foram feitas com dados colhidos *in situ*, conforme descrição feita na seção 3.3. Porém, segundo Rego *et al.* (2015), esses tipos de dados, apesar de serem os mais fiéis às verdadeiras condições oceânicas, são extremamente escassos e limitados devido ao alto custo dos equipamentos de medição. Nesse contexto, torna-se fundamental a utilização de modelos que possibilitem a interpolação e extrapolação das informações colhidas nos poucos pontos de medição para uma maior área de interesse.

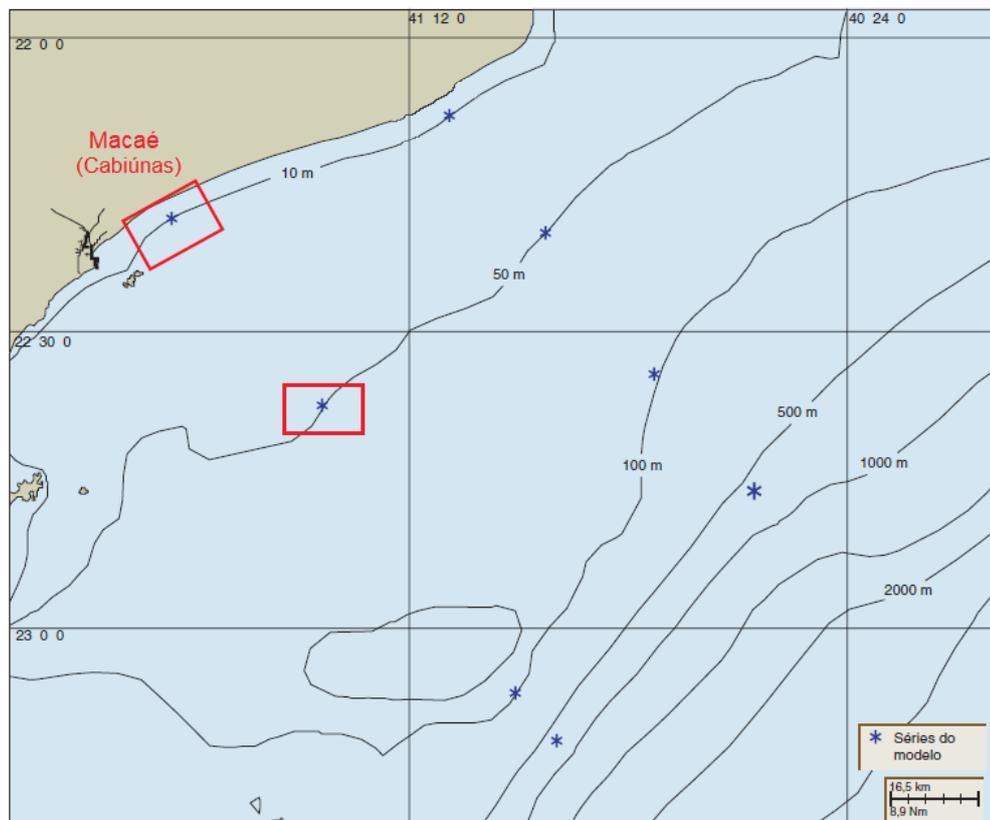
Os potenciais de energia da onda para águas rasas e intermediárias foram calculados com base em dados obtidos por Rego *et al.* (2015) a partir de simulações de transformação de ondas sobre a plataforma continental da Bacia de Campos. As simulações foram feitas com a utilização de dois softwares de terceira geração, o WAVEWATCH III, desenvolvido pela National Weather Service (NWS) / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e o SWAN (Simulating Waves *Nearshore*), que é um modelo computacional gratuito e de código aberto próprio para simulações em águas rasas que utiliza a equação 2-40 como base de cálculo.

Com o auxílio dos softwares supracitados, Rego *et al.* (2015) puderam modelar o comportamento das ondas da Bacia de Campos quando transitam em águas rasas e intermediárias; para tal, foram usados eventos representativos de cada categoria de mar da Bacia, o que permitiu a obtenção de dados de onda para cada um deles em diferentes profundidades e localizações.

Utilizando como base, os dados simulados por Rego *et al.* (2015), que relacionam a altura significativa com a batimetria de cada ponto, foi possível chegar às perdas médias de altura significativa e calcular os potenciais de onda para a Cidade de Macaé nos pontos de águas intermediárias e rasas simulados pelos autores supracitados. Para tal foram aplicadas as relações obtidas pelos autores aos dados dos diagramas de dispersão apresentados na seção 3.3. Não faz parte do escopo desse trabalho definir o local exato para implantação da usina ondomotriz na cidade.

Posto isso, foram utilizados dois pontos de referência, presentes na simulação de Rego *et al.*, 2015 para caracterização dos recursos das ondas e estudo dos conversores de energia. Os pontos se situam em frente ao distrito de Cabiúnas na Cidade de Macaé e em isóbatas de 10 e 50 m como mostra a figura 33.

A tabela 3 apresenta as perdas médias percentuais de altura significativa para cada categoria de mar, obtidas a partir dos dados de Rego *et al.* (2015), para os pontos de águas rasas e intermediárias em relação aos pontos de água profunda.



**Figura 33** – Localização dos pontos de simulação de dados em águas intermediárias e rasas.

**Fonte:** Adaptado de Rego *et al.* (2015).

**Tabela 3** – Perdas médias percentuais de altura significativa nos pontos de águas rasas e intermediárias em relação aos pontos de águas profundas.

Clima de ondas	Perda média percentual de $H_s$	
	Águas intermediárias	Águas rasas
Bom Tempo	10%	40%
Bom Tempo com Swell	7%	40%
Mau tempo de sudoeste	10%	38%
Mau tempo de sudeste	11%	39%

**Fonte:** Elaborado pelo autor, com base nos dados de Rego *et al.* (2015).

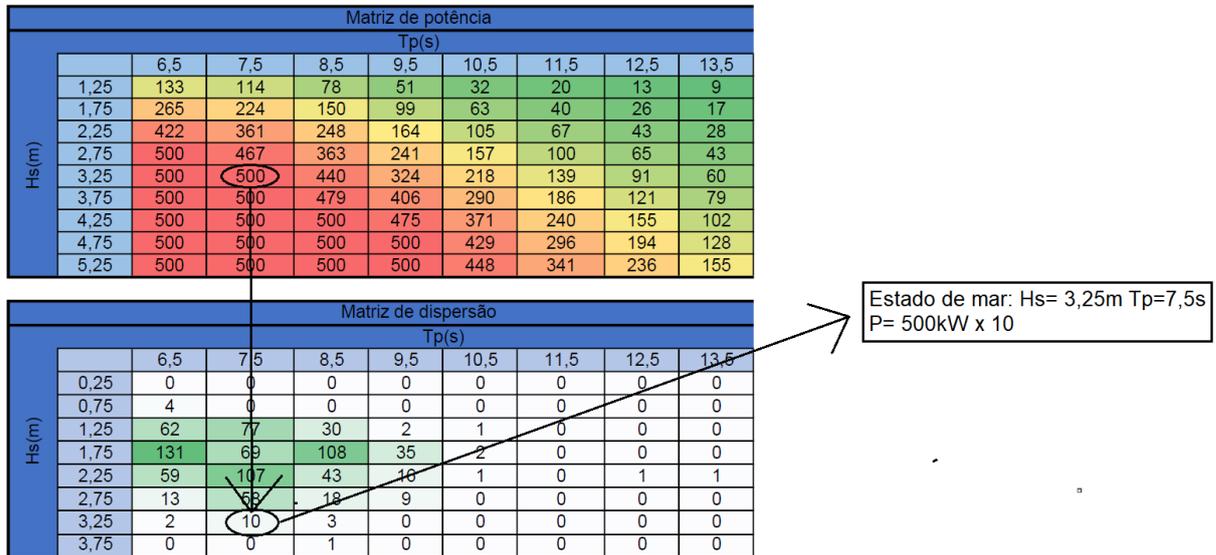
Como mostra a equação 2-35, o potencial é diretamente proporcional ao quadrado da altura significativa, o que faz com que pequenas mudanças nesse parâmetro afetem fortemente o potencial de onda. Sendo assim, essas perdas de altura significativa foram utilizadas como base para estimar as potências de onda disponíveis em águas rasas e intermediárias nos pontos citados anteriormente.

### 3.6 ESTIMATIVA DO POTENCIAL EXTRAÍDO PELOS DISPOSITIVOS

Como já citado na seção 2.6, existem dezenas de protótipos e diferentes conceitos relacionados a tecnologias de captação de energia das ondas. Um dos objetivos desse trabalho é definir entre os conceitos mais avançados e testados nos dias atuais, qual se adequa melhor ao clima de ondas da cidade de Macaé, isto é, qual dos protótipos apresenta melhor desempenho energético, quando testado no clima de ondas local. Para tal foram escolhidos conversores com dados e parâmetros testados e disponibilizados em bibliografia.

Uma forma eficiente de estimar a absorção de energia de um dispositivo em particular em um determinado local é fazendo o produto entre a matriz de potência do dispositivo com o diagrama de dispersão de onda do local (BABARIT *et al.*, 2012). Essas matrizes fornecem a potência gerada por cada dispositivo para cada estado oceânico em termos de  $H_s$  e  $T_p$  ou  $T_e$ , e geralmente são fornecidas pelo desenvolvedor do projeto do conversor (ZANCANELLA, 2016).

Para realizar o produto entre as matrizes e estimar a quantidade de energia elétrica extraída por cada dispositivo conversor, é necessário cruzar os dados das células das matrizes como exemplificado na figura 34.



**Figura 34** – Exemplo de cruzamento de dados entre matrizes para estimativa da produção de conversores.

**Fonte:** Pelo autor

Como mostra o exemplo da figura 34, é feita a correlação dos elementos correspondentes das duas matrizes, de acordo com cada estado de mar representado pelo par  $H_s$  e  $T_p$ . No exemplo dado tem-se um estado de mar com  $H_s = 3,25\text{m}$  e  $T_p = 7,5\text{s}$  registrado com 10 ocorrências. Dessa forma descobre-se que é gerada pelo dispositivo conversor uma potência de 500 kW para cada uma das 10 ocorrências desse estado de mar.

A partir do somatório do produto de cada célula correspondente entre as matrizes, é possível calcular a energia gerada por um conversor, em um determinado intervalo de tempo de interesse, pela seguinte equação (LAVIDAS, 2020; SHADMAN, 2017):

$$E_0 = \Delta T \left[ \sum_{i=1}^n P_e(H_{s_i}, T_{p_i}) \cdot p(H_{s_i}, T_{p_i}) \right] / \text{Total de ocorrências} \quad (3-4)$$

Onde  $\Delta T$ , representa o tempo em horas do intervalo de tempo que se deseja calcular a produção do dispositivo,  $P_e(H_{s_i}, T_{p_i})$  representa os elementos da matriz de

potência elétrica do conversor e  $p(H_{Si}, T_{pi})$  representa os elementos da matriz de dispersão com o número de ocorrências, o total de ocorrências é referente ao período que se deseja calcular. Nesse trabalho não foram consideradas as perdas do sistema de captação e conversão de energia, apenas as potências geradas, presentes na matriz de potência elétrica dos conversores.

Com o auxílio dos diagramas de dispersão e das matrizes de potência, calculou-se a produção proporcional a um ano de funcionamento dos dispositivos no clima de ondas de Macaé. A partir dos valores encontrados, buscou-se analisar quais dispositivos são mais adequados para os estados de mar predominantes na região e para o projeto de iluminação. Os dispositivos foram divididos de acordo com os locais de instalação (*Offshore*, *Nearshore* e *Onshore*) e foram verificados de acordo com o clima de ondas relativo a cada profundidade. Os dispositivos *Offshore* foram verificados para o clima de ondas em água profundas e intermediárias, os *Nearshore* verificados em águas intermediárias e rasas, e o *Onshore* em águas rasas.

Assim como para a estimativa do potencial teórico, os resultados das estimativas da energia extraída pelos conversores serão apresentados de acordo com cada categoria de mar predominante na Baía de Campos.

Um estado de mar é caracterizado pelo par altura significativa ( $H_s$ ) e período de pico ( $T_p$ ); algumas matrizes de potência são construídas em função do período de energia ( $T_e$ ). uma aproximação proposta para relacionar  $T_p$  e  $T_e$  está apresentada na equação 3-1, a qual foi aplicada nas matrizes de potência, possibilitando assim a associação com os diagramas de dispersão das categorias de mar.

Para os estados de mar não presentes nas matrizes de potência, utilizou-se a interpolação polinomial, como recomendado por Babarit (2015). Dessa maneira, foi possível estimar a produção energética para todos os estados oceânicos presentes nas matrizes.

### 3.7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO

A análise comparativa entre os conversores foi feita levando em consideração apenas fatores relacionados à extração e ao desempenho energético no clima de ondas do local de interesse. Para tal foi utilizado o método do produto entre matrizes de potência e dispersão explicado na seção anterior. Sendo assim, não faz parte do escopo da análise, fatores relacionados à viabilidade econômica ou ambiental.

Os indicadores levados em consideração para cada dispositivo selecionado são os seguintes:

- Fator de capacidade do conversor no ponto de interesse;
- Potencial energético extraído por unidade de massa;
- Proporcionalidade entre potencial energético extraído e de demanda.

O fator de capacidade é um parâmetro adimensional que pode ser definido como a razão entre o total real de energia, gerada por um conversor em um determinado local em um intervalo de tempo, pelo máximo de energia que poderia ser gerada teoricamente pelo conversor nesse mesmo intervalo de tempo (SHADMAN, 2017).

Sendo assim o fator de capacidade pode ser definido pela seguinte equação:

$$F_c = \frac{E_0}{\Delta T \cdot P'_0} \quad (3-5)$$

Em que  $E_0$  foi definido na equação 3-4,  $\Delta T$  é o mesmo intervalo de tempo considerado para o cálculo de  $E_0$  e  $P'_0$  é a potência nominal (*rated power*) em kW do conversor considerado. Nesse trabalho, assim como indicado por (PIETER et al., 2011), a potência nominal foi considerada como sendo a potência máxima gerada pelo conversor presente na matriz de potência.

Os custos com insumos, transporte, fabricação e montagem são proporcionais à quantidade de material consumida em um projeto. Portanto, é recomendado que se priorize conversores de menor massa, isto é, que utilizem menor quantidade de material em sua fabricação (BABARIT et al., 2012; DALTON; ALCORN; LEWIS, 2010; ZANCANELLA, 2016).

O método utilizado nesse trabalho para estimar o custo-benefício de cada conversor, de maneira simplificada, foi desenvolvido por Babarit *et al.*, (2012), o qual consiste em considerar a quantidade de massa utilizada em cada projeto e calcular a energia absorvida por unidade de massa (kWh/kg). Assim, quanto maior essa razão, mais vantajoso é o investimento no dispositivo para o clima de ondas em questão.

Para o desenvolvimento de um projeto proporcional a demanda pretendida, foi verificado em cada dispositivo se a quantidade de energia extraída em kWh por ano era da mesma ordem de grandeza da demanda. Dessa forma, buscou-se garantir a

desnecessidade da instalação de dezenas de unidades de captação de um conversor ou que a oferta de energia não excedesse excessivamente a demanda.

Para a análise, foram escolhidos nove dispositivos, sendo cinco *Offshore*, quatro *Nershore* e um *Onshore*. Nas próximas seções, é apresentada uma sucinta descrição de cada dispositivo escolhido e suas respectivas matrizes de potência. Vale ressaltar que as matrizes de potência são relativas a um modulo de cada dispositivo, sendo que alguns deles possibilitam a instalação de diversos módulos de produção.

### 3.7.1 Dispositivos *Offshore*

- Aquabuoy

O Aquabuoy é um conversor de energia do tipo corpo oscilante flutuante. Seu mecanismo consiste em um tubo cilíndrico reto com abertura nas duas extremidades, permitindo a entrada e a saída de água. Na parte superior, encontra-se posicionado o flutuador que o sustenta próximo da superfície e que se move de acordo com a incidência das ondas. O movimento do flutuador aciona uma bomba hidráulica que direciona o fluxo de água presente no tubo a uma turbina hidráulica que, por sua vez, aciona um gerador elétrico para a produção de eletricidade. O conversor possui cerca de 71 toneladas (CALEJO, 2012; WEINSTEIN *et al.*, 2004). A figura 35 apresenta a imagem do dispositivo Aquabuoy em funcionamento. A figura 36 apresenta a matriz de potência do conversor.



**Figura 35** – Imagem e ilustração do Dispositivo Aquabuoy.  
**Fonte:** Tunggal *et al.*, 2010.

		Tp(s)												
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs(m)	1,0	0	0	8	11	12	11	10	8	7	0	0	0	0
	1,5	0	13	17	25	27	26	23	19	15	12	12	12	7
	2,0	0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	23	23	12
	2,5	0	37	47	69	77	73	64	54	43	36	36	36	19
	3,0	0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	51	51	27
	3,5	0	0	93	135	152	144	126	105	86	70	70	70	38
	4,0	0	0	0	122	176	198	188	164	137	112	91	91	49
	4,5	0	0	0	223	250	239	208	173	142	115	115	115	62
	5,0	0	0	0	250	250	250	250	214	175	142	142	142	77
	5,5	0	0	0	250	250	250	250	250	211	172	172	172	92

**Figura 36** – Matriz de potência do Aquabuoy.

**Fonte:** Adaptado de Weinstein *et al.*, 2004.

- **Oceantec**

O conversor de energia de ondas Oceantec é do tipo corpo oscilante flutuante. A maneira como extrai energia das ondas do mar é baseada no movimento inercial relativo que as ondas causam em um dispositivo giroscópico. Esse movimento é usado para alimentar um gerador elétrico por meio de uma série de estágios de transformação. O dispositivo giroscópico está localizado dentro de uma estrutura alongada que fica alinhada com a frente da onda, resultando em um movimento de inclinação. O conversor possui aproximadamente 74 toneladas de massa (SALCEDO *et al.*, 2009; ZANCANELLA, 2016). A figura 37 apresenta um protótipo do Oceantec sendo testado. A figura 38 apresenta a matriz de potência do conversor.



**Figura 37** – Protótipo do dispositivo Oceantec sendo testado.

**Fonte:** Salcedo *et al.*, 2009.

		Tp(s)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Hs(m)	1,0	85	87	59	39	25	16	10	7	5	3
	1,5	191	196	133	89	57	36	23	15	10	7
	2,0	337	348	234	158	101	64	41	27	18	12
	2,5	500	500	364	245	158	101	65	42	28	19
	3,0	500	500	500	337	228	145	93	61	41	28
	3,5	500	500	500	420	309	196	127	83	55	38
	4,0	500	500	500	500	401	258	166	109	72	49
	4,5	500	500	500	500	500	326	210	138	92	62
	5,0	500	500	500	500	500	383	259	170	113	77
	5,5	500	500	500	500	500	389	308	205	137	93

**Figura 38** – Matriz de potência do Oceantec.

**Fonte:** Adaptado de Salcedo *et al.*, 2009.

- Pelamis P750

O Pelamis P750 é um dos dispositivos mais conhecidos e um dos mais bem sucedidos projetos da categoria corpo oscilante flutuante. O conversor possui uma configuração única com uma cadeia interligada de seções cilíndricas, semelhante a uma cobra flutuando na superfície do oceano, as quais são mantidas por juntas articuladas cujo movimento de elevação e oscilação bombeia óleo hidráulico em alta pressão. O fluido movimentado pelos pistões hidráulicos aciona um motor hidráulico acoplado a um gerador elétrico, gerando eletricidade (MUETZE; VINING, 2006). O conversor possui massa de 700 toneladas (DALTON; ALCORN; LEWIS, 2010). A figura 39 mostra a imagem do protótipo Pelamis P750 em funcionamento. A figura 40 mostra a matriz de potência do Pelamis P750.



**Figura 39** – Protótipo do dispositivo Pelamis P750.

**Fonte:** Solovyev, Solovyev e shilova, 2019.

		Te(s)																	
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	
Hs(m)	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1,0	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0	
	1,5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2,0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2,5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3,0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3,5	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4,0	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4,5	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5,0	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5,5	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6,0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6,5	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7,0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7,5	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8,0	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

**Figura 40** – Matriz de potência do dispositivo Pelamis P750.

**Fonte:** Adaptado de Dalton, Alcorn e Lewis, 2010.

- Wave Dragon

O Wave Dragon é um dispositivo de galgamento tradicional constituído por dois refletores que concentram as ondas incidentes numa rampa que conduz a água para um reservatório. Possui massa de 22000 toneladas (KOFOED et al., 2006). A figura 41 mostra um protótipo do Wave Dragon sendo testado. A figura 42 mostra a matriz de potência do Wave Dragon.



**Figura 41** – Protótipo do Wave Dragon sendo testado.

**Fonte:** kofoed et al., 2006.

		Te(s)																		
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0
Hs(m)	1,0	348	432	516	608	699	798	896	925	953	958	962	941	919	870	820	820	663	555	446
	1,5	485	617	750	899	1049	1212	1375	1433	1491	1509	1527	1502	1477	1404	1332	1332	1086	912	737
	2,0	621	802	983	1191	1398	1626	1853	1941	2029	2061	2092	2063	2034	1939	1844	1844	1509	1269	1028
	2,5	1123	1213	1304	1609	1914	2258	2602	2752	2903	2972	3041	3017	2993	2868	2743	2743	2266	1910	1555
	3,0	1624	1624	1624	2027	2430	2890	3350	3563	3776	3883	3989	3970	3951	3796	3641	3641	3022	2552	2082
	3,5	2581	2581	2581	2783	2984	3588	4191	4494	4796	4870	4945	4935	4926	4845	4765	4765	3983	3372	2761
	4,0	3538	3538	3538	3538	3538	4285	5032	5424	5816	5858	5900	5900	5900	5895	5889	5889	4943	4191	3439
	4,5	4719	4719	4719	4719	4719	5093	5466	5662	5858	5879	5900	5900	5900	5897	5895	5895	5422	4822	4222
	5,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
	5,5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
6,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	
6,5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	

**Figura 42** – Matriz de potência do dispositivo Wave Dragon.

**Fonte:** Adaptado de Veigas *et al.*, 2015.

- Wavestar

O Wavestar é um conversor do tipo corpo oscilante de absorção pontual. Pode ser instalado tanto *Offshore* quanto *Nearshore*; sendo assim, foi testado com os diagramas de dispersão para todas as profundidades disponíveis. O Dispositivo, de forma semelhante ao da Coppe/UFRJ, obtém energia das ondas através de boias sustentadas por braços, as quais oscilam verticalmente de acordo com a incidência das ondas. Por fim, o movimento do fluido hidráulico em um circuito fechado aciona uma turbina hidráulica e gera energia (WAVESTAR ENERGY, 2014). Possui, levando em conta 20 flutuadores, uma massa de 1600 toneladas (BABARIT *et al.*, 2012). A figura 43 ilustra o Dispositivo em funcionamento. A figura 44 apresenta a matriz de potência do Wavestar.



**Figura 43** – Ilustração do dispositivo Wavestar em funcionamento.

**Fonte:** Marquis, Kramer e Frigaard, 2010.

		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1,0	63	92	85	73	63	60	60	53	47	48	46	42	37
	1,5	134	174	181	160	141	124	118	115	100	89	77	94	80
	2,0	207	313	296	275	250	223	229	229	200	161	148	180	153
	2,5	0	463	462	396	393	379	320	370	306	294	225	236	228
	3,0	0	653	641	602	557	555	460	471	461	393	437	381	325
	3,5	0	0	900	848	785	717	662	656	557	551	571	580	478
	4,0	0	0	1123	1098	1030	984	799	857	821	830	637	592	652
	4,5	0	0	1339	1339	1002	1181	1050	1140	1012	848	863	672	828
	5,0	0	0	1689	1518	1403	1318	1248	1348	1115	1176	825	890	982
	5,5	0	0	0	1943	1749	1517	1477	1374	1395	1376	1089	1212	1117
	6,0	0	0	0	2192	2144	1618	1789	1586	1634	1783	1585	1346	1313
	6,5	0	0	0	2335	2162	1975	1962	1857	1660	1491	1619	1336	1668
	7,0	0	0	0	2709	2437	2449	2262	2205	1900	2292	1785	1443	1750

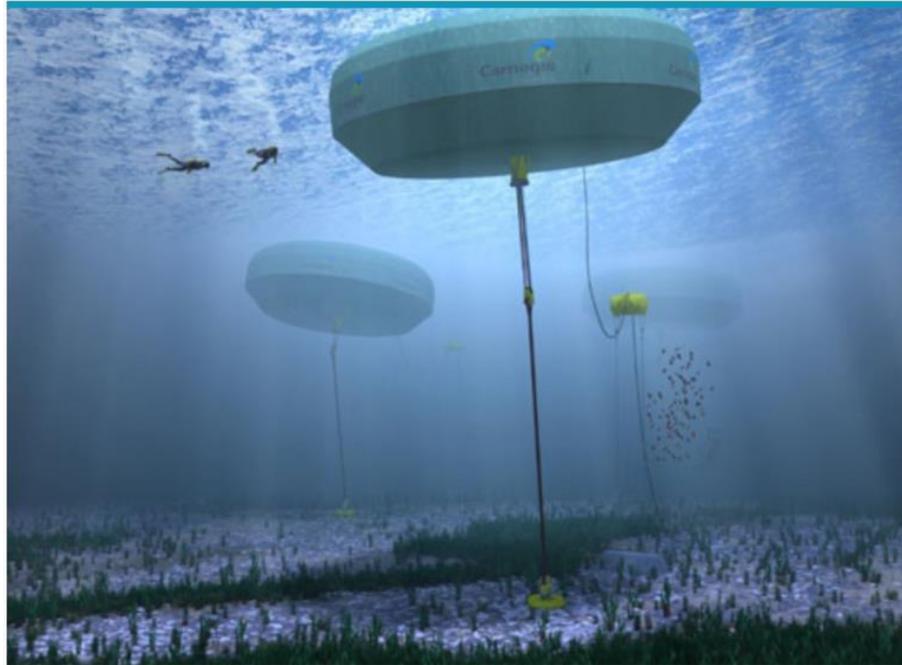
**Figura 44** – Matriz de potência do dispositivo Wavestar.

Fonte: Babarit *et al.*, 2012.

### 3.7.2 Dispositivos *Nearshore*

- CETO

O CETO é um conversor do tipo absorvedor pontual totalmente submerso. Uma boia fica posicionada a alguns metros da superfície do oceano e se move de forma orbital de acordo com a passagem das ondas, acionando um cilindro que pressuriza a água em um circuito fechado; a água em alta pressão é então levada até uma turbina que converte o movimento em eletricidade (CARNEGIE CLEAN ENERGY, 2015). O dispositivo analisado possui massa de 200 toneladas (BABARIT *et al.*, 2012). A figura 45 mostra uma ilustração do dispositivo CETO instalado na Austrália. A figura 46 apresenta a matriz de potência do dispositivo testado.



**Figura 45** – Ilustração do dispositivo CETO instalado na Austrália.  
**Fonte:** Arena, 2017

		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1,0	5	9	9	10	7	6	5	4	3	3	2	2	1
	1,5	12	19	22	20	15	13	10	8	6	6	4	3	3
	2,0	13	32	38	32	25	23	17	13	11	9	7	7	5
	2,5	0	48	54	47	41	33	26	20	17	14	10	9	8
	3,0	0	65	75	68	56	46	36	26	23	18	15	10	10
	3,5	0	0	97	86	71	62	46	33	29	23	20	15	13
	4,0	0	0	119	121	97	69	58	47	38	31	27	21	16
	4,5	0	0	147	146	107	93	74	61	48	37	33	26	21
	5,0	0	0	156	174	139	116	83	63	59	45	38	25	22
	5,5	0	0	0	201	164	133	89	79	66	54	41	35	28
	6,0	0	0	0	216	197	153	127	88	79	65	46	40	33
	6,5	0	0	0	244	209	175	151	113	95	76	55	44	39
	7,0	0	0	0	260	209	183	157	114	103	82	62	51	42

**Figura 46** – Matriz de potência do dispositivo CETO.  
**Fonte:** Babarit *et al.*, 2012

- OE buoy

O Ocean Energy Buoy (OE Buoy) é um dispositivo flutuante de coluna de água oscilante. É composto por uma plataforma equipada com uma turbina que gira com a ação do ar pressurizado pela água trazida com a incidência das ondas no conversor, gerando eletricidade. (IEA, 2015; KHAN; BHUYAN, 2009). O conversor possui 1800 toneladas de massa (BABARIT *et al.*, 2012). A figura

47 mostra a imagem do protótipo do dispositivo sendo testado. A figura 48 apresenta a matriz de potência do dispositivo analisado.



**Figura 47** – Protótipo do OE Buoy sendo testado.

Fonte: IEA, 2015

		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1,0	8	17	27	42	56	59	52	44	40	38	40	38	30
	1,5	17	39	61	96	126	132	117	99	89	87	89	85	66
	2,0	30	69	108	170	224	235	208	177	159	154	159	151	118
	2,5	47	108	169	266	350	368	324	276	249	241	248	236	185
	3,0	68	155	244	383	504	530	467	398	358	347	357	340	266
	3,5	93	212	332	521	686	721	636	542	487	472	486	463	362
	4,0	121	276	433	680	896	942	831	708	636	616	634	605	473
	4,5	154	350	548	861	1130	1190	1050	896	805	780	803	765	599
	5,0	190	432	677	1060	1400	1470	1300	1110	994	963	991	945	739
	5,5	0	523	819	1290	1690	1780	1570	1340	1200	1170	1200	1140	894
	6,0	0	622	975	1530	2020	2120	1870	1590	1430	1390	1430	1360	1060
6,5	0	730	1140	1800	2370	2490	2190	1870	1680	1630	1670	1600	1250	
7,0	0	847	1330	2080	2750	2880	2540	2170	1950	1890	1940	1850	1450	

**Figura 48** – Matriz de potência do dispositivo OE Buoy.

Fonte: Babarit *et al.*, 2012.

- *Oyster*

O *Oyster* é um dispositivo desenvolvido pela *Aquamarine Power*. É do tipo corpo oscilante totalmente submerso, o qual funciona por conta da movimentação pendular invertida de uma aba articulada responsável por captar o movimento orbital das ondas. A aba movimenta dois pistões hidráulicos que pressurizam água, através de tubulações, até turbinas que geram eletricidade na costa (KHAN; BHUYAN, 2009). Possui 2020 toneladas de massa (BABARIT

et al., 2012). A figura 49 mostra a ilustração do sistema de funcionamento do dispositivo. A figura 50 apresenta a matriz de potência do Oyster.



**Figura 49** – Ilustração do sistema de conversão de energia do dispositivo Oyster

**Fonte:** Whittaker *et al.*, 2007

		Tp(s)												
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Hs(m)	1,0	27	39	57	76	87	104	109	100	101	98	94	94	87
	1,5	63	92	126	168	201	213	201	239	207	198	183	150	154
	2,0	75	160	233	301	380	408	383	399	329	365	319	265	259
	2,5	0	254	378	467	568	623	616	601	519	523	481	390	428
	3,0	0	368	503	693	799	824	876	792	759	704	546	579	554
	3,5	0	0	655	934	1032	1085	1241	1075	973	925	862	747	688
	4,0	0	0	843	1093	1352	1427	1430	1390	1158	1224	1139	1138	863
	4,5	0	0	1219	1408	1644	1677	1807	1641	1662	1562	1404	1370	1191
	5,0	0	0	1247	1670	1965	1962	2097	2002	1833	1798	1814	1459	1442
	5,5	0	0	0	1979	2339	2308	2115	2389	2120	2012	1940	1518	1587
	6,0	0	0	0	2406	2713	2776	2344	2705	2451	2396	2182	2414	2133
	6,5	0	0	0	2778	3044	3001	2989	3211	2986	2896	2716	2455	2309
	7,0	0	0	0	2871	3119	3131	3127	3176	3332	2877	2925	2676	2658

**Figura 50** – Matriz de potência do dispositivo Oyster.

**Fonte:** Babarit *et al.*, 2012

### 3.7.3 Dispositivo Onshore

- SSG

O SSG é um conversor do tipo galgamento, ancorado diretamente na costa. O dispositivo possui uma série de reservatórios acima do nível do mar disposto em andares, os quais recebem as ondas e armazenam a energia em forma de potencial gravitacional. A água armazenada é liberada girando turbinas instaladas em cada pavimento; a energia extraída de um determinado

volume de água no reservatório é diretamente proporcional à sua elevação acima do nível médio do mar (MARGHERITINI; VICINANZA; FRIGAARD, 2009). A figura 51 mostra um dispositivo SSG sendo testado na costa da Noruega. A figura 52 apresenta a matriz de potência do SSG analisado.



**Figura 51** – Piloto de um dispositivo SSG sendo testado na Noruega.  
**Fonte:** Margheritini, Vicinanza e Frigaard, 2009.

		Te(s)													
		5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5
Hs(m)	0,5	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	198	208	218	228
	1,0	397	437	476	516	556	595	635	675	715	754	794	833	873	913
	1,5	893	932	1072	1161	1250	1340	1429	1518	1608	1697	1786	1875	1965	2054
	2,0	1588	1746	1905	2064	2223	2381	2540	2699	2858	3016	3175	3334	3493	3651
	2,5	2481	2729	2977	3225	3473	3721	3969	4217	4465	4713	4961	5209	5457	5705
	3,0	3572	3929	4287	4644	5001	5358	5715	6073	6430	6787	7144	7501	7859	8216
	3,5	4862	5348	5834	6321	6807	7203	7779	8265	8751	9238	9724	10201	10695	11183
	4,0	6350	6985	7620	8256	8891	9526	10161	10796	11431	12066	12701	13336	13971	14606
	4,5	8037	8841	9645	10448	11252	12056	12860	13663	14467	15271	16074	16878	17682	18486
	5,0	9923	10915	11907	12899	13892	14884	15876	16868	17860	18853	19845	20000	20000	20000
	5,5	12006	13207	14407	15608	16809	18009	19210	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	6,0	14288	15717	17146	18575	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	6,5	16769	18446	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	7,0	19448	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	7,5	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000
	8,0	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000

**Figura 52** – Matriz de potência do dispositivo SSG  
**Fonte:** Silva, D., Rusu e Soares, 2013

A Tabela 4 apresenta o resumo de todas as informações dos dispositivos analisados utilizadas nos cálculos e análises comparativas.

**Tabela 4** – Resumo das características dos dispositivos analisados

Dispositivo	Tipo	Massa (toneladas)
Offshore		
Aquabuoy	Corpo Oscilante	71
Oceantec	Corpo Oscilante	74
Pelamis P750	Corpo Oscilante	700
Wave Dragon	Galgamento	22000
Wavestar	Corpo Oscilante	1600
Nearshore		
CETO	Corpo Oscilante	200
OE Buoy	Coluna d'água oscilante	1800
Oyster	Corpo Oscilante	2020
Wavestar	Corpo Oscilante	1600
Onshore		
SSG	Galgamento	-

Fonte: Pelo autor

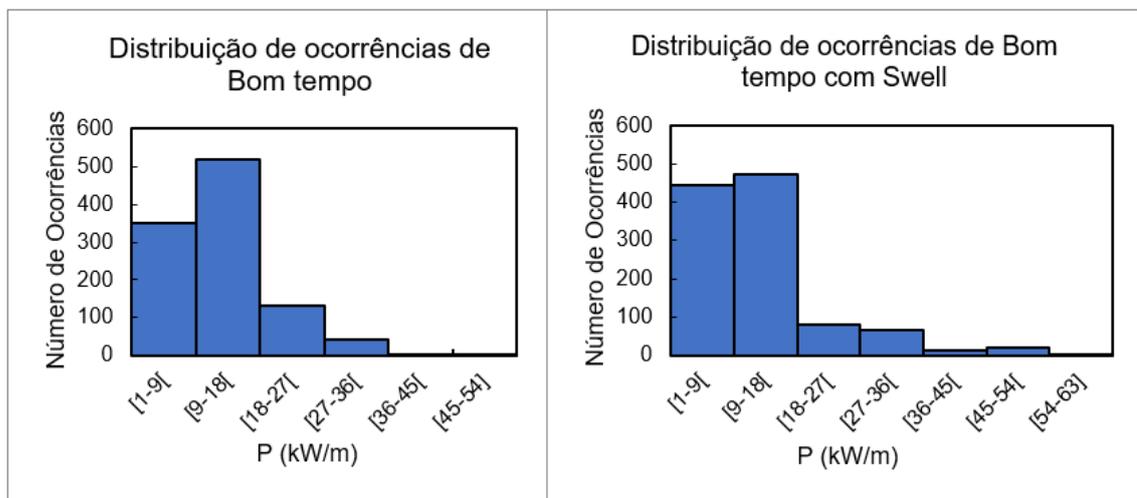
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDA POR OCORRÊNCIA

Cada ocorrência de estado de mar representada pelo par  $H_s$  e  $T_p$ , dispõe de um determinado potencial energético, tal potencial foi calculado de forma individual, para cada ocorrência, através das equações e relações apresentadas nas seções 3-4 e 3-5. Os resultados obtidos foram expostos em formas de histogramas e comentados nas seções a seguir.

#### 4.1.1 Potencial energético de onda em águas profundas

A figura 53 apresenta a distribuição do potencial de onda para cada ocorrência em situação de Bom Tempo e Bom Tempo com *Swell* em águas profundas.

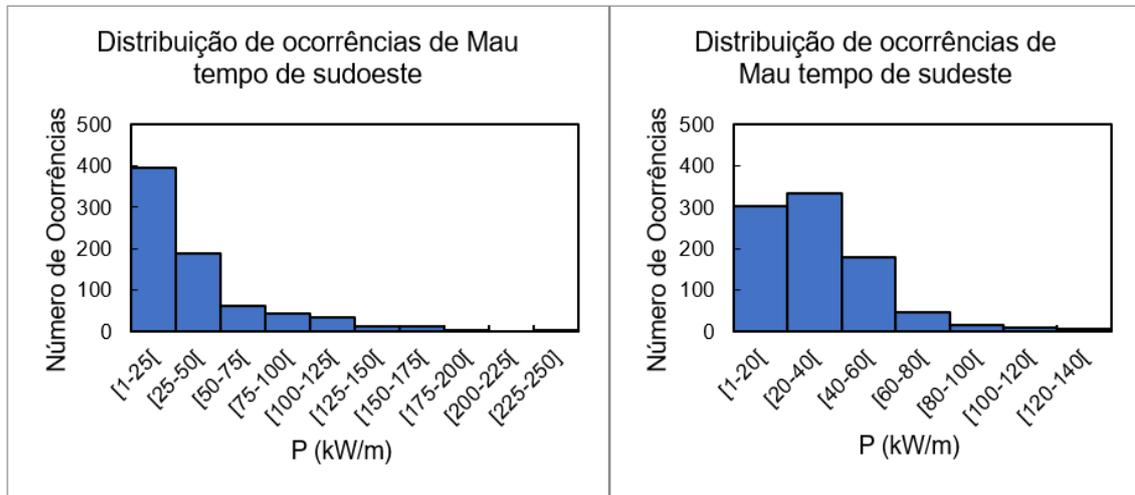


**Figura 53** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com *Swell* em águas profundas.

**Fonte:** Pelo autor

De acordo com os histogramas da figura 53, pode-se observar que para os dois estados, as ocorrências predominantes são de ondas com potencial de 1 a 18 kW/m, representando cerca de 83% do total nos dois casos. Em situação de Bom Tempo puro, as ocorrências com potenciais entre 18 e 36 kW/m representam 16,5%; potenciais maiores que 36 kW/m ocorrem em menos de 1% das ocorrências. Em Bom Tempo com *Swell*, ocorrências entre 18 e 36 kW/m representam 13,5% do total, potenciais maiores que esse intervalo não chegam a 4%.

A figura 54 apresenta a distribuição do potencial de onda de cada ocorrência para situação de Mau Tempo de Sudoeste e Mau Tempo de Sudeste em águas profundas.



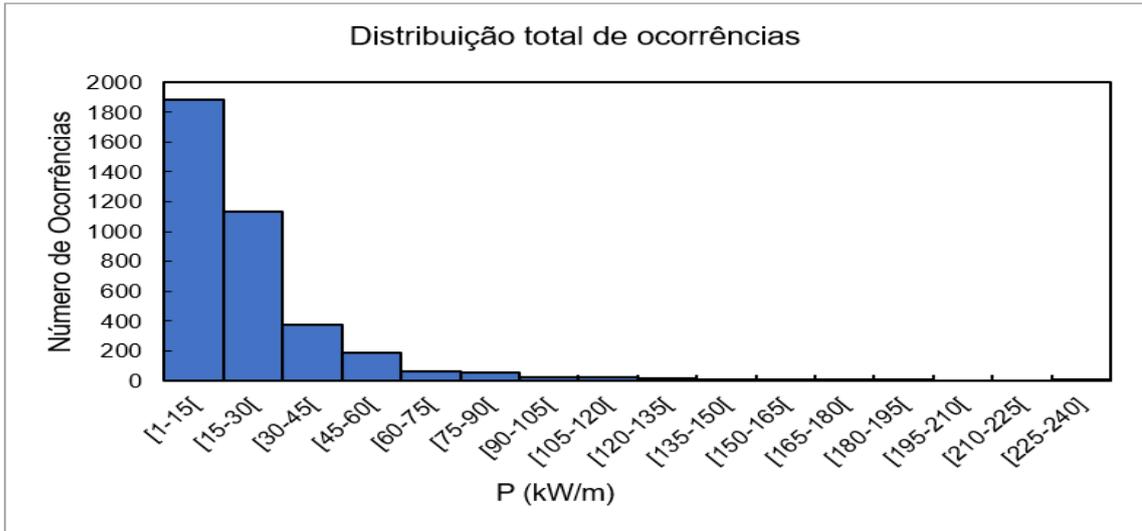
**Figura 54** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de sudoeste e Mau tempo de sudeste em águas profundas.

**Fonte:** Pelo autor

De acordo com os histogramas apresentados na figura 54, pode-se observar que os potenciais de onda por ocorrência predominam na faixa de 1 a 50 kW/m com cerca de 80%. Onde em situação de Mau Tempo de sudoeste os valores se concentram na faixa de 1 a 25 kW/m (53%) e, em situação de Mau Tempo de sudeste, a predominância é entre 20 e 40 kW/m (40%).

Diante dos dados apresentados, pode-se perceber que as situações de Mau Tempo apresentam ocorrências com potenciais de onda superiores as ocorrências de Bom Tempo, apesar de um menor número de eventos; ou seja, as ocorrências de Mau Tempo têm um menor tempo de permanência, mas geram as condições de mar mais energéticas na Bacia de Campos. Por outro lado, as categorias de Bom Tempo apresentam estados de mar com menor potencial energético disponível, mas com maior número de ocorrências, isto é, maior tempo de permanência.

A figura 55 apresenta a distribuição total dos potenciais de onda em cada ocorrência em águas profundas.



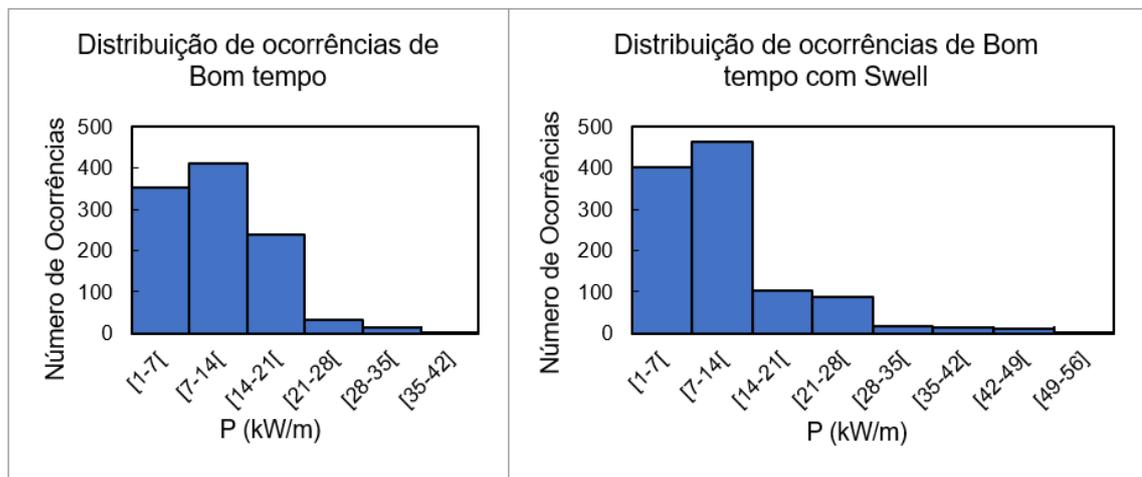
**Figura 55** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências em águas profundas.

**Fonte:** Pelo autor

De acordo com o gráfico da figura 55, pode-se perceber que a maior parte, cerca de 80% do total de ocorrências, possuem potencial entre 1 e 30 kW/m. Além disso, ocorrências com potenciais maiores que 90 kW/m não chegam a 3% do total de ocorrências. Levando em conta que se tratam de dados em águas profundas, ou seja, sem dissipação de energia, pode-se notar um nível moderado de potencial disponível, porém uma constância de eventos bastante significativa.

#### 4.1.2 Potencial energético de onda em águas intermediárias e rasas

A figura 56 apresenta a distribuição dos potenciais de onda das ocorrências de Bom Tempo e Bom Tempo com *Swell* em águas intermediárias.

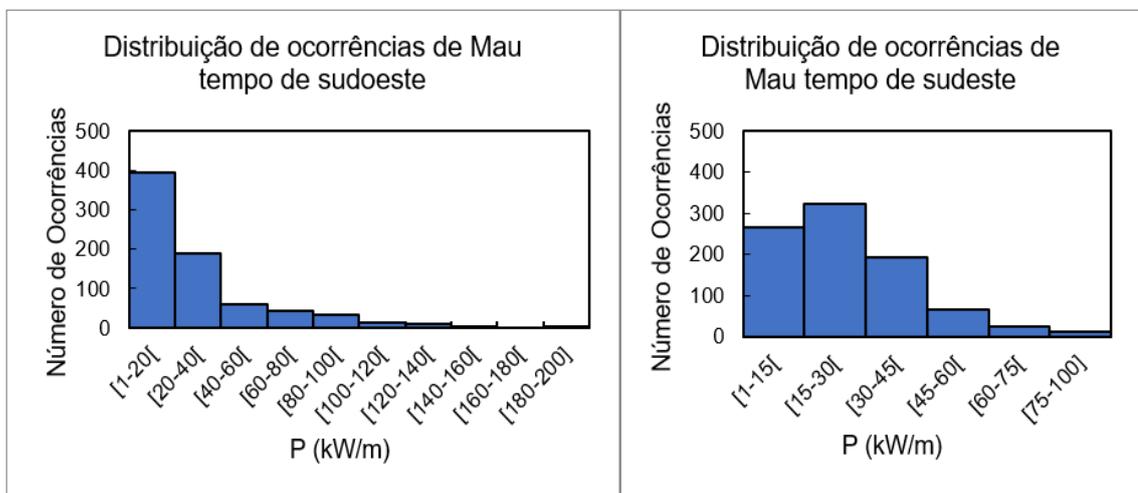


**Figura 56** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com *Swell* em águas intermediárias.

**Fonte:** Pelo autor

Os histogramas apresentados na figura 56, quando comparados aos da figura 54, mostram como a mudança de batimetria afeta o potencial entregue pelas ondas em situações de Bom Tempo e Bom Tempo com *Swell*. Pode ser observada uma mudança de faixa de predominância de potenciais de 1 a 18 kW/m em águas profundas para 1 a 14 kW/m em águas intermediárias, com cerca de 80% das ocorrências. Pode-se notar também a redução dos valores máximos para as ocorrências de águas intermediárias em relação aos valores em águas profundas.

A figura 57 mostra a distribuição dos potenciais de onda para cada ocorrência de Mau Tempo de Sudoeste e Sudeste em águas de profundidade intermediária.

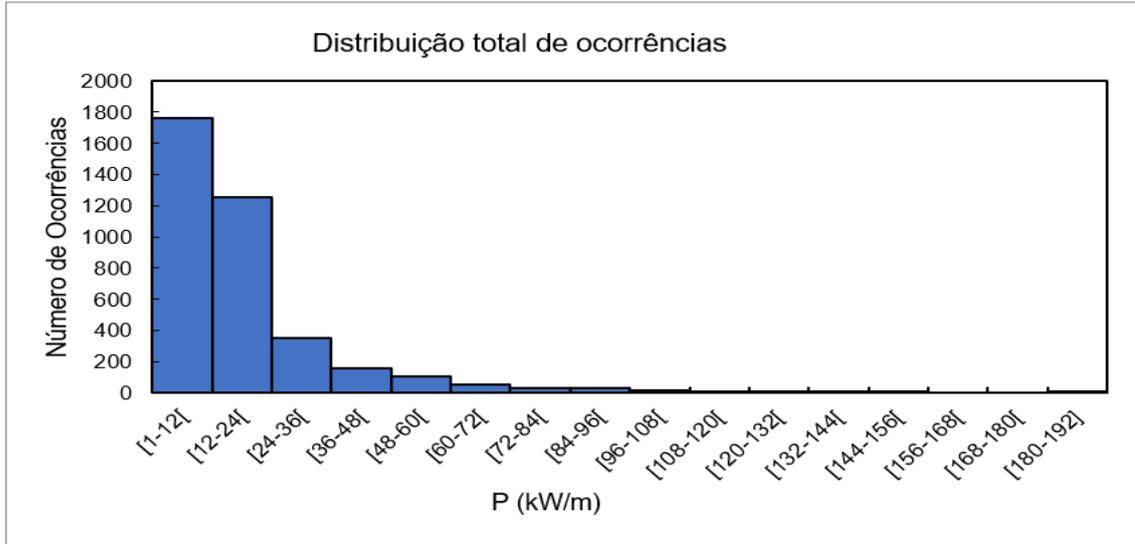


**Figura 57** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de sudoeste e Mau tempo de sudeste em águas intermediárias.

**Fonte:** Pelo autor

Os histogramas da figura 57, quando comparados aos da figura 54, mostram, através da redução dos valores dos intervalos de distribuição das ocorrências, a dissipação do potencial de onda quando estas passam de águas profundas para intermediárias, nas ocorrências de Mau Tempo. Vale ressaltar que a dissipação que pode ser observada, nesse caso, é relativamente baixa pois a maior interação com o fundo e conseqüente aumento de perda de potencial ocorre em águas rasas.

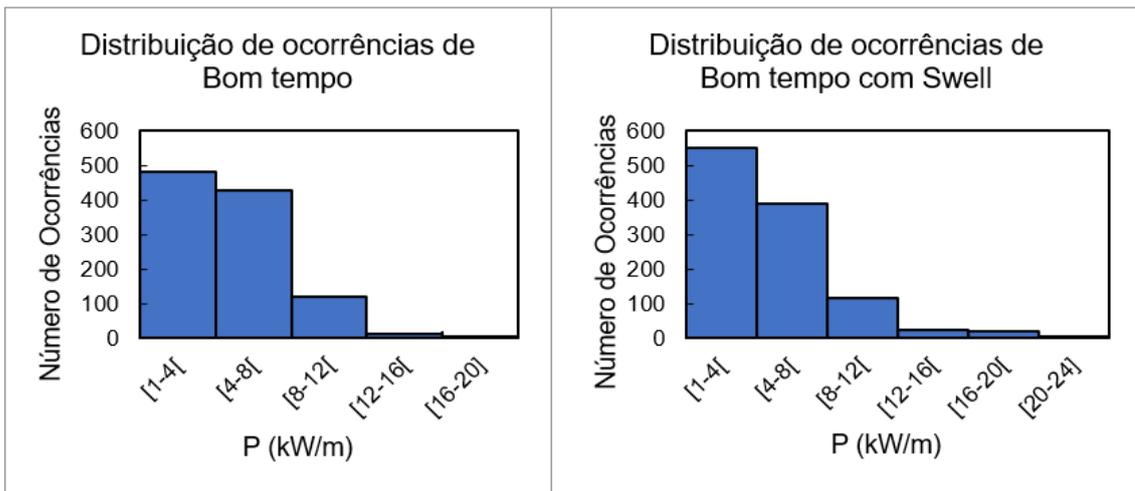
A figura 58 apresenta o histograma com a distribuição geral dos potenciais de onda das ocorrências de todas as categorias de mar em águas intermediárias.



**Figura 58** – Histograma de distribuição do potencial de onda do total de ocorrências em águas intermediárias  
**Fonte:** Pelo autor

De acordo com o histograma da figura 58, cerca de 80% das ocorrências geram potenciais na faixa de 1 a 24 kW/m, enquanto ocorrências com potenciais maiores que 60 kW/m não chegam a 4% do total de eventos em águas intermediárias.

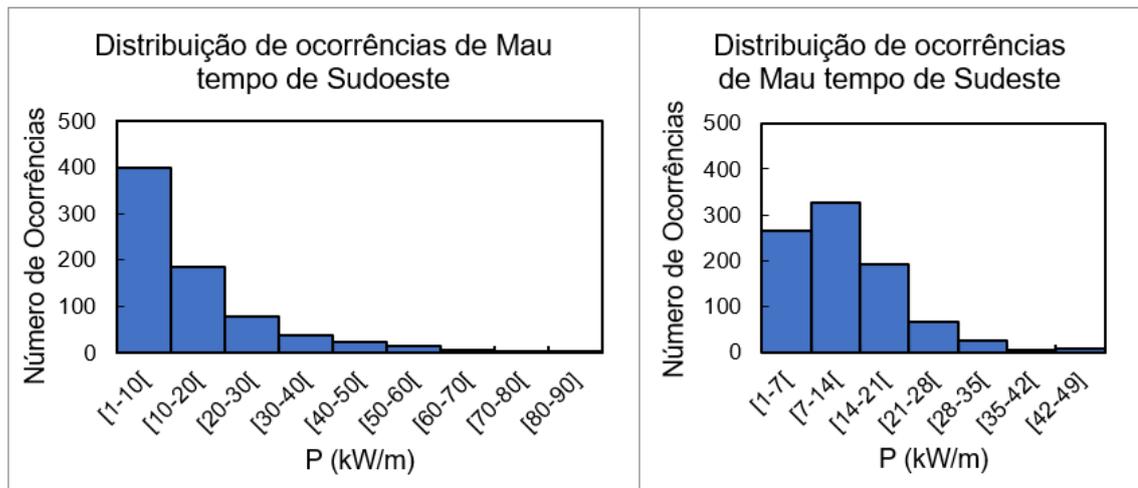
A figura 59 apresenta a distribuição dos potenciais de onda das ocorrências de Bom Tempo e Bom Tempo com Swell quando atingem a profundidade de águas rasas.



**Figura 59** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Bom tempo e Bom tempo com Swell em águas rasas.  
**Fonte:** Pelo autor

Nos histogramas apresentados na figura 59, é possível notar uma perda de potencial bem mais acentuada, com predominância de ocorrências na faixa de 1 a 8 kW/m com quase 90%, e potenciais máximos que não ultrapassam os 24 kW/m.

A figura 60 apresenta os potenciais de onda das ocorrências de Mau Tempo de Sudoeste e Mau Tempo de Sudeste em águas rasas, ou seja, após terem parte de sua energia dissipada pela interação com o fundo.



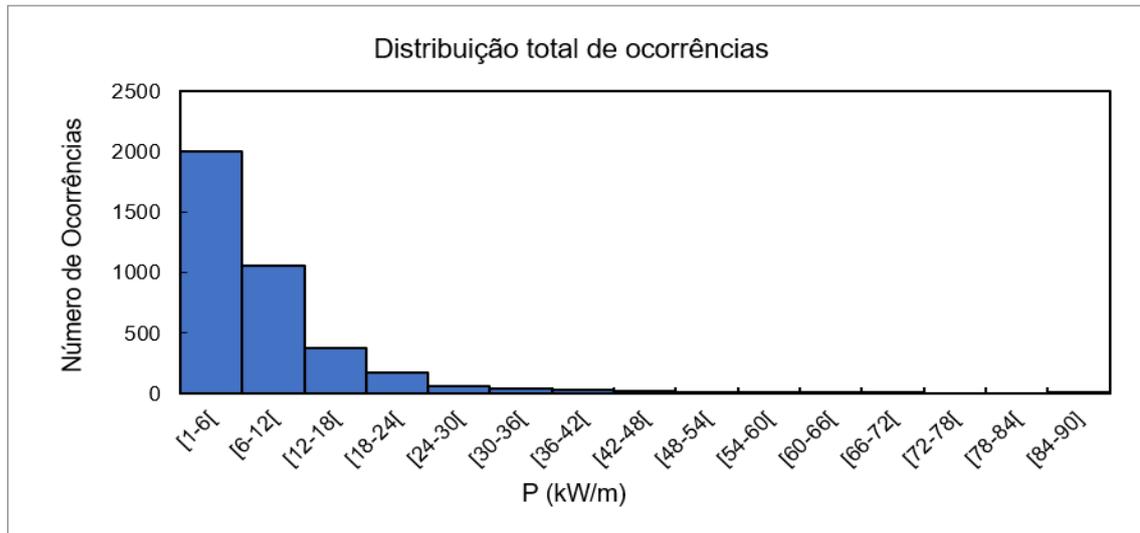
**Figura 60** – Histogramas de distribuição do potencial de onda das ocorrências de Mau tempo de Sudoeste e Mau tempo de Sudeste em águas rasas.

**Fonte:** Pelo autor

Os histogramas da figura 60 evidenciam a perda de energia das ondas em relação a águas profundas e intermediárias para as situações de Mau Tempo de Sudoeste e Mau Tempo de Sudeste. Os valores de potenciais disponíveis predominam entre 1 e 20 kW/m (cerca de 80%), enquanto em águas profundas a faixa é de 1 a 50 kW/m como visto anteriormente.

A figura 61 apresenta o histograma com a distribuição conjunta dos potenciais disponibilizados pelas ocorrências de todas as categorias de mar em águas rasas.

O histograma da figura 61 mostra que, no ponto considerado em águas rasas, cerca de 80% dos potenciais de onda ficam entre 1 e 12 kW/m; já os potenciais maiores que 30 kW/m representam cerca de 3% do total de ocorrências em águas rasas.



**Figura 61** – Histograma de distribuição do potencial de onda do total de ocorrências em águas rasas  
**Fonte:** Pelo autor

#### 4.2 CÁLCULO DA DEMANDA DE PROJETO

A partir dos dados levantados no âmbito do projeto da Fundação COPPETEC (2012), foram consideradas as quantidades de postes, lâmpadas e suas potências, ao longo das três praias de interesse, e a demanda energética total para iluminação.

A praia dos Cavaleiros e a praia Campista possuem, em conjunto, cerca de 4,3 km de extensão. Ao longo das duas praias, existem 98 postes de uma lâmpada, 98 postes de 4 lâmpadas e 7 postes pequenos de uma lâmpada. A praia do Pecado possui cerca de 1,5 km de extensão, com 12 postes de 3 lâmpadas e 38 postes de 2 lâmpadas iluminando toda a praia (FUNDAÇÃO COPPETEC, 2012).

A tabela 5 apresenta um resumo de todos os dados de consumo energético para iluminação das três praias, incluído a potência para cada tipo de lâmpada e os gastos de energia diário, mensal e anual das praias de interesse.

**Tabela 5** – Dados do consumo energético da iluminação das praias Campistas, Cavaleiros e Pecado.

Tipo	Número de lâmpadas	Consumo por lâmpada (W)	Consumo total (kW)	Consumo de energia (kWh/dia)	Consumo de energia (kWh/mês)	Consumo de energia (KWh/ano)
Campista/ Cavaleiros						
1	392	400	157	1.568	47.040	572.320
2	98	150	15	147	4.410	53.655
3	7	150	1	11	315	3.833
Total	497	700	173	1.726	51.765	629.808
Pecado						
1	36	126	5	45	1.361	16.556
2	76	180	14	137	4.104	49.932
Total	112	306	18	182	5.465	66.488
Total Geral	609	1.006	191	1.908	57.230	696.296

**Fonte:** Pelo autor.

De acordo com a tabela 5, as três praias são iluminadas por um total de 609 lâmpadas, com uma potência total de 191 kW que ficam ligadas cerca de 10 horas por dia. Possuem consumo de energia mensal de 57.230 kWh e um consumo anual de 696.296 kWh ou cerca de 0,7 GWh.

#### 4.3 TEMPO DE PERMANÊNCIA DAS CATEGORIAS DE MAR DA BACIA DE CAMPOS

A tabela 6 apresenta os percentuais em relação ao tempo de permanência de cada estado de mar e o período sem ocorrências registradas pelo ondógrafo, além disso, apresenta, de maneira aproximada, os meses por ano que cada categoria de mar ocorre e os meses por ano sem ocorrências de onda registradas.

**Tabela 6** – Percentual de ocorrências em relação ao tempo de coleta de dados e meses por ano de cada estado de mar.

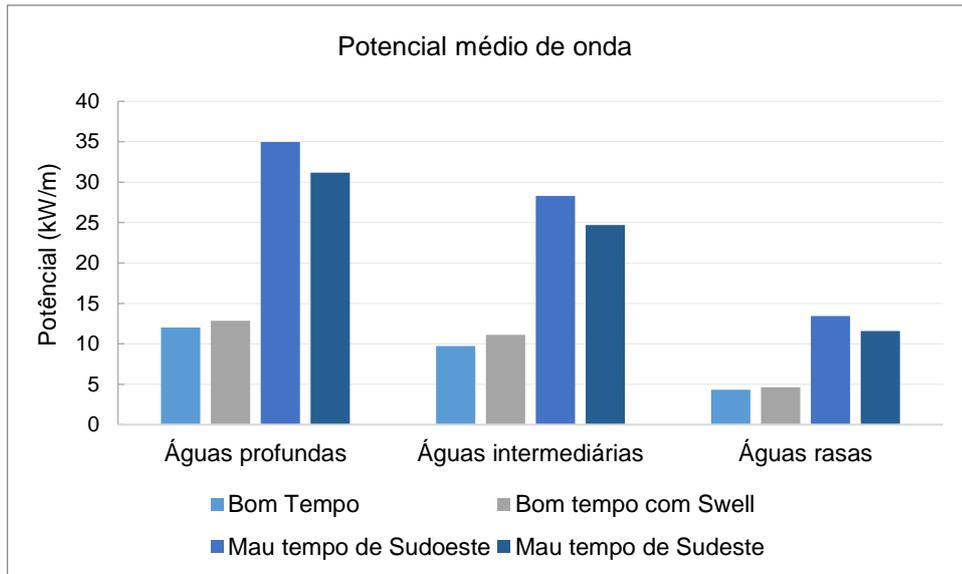
Estado de mar	Percentual	Meses por ano
Bom tempo	17,9%	2,2
Bom tempo com Swell	18,9%	2,3
Mau tempo de sudoeste	12,7%	1,5
Mau tempo de sudeste	15,2%	1,8
Sem ocorrências	35,3%	4,2

**Fonte:** Pelo autor.

De acordo com a tabela 6, cerca de 4 meses por ano não são registradas ocorrências de nenhum tipo. Dessa forma, em aproximadamente 35% do ano não é possível gerar energia através das ondas na região de estudo, mesmo que os dispositivos utilizados tenham 100% de eficiência. Sendo assim, durante o ano, pelo menos 240.365 kWh terão que ser complementados por outras fontes de energia, preferencialmente limpas, como solar e eólica.

#### 4.4 POTENCIAL ENERGÉTICO TEÓRICO DE ONDA

A figura 62 apresenta os valores dos potenciais médios disponíveis em kW por metro de onda, para cada categoria de mar em relação a cada profundidade considerada, isto é, a média dos potenciais de cada ocorrência de cada situação de mar em profundidades decrescentes.



**Figura 62** – Potenciais médios de onda por categoria de mar em diferentes profundidades.  
**Fonte:** Pelo Autor.

De acordo com o gráfico mostrado na figura 62, é notável a discrepância entre o potencial energético disponível nas situações de Bom Tempo em relação às situações de Mau Tempo. As situações de Mau Tempo possuem em média cerca de duas vezes mais potencial por ocorrência que as situações de Bom Tempo. É possível notar também, no gráfico apresentado pela figura 62, que a perda do potencial médio de onda em águas intermediárias, em relação a águas profundas não chega a 20%. Em águas rasas, essa perda pode chegar a quase 65% do potencial disponível em águas profundas.

Como pode ser notado, a perda de potencial das ondas em águas intermediárias, em relação às ondas em águas profundas, não é muito significativa. Sendo assim, instalar uma usina de ondas nessa localização, na maioria das vezes, é mais vantajoso devido às menores distâncias a serem vencidas em território marinho, facilitando toda instalação do projeto e melhorando as condições de captação, conversão e distribuição de energia.

Em águas rasas, como a oferta de energia é bem menor, a viabilidade de um projeto de captação de energia das ondas deve ser avaliada caso a caso, porém pode ser vantajoso se a demanda de energia do projeto for baixa, ou se a batimetria local não viabilizar a instalação dos dispositivos em águas de maiores profundidades.

Como citado na seção 2.4, as situações mais severas de mar que apresentam o maior potencial médio de onda, como mostra a figura 62, são as situações de Mau tempo, tais eventos são gerados por anticiclones e ciclones extra tropicais. Oliveira,

L. A. K, (2015) simulou, através do modelo Wavewatch III e analisou 34 anos de dados de onda para mesma região de estudo desse trabalho. A partir da análise o autor associou os sistemas que geram os eventos mais energéticos aos meses de outono, inverno e início de primavera, ou seja, de abril a setembro, com pico em julho, seguido por setembro. Os meses de verão e primavera são associados a condições de baixa energia devido a dominância da ASAS que gera as situações de Bom Tempo. Bulhões *et al.*, (2014) ao analisarem a influência das tempestades sobre dinâmica de sedimentos da costa da região da Bacia de Campos também sugeriram a temporada de tempestades para o litoral norte fluminense entre os meses de abril e setembro. Sendo assim, tudo indica que os conversores de energia teriam disponíveis uma maior quantidade de potencial energético de onda disponível para conversão, durante os meses indicados.

A tabela 7 mostra o potencial médio de onda geral dos eventos que ocorrem no ano em cada profundidade considerada.

**Tabela 7** – Potencial médio de onda para cidade de Macaé.

Profundidade	P(kW/m)
Águas profundas	21
Águas intermediárias	17
Águas rasas	8

Fonte: Pelo autor.

De acordo com a tabela 7, e considerando os 23 km de costa da cidade de Macaé, tem-se cerca de 0,48 GW de potencial teórico médio disponível em águas profundas, 0,39 GW disponível em águas intermediárias e 0,18 GW em águas rasas.

#### 4.5 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDA

A partir dos resultados gerados após a verificação do comportamento dos dispositivos, através de suas matrizes de potência no clima de ondas da cidade, foi feita uma comparação dos números obtidos com objetivo de determinar o conversor com melhor desempenho segundo os indicadores preestabelecidos.

#### 4.5.1 Total de energia gerada por cada dispositivo

A tabela 8 apresenta a energia gerada em GWh em um ano de operação no clima de ondas de Macaé pelos conversores *Offshore*, nas profundidades em que podem ser instalados.

**Tabela 8** – Energia gerada pelos conversores *Offshore*.

Conversor	Energia (GWh)	
	Águas profundas	Águas intermediárias
Aquabuoy	0,38	0,30
Oceantec	1,31	1,10
Pelamis P750	1,15	0,96
Wave Dragon	16,17	14,16
Wavestar	2,42	1,98

Fonte: Pelo autor.

A Tabela 8 foi gerada com as matrizes de potência de cada conversor, presentes na seção 3.7 no clima de ondas da cidade. De acordo com a Tabela 8, dentre os dispositivos *Offshore*, o Wave Dragon gera o maior montante de energia, com 16,17 GWh em águas profundas e 14,16 GWh em águas intermediárias. O menor montante de energia foi gerado pelo Aquabuoy, com 0,38 GWh em águas profundas e 0,30 GWh em águas intermediárias.

Os dispositivos Pelamis P750, Oceantec, e Wavestar também apresentam uma soma de energia gerada bem menor que a do Wave Dragon, mas é importante, ainda, avaliar outros indicadores, afim de determinar dentre eles qual tem o melhor desempenho no clima de ondas estudado, análise que será feita na próxima seção.

Dentre os dispositivos *Offshore*, os que apresentam um montante de energia gerado mais próximo da demanda de projeto, que é de 0,7 GWh por ano, são o Oceantec e o Pelamis P750; o Wavestar tem uma produção consideravelmente acima da demanda. O Wave Dragon apresenta uma produção de mais de 20 vezes a demanda e o Aquabuoy apresenta uma produção anual média cerca de 2 vezes menor que a demanda de projeto.

A Tabela 9 apresenta a energia gerada em GWh em um ano de operação no clima de ondas macaense para os dispositivos *Nearshore*, analisados em águas intermediárias e rasas.

**Tabela 9** – Energia gerada pelos conversores *Nearshore*.

Conversor	Energia (GWh)	
	Águas intermediárias	Águas rasas
CETO	0,17	0,08
OE Buoy	1,52	0,66
<i>Oyster</i>	2,88	1,31
Wavestar	1,98	0,84

Fonte: Pelo autor.

De acordo com a Tabela 9, o dispositivo *Oyster* apresenta a maior soma de geração energética entre os dispositivos *Nearshore*, enquanto o CETO apresenta o menor total. É possível notar que a diminuição da produção de energia elétrica é, em média 55% de águas intermediárias para águas rasas nos dispositivos *Nearshore*, enquanto para os dispositivos *Offshore* a perda em produção de águas profundas para águas intermediárias é de cerca de 17%.

Dentre os dispositivos *Nearshore* analisados, os que apresentam um montante de energia gerado mais próximo da demanda de projeto são Wavestar e o *Oyster* em águas rasas, e o OE Buoy em águas intermediárias. O dispositivo CETO apresentou uma produção bem abaixo da demanda, cerca de 9 vezes menor em águas rasas e quase quatro vezes menor em águas intermediárias.

O dispositivo *Onshore* analisado, SSG, apresentou uma produção energética de 8,7 GWh em águas rasas, o que representa uma alta produção mesmo comparado a dispositivos *Offshore*, que possuem uma maior oferta de potencial energético devido à profundidade que são instalados, fato que pode ser explicado devido às suas grandes dimensões, que serão comentadas na seção a seguir.

#### 4.5.2 Desempenho dos dispositivos no clima de ondas de Macaé

A Tabela 10 apresenta os fatores da capacidade dos dispositivos de conversão de energia *Offshore*, que foram calculados a partir da equação 3-5. Além disso, a Tabela 10 apresenta a quantidade de energia em kWh produzida por kg do dispositivo analisado, tal razão como citado na seção 3.7, é usada por Babarit *et al.* (2012) como um indicativo prévio de qual dispositivo é mais vantajoso economicamente.

**Tabela 10** – Fator de capacidade e energia absorvida por unidade de massa dos dispositivos *Offshore*.

Conversor	Fator de Capacidade ( $F_c$ )		kWh/kg	
	Águas profundas	Águas intermediárias	Águas profundas	Águas intermediárias
Aquabuoy	17%	14%	5,29	4,28
Oceantec	30%	25%	17,74	14,86
Pelamis P750	18%	15%	1,64	1,37
Wave Dragon	30%	27%	0,73	0,64
Wavestar	13%	9%	1,51	1,23

Fonte: Pelo autor.

O fator de capacidade pode ser interpretado como um indicativo de quão bem aproveitada é a capacidade de produção de um dispositivo conversor em um determinado local de interesse, ou seja, quanto maior esse fator mais adaptado as condições de mar do local o dispositivo é. Um fator de capacidade muito baixo mostra que no local verificado o dispositivo ficará com excessiva capacidade ociosa.

Segundo a Tabela 10, os dispositivos *Offshore* com maior fator de capacidade no clima de ondas da Cidade de Macaé, ou seja, que tiveram sua capacidade melhor aproveitada, são o Wave Dragon com 30% em águas profundas e 27% em águas intermediárias, seguido pelo Oceantec com fator de capacidade de 30% e 25% em águas profundas e intermediárias, respectivamente. O Pelamis e o Aquabuoy vêm respectivamente em terceiro e quarto lugar com fatores de capacidade entre 14 e 18% em águas profunda e intermediarias.

Com o fator de capacidade mais baixo ficou o Wavestar com 13% em águas profundas e 9% em águas. O baixo fator de capacidade pode ser explicado a partir da análise da matriz de potência do dispositivo, disponível na seção 3.7.1; tal matriz mostra que o dispositivo trabalha de forma mais otimizada em climas de onda com altos períodos de energia e elevadas alturas significativas. Dessa forma, em um clima de ondas como o de Macaé, o conversor seria subutilizado.

Ao analisar a quantidade de energia absorvida pela massa do conversor, o Oceantec, mais uma vez fica bem na frente dos outros, com 17,74 kWh/kg em águas profundas e 14,86 kWh/kg em águas intermediarias. O Wave Dragon, que apresentou o maior fator de capacidade entre os dispositivos *Offshore*, nesse quesito ficou em último lugar, fato que mostra que se trata de um dispositivo de grandes dimensões e provavelmente um alto custo de implementação, além da geração de energia muito acima da demanda de projeto, não sendo um conversor adequado para finalidade

desse trabalho. O Aquabuoy apresentou a segunda maior razão kWh/kg, tanto em águas rasas quanto em águas intermediárias, seguido pelo Pelamis P750.

A Tabela 11 apresenta os fatores de capacidade dos dispositivos *Nearshore*, assim como suas respectivas razões de energia absorvida por quilograma que compõem cada dispositivo.

**Tabela 11** – Fator de capacidade e energia absorvida por unidade de massa dos dispositivos *Nearshore*..

Conversor	Fator de Capacidade ( $F_c$ )		kWh/kg	
	Águas intermediárias	Águas rasas	Águas intermediárias	Águas rasas
CETO	10%	4%	0,84	0,38
OE Buoy	9%	3%	0,85	0,36
Oyster	10%	5%	1,43	0,65
Wavestar	9%	4%	1,23	0,52

**Fonte:** Pelo autor.

De acordo com Tabela 11, o dispositivo Oyster apresentou um maior Fator de capacidade entre os conversores *Nearshore*, com 10% em águas intermediárias e 5% em águas rasas. O dispositivo CETO ficou em segundo lugar em relação ao fator de capacidade, com 10% em águas intermediárias e 4% em águas rasas. O dispositivo OE Buoy foi o que apresentou menor fator de capacidade entre todos os conversores analisados, com 9% em águas intermediárias e 3% em águas rasas. O Wavestar, conversor que pode ser tanto *Offshore* quanto *Nearshore*, apresentou baixo fator de capacidade em todas as profundidades, não passando dos 13%, sendo o segundo menor entre todos os conversores analisados.

Em relação a razão de energia absorvida por quilograma de material que compõe o dispositivo, o Oyster também teve o melhor desempenho, com 1,43 kWh/kg em águas intermediárias e 0,65 kWh/kg em águas rasas.

O SSG, único conversor *Onshore* estudado, apresentou uma alta produtividade em águas rasas, porém não foi possível calcular sua taxa de energia absorvida por quilograma de dispositivo, pois não foram encontrados dados confiáveis sobre as dimensões do dispositivo utilizado na produção da matriz de potência. No entanto, segundo Zancanella (2016), o conversor utilizado para produção da matriz em questão tem entre 150 e 600 m de comprimento, o que caracteriza um dispositivo de grandes dimensões e, conseqüentemente, grande massa e alto custo. O SSG apresenta ainda uma produção de energia muito superior à demanda anual de projeto calculada, com

8,7 kWh por ano, sendo cerca de 12 vezes maior que o necessário e um fator de capacidade no ponto de águas rasas em Macaé de apenas 5%.

De acordo com os indicadores considerados, dentre os dispositivos testados, o Oceantec, seguido pelo Aquabuoy e Pelamis P750 foram os que tiveram melhor desempenho entre os conversores *Offshore*. Em relação aos dispositivos *Nearshore*, o Oyster foi o que teve melhor desempenho.

Diaconu e Rusu (2013) verificaram, através do método de matrizes de potência, uma série de conversores de energia das ondas em uma plataforma localizada na costa ocidental do Mar Negro. Dentre os conversores verificados estavam o Aquabuoy, Oceantec e OE Buoy. O dispositivo Oceantec, assim como na Bacia de Campos, mostrou ser um dos dispositivos com melhor desempenho energético na costa do mar negro.

Zancanella (2016) estimou a produção de diversos conversores através de suas matrizes de potência e dos diagramas de dispersão da costa de Florianópolis. Dentre os conversores testados, em diversos pontos de diferentes profundidades, os maiores fatores de capacidade foram do Wave Dragon com 34% (27-30% na Bacia de Campos), Oceantec com 22% (25-30% na Bacia de Campos), Pelamis P750 com 18% (15-18% na Bacia de Campos) e Aquabuoy 18% (14-17% na Bacia de Campos). Com os menores fatores de capacidade ficaram o Wavestar 11% (4-13% na Bacia de Campos) Oyster com 10% (5-10% na Bacia de Campos) e OE Buoy com 9% (3-9% na Bacia de Campos).

Com exceção do Oceantec e do WaveStar, todos os outros conversores apresentaram fator de capacidade um pouco maior nas águas da costa de Florianópolis quando comparados à costa de Macaé. Tal fato pode ser explicado pelos períodos e alturas significativas um pouco maiores no regime de ondas de territórios localizados mais ao sul do país, fazendo com que conversores que se comportam melhor em mares mais energéticos sejam melhores aproveitados nesses locais. O Oceantec é um exemplo de dispositivo que tem bom desempenho em estados de mar com ondas de menores períodos e alturas significativas, como pode ser visto em sua matriz de potência apresentada na figura 38.

O quadro 1 apresenta o resumo com os resultados obtidos nos conversores com melhor desempenho de acordo com os indicadores energéticos definidos nesse trabalho.

**Quadro 1** – Resumo dos resultados obtidos nos quatro conversores com melhor desempenho.

Dispositivo conversor	Classificação (Princípio de funcionamento)	Classificação (Profundidade de instalação)	Pofundidade verificada	Energia Gerada em um ano (Gwh)	Fator de Capacidade	kWh/kg (anual)
Aquabuoy	Corpo Oscilante	<i>Offshore</i>	Profunda	0,38	17%	5,29
			Intermediária	0,3	14%	4,28
Oceantec	Corpo Oscilante	<i>Offshore</i>	Profunda	1,31	30%	17,74
			Intermediária	1,10	25%	14,86
Pelamis P750	Corpo Oscilante	<i>Offshore</i>	Profunda	1,15	18%	1,64
			Intermediária	0,96	15%	1,37
Oyster	Corpo Oscilante	<i>Nearshore</i>	Intermediária	2,88	10%	1,43
			Rasa	1,31	5%	0,65

Fonte: Pelo autor.

Vale ressaltar que os indicadores aqui utilizados, apesar de serem bons indicadores, representativos do desempenho energético dos dispositivos, devem ser analisados com cautela e não embasam uma decisão definitiva sobre o melhor conceito de conversor para o local de estudo. O fator de capacidade, como mostrado na equação 3-5, é um parâmetro sensível à potência nominal ( $P'_0$ ) no denominador. Sendo que, para o  $P'_0$ , é considerada a potência máxima fornecida pelo desenvolvedor na matriz de potência, valor que só seria atingido por uma onda ou uma pequena faixa de ondas ideais. Sendo assim, quando esse número é muito maior que os valores mínimos e intermediários da matriz, o fator de capacidade tende a ser muito baixo, fato que ocorreu com os conversores *Nearshore*, aqui analisados. E o segundo indicador, de kWh absorvido por massa de dispositivo, usado para complementar a análise, não considera a modularidade dos dispositivos, ou seja, que alguns dispositivos podem ser instalados com diversos módulos, o que mudaria a razão calculada.

#### 4.5.3 Comparativo entre energia gerada pelos dispositivos de melhor desempenho e a demanda de projeto

As tabelas e gráficos dessa seção apresentam dados comparativos entre a energia gerada pelos melhores dispositivos, escolhidos de acordo com os indicadores analisados nas seções anteriores, e a demanda energética para iluminação das praias. A produção de cada dispositivo e a demanda de projeto foram dadas de acordo com os percentuais do tempo de permanência esperados para cada categoria de mar no ano, mostrados na Tabela 6. Ou seja, os dispositivos conversores geram, para cada categoria de mar que ocorre durante o ano, uma quantidade de energia proporcional aos seus tempos de permanência; essas parcelas somadas dão o total

produzido no ano. Sendo assim, a produção dos principais dispositivos nesta seção, será apresentada separadamente para cada categoria de mar, tal como a demanda, estimada para o mesmo intervalo de tempo considerado.

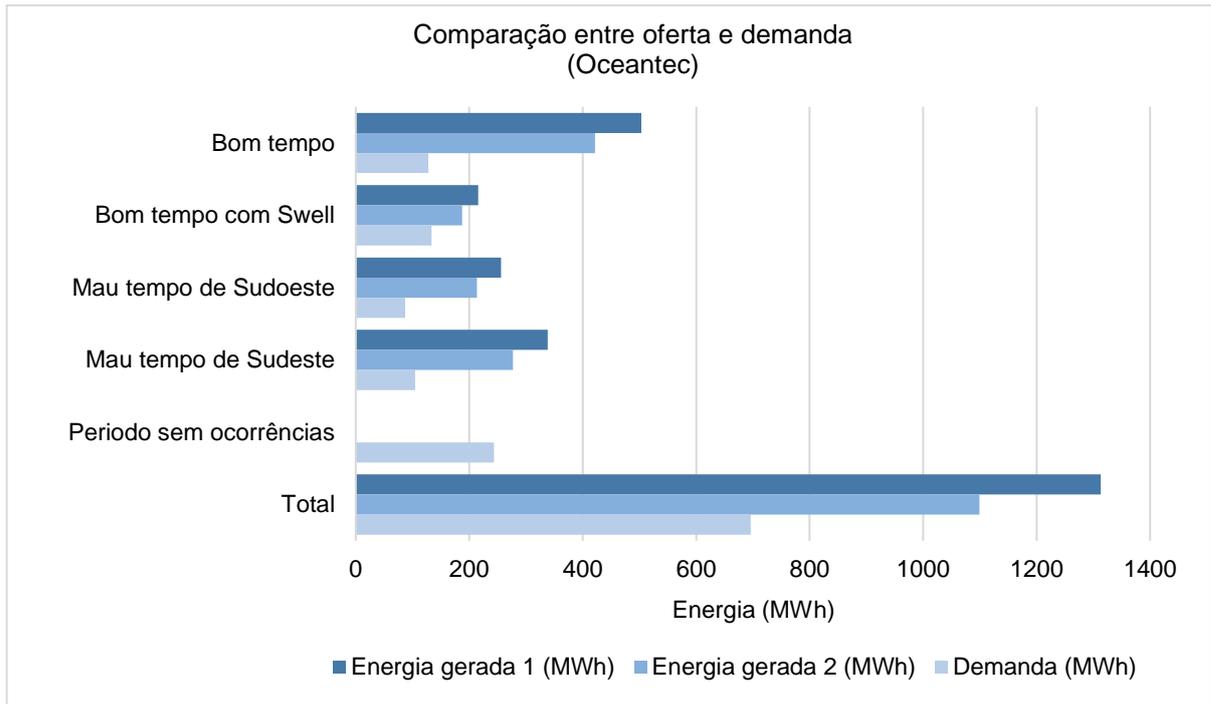
A tabela 12 e a figura 63, apresentam os dados de comparação entre a produção do conversor Oceantec e a demanda energética anual para águas profundas e intermediárias.

**Tabela 12** – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Oceantec.

Clima de onda	Oceantec					
	Águas profundas			Águas intermediárias		
	Energia gerada 1 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)	Energia gerada 2 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)
Bom tempo	503	128	375	422	128	294
Bom tempo com Swell	216	133	82	187	133	54
Mau tempo de Sudoeste	256	87	169	213	87	126
Mau tempo de Sudeste	338	104	234	277	104	172
Período sem ocorrências	0	244	-244	0	244	-244
<b>Total</b>	<b>1313</b>	<b>696</b>	<b>617</b>	<b>1099</b>	<b>696</b>	<b>403</b>

**Fonte:** Pelo autor.

De acordo com a Tabela 12, o conversor Oceantec precisaria da complementação de uma segunda fonte de energia, apenas no período sem ocorrências de ondas, em qualquer outro período, o dispositivo seria capaz de fornecer um montante de energia maior que o da demanda. Sendo que o excesso de energia produzido em relação a demanda não é muito excessivo e pode ser utilizado em outras finalidades como a alimentação de bombas hidráulicas instaladas nos chuveiros das orlas.



**Figura 63** – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Oceantec.

**Fonte:** Pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 63 permite uma melhor visualização das diferenças entre os montantes de energia produzidos em cada profundidade e a demanda energética de projeto.

A Tabela 13 e a figura 64 apresentam, respectivamente os dados e o gráfico de comparação entre demanda e energia gerada no ano para o dispositivo Aquabuoy.

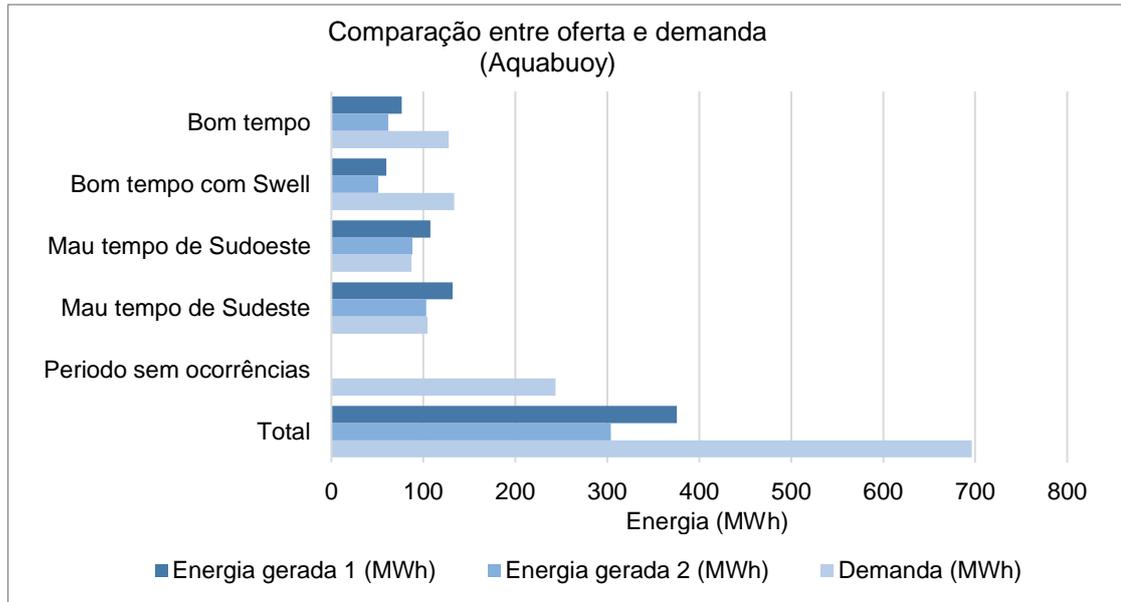
**Tabela 13** – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Aquabuoy.

Clima de onda	Aquabuoy					
	Águas profundas			Águas intermediárias		
	Energia gerada 1 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)	Energia gerada 2 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)
Bom tempo	77	128	-51	62	128	-66
Bom tempo com Swell	60	133	-74	51	133	-83
Mau tempo de Sudoeste	108	87	21	88	87	1
Mau tempo de Sudeste	132	104	27	103	104	-1
Período sem ocorrências	0	244	-244	0	244	-244
<b>Total</b>	<b>376</b>	<b>696</b>	<b>-321</b>	<b>304</b>	<b>696</b>	<b>-392</b>

**Fonte:** Pelo autor.

De acordo com a Tabela 13, apesar do bom desempenho comparado aos outros conversores, tanto em águas profundas quanto em águas intermediárias, o

Aquabuoy não consegue suprir a demanda em nenhuma categoria de mar testada. Para suprir toda demanda energética anual seria necessários pelo menos dois módulos trabalhando juntos, isso sem levar em conta a interferência entre eles, fato que poderia gerar uma matriz de potência diferente e não proporcional a matriz usada neste trabalho.



**Figura 64** – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para Aquabuoy.

**Fonte:** Pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 64, possibilita uma melhor visualização da relação entre energia gerada em cada profundidade de instalação para as diferentes categorias de mar do dispositivo Aquabuoy, e a demanda de energia elétrica durante cada período considerado, ficando evidente que o total de energia produzida é bem menor do que a demanda.

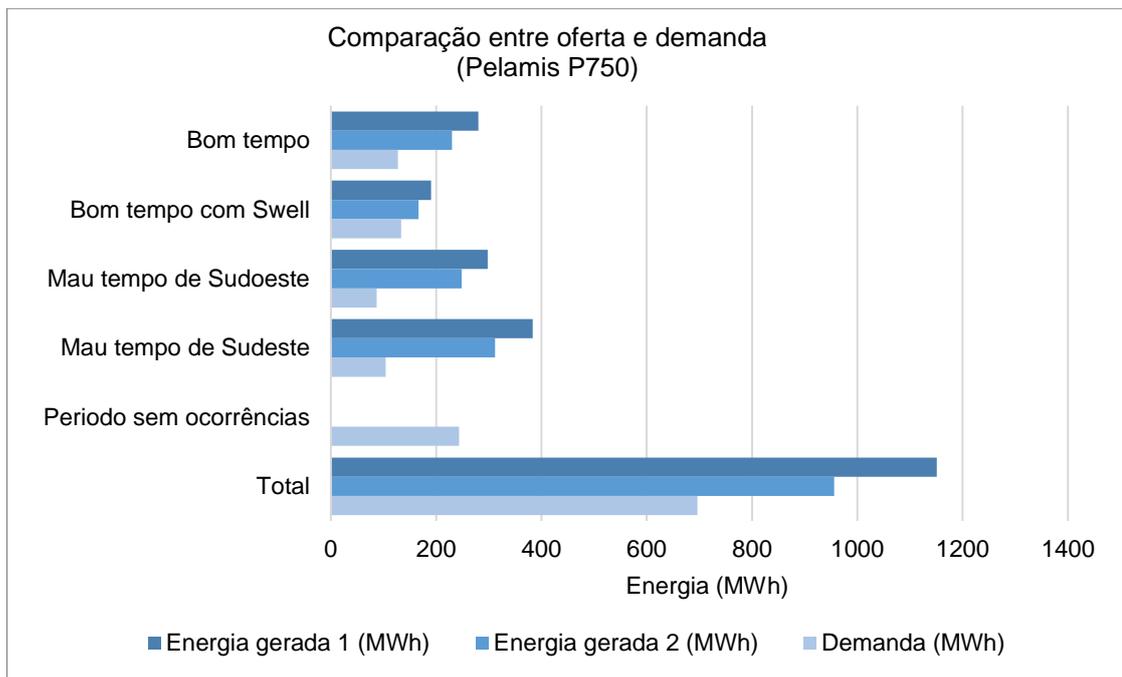
A Tabela 14 e a figura 65 mostram os dados referentes à comparação entre a energia gerada e a demanda para o dispositivo Pelamis P750 nas diferentes profundidades e categorias de mar.

**Tabela 14** – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Pelamis P750.

Pelamis P750						
Clima de onda	Águas profundas			Águas intermediárias		
	Energia gerada 1 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)	Energia gerada 2 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)
Bom tempo	280	128	152	230	128	102
Bom tempo com Swell	190	133	57	166	133	33
Mau tempo de Sudoeste	298	87	211	248	87	161
Mau tempo de Sudeste	383	104	279	312	104	207
Periodo sem ocorrências	0	244	-244	0	244	-244
<b>Total</b>	<b>1151</b>	<b>696</b>	<b>455</b>	<b>956</b>	<b>696</b>	<b>260</b>

Fonte: Pelo autor.

Como mostra a tabela 14 o Pelamis P750 possui uma produção bastante proporcional a demanda de projeto, sendo necessário a complementação de energia por outras fontes apenas no período sem ocorrências de estados de mar.



**Figura 65** – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Pelamis P750

Fonte: Pelo autor.

O gráfico apresentado na figura 65 evidencia a produção de energia maior que a demanda em todas as categorias de mar. Sendo que o excesso de energia produzido em relação a demanda, assim como no OceanTec, não é muito excessivo e pode ser utilizado em outras finalidades.

A Tabela 15 e a figura 66 mostram os dados referentes à comparação entre a energia gerada e a demanda para o dispositivo *Nearshore*, Oyster nas diferentes profundidades e categorias de mar.

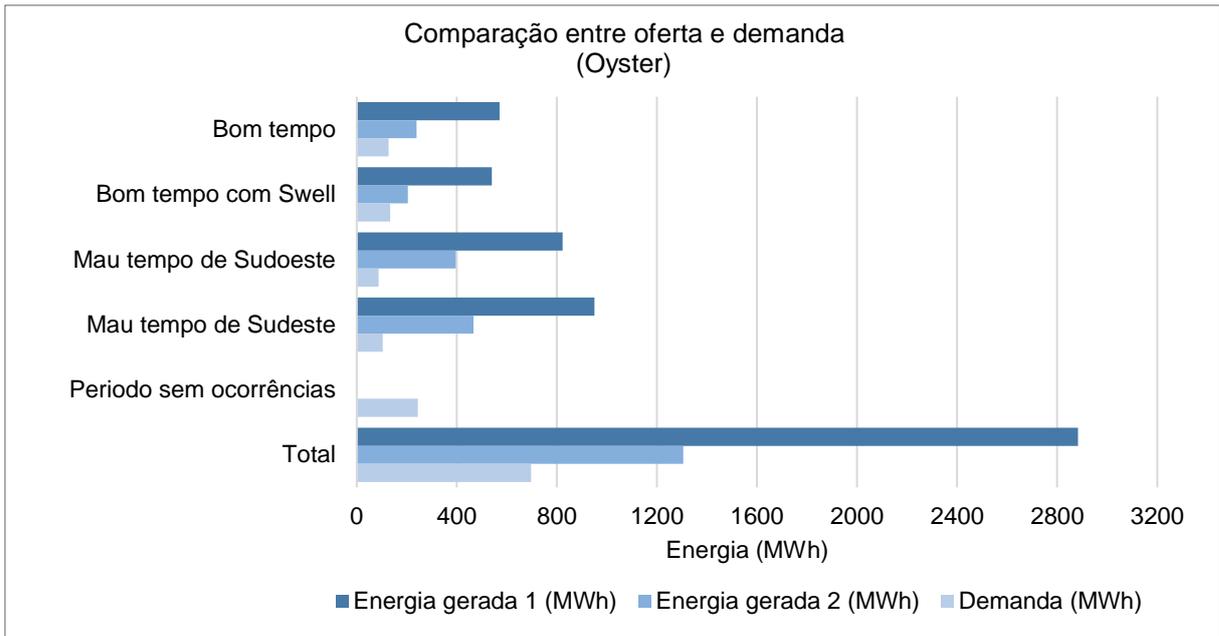
**Tabela 15** – Comparação entre energia gerada e demanda de projeto em diferentes profundidades para o conversor Oyster.

Clima de onda	Oyster					
	Águas intermediárias			Águas rasas		
	Energia gerada 1 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)	Energia gerada 2 (MWh)	Demanda (MWh)	Diferença (MWh)
Bom tempo	570	128	443	238	128	111
Bom tempo com Swell	540	133	406	205	133	71
Mau tempo de Sudoeste	823	87	736	396	87	309
Mau tempo de Sudeste	950	104	846	467	104	362
Periodo sem ocorrências	0	244	-244	0	244	-244
Total	2884	696	2187	1305	696	609

Fonte: Pelo autor.

De acordo com a Tabela 15, o conversor Oyster pode suprir a demanda com facilidade. Porém, em águas intermediárias a diferença é muito alta, enquanto em águas rasas o montante de energia gerado é mais próximo da demanda e sem necessidade de complementação por outras fontes.

O dispositivo Oyster apresenta diminuição da energia gerada por kg em mais de 50% quando verificado em águas rasas. Porém, existe a vantagem da menor distância entre a área de captação e a costa, o que pode tornar o projeto mais vantajoso. O dispositivo se mostra adequado para o funcionamento nas águas da Bacia de Campos, entretanto, para determinação de qual melhor posicionamento do conversor, é necessária uma avaliação econômica e energética mais profunda.



**Figura 66** – Comparação entre energia gerada em águas profundas (1), Energia gerada em águas intermediárias (2) e demanda de energia do projeto para o Oyster.

**Fonte:** Pelo autor.

No gráfico apresentado na figura 66, é possível visualizar a diferença entre o montante gerado pelo dispositivo nas duas profundidades avaliadas, ficando evidente a diminuição de produção em águas rasas.

De acordo com os dados expostos, diferentes condições de mar propiciam diferentes desempenhos nos conversores de energia das ondas. Mesmo em condições de mar de menor energia, existem dispositivos que possuem um desempenho melhor do que se estivessem em situações de mar mais severas. Segundo Souza (2011) e Zancanella (2016), tal fenômeno pode ser explicado pela especificidade dos projetos que são direcionados para os climas de ondas existentes em cada região, ou seja, cada conversor possui seu ponto ótimo de funcionamento em um certo intervalo de pares de  $T_p$  e  $H_s$ .

No caso do presente trabalho, o dispositivo que demonstrou ter seu ponto ótimo de trabalho mais próximo das condições de onda da região foi o Oceantec; tal conversor possui bom desempenho em situações de mar de baixos  $T_p$  e  $H_s$  moderadas. Além disso, apresentou uma produção bastante proporcional à demanda de projeto pretendida, tanto se instalado em águas profundas ou em águas intermediárias, como pode ser visto na Tabela 12 e no gráfico da figura 63.

## 5 CONCLUSÃO

Através de uma extensa pesquisa bibliográfica buscou-se, inicialmente, definir o comportamento e as características das ondas que chegam ao litoral da cidade de Macaé, ou seja, definir o clima de ondas dominante na região. Apesar da dificuldade inicial, devido ao reduzido número de publicações contendo dados sobre as ondas em território nacional, especialmente na região de estudo, foi possível definir com clareza o regime de ondas presente em Macaé, a partir de um referencial bem fundamentado. Tal regime se caracteriza por possuir ondas de altura significativa ( $H_s$ ) entre 1 e 3 metros em águas profundas e períodos de pico ( $T_p$ ) que se concentram na faixa de 6-12s. Além disso, foi possível definir que as situações de mar de maior energia (maiores  $H_s$ ), definidas como situações de Mau Tempo, concentram-se nos meses de outono e inverno, enquanto as de menor energia (menor  $H_s$ ), definidas como situações de Bom Tempo, se concentram nos meses de verão e primavera. Outra importante constatação foi de que em cerca de 35%, ou 4,2 meses no ano, não se tem ocorrências de estado de mar consideráveis para serem computadas no diagrama de dispersão, portanto os dispositivos conversores não seriam capazes de extrair energia das ondas durante esse intervalo de tempo. Sendo assim, seria necessária a complementação por outros tipos de fontes de energia para o objetivo de iluminação das orlas das praias.

Com a delimitação do clima de ondas e definição dos diagramas de dispersão a serem usados, foi possível calcular a os potenciais de onda para cidade de Macaé em águas profundas. Depois, a partir de relações entre batimetria e  $H_s$ , obtidas em bibliografia específica sobre as ondas da cidade, foi possível estimar os potenciais em pontos específicos de águas intermediárias e rasas e, assim, obter uma noção geral do potencial de onda disponível no litoral da região. Dessa forma, chegou-se a resultados de que em Águas profundas tem-se um potencial médio de onda de 21 kW/m, sendo cerca de 0,48 GW considerando os 23 km de costa de Macaé. Nos pontos considerados em águas intermediárias e rasas, tem-se, respectivamente, 17 kW/m e 8 kW/m; considerando os 23 km de costa, tem-se 0,39 GW e 0,18 GW em águas intermediárias e rasas, respectivamente. Tais valores representam potencial de onda considerável quando comparados aos valores estimados para o território nacional.

Em relação à análise comparativa entre os conversores de energia das ondas, foram estudados, a partir de informações presentes na literatura, nove diferentes dispositivos em 3 pontos distintos com diferentes profundidades. Dessa forma, foi possível obter uma estimativa do potencial energético do recurso da energia das ondas de Macaé a partir das tecnologias disponíveis no momento. Os totais de energias gerados em um ano de produção foram entre 0,08 - 16,17 GWh, dependendo do conversor e local de instalação.

A estimativa da energia gerada pelos dispositivos na cidade de Macaé revelou que os conversores com maior produção total de energia são o Wave Dragon (16,17 GWh) em águas profundas, SSG (8,7 GWh) em águas rasas, Oyster (2,88 GWh) em águas intermediárias e Wavestar (2,42 GWh) em águas profundas. Tais resultados são referentes a um módulo de cada dispositivo, sendo que alguns dispositivos podem contemplar a instalação de diversos módulos. Porém, o comparativo de fator de capacidade e os kWh de energia produzida por kg de massa de dispositivo foram os fatores preponderantes na escolha do melhor dispositivo para o objetivo do estudo. Nesses quesitos, os conversores que mais se destacaram, seguidos pelos seus números máximos de desempenho, foram o Oceantec com 30% de fator de capacidade e 17,74 kWh/kg por ano, seguido pelo Aquabuoy com 17% de fator de capacidade e 5,29 kWh/kg por ano.

Após a definição dos conversores que possuem melhor desempenho na região de interesse, a partir dos indicadores supracitados, foi realizado o comparativo entre a demanda de energia para iluminação das orlas e a produção de energia total de acordo com as situações de mar predominantes no ano em Macaé. A demanda foi calculada a partir dos dados encontrados em bibliografia sobre os equipamentos de iluminação presentes nas orlas das praias, o valor encontrado foi aproximadamente 0,7 GWh por ano.

Posterior à comparação entre demanda de projeto e produção de cada conversor, chegou-se à conclusão de que o conversor Aquabuoy, apesar de um bom desempenho, possui uma produção total de energia muito menor do que a demanda do projeto, o que demandaria a instalação de mais módulos do conversor. O dispositivo Oyster apresentou uma produção de mais que o dobro da demanda em águas intermediárias; já em águas rasas, demonstrou uma produção mais próxima à demanda. O conversor Oceantec e o Pelamis P750 apresentaram produção proporcional à demanda, sem necessidade de complementação, tanto em águas

profundas quanto em águas intermediárias, entretanto, o *Oceantec* apresentou um maior fator de capacidade e maior produção de kWh por kg de dispositivo. Sendo assim, o *Oceantec* foi considerado, pelos indicadores aqui definidos, o conversor mais recomendado, entre os analisados, para o projeto de iluminação das orlas da praia de Macaé.

Vale ressaltar que, entre os dispositivos conversores *Offshore*, a perda percentual média de kWh gerado, passando de águas profundas para intermediárias, foi de cerca de 17%. Entre os dispositivos *Nearshore*, a perda foi de cerca de 55% na produção. Do ponto de vista energético, é mais vantajoso instalar o conversor onde ele produz mais energia, entretanto, para decidir o posicionamento dos dispositivos é necessária uma análise que leve em conta fatores econômicos, como aumento do custo de implantação e rede de transporte de energia, devido a maior distância da costa.

Os resultados deixaram evidente a questão da especificidade dos conceitos dos dispositivos de onda, mostrando que diferentes conversores apresentam comportamentos distintos de acordo com as condições de mar a que são submetidos. Pôde-se constatar que, na cidade de Macaé, conversores projetados para funcionamento em menores períodos e alturas de onda apresentaram melhor desempenho. O *Oceantec* é um exemplo de tal fato, mostrando maior fator de capacidade (30%) no clima de ondas de Macaé do que no clima de ondas mais energético da cidade de Florianópolis (22%), no Sul do Brasil.

O presente trabalho constitui um primeiro passo para o estudo e o desenvolvimento das energias das ondas na Cidade de Macaé e região, associando trabalhos sobre o clima de ondas da Bacia de Campos à estimativa do potencial energético de onda disponível. Dessa forma, pode-se mostrar que a cidade possui um relevante potencial energético em suas águas e, mesmo que estudos mostrem que as energias das ondas precisam percorrer um longo caminho para tornarem-se viáveis, especialmente no Brasil, elas podem ser de grande valia para pequenos projetos de visibilidade e fomento de energia limpa e renovável.

Foi possível estabelecer, dentre diferentes conceitos de energia das ondas, alguns que se mostram mais compatíveis, do ponto de vista energético, para serem utilizados no clima de ondas da região. No entanto, destaca-se a importância de análises mais aprofundadas, com uma maior base de dados e que levem em conta outros fatores para uma tomada de decisão, como viabilidade econômica e impactos

ambientais, além de outros indicadores e parâmetros de desempenho energético que permitam uma análise mais completa e aprofundada do funcionamento de diversos conceitos e projetos em diferentes localidades.

Uma das dificuldades do trabalho foi encontrar dados de onda para as regiões de interesse, dessa forma, limitando o número de pontos para estimativa do potencial teórico e verificação de conversores. Uma primeira recomendação para trabalhos futuros seria a simulação de dados de onda em diversos pontos da Bacia de Campos, com os quais se poderia definir sítios mais apropriados para implementação de um conversor de energia das ondas. Tal medida geraria ainda a possibilidade de análise de dados mês a mês, aumentando assim a precisão do estudo de potencial de onda para projetos futuros.

A escala dos conversores foi outra limitação imposta ao trabalho, já que as matrizes de potência disponíveis eram de conversores de diferentes ordens de grandeza, fato que dificultou a comparação entre eles nos quesitos de energia total produzida e proporcionalidade em relação à demanda pretendida. Como recomendação, fica a busca por matrizes de potência de dispositivos em outras escalas de tamanho, com objetivo de adequar a dimensão do dispositivo para a demanda de projeto.

Este trabalho levou em consideração fatores estritamente de desempenho energético para análise dos conversores. Uma importante recomendação é o desenvolvimento de uma metodologia de tomada de decisão que possa ser aplicada em diferentes climas de ondas, e que leve em conta outros fatores como, novos indicadores de cunho energético, fatores econômicos, ambientais e estéticos, para cada concepção de tecnologia de conversão disponível.

Em relação à especificidade do funcionamento ótimo de conversores em determinados climas de onda recomenda-se um estudo mais aprofundado, inclusive com a produção de protótipos físicos dos conceitos de conversores nacionais, a fim de obter-se parâmetros de funcionamento e matrizes de potência de tais dispositivos. Visando, de tal modo, torná-los cada vez mais adaptados aos padrões de ondas do país e viabilizar projetos pioneiros que utilizem apenas tecnologias nacionais.

## REFERÊNCIAS

ADERINTO, T.; LI, H. Ocean Wave Energy Converters : Status and Challenges. **Energies**, v. 11, n. maio de 2018, p. 1–26, 2018.

AIRY, G. B. **Tides and Waves**. Baviera: B. Fellowes, 1845.

ANDRADE, A. F. DE. **Técnicas para Identificação Automática de Sistemas de Ondas e Suas Respectivas Áreas de Geração em Função da Chegada Dispersiva das Ondulações**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE. Universidade federal do Rio de Janeiro, 2014.

ARENA. **How does wave energy work?** Disponível em: <<https://arena.gov.au/blog/how-does-wave-energy-work/>>. Acesso em: 28 ago. 2020.

ASSIS, L. E. DE. **AVALIAÇÃO E APROVEITAMENTO DA ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS NO LITORAL DO RIO GRANDE DO SUL**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

ASSIS, L. E.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. E. B. Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Ocoânicas no Litoral do Rio Grande do Sul. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, p. 21–29, maio 2013.

BABARIT, A. et al. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 41, p. 44–63, 2012.

BABARIT, A. A database of capture width ratio of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 80, p. 610–628, 2015.

BASTOS, G.; LUPARELLI, A. **Bacia de Campos**; ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, , 2015. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ANPgovbr/bacia-de-campos-51511845>>. Acesso em: 12 mar. 2020

BESERRA, E. R. et al. Wave climate analysis for a wave energy conversion application in Brazil.In: OMAE. **Anais da 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering**. [s.l.], 2007. p. 897-902.

BLOG DA PETROBRÁS. **Petrobras inicia produção na área de Brava no pré-sal da Bacia de Campos**. Disponível em: <<https://diariodopresal.wordpress.com/2011/04/19/pre-sal-petrobras-inicia-producao-em-fase-de-tld-na-area-de-brava-bacia-de-campos/>>. Acesso em: 8 set. 2020.

BULHÕES, E. M. R. et al. Impactos costeiros induzidos por ondas de tempestade entre o Cabo Frio e o Cabo Búzios. **Quaternary and Environmental Geosciences**, n. December, p. 155–165, 2014.

CALEJO, P. J. P. **SISTEMA CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR**.Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2012.

CAMPOS, R. M. **ANÁLISE DOS EXTREMOS DE ONDA NO RIO DE JANEIRO ASSOCIADOS A CICLONES EXTRATROPICAIS NO ATLÂNTICO SUL.**

Dissertação de Mestrado em Engenharia Oceânica, COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.

CARNEGIE CLEAN ENERGY. **CETO Technology**. Disponível em: <<https://www.carnegiece.com/ceto-technology/>>. Acesso em: 23 jul. 2020.

CARVALHO, J. **Plano de retomada de Macaé é apresentado**. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/plano-de-retomada-de-macaee-apresentado>>. Acesso em: 25 jun. 2020.

CARVALHO, J. T. **SIMULAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS OCEÂNICAS AO LARGO DO LITORAL BRASILEIRO**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2010.

CEMBRA. **O Brasil e o mar no século XXI – Relatório aos Tomadores de Decisão do País**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro de Excelência para o Mar Brasileiro (Cembra), 2019. v. 2

COPPE/UFRJ. **O futuro sustentável**. Tecnologia e inovação para uma economia verde e a erradicação da pobreza. In: Rio+20. **Anais da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável**. Rio de Janeiro: 2012. p. 1-10.

CORNETT, A. M. A GLOBAL WAVE ENERGY RESOURCE ASSESSMENT. **International Society of Offshore and Polar Engineers**, p. 9, 2008.

CRUZ, J.; SARMENTO, A. **Energia das ondas: introdução aos aspectos tecnológicos, económicos e ambientais**. Amadora: Instituto Superior Técnico WEC – Wave Energy Centre, 2004.

CUNHA, I. P. DA C. et al. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. n. February 2018, 2017.

DALTON, G. J.; ALCORN, R.; LEWIS, T. Case study feasibility analysis of the Pelamis wave energy converter in Ireland , Portugal and North America. **Renewable Energy**, v. 35, n. 2, p. 443–455, 2010.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Advanced Series on Ocean Engineering - Volume 2 : Water wave mechanics for Engineers and Scientists**. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1991.

DIACONU, S.; RUSU, E. Evaluation of various WEC devices in the Romanian near shore. **WSEAS Conference**, p. 11, 2013.

DUARTE, P. A. **Dados sobre o planeta Terra**. Disponível em: <<https://planetario.ufsc.br/dados-sobre-o-planeta/>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

EIA. **EIA projects less than a quarter of the world's electricity generated from coal by 2050**. Disponível em: <<https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=42555>>. Acesso em: 28 mar.2020.

ELMORE, W. C.; HEALD, M. A. **Physics of Waves**. Nova Iorque: McGraw-Hill, 1969.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 28 jun. 2021.

ESTEFEN, S.F. **Geração de Energia Elétrica pelas Ondas do Mar**. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/pt-br/geracao-de-energia-eletrica-pelas-ondas-do-mar>>. Acesso em: 28 maio. 2020.

ESTEFEN, S. F.; CASTELLO, Xavier ; LOURENÇO, Marcelo Igor ; ROSSETO, R. M. Design Analyses applied to a Hyperbaric wave energy converter. 2010 PRADS, Rio de Janeiro. Practical Design of Ships and Other Floating Structures.

FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**, v. 20, n. 0951, p. 185–201, 2007.

FARIA, T. P.; TOUGEIRO, J. V. CONFLITOS SOCIOAMBIENTAIS MOTIVADOS POR OCUPAÇÃO DE MANGUEZAIS E RESTINGAS PARA FINS HABITACIONAIS NO ESPAÇO URBANO DE MACAÉ, RJ. p. 242–271, 2010.

FLEMING, F. P. **AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ENERGIAS OCEÂNICAS NO BRASIL**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

FUNDAÇÃO COPPETEC. **DESENVOLVIMENTO DE MODELO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DE ESTRUTURAS MARINHAS DE AMPLIFICAÇÃO DE ONDAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, Relatório Final R5, Projeto P&D 0678-0510/2010**. Rio de Janeiro: UTE – Norte Fluminense S.A., 2012.

GARRISON, T. S. **Essentials of oceanography**. 6. ed. Belmont: Brooks Cole, 2011.

GERO. **Grupo de Energia Renovável no Oceano (GERO)**. Disponível em: <<http://www.gero.coppe.ufrj.br/index.php/pt/#>>. Acesso em: 28 jul. 2021.

GODA, Y. **RANDOM SEAS AND DESIGN OF MARITIME STRUCTURES**. 2. ed. Tokyo: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.

GOLDEMBERG, J. Energia e Sustentabilidade. **Revista de Cultura e Extensão USP**, v. 14, p. 33–43, 2015.

HOLTHUIJSEN, L. H. **WAVES IN OCEANIC AND COASTAL WATERS**. New York: Cambridge University Press, 2007.

IBGE. **Censo 2010**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/noticias-censo.html?busca=1&id=1&idnoticia=2036&t=ibge-parceria-marinha-brasil-lanca-atlas-geografico-zonas-costeiras-oceanicas&view=noticia#:~:text=Devido a fatores históricos relacionados,50%2C7 milhões de habitantes.>>. Acesso em: 17 jun. 2020.

IBGE. **População**. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/macaee/panorama>>. Acesso em: 4 ago. 2020.

IEA. **Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEA-OES), Annual Report Ocean Energy Systems**The Executive Committee of Ocean Energy Systems Edited, , 2015. Disponível em: <<https://www.ocean-energy-systems.org/publications/annual-reports/>>

KAMPHUIS, J. W. **INTRODUCTION TO COASTAL ENGINEERING**. [s.l.] World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2000.

KHAN, J.; BHUYAN, G. S. **Ocean Energy: Global Technology Development Status** Powertech Labs Inc. Columbia: IEA-OES, 2009. Disponível em: <[www.powertechlabs.com](http://www.powertechlabs.com)>.

KOFOED, J. P. et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. v. 31, p. 181–189, 2006.

LAVIDAS, G. Selection index for Wave Energy Deployments ( SIWED ): A near-deterministic index for wave energy converters. **Energy**, v. 196, p. 117131, 2020.

LÓPEZ, I. et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 413–434, 2013.

MARGHERITINI, L.; VICINANZA, D.; FRIGAARD, P. SSG wave energy converter : Design , reliability and hydraulic performance of an innovative overtopping device. **Renewable Energy**, v. 34, n. 5, p. 1371–1380, 2009.

MARQUIS, L.; KRAMER, M.; FRIGAARD, P. Wave Star: First Power Production Results from the Wave Star Roshage Wave Energy Converter Laurent. **Anais 3th Internacional Conference on Ocean Energy**.Bilbao: **Wave Star**, 2010. p. 1-23.

MELO, E. F. Nota sobre o cálculo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para uso em conversores de energia.In: SEMENGO.**Anais do V SEMINÁRIO E WORKSHOP EM ENGENHARIA OCEÂNICA**.Rio Grande: 2012. p. 1-9.

MØRK, G. et al. Assessing the global wave energy potential.In: OMAE. **Anais 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering**.Shanghai: 2010. p. 447-454.

MUETZE, A.; VINING, J. G. Ocean wave energy conversion - A survey.In: (IEEE Industry Applications Society). **Anais IAS Annual Meeting**.[s.l]:2006. p. 1410-1417.

MUSTAPA, M. A. et al. Wave energy device and breakwater integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, n. March, p. 43–58, 2017.

OES. ANNUAL IMPLEMENTING AGREEMENT on OCEAN ENERGY SYSTEMS 2014. **The Executive Committee of Ocean Energy Systems**, v. 5, p. 148, 2014.

OES. REPORT ANNUAL OCEAN ENERGY SYSTEMS 2016. **The Executive Committee of Ocean Energy Systems**, p. 188, 2016.

OES. ANNUAL REPORT AN OVERVIEW OF OCEAN ENERGY ACTIVITIES IN 2019. **The Executive Committee of Ocean Energy Systems**, p. 152, 2019.

OLIVEIRA, G. **Caminhada no domingo destaca a importância da doação de órgãos**. Disponível em:

<<http://www.macaee.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/caminhada-no-domingo-destaca-a-importancia-da-doacao-de-orgaos>>. Acesso em: 18 dez. 2020.

OLIVEIRA, L. A. K. **VARIABILIDADE INTERANUAL DO CLIMA DE ONDAS E TEMPESTADES E SEUS IMPACTOS SOBRE A MORFODINÂMICA DE PRAIAS DO LITORAL SUDESTE DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO**. Tese de Doutorado em Geografia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

PAREDES, G. M. **ESTUDO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA OFFSHORE PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS**. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto, 2008.

PARENTE, C. E. et al. Climatologia De Ondas. In: **Meteorologia e Oceanografia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015. p. 55–96.

PIETER, M. et al. BELGIAN OCEAN ENERGY ASSESSMENT ( BOREAS ). n. January 2011, p. 171, 2011.

PINHO, U. F. DE. **CARACTERIZAÇÃO DOS ESTADOS DE MAR NA BACIA DE CAMPOS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

PLANETA COPPE NOTÍCIAS. **LabOceano inaugura sistema de correnteza**. Disponível em: <<https://coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/laboceano-inaugura-sistema-de-correnteza>>. Acesso em: 17 maio. 2020.

PRUDELL, J. et al. A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 46, n. 6, p. 2392–2400, 2010.

REGO, V. S. et al. Transformação De Ondas Sobre a Plataforma Continental E Correntes Induzidas Por Ondas. In: **Meteorologia e Oceanografia**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, 2015. p. 97–132.

REIS, M. T.; SANTOS, J. A. Probabilistic assessment of the safety of sea defences using level II and level III methods. **Territorium**, n. July, 2011.

RONCHI, F. P.; SCHAEFFER, L. Classificação das tecnologias para conversão de energia das ondas. **Anais da 3ª Conferência Internacional de Materiais e Processos para Energias Renováveis**. Porto Alegre: RENOMAT, 2013. p. 1-7.

SALCEDO, F. et al. Oceantec : Sea trials of a quarter scale prototype. **Anais 8th European Wave Tidal Energy Conference**. [s.l]:2009. p. 460-465.

SHADMAN, M. **APPLICATION OF THE LATCHING CONTROL ON A WAVE ENERGY CONVERTER**. Tese (Doutorado em Engenharia Oceânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

SHADMAN, M. et al. Ocean Renewable Energy Potential , Technology , and Deployments : A Case Study of Brazil. **Energies**, v. 12, p. 3658–3695, 2019.

SHADMAN, MILAD ; Estefen, Segen F. Wave energy extraction using latching control system. 2018. 27th International Congress on Waterborne. Transportation, Shipbuilding and Offshore- Sobena, Rio de Janeiro. 241.

SILVA, D.; RUSU, E.; SOARES, C. G. Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. **Energies**, v. 6, p. 1344–1364, 2013.

SILVA, F. L. C. **INVESTIGAÇÕES SOBRE A CHEGADA DE ONDULAÇÕES (SWELL) EM SITUAÇÕES DE BOM TEMPO NA BACIA DE CAMPOS**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

SILVEIRA, J. **Prefeitura apoia a primeira Ciranda Literária em Macaé**. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/noticias/leitura/noticia/prefeitura-apoia-a-primeira-ciranda-literaria-em-macaee>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

SILVEIRA, J. **Iluminação das praias Campista e Cavaleiros recebe manutenção**. Disponível em: <<http://www.macaee.rj.gov.br/infraestrutura/leitura/noticia/iluminacao-das-praias-campista-e-cavaleiros-recebe-manutencao>>. Acesso em: 18 fev. 2020.

SOLOVYEV, A.; SOLOVYEV, D.; SHILOVA, L. The Ensuring of Survivability of Wave Energy Stations Constructive Elements in Extreme Weather Conditions. In: E3S. **Anais Web of Conferences 97, 05049**. EDP Sciences, 2019. p. 1-10.

SOUZA, R. D. A. E. **ESCOLHA DE TECNOLOGIA DE CONVERSÃO DA ENERGIA DAS ONDAS EM ENERGIA ELÉTRICA**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande - FURG, 2011.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Rio de Janeiro: EPE, 2016.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essential Of Oceanography**. 12. ed. Boston: Pearson, 2016.

VEIGAS, M. et al. A proposed wave farm on the Galician coast. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 102–111, 2015.

VICINANZA, D.; CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V. Wave energy potential in the north-west of Sardinia ( Italy ). **Renewable Energy**, v. 50, p. 506–521, 2013.

VIOLANTE-CARVALHO, N. **Investigação sobre a evolução do clima de ondas na Baía de Campos e a correlação com as situações meteorológicas associadas**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1998.

WAVESTAR ENERGY. **Concept: How it works**. Disponível em: <<http://wavestarenergy.com/concept>>. Acesso em: 27 jun. 2020.

WEINSTEIN, A. et al. AquaBuOY - The Offshore Wave Energy Converter Numerical Modeling and Optimization. In **OCEANS'04. MTS/IEEE TECHNO-OCEAN'04**, v. 4, p. 1854–1859, 2004.

WHITTAKER, T. et al. The development of Oyster – A shallow water surging wave energy converter. In: **ER. Anais 7th European Wave Tidal Energy Conference**. Porto, Portugal: 2007. p. 1-6.

WRIGHT, J.; COLLING, A.; PARK, D. **Waves, tides, and shallow-water processes**. 2. ed. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 1999.

WU, Z.; LEVI, C.; ESTEFEN, S. F. Practical considerations on nonlinear stiffness system for wave energy converter. **Applied Ocean Research**, v. 92, n. April, p. 101935, 2019.

ZANCANELLA, A. C. B. **ESTUDO COMPARATIVO E MODELAGEM DINÂMICA DE CONVERSORES DE ENERGIA A PARTIR DE ONDAS OCEÂNICAS**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.