

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS MARÍTIMAS PARA
DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA NO LITORAL DE TRAMANDAÍ-RS

por

João Pedro Volker

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, setembro de 2022.

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

Volker, João Pedro
ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS MARÍTIMAS
PARA DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA NO LITORAL DE
TRAMANDAÍ-RS / João Pedro Volker. -- 2022.
38 f.
Orientador: Guilherme Henrique Fiorot.

Coorientador: Eduardo Puhl.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2022.

1. Energia das ondas. 2. Dispositivos conversores
de energia das ondas. 3. Potencial energético. 4.
Tramandaí . I. Fiorot, Guilherme Henrique, orient.
II. Puhl, Eduardo, coorient. III. Título.

João Pedro Volker

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS MARÍTIMAS PARA
DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA NO LITORAL DE TRAMANDAÍ-RS

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Puhl

Comissão de Avaliação:

Prof. Diogo Elias da Vinha Andrade

Prof. Felipe Roman Centeno

Prof^ª. Letícia Jenisch Rodrigues

Porto Alegre, setembro de 2022.

DEDICATÓRIA

À minha mãe, Rosângela, pelo amor incondicional, carinho, preocupação e dedicação que só uma mãe conhece para com a criação de seus filhos e por sempre dar seu máximo para mostrar e proporcionar o caminho da educação.

Ao meu pai, Elton, por ter oportunizado meus estudos e ser encorajador de minhas decisões; pelas diversas conversas que tivemos trazendo meu conhecimento teórico para o seu conhecimento prático de engenharia.

À minha irmã, Ana, pela amizade ímpar; por sempre ter sido uma pessoa com quem eu pudesse me abrir e confiar.

A Isabel, por ser companheira em todos os momentos; por sempre acreditar em mim e me lembrar do potencial que tenho, mesmo quando já não o via mais. E, por me mostrar um novo estilo de vida, mais leve e saudável, com uma conexão mais forte com a natureza e comigo mesmo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos colegas que estiveram ao meu lado com sua amizade ao longo deste percurso; aos meus familiares e amigos que demonstraram afeto e compreensão.

Aos professores que tive durante a minha formação educacional, que são parte indispensável para a construção de um país melhor e da nossa querida UFRGS.

EPÍGRAFE

“Saber muito não lhe torna inteligente. A inteligência se traduz na forma que você recolhe, julga, maneja e, sobretudo, onde e como aplica esta informação.”

Carl Sagan

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2022

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE ONDAS MARÍTIMAS PARA
DISPOSITIVOS CONVERSORES DE ENERGIA NO LITORAL DE TRAMANDAÍ-RS

Volker, João P.

volkerjoao@gmail.com

Resumo. Dispositivos conversores de energia das ondas vêm sendo cada vez mais estudados nas últimas décadas devido a necessidade da mudança no setor da produção de energia elétrica para fontes mais limpas a fim de mitigar as mudanças climáticas globais. Neste sentido, como forma de proporcionar informações úteis para tomadores de decisões do estado do Rio Grande do Sul, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o estado de mar e estimar o potencial energético das ondas disponível na praia de Tramandaí-RS, verificando estes dados em associação com alguns destes dispositivos. A partir de uma série de dados medidos entre os anos de 2013 e 2017, executou-se tratamento matemático e estatísticos dos dados, avaliando-se os tipos de ondas desenvolvidas na região. Os resultados obtidos para as estações de inverno e outono se mostraram as mais energéticas e a direção das ondas mais frequente entre as direções Leste e Sudeste. Seis dispositivos foram analisados, a partir de suas matrizes de potência, discutindo-se em quais situações seriam mais adequados. Concluiu-se que o dispositivo Wave Dragon é o mais recomendado para ser estudado em testes locais. Assim, o trabalho contribui para a gama de estudos e pesquisas necessários para comprovação do potencial energético disponível.

Palavras-chave: Energia das ondas, dispositivos conversores de energia das ondas, potencial energético, Tramandaí.

Study of the energy potential of sea waves for wave energy converters on the Tramandaí-RS coast.

Abstract. Wave energy converters have been increasingly studied in the past few decades due to the shift necessity of the electrical production sector to cleaner sources in order to mitigate global climate change. In this sense, as a way of providing useful information for decision makers in the Rio Grande do Sul state, the present work aims to evaluate the sea state and estimate the energy potential of waves available on the Tramandaí-RS beach, verifying this data in association with some of these devices. From data measured between the years 2013 and 2017, mathematical and statistical treatment of the data was performed, evaluating the wave types developed in the region. The results, obtained for winter and autumn seasons were the most energetic and the wave direction was more frequent between the East and Southeast directions. Six devices were analyzed, based on their power matrices, discussing in which situations they would be most suitable. It was concluded that the Wave Dragon device is the most recommended to be studied in local tests. Thus, the work contributes to the range of studies and research needed to prove the energy potential available.

Keywords: Wave energy, wave energy converters, potential energy, Tramandaí.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa do potencial mundial da região litorânea.	1
Figura 2 - Principais tipos de <i>WECs</i> atualmente disponíveis.....	2
Figura 3 - Dois exemplos de <i>WECs</i> . (a) Usina de ondas do Porto de Pecém, Ceará. (b) Dispositivo conversor de energia “ <i>Wave Dragon</i> ”	2
Figura 4 - Sistema de coordenadas e nomenclatura da onda.	3
Figura 5 - Condições de contorno em ondas de gravidade.	4
Figura 6 - Trajetórias das partículas de água em várias profundidades de uma onda viajando em águas profundas.....	6
Figura 7 - Movimento das partículas de ondas em águas profundas, de transição e rasas.	7
Figura 8 - Posição geográfica do <i>AWAC</i> e litoral de Tramandaí.	8
Figura 9 - Sistema de medições e dimensões do dispositivo <i>AWAC</i>	9
Figura 10 - Fluxo do tratamento dos dados.....	10
Figura 11 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2014.	11
Figura 12 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.	12
Figura 13 - Potência (kW/m) disponível em cada mês dos dados analisados.....	13
Figura A. 1 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no inverno de 2014. ..	18
Figura A. 2 - Histogramas das direções principais de onda do inverno de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.....	18
Figura A. 3 - Altura significativa, período de pico e direção de onda na primavera de 2014.	19
Figura A. 4 - Histogramas das direções principais de onda da primavera de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.....	19
Figura A. 5 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2015.	20
Figura A. 6 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2015. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.	20
Figura A. 7 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2016.	21
Figura A. 8 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2016. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.	21
Figura A. 9 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no outono de 2016.	22
Figura A. 10 - Histogramas das direções principais de onda do outono de 2016. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.....	22
Figura A. 11 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no outono de 2017. ..	23
Figura A. 12 - Histogramas das direções principais de onda do outono de 2017. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.....	23
Figura A. 13 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no inverno de 2017. ..	24
Figura A. 14 - Histogramas das direções principais de onda do inverno 2017. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.	24

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados das instalações do <i>AWAC</i>	9
Tabela 2 - Valores de altura significativa média, período de pico médio, direção de onda de maiores ocorrências e direções gaussianas.	12
Tabela 3 - Potências médias mensais (kW) para os diferentes dispositivos.	14

NOMENCLATURA

Símbolos

H	Altura de uma onda senoidal	[m]
T	Período de onda	[s]
h	Profundidade em relação ao NAE	[m]
t	Tempo	[s]
\vec{v}	Vetor de velocidades	[-]
u	Componente horizontal de velocidade	[m/s]
w	Componente vertical de velocidade	[m/s]
x	Direção horizontal	[-]
z	Direção vertical	[-]
g	Aceleração da gravidade	[m/s ²]
k	Número de onda	[rad/m]
C	Celeridade	[m/s]
E_T	Energia total	[W]
E_C	Energia cinética	[W]
E_P	Energia potencial	[W]
F	Fluxo de energia	[W/m]
C_g	Velocidade de grupo	[m/s]
H_s	Altura significativa	[m]
T_p	Período de pico	[s]
T_e	Período de energia	[s]
P	Potencial energético de uma frente de onda	[W/m]
k_e	Número de onda para o período de energia	[rad/m]

Símbolos gregos

λ	Comprimento de onda	[m]
η	Deslocamento da superfície livre	[m]
ρ	Massa específica do fluido	[kg/m ³]
ϕ	Potencial de velocidades	[-]
σ	Frequência angular	[rad/s]
λ_0	Estimativa inicial para comprimento de onda	[m]

Abreviaturas e acrônimos

<i>WEC</i>	<i>Wave Energy Converter</i>
NAE	Nível de água estático
CCF	Condição de Contorno de Fundo
CCCSL	Condição de Contorno Cinemática da Superfície Livre
CCDSL	Condição de Contorno Dinâmica da Superfície Livre
CCLP	Condição de Contorno Lateral Periódica
<i>SSG</i>	<i>Sea Slot-cone Generator</i>
<i>F-OWC</i>	<i>Floating Oscillating War Column</i>
<i>AWAC</i>	<i>Acoustic Wave and Current Profiler</i>
<i>AST</i>	<i>Acoustic Surface Tracking</i>

MATLAB *Matrix Laboratory*

SUMÁRIO

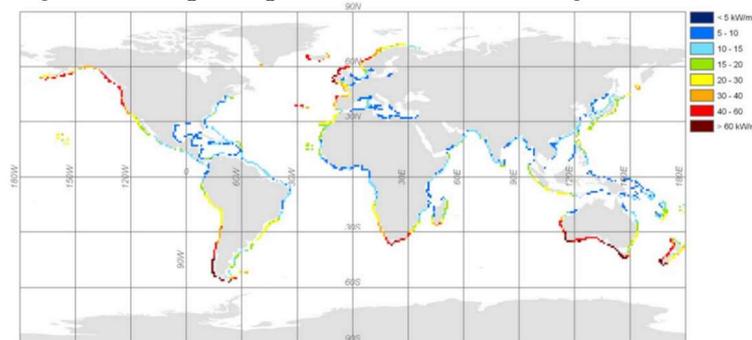
LISTA DE FIGURAS	viii
NOMENCLATURA	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivo geral	2
1.2 Objetivo específico	3
2. REVISÃO CONCEITUAL	3
2.1 Teoria das ondas.....	3
2.1.1 Equacionamento matemático	3
2.1.2 Potencial energético	6
2.2 Matrizes de potência dos dispositivos.....	8
3. METODOLOGIA.....	8
3.1 Obtenção dos dados para o estado de mar.....	8
3.2 Tratamento dos dados	9
4. RESULTADOS	11
4.1 Estado de mar.....	11
4.2 Análise das Matrizes de Potência.....	13
5. CONCLUSÕES.....	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	16
APÊNDICE A	18
ANEXO A - Matriz de potência (kW) do conversor <i>SSG</i>	25
ANEXO B - Matriz de potência (kW) do conversor <i>Wave Dragon</i>	25
ANEXO C - Matriz de potência (kW) do conversor <i>Pelamis</i>	26
ANEXO D - Matriz de potência (kW) do conversor <i>Oyster</i>	26
ANEXO E - Matriz de potência (kW) do WEC <i>Aqua Buoy</i>	27
ANEXO F - Matriz de potência (kW) do conversor <i>F-OWC</i>	27

1. INTRODUÇÃO

O setor energético global atualmente se encontra em um momento de mudança no que se refere a área da geração de energia elétrica, fato este impulsionado pelas mudanças climáticas que vêm ocorrendo nas últimas décadas, além das instabilidades econômicas e políticas. A busca por uma matriz de geração de energia elétrica cada vez mais limpa, através de fontes renováveis, é fundamental para o desenvolvimento mais sustentável (Renewable Energy Agency, 2018). Neste cenário, o Brasil é um país de destaque e abriga potenciais diversos. No território brasileiro, encontram-se grandes bacias hidrográficas o que justifica a construção de grandes hidrelétricas nas últimas décadas. Porém, tal forma de conversão de energia, apesar de ser a maior fonte no território brasileiro, é causadora de grandes impactos ambientais. Sendo assim, a busca por novas formas de geração contribui para diversificar e complementar o modelo existente (Luomi, 2014).

A geração de energia elétrica através dos oceanos tem sido alvo de estudos em diversos países nos últimos anos, mostrando seu potencial em contribuir para a mudança do cenário energético (Scruggs et al., 2009; Tollefson, 2013; Wang, 2017). Tal energia se apresenta na forma das ondas, das correntes oceânicas e dos gradientes térmicos. Estudos apontam que o potencial teórico mundial disponível nas costas chega a ser de 3475 GW, desconsiderando regiões onde ocorrem congelamento dos mares e onde a potência é menor que 5 kW/m (Mørk et al., 2010). O Brasil, possuidor de uma longa costa oceânica, tem potencial teórico de 91,8 GW e mais especificamente a região sul de 21,1 kW/m (Shadman et al., 2019) de produção de energia elétrica a partir da energia das ondas. A Figura 1 mostra o potencial mundial disponível na costa dos continentes.

Figura 1 - Mapa do potencial mundial da região litorânea.



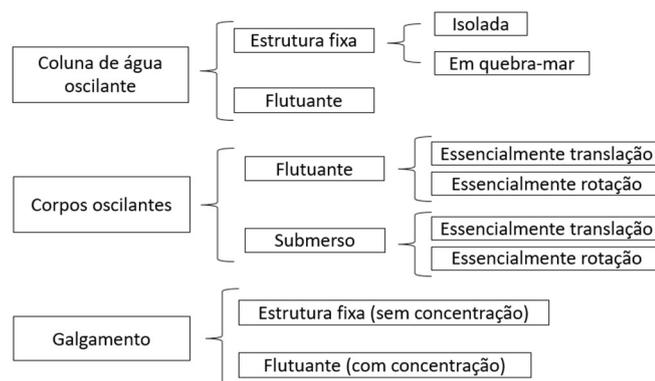
Fonte: Mørk et al. (2010)

Percebe-se, pela Figura 1, que a região sul do Brasil se encontra em uma das mais promissoras no cenário nacional, apontando para um potencial de 20 a 30 kW/m, fato este que poderia impulsionar a matriz energética local.

Atualmente, existem diversos projetos de mecanismos e dispositivos para converter a energia das ondas em energia elétrica, direta ou indiretamente. Os *Wave Energy Converters* (*WECs*) são dispositivos capazes de transformar a energia mecânica das ondas em uma forma útil de energia, como a eletricidade.

Os *WECs* podem ser classificados de inúmeras formas: de acordo com o seu princípio de funcionamento, isto é, o modo com que ele capta a energia; dependendo da forma com que o dispositivo transforma a energia mecânica em energia elétrica; em função da profundidade onde o dispositivo fica instalado (*Shoreline, Nearshore e Offshore*). A Figura 2 mostra os três principais tipos de *WECs* e suas variações.

Figura 2 - Principais tipos de *WECs* atualmente disponíveis.



Fonte: Pecher et al. (2017).

A Figura 3 mostra dois diferentes tipos de *WECs*. O primeiro, mostrado pela Figura 3 (a), sendo o sistema pioneiro do país e da América Latina, desenvolvido no porto de Pecém, estado do Ceará. Trata-se de um dispositivo de corpo oscilante fixado em quebra-mar. Já a Figura 3 (b) mostra um dos dispositivos de instalação em alto mar mais estudados e promissores chamado de “*Wave Dragon*”, um dispositivo de galgamento flutuante.

Figura 3 - Dois exemplos de *WECs*. (a) Usina de ondas do Porto de Pecém, Ceará. (b) Dispositivo conversor de energia “*Wave Dragon*”



Fontes: COPPE/UFRJ, Kofoed et al. (2006)

Dado o atual cenário energético do Brasil, a geração de energia elétrica através das ondas ainda está bastante atrasada em relação aos países europeus e norte-americanos. De acordo com Shadman et al. (2019), o continente europeu possui 60,7% dos projetos em energia dos oceanos seguido da América do Norte com 17,1%. O continente sul-americano é o mais atrasado com 0,7%. Contudo, o Brasil é possuidor de uma vasta região costeira disponível, que com auxílio de incentivos e pesquisas se mostrará uma forte aliada do país. Devido à grande quantidade de dispositivos que estão sendo desenvolvidos e testados, é importante que seja realizada uma extensiva avaliação antes de qualquer investimento. Fatores como manutenção, durabilidade, acesso para manutenção, materiais e estruturas, método de conversão de energia e principalmente estudos do potencial energético disponível sazonalmente na região devem sempre ser levados em conta.

1.1 Objetivo geral

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral o de estimar o potencial energético das ondas na costa do RS a partir da análise de dados oceanográficos medidos entre

os anos de 2013 e 2017 na praia de Tramandaí-RS. Tais dados foram obtidos através de outros trabalhos e são necessários para, a partir de análises e estudos estatísticos, compreender o clima de ondas e estipular, mediante equações matemáticas, o potencial teórico encontrado para dadas posição geográfica e profundidade. A partir destas informações, será discutido sobre quais dispositivos conversores de energia das ondas se adequam melhor ao clima de ondas local.

1.2 Objetivo específico

Pretende-se, neste trabalho: 1- Gerar gráficos que representam o estado de mar com os dados obtidos nos períodos analisados; 2- Levantar hipóteses e avaliar possíveis correlações entre as variáveis analisadas; 3- Através das correlações avaliadas, definir a potência teórica em kW/m de forma sazonal; 4- Comparar diferentes tipos de dispositivos conversores de energia das ondas e analisar quais são os mais adequados para o clima de ondas encontrado no local.

2. REVISÃO CONCEITUAL

2.1 Teoria das ondas

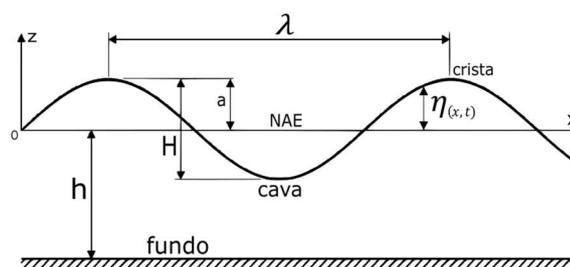
As ondas oceânicas são resultado da combinação de uma variedade de perturbações e de forças de restauração. Marés, que são ondas de período muito extenso, e tsunamis, que são causadas por perturbações como terremotos, são também consideradas ondas. No entanto, as ondas com maior interesse para obtenção de sua energia são as ondas de gravidade, que são formadas pelas forças resultantes da interação entre os ventos e a superfície do oceano.

Ondas oceânicas são bem entendidas e bem descritas na literatura, contudo, é difícil descrever, reproduzir e prever corretamente as condições do ambiente em alto-mar devido ao grande número de parâmetros que influenciam seu movimento. Pressão atmosférica, velocidade do vento, temperatura, umidade, densidade, salinidade da água, profundidade e composição do leito oceânico são alguns dos parâmetros que têm influência no movimento das ondas oceânicas (Pecher et al., 2017).

2.1.1 Equacionamento matemático

Uma onda comum pode ser representada pela variação senoidal da sua superfície livre. Algumas propriedades definem esta onda, a saber: a altura H , que é a distância entre a crista e a cava; o comprimento de onda λ , que é a distância entre dois pontos similares na onda; o período T , sendo o tempo em que a onda leva para se repetir. Na Figura 4, NAE representa o nível de água estático e h é a profundidade em relação ao NAE. O símbolo η representa o deslocamento da superfície em relação ao NAE em função do tempo t e da coordenada x .

Figura 4 - Sistema de coordenadas e nomenclatura da onda.



Fonte: Adaptado de Carneiro (2007).

A lei da conservação da massa afirma que a mesma não pode ser criada ou destruída. Isso leva à equação da continuidade (Eq. (1)):

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (1)$$

onde $\vec{v}(u, w)$ é o vetor de velocidades das partículas, sendo u a componente na horizontal em relação a x , e w a componente na vertical em relação a z , e ρ é a massa específica do fluido.

Ao considerar a água como um fluido incompressível, a Equação 1 se reduz à divergência nula (Eq. (2)):

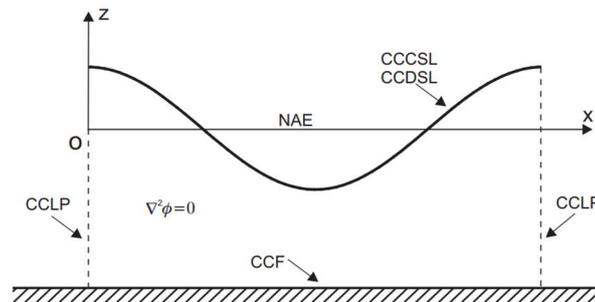
$$\vec{\nabla} \cdot \vec{v} = 0 \quad (2)$$

O potencial de velocidades ϕ é obtido ao supor que o fluido possui movimento irrotacional, o que resulta na existência de um potencial de velocidades que satisfaz a equação da continuidade, que leva à Equação (3), também conhecida como equação de Laplace:

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (3)$$

Carneiro (2007) demonstra a utilização de condições de contorno no problema estudado para determinar o potencial de velocidades. Na Figura 5 são indicadas as condições de contorno no caso de ondas de gravidade.

Figura 5 - Condições de contorno em ondas de gravidade.



Fonte: Carneiro (2007)

A condição de contorno de fundo (CCF) considera o fundo horizontal e impermeável, no qual a velocidade vertical é nula:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{em} \quad z = -h \quad (4)$$

A condição de contorno cinemática na superfície livre (CCCSL) impõe que a componente normal da velocidade das partículas da superfície é igual a velocidade da componente normal do contorno do fluido:

$$-\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \eta}{\partial t} - \frac{\partial \phi \partial \eta}{\partial x \partial x} \quad \text{em} \quad z = \eta(x, t) \quad (5)$$

, enquanto a condição de contorno dinâmica na superfície livre (CCDSL) diz que na superfície livre a pressão relativa é constante, assim:

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}\left[\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\phi}{\partial z}\right)^2\right] + g\eta = f(t) \quad \text{em} \quad z = \eta(x, t) \quad (6)$$

que é a integral da Equação de Euler. Expandindo a Eq. (6) em $z = 0$ por série de Taylor, considerando apenas a parcela linear, uma vez que a onda é considerada de pequena amplitude e que a profundidade é grande, essa condição de contorno pode ser expressa como:

$$\eta = \frac{1}{g}\left[\frac{\partial\phi}{\partial t}\right]_{z=0} \quad (7)$$

Fazendo o mesmo na CCCSL, esta condição de contorno é reduzida para:

$$-\frac{\partial\phi}{\partial z}\Big|_{z=0} = \frac{\partial\eta}{\partial t} \quad (8)$$

Por fim, a condição de contorno lateral periódica (CCLP) tanto espacial quanto temporal, isto é, a periodicidade do escoamento:

$$\begin{aligned} \phi(x, t) &= \phi(x + L, t) \\ \phi(x, t) &= \phi(x, t + T) \end{aligned} \quad (9)$$

Dean e Dalrymple (1991) demonstram a equação do potencial de velocidades de uma onda linear:

$$\phi(x, z, t) = \frac{Hg \cosh[k(h + z)]}{2\sigma \cosh(kh)} \text{sen}(kx - \sigma t) \quad (10)$$

e a equação da superfície livre, então, é obtida substituindo o potencial de velocidades na Equação 7:

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t) \quad (11)$$

onde x é a coordenada horizontal (m) e t o tempo (s). Além disso, o número de onda k e a frequência angular de onda σ são obtidos das seguintes relações:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (12)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \quad (13)$$

Finalmente, substituindo as expressões do potencial de velocidades (Equação 10) e da variação da superfície livre (Equação 11) na condição de contorno CCCSL (Equação 8), obtém-se a chamada Equação da dispersão, que descreve a forma com que um campo de ondas constituído de várias frequências se separaria ou dispersaria devido a diferentes celeridades das várias frequências e pode ser escrita como:

$$\lambda = \frac{gT_e^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda}\right) \quad (14)$$

2.1.2 Potencial energético

Para todas as ondas progressivas e periódicas, a velocidade de propagação da crista da onda C , ou celeridade, é definida pela Eq. (15):

$$C = \frac{\lambda}{T} = \frac{\sigma}{k} \quad (15)$$

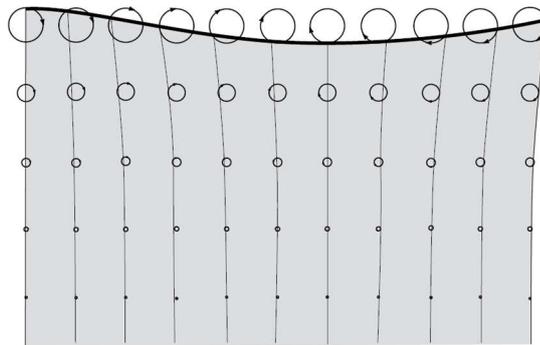
A energia total de uma onda linear é a soma da energia cinética E_C , proveniente do resultado de uma parcela dos movimentos das ondas, e da energia potencial E_P , resultado do deslocamento de massa e da posição de equilíbrio contra o campo gravitacional. Tais energias são equivalentes e a energia total em um comprimento de onda por unidade de largura é expressa por:

$$E_T = E_C + E_P = \frac{\rho g H^2}{16} + \frac{\rho g H^2}{16} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (16)$$

É fácil de se observar o movimento das partículas subindo e descendo conforme as ondas viajam pela água. Quando se observa mais atentamente em pequenos objetos flutuantes é possível notar que as partículas também se movimentam para frente e para trás. Esses dois movimentos ocorrem de forma simultânea, fazendo o que se chama de movimento orbital das partículas. Mais especificamente, na crista da onda, a direção do movimento das partículas é igual à direção de propagação da onda e na cava segue a direção contrária.

A profundidade da água também é fator de influência das velocidades orbitais das partículas de água em uma onda. Conforme uma onda se propaga, tanto as partículas superficiais quanto as partículas mais abaixo estão em movimento, porém quanto maior a profundidade, menor é o seu movimento. A Figura 6 mostra tal comportamento. Cada círculo é $1/9$ do comprimento de onda do círculo imediatamente acima. O perfil da onda avança da esquerda para a direita.

Figura 6 - Trajetórias das partículas de água em várias profundidades de uma onda viajando em águas profundas.

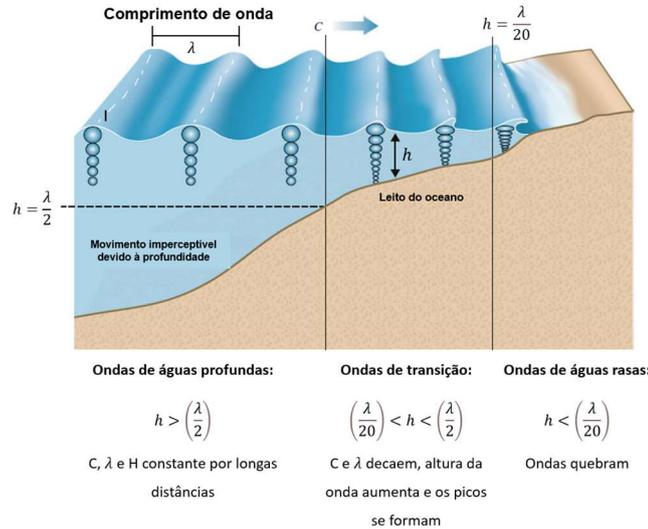


Fonte: World Meteorological Organization (2018).

À medida em que a onda alcança regiões do escoamento de menor profundidade, esta começa a interagir com o leito e o movimento orbital é alterado. A Figura 7 mostra os limites de profundidade (h) para tratamento das ondas em águas profundas, de transição e rasas. Observa-se que quanto mais raso o leito do oceano fica, mais elípticas as órbitas das partículas

se tornam. Tal fator é muito importante para determinação dos parâmetros das ondas, os quais são utilizados para o cálculo da potência de frente de onda.

Figura 7 - Movimento das partículas de ondas em águas profundas, de transição e rasas.



Fonte: Adaptado de Pecher et al. (2017)

O fluxo de energia F transportado por uma onda linear periódica é a quantidade de energia que uma onda transporta em um plano vertical e perpendicular à direção de propagação da onda por uma unidade de comprimento. Esse fluxo pode ser calculado pela Eq. (17):

$$F = EC_g \quad (17)$$

onde E é a densidade de energia, obtida pela Equação 16 e C_g é a velocidade de grupo, que representa a velocidade com que essa densidade de energia viaja e pode ser obtida por:

$$C_g = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] C \quad (18)$$

Assim, o fluxo de energia para uma onda pode ser calculado pela expressão:

$$F = \frac{\rho g}{16} H^2 \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] C \quad (19)$$

A grandeza Fluxo de Energia é, por definição, dimensionalmente equivalente à Potência. Portanto, esse Fluxo pode ser definido em unidades de Watts por metro de crista [W/m] (Melo, 2012). A expressão acima considera uma onda senoidal de mesma frequência (monocromática), porém as condições oceanográficas naturais dificilmente se aproximam desta situação. Geralmente é observado um estado de mar composto por ondulações com diferentes características (altura, período, direção e fase) chamado irregular.

Os parâmetros estatísticos de interesse que melhor caracterizam o estado de mar natural e que são utilizados para o cálculo do potencial energético consistem na altura significativa (H_s) e no período médio de energia (T_e), em que H_s é obtida através da média do terço superior das alturas encontradas ordenadas de menor para maior. Já o período médio de energia (T_e) representa o período das potências dominantes, interpretado fisicamente como o período de uma única onda senoidal com a mesma energia do estado de mar, dado pelo pico no espectro de potência (De Assis, 2010; Melo, 2012).

Portanto, uma outra forma de representar o potencial de uma onda do mar pode ser em função da altura significativa (H_s) e do período de energia (T_e). Assim, a Equação 19 pode ser reescrita, da seguinte forma (Lisboa et al., 2017):

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H_s^2 T_e \left(1 + \frac{2k_e h}{\sinh(2k_e h)} \right) \tanh(k_e h) \quad (20)$$

onde k_e é o número de onda para o período de energia e h é a profundidade. A densidade do fluido ρ é de 1025 kg/m^3 e a aceleração da gravidade g é de $9,81 \text{ m/s}^2$.

2.2 Matrizes de potência dos dispositivos

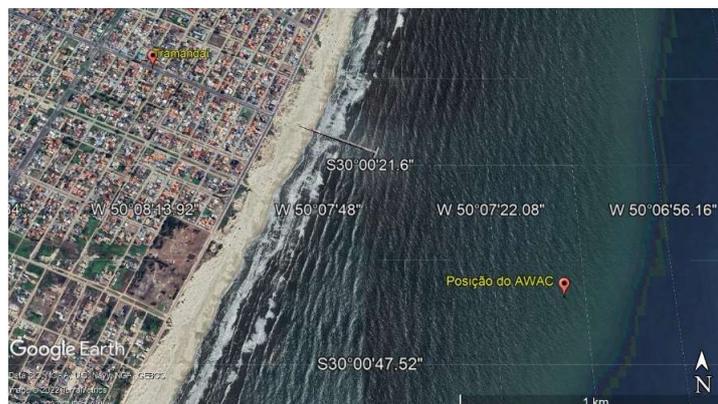
Matrizes de potência para dispositivos conversores de energia das ondas são boas alternativas para fins de comparação entre a aplicação de diferentes dispositivos dado um estado de mar onde os parâmetros H_s , T_p e T_e são conhecidos. Tais matrizes encontram-se em diversos estudos realizados por pesquisadores da área (Babarit et al., 2012; Silva et al., 2013; Veigas et al., 2015). Os dispositivos cujas matrizes de potência foram obtidas na literatura a serem comparados são: *Pelamis*, *Wave Dragon*, *Sea Slot-cone Generator (SSG)*, *Oyster*, *Aqua Buoy* e Coluna de Água Oscilante Flutuante (do inglês *Floating Oscillating Water Column*, ou *F-OWC*). Tais matrizes podem ser encontradas no Anexo A.

3. METODOLOGIA

3.1 Obtenção dos dados para o estado de mar

Os dados utilizados no presente trabalho foram obtidos pelo CECO/UFRGS¹ e disponibilizados para download na internet pelo portal da universidade Rede Ondas (“Tramandaí, RS - Rede Ondas”). Os mesmos foram obtidos através do dispositivo *Acoustic Wave and Current Profiler* (1-MHz Nortek/*AWAC*), instalado na praia de Tramandaí (Longitude: $50^\circ 07' 12,24''$ W, Latitude: $30^\circ 00' 39,42''$ S), como mostra a Figura 8.

Figura 8 - Posição geográfica do *AWAC* e litoral de Tramandaí.



Fonte: O autor.

Andrade et al. (2021) realizaram a aquisição dos dados em cinco diferentes períodos, como mostra a Tabela 1. Nas duas primeiras instalações, o dispositivo ficou a 12 m de

¹ CECO – Centro de Estudos de Geologia Costeira e Oceânica.

profundidades e nas seguintes, a 14 m. A distância entre os locais de instalação não foi superior a 400 m.

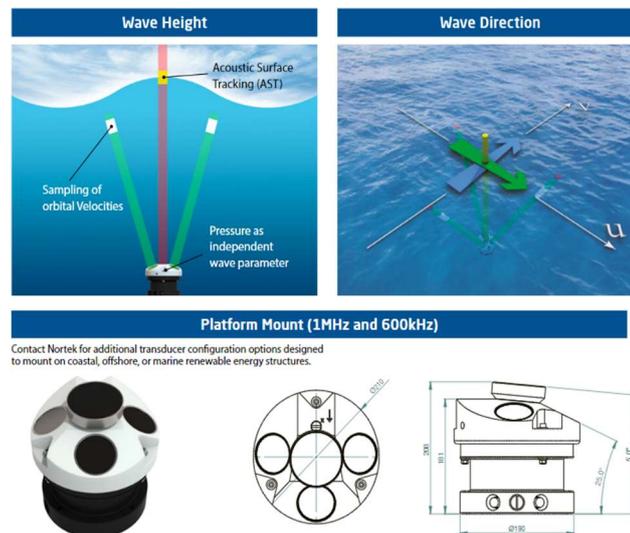
Tabela 1 - Dados das instalações do *AWAC*.

Instalação	Data de início	Data de fim	Estação	Profundidade (m)
#1	17/12/2013	13/03/2014	Verão	12
#2	24/06/2014	27/04/2015	Inverno/Primavera/Verão	12
#3	27/04/2015	30/07/2015	Outono	14
#4	19/01/2016	21/06/2016	Verão/Outono	14
#5	05/06/2017	09/08/2017	Outono/Inverno	14

Fonte: (Andrade et al., 2021)

Para estimar a altura das ondas H_s , o *AWAC* emite um sinal acústico vertical para a superfície do mar e recebe o eco via transdutor verticalmente posicionado. Um algoritmo interno do dispositivo, chamado de *Acoustic Surface Tracking (AST)*, faz a conversão do sinal para o seu sistema de armazenamento de dados. O período das ondas T_p é obtido de forma análoga. Já a direção das ondas é obtida através da combinação do *AST* com as velocidades orbitais. A Figura 9 ilustra como são feitas as medições dos dados e as dimensões do dispositivo, sem a plataforma de ancoragem ao solo.

Figura 9 - Sistema de medições e dimensões do dispositivo *AWAC*.



Fonte: *AWAC Technical Specifications*. Disponível no site da fabricante Nortek ².

Para caracterizar o estado de mar, o aparelho realiza medições da superfície d'água com frequência de 1 Hz durante um período de 10-20 min. A partir deste registro o sistema realiza uma pré-análise obtendo a altura significativa de onda, o período de pico e a direção da onda com precisão de < 1% do valor medido e resolução de 1 cm para H_s , escala de 0,5 s – 50 s para período de pico T_p e precisão de 2° e resolução de 0,1° para *Dir*.

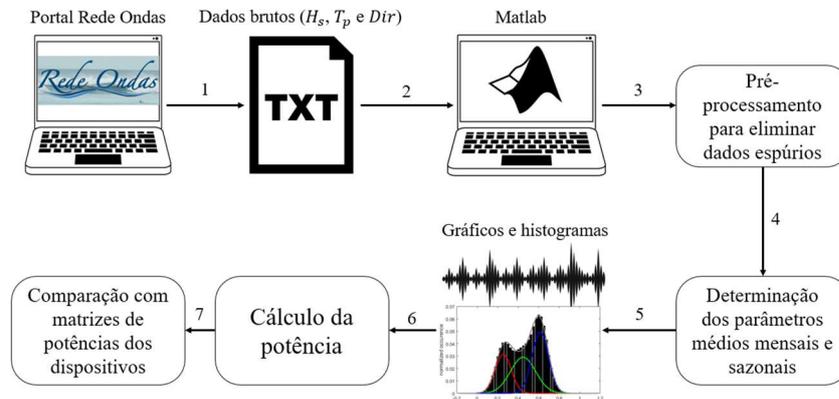
3.2 Tratamento dos dados

² <https://www.nortekgroup.com/products/awac-1-mhz>

Os dados obtidos pelo AWAC e disponibilizados no portal Rede Ondas são arquivos de texto onde cada coluna representa uma variável e cada linha uma medição. Além disso, os arquivos são separados por ano e mês. Para facilitar o método empregado, todos os arquivos foram compilados para um arquivo único. É importante frisar que a frequência de medições durante a primeira instalação foi de 10 minutos, enquanto que nas instalações seguintes foi de 3 horas.

A Figura 10 exemplifica o fluxo do tratamento dos dados. No primeiro passo, os dados passam por uma rotina de processamento dentro do software de cálculos numéricos Matlab, na sua versão estudantil. O código criado retira os dados considerados espúrios e separa os dados por estações, meses e anos. Em seguida, são plotados gráficos de altura significativa, período de pico e direção de onda ao longo das estações analisadas. Histogramas das frequências para as direções de onda foram normalizados e curvas gaussianas foram ajustadas para que se observasse as principais direções em cada estação.

Figura 10 - Fluxo do tratamento dos dados.



Fonte: O autor.

Neste trabalho, o período médio de energia foi calculado como sendo 75% do período de pico, de acordo com a definição de Melo (2012), uma vez que os dados de medição disponibilizam somente o parâmetro T_p .

$$T_e = 0,75 T_p \quad (21)$$

Para realizar a estimativa da potência de cada estado de mar foi utilizada a Eq. (20). Para tanto, um outro procedimento foi necessário para calcular o número de onda (k), que depende do comprimento de onda (λ). Essa informação não está disponível nas medições e para tanto, criou-se uma função iterativa que utiliza a equação da dispersão (Equação 14):

$$\lambda = \frac{gT_e^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi h}{\lambda_0}\right) \quad (22)$$

onde λ_0 é uma estimativa inicial para o comprimento de onda. O resultado do comprimento de onda é comparado com a estimativa inicial a cada nova iteração e o processo é interrompido quando a condição $0 < \lambda - \lambda_0 < 10^{-4}$ for satisfeita.

Os resultados dos parâmetros médios $\overline{H_s}$, $\overline{T_e}$, e $\overline{T_p}$ obtidos em cada mês são utilizados como dados de entrada nas matrizes de potência dos dispositivos. Contudo, alguns meses se repetem em diferentes anos de medições. Um ano representativo é criado para a construção da Tabela 3, que faz a comparação da potência fornecida por diferentes dispositivos em cada mês

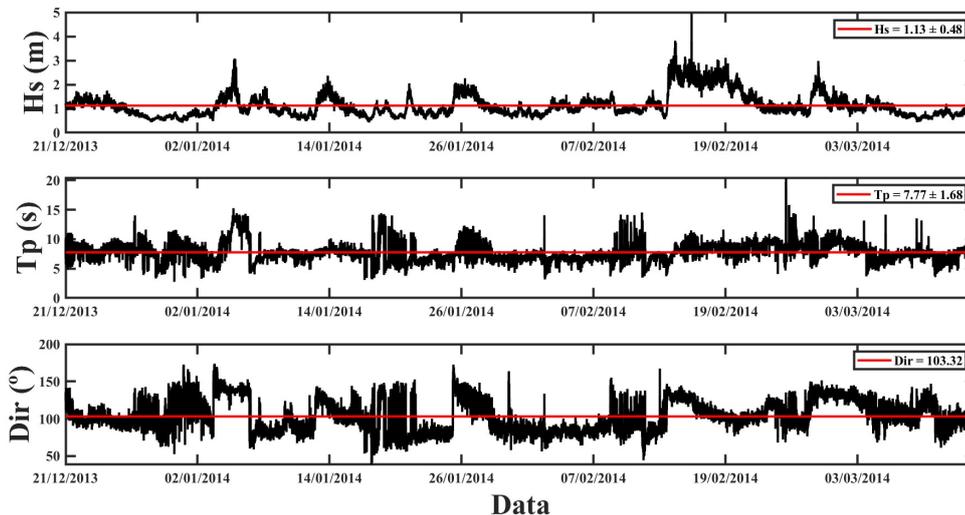
desse ano representativo. Os valores dos parâmetros são medianizados naqueles meses onde a aquisição de dados foi obtida em mais de um ano.

4. RESULTADOS

4.1 Estado de mar

Os dados para o verão de 2014 são aqui tratados e serviram de base para se aplicar o processamento de dados para todos os outros períodos de interesse nos quais disponibilizou-se medidas. Para este período, a Figura 11 apresenta os dados de altura significativa H_s (m), período de pico T_p (s) e direção de onda Dir ($^\circ$). Os dados foram adquiridos no período entre os dias 17 de dezembro de 2013 a 13 de março de 2014. A altura significativa média foi de $1,1 \pm 0,5$ m representada pela linha vermelha enquanto o período de pico médio das ondas foi de $7,7 \pm 1,7$ s.

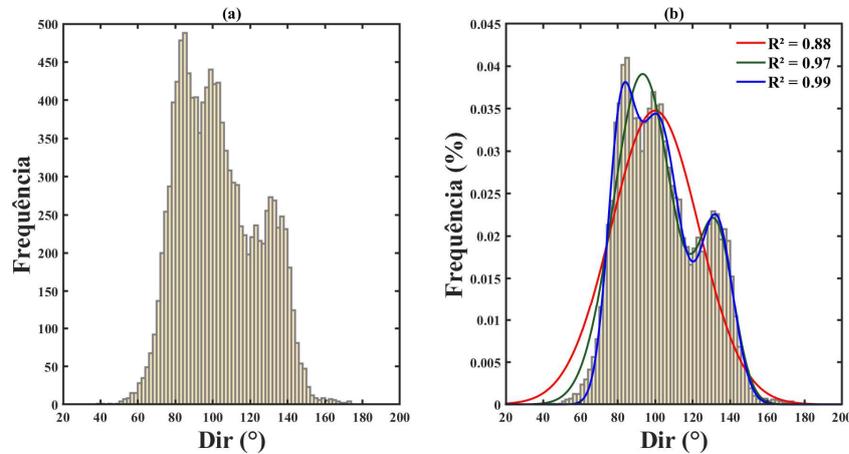
Figura 11 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2014.



Fonte: O autor.

Observando o gráfico de direção de onda, é possível notar certa alternância com prevalência das direções aproximadas de 100° e 125° . Portanto, pode-se identificar a hipótese de que certas direções preferenciais das ondas poderiam ser identificadas. Para se investigar essa hipótese, foi gerado um histograma entre os limites 20° e 200° com barras divididas a cada 2° , conforme mostrado na Figura 12. O gráfico da Figura 12 (a) traz a frequência, ou número de ocorrências, para as direções identificadas no período observado. O gráfico da Figura 12 (b) traz os mesmos valores de frequência, agora normalizados em função do número total de ocorrências, apresentando valores em porcentagem. Assim, assumindo que os eventos de direções de ondas constituem um processo gaussiano, buscou ajustar curvas gaussianas ao histograma normalizado, empregando 1, 2 e 3 funções, conforme identifica a Figura 12 (b). Este procedimento permite identificar propriedades estatísticas que caracterizam as propriedades dominantes das ondas durante o período desejado. Para este período de observação, a curva que obteve o melhor ajuste foi a gaussiana de três termos (em azul), com coeficiente de regressão $R^2 = 0,99$ e raiz quadrada do erro médio $RMSE = 14 \times 10^{-4}$.

Figura 12 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



Fonte: O autor.

Os resultados obtidos para altura significativa média, período de pico médio, direção de onda de maiores ocorrências e direções dos picos da curva gaussiana para todas as estações analisadas, são apresentados na Tabela 2 (Os histogramas para as outras estações objeto deste estudo são trazidas no Apêndice A).

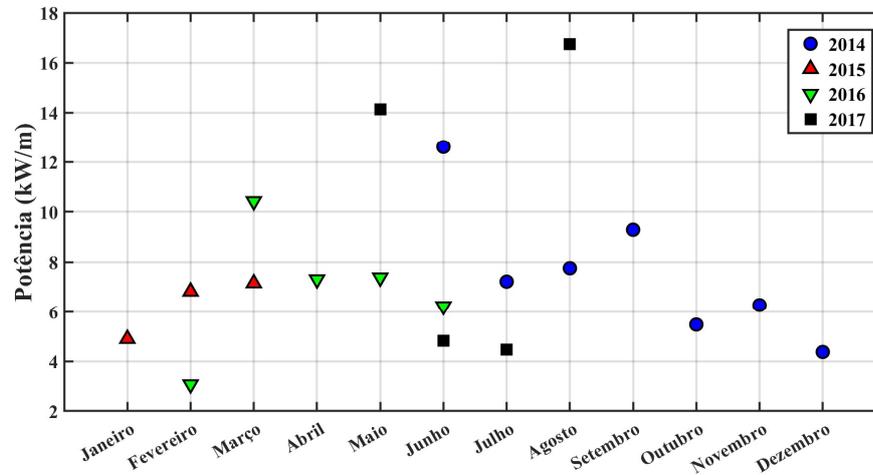
Tabela 2 - Valores de altura significativa média, período de pico médio, direção de onda de maiores ocorrências e direções gaussianas.

	\bar{H}_s (m)	\bar{T}_p (s)	\overline{Dir}	Direções por ajuste gaussiano
Verão 2014	$1,1 \pm 0,5$	$7,7 \pm 1,7$	$93,1^\circ \pm 22,3^\circ$	ENE, ESE e SE
Inverno 2014	$1,3 \pm 0,4$	$9,8 \pm 2,3$	$130,1^\circ \pm 8,3^\circ$	E e SE
Primavera 2014	$1,2 \pm 0,4$	$8,0 \pm 1,8$	$91,3^\circ \pm 14,6^\circ$	E e SE
Verão 2015	$1,2 \pm 0,4$	$8,4 \pm 1,8$	$103,5^\circ \pm 7,8^\circ$	E e SE
Verão 2016	$1,1 \pm 0,5$	$8,4 \pm 2,0$	$105,1^\circ \pm 12,3^\circ$	E, ESE e SE
Outono 2016	$1,2 \pm 0,5$	$10,0 \pm 2,6$	$139,1^\circ \pm 5,0^\circ$	ESE e SE
Outono 2017	$1,4 \pm 0,6$	$9,8 \pm 2,1$	$156,6^\circ \pm 4,1^\circ$	ESE e SSE
Inverno 2017	$1,4 \pm 0,7$	$9,4 \pm 2,7$	$104,8^\circ \pm 7,8^\circ$	E, SE e SSE

As estações analisadas com maiores alturas significativas médias foram o inverno e outono de 2017 com 1,4 m nas duas. A maior média dos períodos de pico aconteceu durante o outono de 2016 com 10 s e outono de 2017, empatado com o inverno de 2014, com 9,8 s nas duas estações. Em primeira análise, imagina-se que estas estações são as que possuem maior potencial energético, porém o desvio padrão alerta para a não homogeneidade dos dados.

Além da análise sazonal para o estado de mar, foi possível estimar a potência para cada mês dentro da série de dados através da Equação 20. A Figura 13 mostra a potência média para cada mês em diferentes anos. Os meses nos quais a aquisição dos dados não aconteceu para todos os dias não foram utilizados, pois a falta de informação compromete o cálculo da potência média.

Figura 13 - Potência (kW/m) disponível em cada mês dos dados analisados.



Fonte: O autor.

Somando-se as potências médias e considerando-se os maiores e menores valores obtidos em cada mês, tem-se que as potências máxima e mínima anual são 105,5 kW/m e 72,3 kW/m, respectivamente. A potência média anual máxima é 8,79 kW/m e a mínima 6,02 kW/m. Estes valores estão na mesma ordem de grandeza aos encontrados por Lisboa et al. (2017). É possível perceber um cenário atípico pelos dados observando a alta potência obtida durante o mês de agosto de 2017, quando comparado ao ano de 2014. Isto se deve a chegada de uma forte ressaca (Aires, 2017) que acentuou o clima de ondas naquele período. Esse evento resultou no crescimento da altura significativa para ondas entre 3 a 4 m e do período de pico para 12 s, durante a primeira quinzena, como mostra a Figura A.13, do Apêndice A.

4.2 Análise das Matrizes de Potência

Dentre os dispositivos conversores de energia das ondas analisados, o *SSG* e *Wave Dragon*, ambos de galgamento, são os que mais chamam a atenção por suas matrizes de potências, apresentadas nos Anexos A-B. O primeiro pode gerar 1.965 kW para ondas de até 1,5 m e período de energia de 11 s e tem capacidade máxima de 20.000 kW. Já o segundo, para a mesma altura, mas agora utilizando o período de pico, pode gerar 1.477 kW e sua capacidade máxima fica em 5.900 kW. Para os dois casos, percebe-se que incrementos nos parâmetros propiciam o aumento da potência, contudo, ao olhar unicamente para cada parâmetro nota-se que o aumento de H_s tem maior influência na potência do que T_e para ambos os conversores.

Apesar de ambos os dispositivos terem o mesmo princípio de funcionamento, eles diferem no tipo de instalação. O *SSG* deve ser ancorado na região costeira, portanto é um dispositivo *onshore*, enquanto que o *Wave Dragon* é um dispositivo flutuante *offshore* que fica preso ao fundo do mar em águas relativamente profundas. A principal vantagem do *SSG* consiste em sua robustez, baixo custo e possibilidade de ser incorporado em quebra-mares (vários módulos lado a lado) ou em outras estruturas costeiras, permitindo, inclusive, divisão dos custos para implementação (Margheritini et al., 2009). O *Wave Dragon* é um dispositivo que pode ter diferentes tamanhos, possui sistemas que possibilitam ajustes para melhor eficiência, dependendo da situação, e é de fácil acesso para manutenção (Kofoed et al., 2006).

Para a condição de mar analisada, o dispositivo *Pelamis* possui geração máxima de 83 kW de acordo com sua matriz de potências, apresentada no Anexo C. A partir da sua matriz de potência, percebe-se uma grande dependência dos parâmetros H_s e T_e . Esse tipo de dispositivo é mais adequado em grandes profundidades devido ao grande comprimento de sua estrutura e

a necessidade de ondas mais energéticas. A construção de uma usina de geração de energia através de uma sequência deste dispositivo requer grande espaço para instalação, o que o torna não preferível no quesito “área ocupada” (Veigas et al., 2015).

O dispositivo *Oyster* necessita de grandes alturas de onda para seu melhor desempenho, de acordo com sua matriz de potência, apresentada no Anexo D. Tal dispositivo é capaz de gerar 291 kW a partir de ondas com altura significativa de 4 m e período de energia de 6 s. Contudo, para o estado de mar analisado o fornecimento de energia é de apenas 102 kW. A principal vantagem desse dispositivo é a profundidade de instalação de 12 m, o que o torna mais acessível para instalação e remoção em caso de manutenção.

O Anexo E apresenta a matriz de potência do *Aqua Buoy*, um dispositivo de corpo oscilante flutuante ancorado ao fundo do mar. Observa-se a potência máxima de 250 kW para a altura significativa de 4,5 m e período de pico de 9 s. Essa energia poderia ser atingida apenas durante o inverno e o outono, quando a altura das ondas é mais elevada, o que torna esse dispositivo menos atrativo para a região estudada.

O último dispositivo a ser analisado é o *F-OWC*, o qual é um dispositivo de coluna de água oscilante flutuante e ancorado ao fundo do mar. A matriz de potência para esse dispositivo encontra-se no Anexo F. Para o estado de mar obtido, a potência máxima chega em 84 kW, considerando as estações de inverno e outono. Esse dispositivo deve ser instalado em águas profundas, onde seu desempenho será melhor aproveitado. Assim, a potência fornecida pode ser elevada.

4.3 Comparação entre os dispositivos

A Tabela 3 apresenta a comparação entre as potências médias mensais, em kW, extraídas das matrizes de potência para cada dispositivo. Essa potência é estimada através da combinação entre os parâmetros altura significativa média e período de energia médio (ou de pico no caso dos dispositivos *Aqua Buoy* e *Wave Dragon*), em cada mês de um ano representativo.

Tabela 3 - Potências médias mensais (kW) para os diferentes dispositivos.

	P (kW)								
	\bar{H}_s (m)	\bar{T}_p (s)	\bar{T}_e (s)	<i>SSG</i>	<i>Wave Dragon</i>	<i>Pelamis</i>	<i>Oyster</i>	<i>Aqua Buoy</i>	<i>F-OWC</i>
Janeiro	1,1	8,7	6,5	645	360	42	34	12	20
Fevereiro	1,1	8,2	6,2	476	360	36	30	11	15
Março	1,4	8,9	6,7	1161	692	76	92	27	57
Abril	1,3	9,6	7,2	1250	609	83	38	26	57
Mai	1,5	10,2	7,7	1340	775	153	97	26	84
Junho	1,2	9,8	7,3	595	360	38	38	11	25
Julho	1,2	9,0	6,7	516	360	34	38	12	25
Agosto	1,5	10,4	7,8	1429	775	86	97	26	84
Setembro	1,5	9,0	6,7	1161	775	76	92	27	57
Outubro	1,2	7,7	5,8	476	468	29	30	11	15
Novembro	1,2	8,1	6,1	476	360	29	30	11	15
Dezembro	1,1	7,7	5,8	476	414	29	30	11	15
Anual				10001	6308	711	646	211	469

5. CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos entre os anos 2013 a 2017, foi possível compreender melhor o comportamento do mar da praia de Tramandaí através de gráficos representando altura significativa, período de pico e direção principal de forma sazonal e anual. Avalia-se, também, a alternância entre algumas direções principais de ondas utilizando histogramas de frequências e curvas gaussianas, que puderam confirmar a hipótese. A maioria das ondas medidas são oriundas das direções entre Leste e Sudeste. O estudo mostra que os valores de altura significativa são relativamente baixos, como era esperado, devido à baixa profundidade em que os dados foram medidos. Os meses em que se obteve maior energia das ondas foram aqueles dos períodos de inverno e outono, contendo as maiores alturas significativas médias. A potência média calculada em um ano representativo, em kW por metro de frente de onda, é máxima de 8,79 e mínima de 6,02. Esses resultados são condizentes com o estudo realizado por Lisboa et al. (2017) via modelagem numérica para a mesma região.

A comparação entre os diferentes dispositivos conversores de energia das ondas através de suas matrizes de potência traz indicadores daqueles que melhor se adequam à região estudada. Todavia, os resultados trazem incertezas, uma vez que se utiliza a união de dois valores médios para estimar a potência do dispositivo. Devido a esse motivo, optou-se pela análise mensal da potência, de forma a amenizar a grande variabilidade que resultaria de uma análise sazonal neste caso.

Percebe-se a superioridade dos dispositivos *SSG* e *Wave Dragon*, ambos de galgamento, em relação ao demais. A principal diferença do *SSG* em relação ao *Wave Dragon* é a dificuldade para sua instalação, que necessita de uma grande estrutura a ser construída. Por outro lado, o dispositivo *Wave Dragon*, apesar de ter menor potencial, é de instalação mais fácil, uma vez que se trata de um dispositivo flutuante.

Propõem-se, para projetos futuros, uma análise computacional que possibilite avaliar o clima de ondas em diferentes profundidades e para o período desejado, removendo as dificuldades que as medições realizadas em local impõem. Também, um estudo mais aprofundado da viabilidade econômica poderá ser realizado para que se tenha outros fatores de influência na decisão de projetos.

Finalmente, o presente trabalho contribui para a melhor compreensão das características do litoral de Tramandaí e se preocupa com a viabilização de um projeto energético mais limpo para a população de forma geral. Portanto, este trabalho motiva maiores e mais numerosos estudos sobre o tema abordado, de forma a se aproximar da concretização da implementação de uma alternativa complementar para a matriz energética do país.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON AIRES. Ressaca no litoral do Rio Grande do Sul deve seguir até domingo, com ondas de até 4 metros. <https://gauchazh.clicrbs.com.br/geral/noticia/2017/08/ressaca-no-litoral-do-rio-grande-do-sul-deve-seguir-ate-domingo-com-ondas-de-ate-4-metros-9866831.html>, ago. 2017.

ANDRADE, M. M. et al. Shallow-water circulation on the northern coast of Rio Grande do Sul, Brazil: A wave-dominated system. *Regional Studies in Marine Science*, v. 47, 1 set. 2021.

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

CARNEIRO, M. L. Desenvolvimento de dispositivo de geração e absorção ativa de ondas para tanque de ensaios de estruturas oceânicas. 13 nov. 2007.

DE ASSIS, L. E. Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul. Dissertação de Mestrado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, abr. 2010.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Advanced Series on Ocean Engineering. v. 2, jan. 1991.

KOFOED, J. P. et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable Energy*. Anais...fev. 2006.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, P. R. F.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. *Energy*, v. 121, p. 176–184, 15 fev. 2017.

LUOMI, M. Sustainable Energy in Brazil: Reversing Past Achievements or Realizing Future Potential: Sustainable Energy in Brazil iii. 2014.

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, maio 2009.

MELO, E. V Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (V SEMENGO). Rio Grande, Novembro de 2012. Nota sobre o cálculo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para uso em conversores de energia. 2012. Acesso em: 9 ago. 2022

MØRK, G. et al. Assessing the Global Wave Energy Potential. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, v. 3, p. 447–454, 22 dez. 2010.

PECHER, A.; KOFOED, J. P. *Handbook of Ocean Wave Energy*. Cham: Springer International Publishing, 2017. v. 7

RENEWABLE ENERGY AGENCY, I. *Global Energy Transformation: A Roadmap to 2050*. 2018.

SCRUGGS, J.; JACOB, P. Engineering: Harvesting ocean wave energy. *Science*, v. 323, n. 5918, p. 1176–1178, 27 fev. 2009.

SHADMAN, M. et al. Ocean renewable energy potential, technology, and deployments: A case study of Brazil. *Energies*, v. 12, n. 19, 25 set. 2019.

SILVA, D.; RUSU, E.; SOARES, C. G. Evaluation of Various Technologies for Wave Energy Conversion in the Portuguese Nearshore. *Energies* 2013, Vol. 6, Pages 1344-1364, v. 6, n. 3, p. 1344–1364, 5 mar. 2013.

TOLLEFSON, J. Climate science: A line in the sands. *Nature*, v. 500, n. 7461, p. 136–137, 2013.

Tramandaí, RS - Rede Ondas. Disponível em: <<https://redeondas.furg.br/pt/dados?id=25:tramandai&catid=8>>. Acesso em: 9 ago. 2022.

VEIGAS, M. et al. A proposed wave farm on the Galician coast. *Energy Conversion and Management*, v. 99, p. 102–111, 15 jul. 2015.

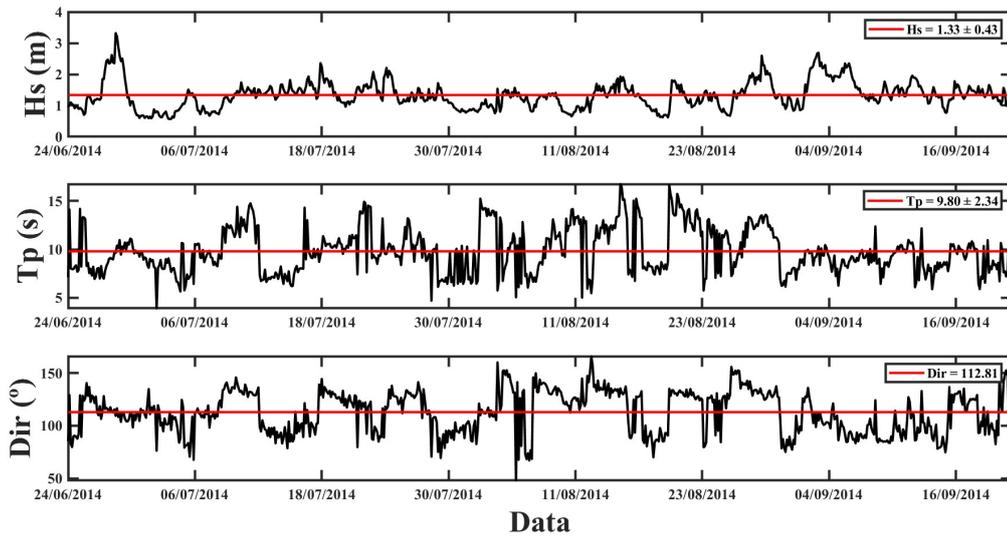
WANG, Z. L. Catch wave power in floating nets. *Nature* 2017 542:7640, v. 542, n. 7640, p. 159–160, 9 fev. 2017.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION (WMO). *Guide to Wave Analysis and Forecasting*. 2018.

APÊNDICE A

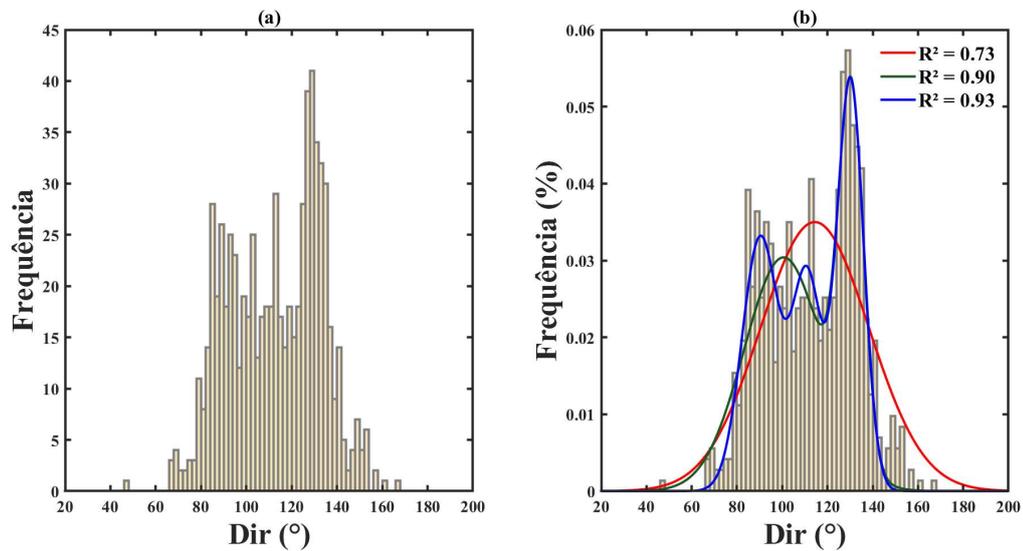
O Apêndice A apresenta os gráficos dos parâmetros H_s , T_p e Dir gerados através das medições realizadas durante estações que se seguiram após o verão de 2014 e também seus histogramas de frequência para as principais direções de onda.

Figura A. 1 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no inverno de 2014.



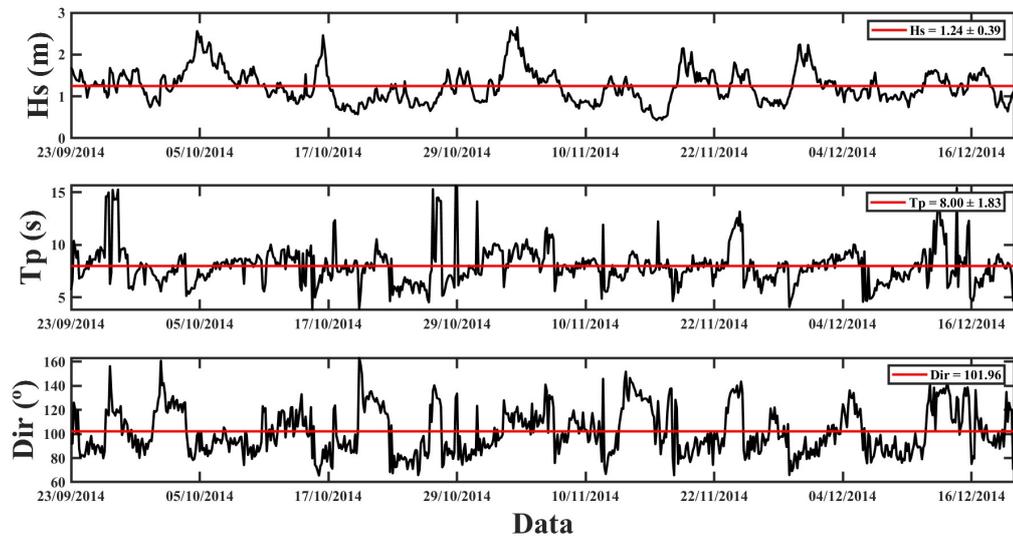
Fonte: O autor.

Figura A. 2 - Histogramas das direções principais de onda do inverno de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



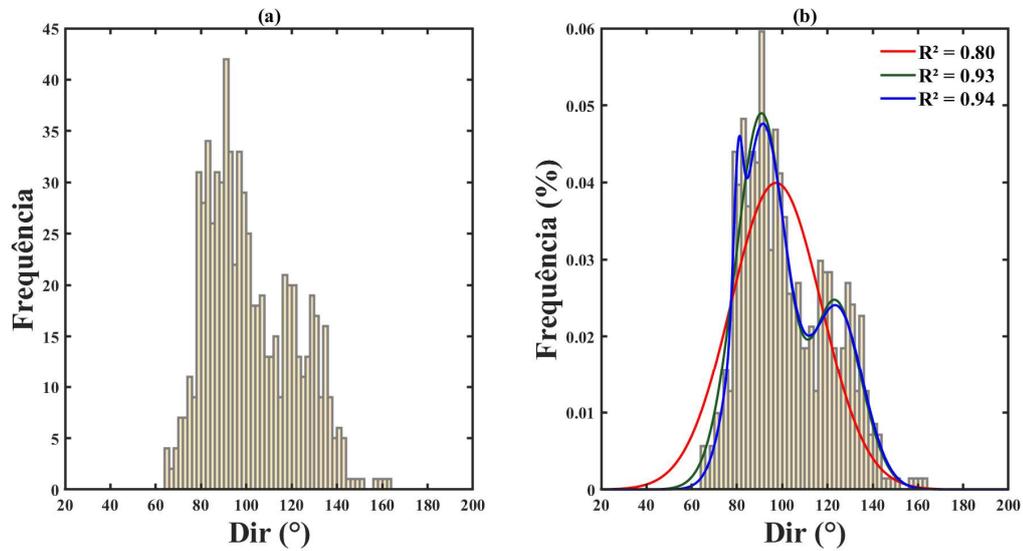
Fonte: O autor.

Figura A. 3 - Altura significativa, período de pico e direção de onda na primavera de 2014.



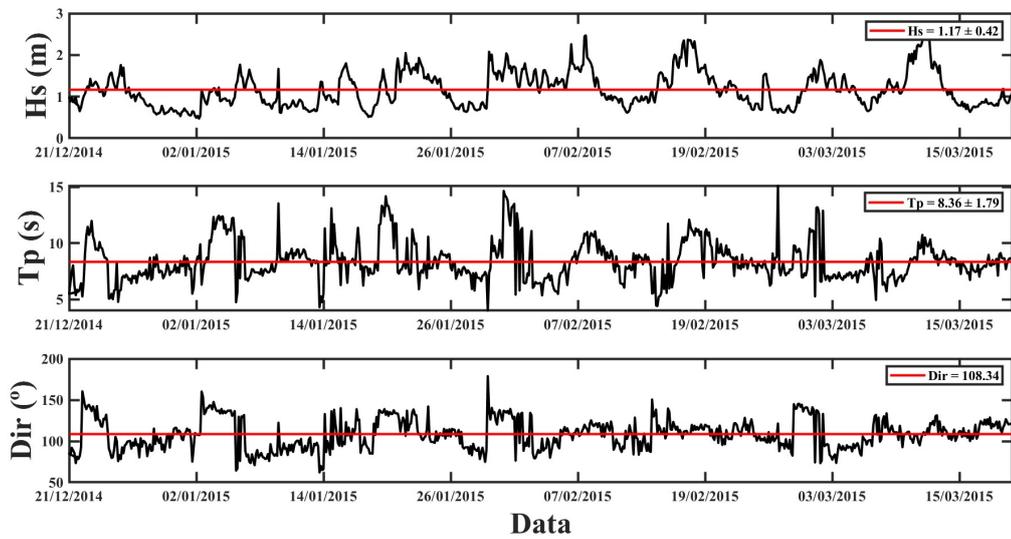
Fonte: O autor.

Figura A. 4 - Histogramas das direções principais de onda da primavera de 2014. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



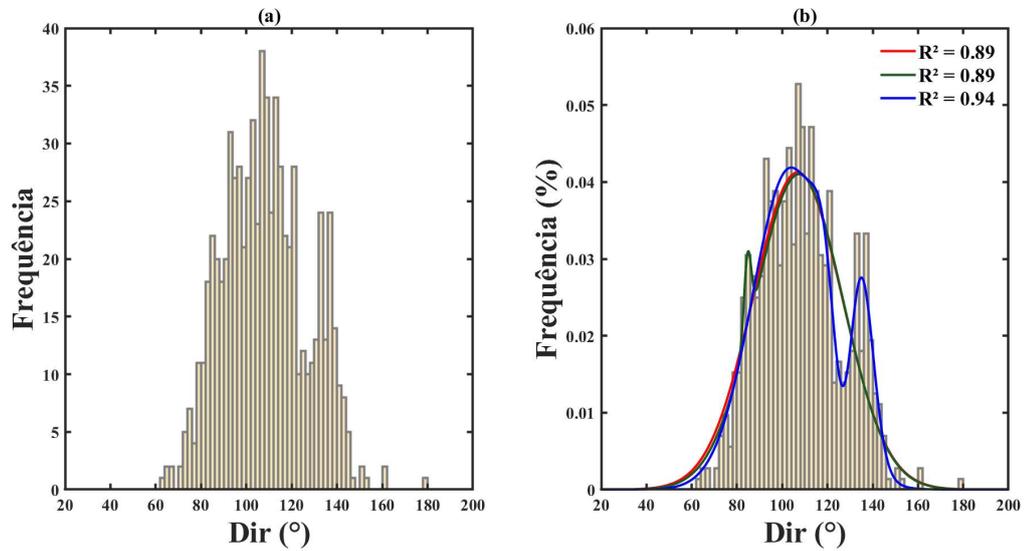
Fonte: O autor.

Figura A. 5 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2015.



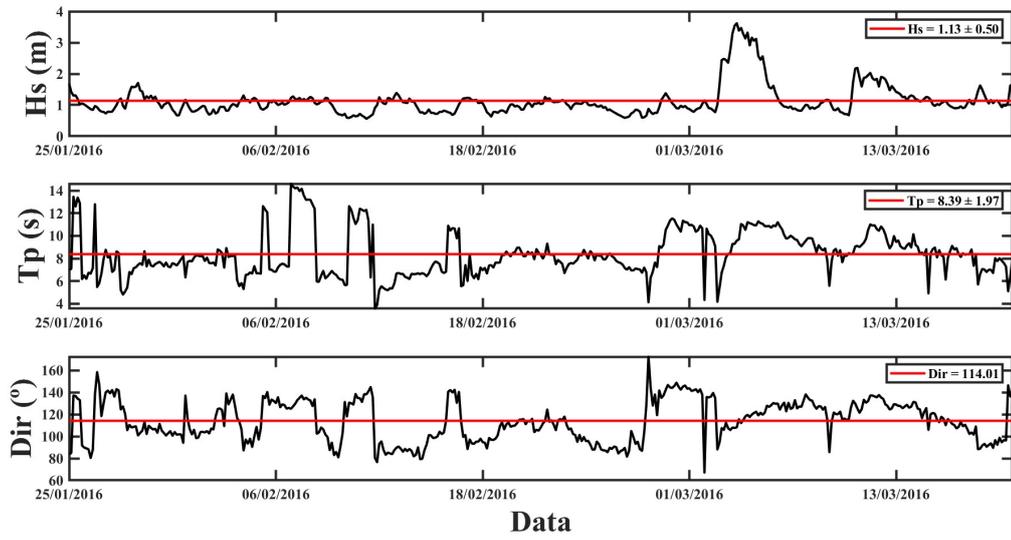
Fonte: O autor.

Figura A. 6 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2015. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



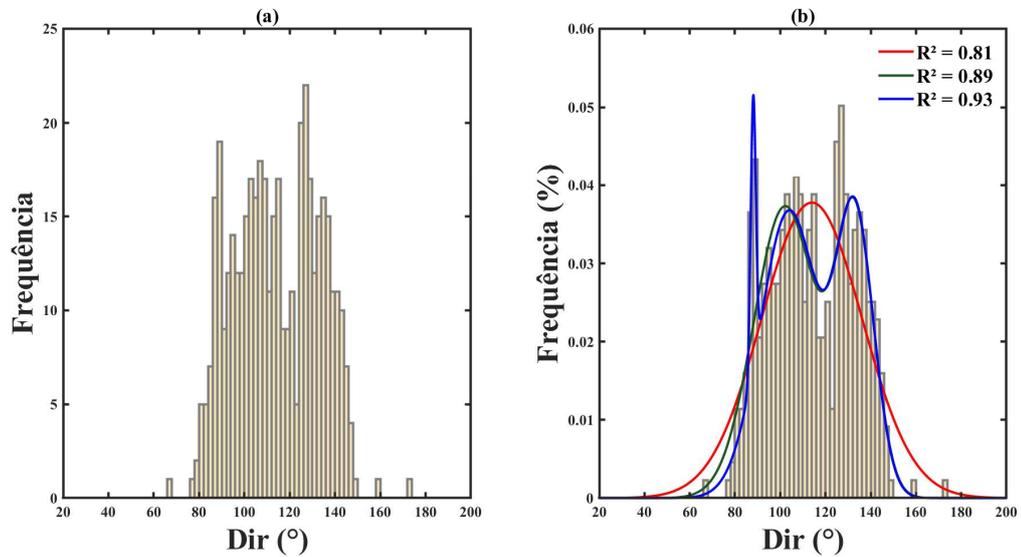
Fonte: O autor.

Figura A. 7 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no verão de 2016.



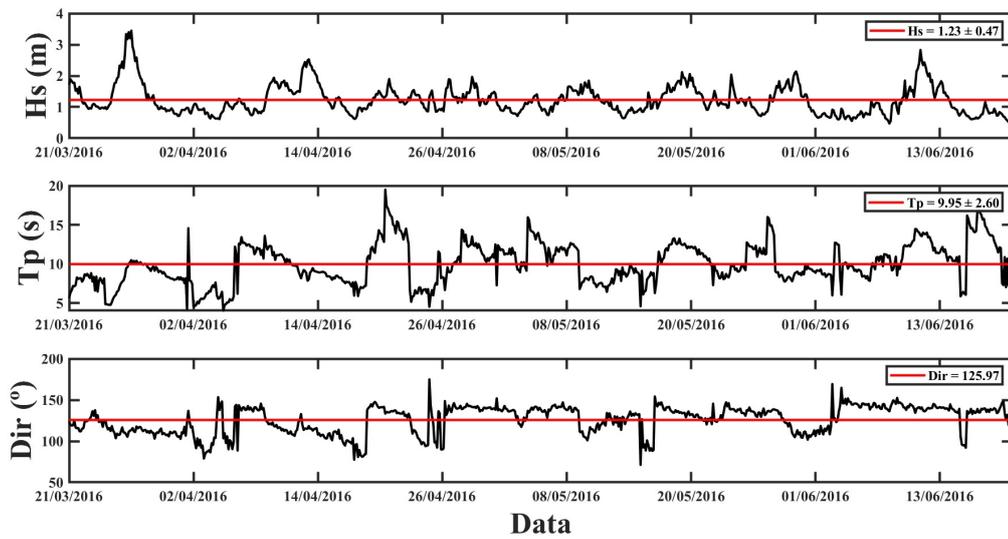
Fonte: O autor.

Figura A. 8 - Histogramas das direções principais de onda do verão de 2016. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



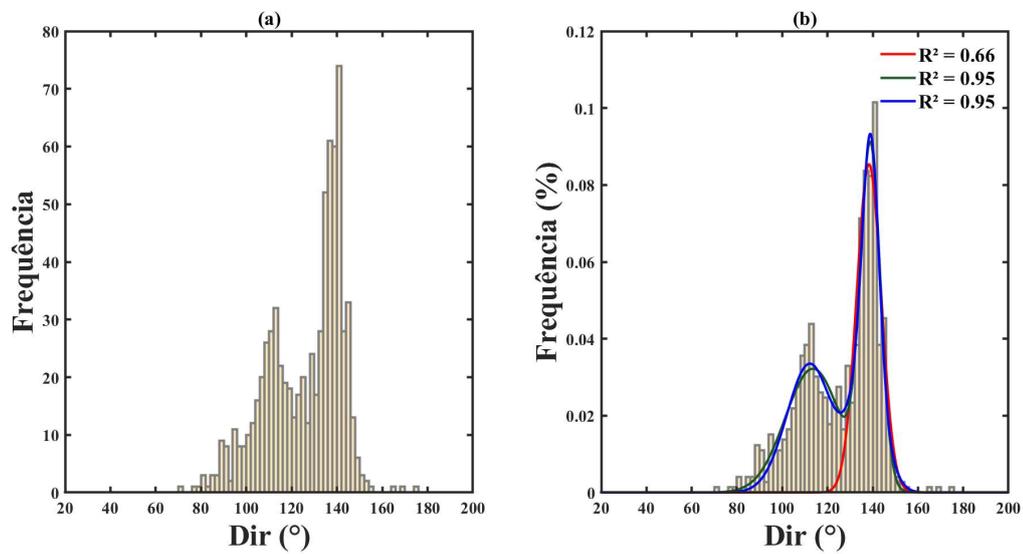
Fonte: O autor.

Figura A. 9 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no outono de 2016.



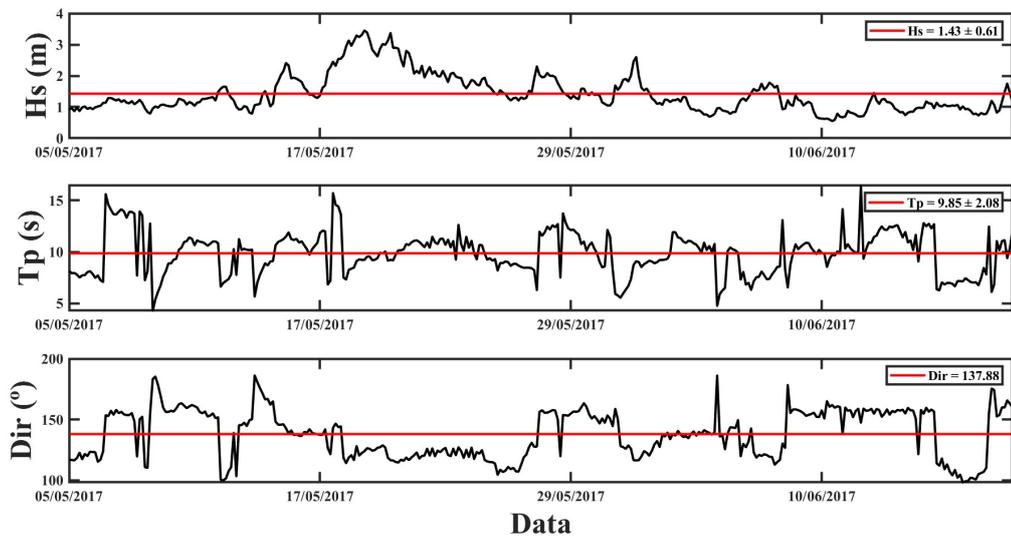
Fonte: O autor.

Figura A. 10 - Histogramas das direções principais de onda do outono de 2016. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



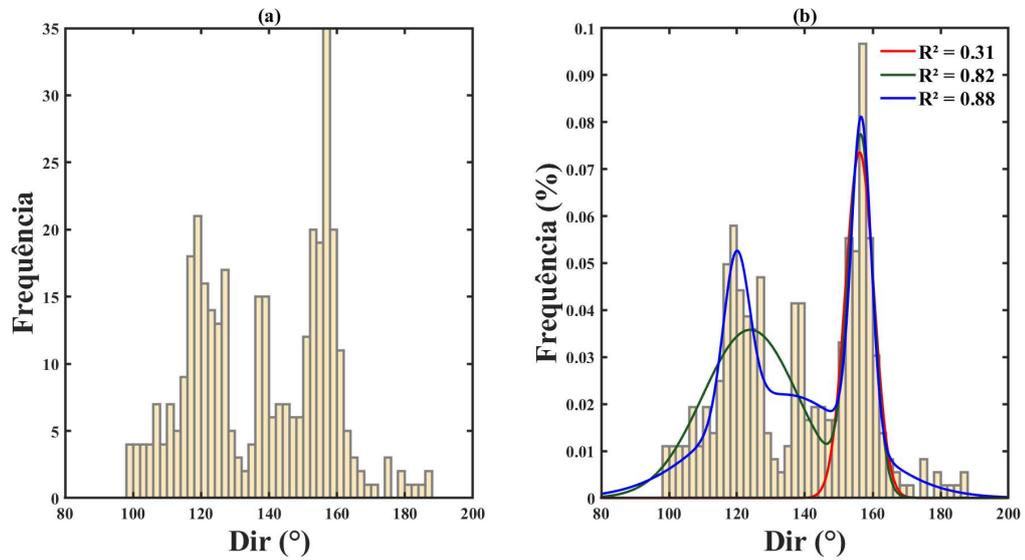
Fonte: O autor.

Figura A. 11 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no outono de 2017.



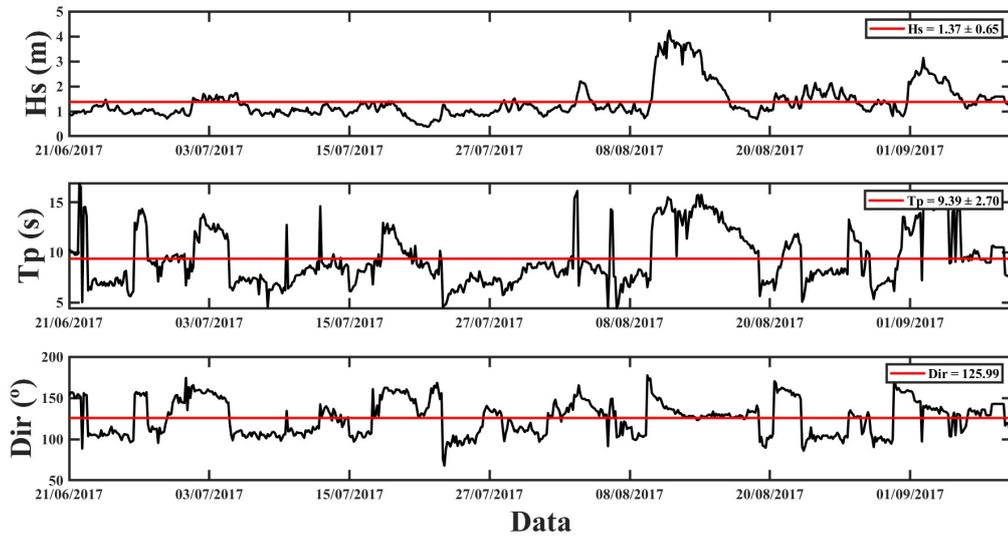
Fonte: O autor.

Figura A. 12 - Histogramas das direções principais de onda do outono de 2017. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



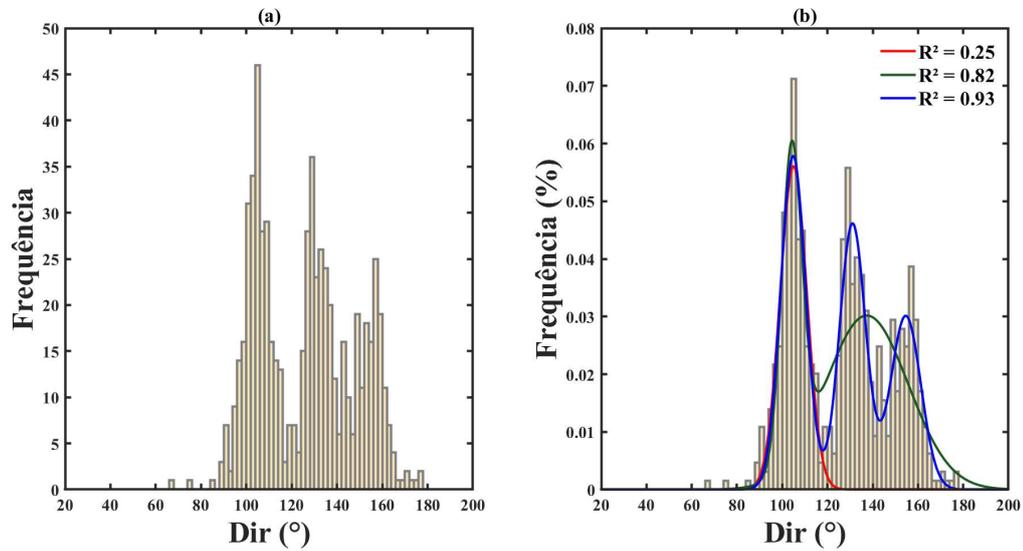
Fonte: O autor.

Figura A. 13 - Altura significativa, período de pico e direção de onda no inverno de 2017.



Fonte: O autor.

Figura A. 14 - Histogramas das direções principais de onda do inverno 2017. (a) Histograma de frequência. (b) Histograma de frequência normalizada.



Fonte: O autor.

ANEXO A - Matriz de potência (kW) do conversor *SSG*

		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	397	437	476	516	556	595	635	675	715	754	794	833	873	913
	1,5	893	982	1072	1161	1250	1340	1429	1518	1608	1697	1786	1875	1965	2054
	2	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	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	10210	10659	11183
	4	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	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	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	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	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000	20000

Fonte: Silva et al., (2013).

ANEXO B - Matriz de potência (kW) do conversor *Wave Dragon*

		Tp (s)												
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs (m)	1	160	250	360	360	360	360	360	360	320	280	250	220	180
	2	640	700	840	900	1190	1190	1190	1190	1070	950	830	710	590
	3	0	1450	1610	1750	2000	2620	2620	2620	2360	2100	1840	1570	1310
	4	0	0	2840	3220	3710	4200	5320	5320	4430	3930	3440	2950	2460
	5	0	0	0	4610	5320	6020	7000	7000	6790	6090	5250	3950	3300
	6	0	0	0	0	6720	7000	7000	7000	7000	7000	6860	5110	4200
	7	0	0	0	0	0	7000	7000	7000	7000	7000	7000	6650	5740

Fonte: Silva et al., (2013).

ANEXO C - Matriz de potência (kW) do conversor *Pelamis*

		Te (s)																	
		5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	
Hs (m)	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	1	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	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	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	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	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	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	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	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Fonte: Silva et al., (2013).

ANEXO D - Matriz de potência (kW) do conversor *Oyster*

		Te (s)									
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	
Hs (m)	0,5	0	0	0	0	0	0	1	3	3	
	1	20	30	38	42	44	44	45	47	45	
	1,5	80	85	92	97	102	103	104	100	104	
	2	140	147	152	158	155	155	160	161	156	
	2,5	192	197	208	202	203	209	211	201	204	
	3	241	237	237	241	243	230	236	231	235	
	3,5	0	271	272	269	268	267	270	260	260	
	4	0	291	290	290	280	287	276	278	277	
	4,5	0	291	290	290	280	287	276	278	277	
	5	0	0	290	290	280	287	276	278	277	
	5,5	0	0	290	290	280	287	276	278	277	
6	0	0	290	290	280	287	276	278	277		

Fonte: Silva et al. (2013).

ANEXO E - Matriz de potência (kW) do WEC *Aqua Buoy*

		Tp (s)												
		5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Hs (m)	1	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	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	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	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	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

Fonte: Silva et al., 2013.

ANEXO F - Matriz de potência (kW) do conversor *F-OWC*

		Te (s)									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Hs (m)	1	15	25	37	44	42	36	30	25	20	15
	1,5	33	57	84	100	95	82	68	56	44	35
	2	59	102	149	178	169	145	122	99	79	62
	2,5	92	159	232	278	264	227	190	155	123	96
	3	133	229	335	401	380	326	274	224	177	139
	3,5	181	312	456	545	518	444	372	305	241	189
	4	237	407	595	712	676	580	486	398	315	246
	4,5	299	515	753	902	856	734	616	504	399	312
	5	370	636	930	1110	1060	906	760	622	493	385
	5,5		770	1130	1350	1280	1100	920	752	596	466
	6		916	1340	1600	1520	1310	1090	895	709	554
6,5		1080	1570	1880	1790	1530	1280	1050	833	650	
7		1250	1820	2180	2070	1780	1490	1220	966	754	

Fonte: Babarit et al., 2012.