

ANÁLISE DE CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS PARA A REGIÃO DE TRAMANDAÍ/RS

Nágila Lucietti Schmidt (nagilals@unifei.edu.br)
Carla de Abreu D'Aquino (carla.daquino@ufsc.br)

RESUMO

O presente trabalho realizou uma análise de conversores de energia de ondas oceânicas, abordando a caracterização do estado de mar predominante e as matrizes de potência de conversores, para uma série de dados de ondas coletadas no litoral de Tramandaí/RS. A metodologia do trabalho consistiu no cálculo dos parâmetros estatísticos de onda e elaboração de diagramas de ocorrência conjunta, a fim de verificar o estado de mar mais frequente. Com base nos diagramas de ocorrência conjunta, matrizes de potência de seis diferentes conversores foram testadas para verificar qual conversor melhor se adaptaria ao clima de ondas da região de estudo. Conforme os resultados obtidos, o conversor F-OWC apresentou o pior desempenho, enquanto os conversores SSG e *Wave Dragon* foram os dispositivos que melhor se adaptaram ao estado de mar predominante, sendo selecionado o dispositivo SSG para as condições de mar encontradas.

Palavras-chave: Energia de ondas. Conversor de energia das ondas. Matriz de potência.

WAVE ENERGY CONVERTERS ANALYSIS FOR TRAMANDAÍ/RS REGION

ABSTRACT

The present work carried out an analysis of ocean wave energy converters, approaching the characterization of the predominant sea state and power matrices of converter devices, for a series of wave data collected in the coast of Tramandaí/RS. The work methodology consisted in the calculation of the wave statistic parameters and the elaboration of occurrence diagrams to verify the most frequent sea state. The occurrence diagrams were used to crossed six power matrices of different converters to verify which converter would best adjust the wave climate of the study region. According to the obtained results, the F-OWC converter presented the worst performance, while the SSG and *Wave Dragon* converters were the devices that best

adapted to the predominant sea state, being the SSG device selected for the sea conditions encountered.

Keywords: Wave energy. Wave energy converter. Power matrix.

1. INTRODUÇÃO

Dentre as formas de energia oceânica, a energia das ondas é considerada uma das fontes de energia renovável com maior potencial de desenvolvimento para os próximos anos (IGLESIAS; CARBALLO, 2009; FALCÃO, 2010; LÓPEZ et al., 2013). Estima-se que o potencial energético global disponível nas ondas oceânicas seja da ordem de 2,11 TW (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012). No Brasil, avalia-se que seja possível disponibilizar em torno de 40 GW para o sistema interligado brasileiro, considerando o aproveitamento do recurso ao longo do litoral das regiões sul e sudeste do país. O aproveitamento da energia de ondas acarretaria impactos positivos na matriz energética brasileira, dado o extenso litoral do país, de cerca de 9000 km (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013).

No Brasil, o setor ainda possui grandes desafios a superar, no que diz respeito a coletas de dados de onda, testes e instalação de estruturas, bem como, a disseminação do conhecimento na área e a ampliação da visibilidade das tecnologias. A energia das ondas encontra-se em estado de maturação tecnológica, o que deve ser encarado como estímulo para ampliar os estudos no setor e impulsioná-lo no mercado de energias renováveis, incluindo a investigação da disponibilidade do recurso energético em diferentes locais e profundidades, de modo a encontrar tecnologias que se adaptam as condições de mar existentes.

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo realizar uma análise comparativa de conversores de energia de ondas oceânicas, a partir da caracterização do estado de mar predominante para uma região de Tramandaí/RS. O local de estudo foi escolhido devido à disponibilidade de uma série de dados de ondas coletados na praia de Tramandaí/RS, cedida pelo Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos (CECO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

1.1 Avaliação do Potencial Energético de Ondas Oceânicas

A primeira etapa para a avaliação do clima de ondas em um determinado local é a definição do padrão das ondas, o qual corresponde ao padrão estatístico dos parâmetros descritivos da onda, tais como a altura, período e direção de propagação (STRAUCH et al.,

2009; CARBALLO; IGLESIAS, 2012). O clima de ondas é representado por diagramas de ocorrência ou dispersão, que apresentam a distribuição dos parâmetros descritivos da onda, sintetizando os dados de forma a verificar o espalhamento dos mesmos (COLI, 2000).

As ondas transportam energia pelo oceano e transportam massa apenas quando propagam-se próximo à costa, devido a interação com o fundo oceânico. O fluxo médio de energia ou potência (P) é definido como a taxa temporal de energia transferida pelas ondas por unidade de comprimento de crista (W/m), através de um plano vertical perpendicular à direção de propagação da onda, a qual é função da altura e do período das ondas.

Os parâmetros estatísticos que caracterizam um estado de mar e são utilizados para avaliar o potencial energético das ondas, consistem na altura de onda significativa (H_s) e no período médio de energia (T_e). A H_s pode ser obtida pela média de alturas do terço superior das ondas individuais, ordenadas da menor até a maior, durante o período de observação, sendo a melhor representação de uma onda irregular, em termos de energia. O T_e consiste no período das oscilações de 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 (MELO FILHO, 2012; ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013).

Para o estado de mar real, a potência é calculada baseando-se nos parâmetros estatísticos de onda, conforme a Equação 1, designada para águas profundas (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013). Para águas intermediárias e rasas, o cálculo da potência é realizado pelas Equações 2 e 3, respectivamente (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

$$P[W/m] = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \quad (1)$$

$$P[W/m] = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (2)$$

$$P[W/m] = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} \quad (3)$$

1.2 Dispositivos Conversores de Energia das Ondas

A energia contida nas ondas pode ser aproveitada por meio de dispositivos conversores, desenvolvidos visando a conversão da energia transportada pelas ondas oceânicas em energia elétrica. Existem diversos estudos realizados com o objetivo de

melhorar a eficiência de conversão dos dispositivos e aprimorar as tecnologias existentes, buscando torná-los viáveis para a utilização em grande escala (CARBALLO et al., 2015; RUSU; ONEA, 2017).

Os conversores podem ser classificados quanto a distância do local em que estão instalados à linha de costa, e também, quanto ao princípio de funcionamento. A classificação quanto ao local de instalação se dá pelas diferentes profundidades existentes no local de instalação, uma vez que a onda sofre transformações ao aproximar-se da costa, devido aos efeitos de atrito com o fundo oceânico. As classes englobam os dispositivos costeiros (*onshore*), que podem ser fixados à costa ou em águas rasas; os dispositivos próximos à costa (*nearshore*), instalados em profundidades de 10 a 25 metros; e os dispositivos afastados da costa (*offshore*), instalados em águas profundas (superior a 40 metros) (LÓPEZ et al., 2013).

Quanto ao princípio de funcionamento, de modo geral, são consideradas três classes, compreendendo a coluna de água oscilante (CAO), os corpos oscilantes e os dispositivos de galgamento. A CAO consiste em um dispositivo que pode ser instalado fixo ou flutuante, estando na costa ou longe dela. O princípio de operação se dá pela compressão e descompressão do ar presente dentro da estrutura, com a passagem e o retorno da onda, respectivamente. As turbinas mais utilizadas são do tipo *Wells*, que possuem a capacidade de manter o sentido de rotação, independente do sentido de escoamento do ar. O dispositivo CAO consiste na tecnologia de conversão mais estudada e investigada (LISBOA et al., 2018).

Os dispositivos de corpos oscilantes possuem princípio de funcionamento de acordo com as oscilações dos corpos flutuantes, provocadas pelo movimento das ondas do mar. A oscilação dos corpos é responsável por acionar um sistema hidráulico que faz a conversão da energia das ondas em energia elétrica (LÓPEZ et al., 2013).

Os dispositivos de galgamento são caracterizados por converter a energia potencial gravitacional das ondas em energia elétrica, por meio do encaminhamento das ondas incidentes para uma rampa, que recolhe as ondas em um reservatório acima do nível do mar. As ondas, ao retornarem ao mar, passam por uma turbina que produz eletricidade. Esses dispositivos podem estar fixos ou flutuantes, além de permitirem a instalação na costa, próximo à costa ou afastados da mesma (LÓPEZ et al., 2013).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados de onda analisados são provenientes da região costeira de Tramandaí/RS e foram coletados na profundidade de 17 metros, por meio de um ondógrafo direcional,

fundado em novembro de 2006 na praia de Tramandaí (Figura 1). A série de dados consiste em registros coletados entre novembro de 2006 à setembro de 2007. O fundeio do ondógrafo foi realizado por meio de uma parceria entre a PETROBRÁS/TRANSPETRO e a UFRGS, com a finalidade de obter uma série longa e contínua de dados de onda, a fim de caracterizar o litoral norte do Rio Grande do Sul (STRAUCH et al., 2009).

A análise estatística inicial foi executada nos dados de onda, a fim de verificar o padrão e a distribuição dos dados, em termos de H_s , T_e e direção das ondas. De posse dos parâmetros estatísticos, foi calculado o potencial energético das ondas na área de estudo, com o objetivo de avaliar a disponibilidade energética sazonal, bem como, da série completa. Para verificar a dispersão dos dados de onda, foram construídos diagramas de ocorrência, que relacionam a direção e H_s , bem como, diagramas que relacionam T_e com H_s .

A Figura 2 ilustra os conversores considerados na análise deste trabalho, sendo o *Sea Slot-cone Generator (SSG)*, *Oyster*, *Arquimedes Wave Swing (AWS)*, *Pelamis*, *Wave Dragon* e Coluna de Água Oscilante Flutuante (do inglês F-OWC ou *Floating Oscillating Water Column*). As tecnologias apresentadas consistem em alguns exemplos de tecnologias para a conversão da energia das ondas existentes e em desenvolvimento no mundo. No momento, as tecnologias mencionadas encontram-se em processo de maturação tecnológica, necessitando de maiores testes e pesquisas para serem utilizadas em grande escala. Estes dispositivos foram escolhidos por fornecerem suas matrizes de potência em artigos publicados em Silva, Rusu e Soares (2013), Carballo et al. (2015), Veigas et al. (2015) e Babarit et al. (2012).

Para estimar a potência extraída por um conversor, foram utilizadas as matrizes de potência dos dispositivos, obtidas a partir da literatura. As matrizes de potência são elaboradas por modelos numéricos, que consistem, essencialmente, em integrar a equação do movimento no domínio do tempo (BABARIT et al., 2012). Cada conversor possui a sua matriz de potência, tendo como parâmetros de entrada a H_s e o T_e das ondas. A relação entre ambos os parâmetros, fornece uma estimativa da potência de saída (kW) do conversor, para um dado estado de mar.

As matrizes de potência consistem em uma alternativa bastante utilizada em diversos trabalhos e construídas por alguns autores (BABARIT et al., 2012; SILVA; RUSU; SOARES, 2013; VEIGAS et al., 2015), a fim de estimar a potência extraída e a energia gerada por conversores de ondas, para diferentes estados de mar. As matrizes de potência permitem a análise de resultados de forma simplificada, sendo empregadas quando demais parâmetros dos conversores não são acessíveis e a modelagem numérica é a única solução disponível.

Os conversores analisados foram classificados de acordo com o local de instalação e princípio de funcionamento. A Tabela 1 resume as principais características de cada um dos conversores analisados. Para a análise dos conversores, foram cruzadas as informações do diagrama de ocorrência de H_s e T_e e as matrizes de potência de cada conversor, buscando avaliar os dispositivos mais adequados para utilização na região de estudo, de acordo com o estado de mar predominante. As Figuras 3, 4, 5, 6, 7 e 8 apresentam as matrizes de potência dos dispositivos SSG, *Oyster*, *Pelamis*, *AWS*, *Wave Dragon* e F-OWC, respectivamente.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Estatística dos Dados de Onda

Os valores de H_s estão distribuídos de 0,5 m a 2,5 m, sendo estes os valores mais frequentes verificados. As maiores ocorrências de H_s alcançaram 3 m, todavia, com poucas ocorrências registradas. O valor médio de H_s consistiu em 1,23 m e as maiores médias sazonais foram obtidas no inverno (1,37 m) e verão (1,32 m). Assim, pode-se inferir que a estação mais energética é o inverno, seguida do verão. A potência das ondas é proporcional ao quadrado da altura (H_s) conforme Eq. 1, logo, pequenos incrementos em H_s interferem consideravelmente na potência das ondas. Os valores de T_e variaram entre 4 s a 8 s, sendo os mais frequentes observados. O valor médio de T_e consistiu em 5,92 s, sendo a maior média sazonal verificada para o inverno (6,14 s), seguida do outono (5,95 s). De forma geral, os períodos de onda são curtos, indicando o predomínio de um padrão de ondas que formam-se próximas a região de coleta dos dados. A Tabela 2 informa as médias e desvios padrão associados para H_s , T_e e direção de propagação das ondas (θ), indicando os valores médios para a série de dados e para períodos sazonais.

De acordo com resultados da literatura para a região de estudo, os valores médios calculados (Tabela 2) são semelhantes, principalmente o H_s , enquanto o T_e apresentou valores menores. Conforme Oleinik, Marques e Kirinus (2016), em simulação de ondas realizada na costa sul-sudeste do Brasil, reportaram o valor médio de 1,25 m para H_s , enquanto T_e variou entre 7,5 s e 9 s. Cuchiara et al. (2009) aplicaram o modelo SWAN e encontraram valores de H_s entre 1,0 m a 3,0 m para a região sul do Brasil, enquanto o T_e encontrado foi menor que 6 s e as direções predominantes das ondas, entre o nordeste e sul. Coli (2000) descreveu o clima de ondas para o sul do Rio Grande do Sul com base em dados históricos, concluindo que a faixa de H_s está entre 1,0 m a 1,5 m e T_e entre 5 s a 6 s, com direção predominante para o

sudeste. Pianca, Mazzini e Siegle (2010), através de dados de reanálise do modelo operacional NWW3, obtiveram H_s sazonal entre 2,0 m a 2,6 m, enquanto T_e sazonal ficou entre 7,6 s a 8,3 s. Os modelos numéricos não possuem uma boa resolução para valores próximos à costa e apresentam a tendência de superestimar os valores medidos (MELO FILHO; ROMEU; HAMMES, 2010). A Tabela 3 sintetiza os parâmetros de onda obtidos das literaturas mencionadas.

A Figura 9 mostra o espalhamento de dados entre a direção de propagação e H_s das ondas. A direção de propagação predominante das ondas da região, consistiu na direção sudeste, o que também foi constatado por Coli (2000) e Strauch et al. (2009). Apesar de poucas observações para as direções sudoeste, oeste e noroeste, essas direções apresentam o predomínio de ondas de maior H_s , sendo portanto, ondas de maior potencial energético.

A Figura 10 apresenta o diagrama de ocorrência conjunta para valores de H_s e T_e da série de dados. As maiores ocorrências de onda concentram-se na faixa de T_e entre 5 s a 6 s e H_s entre 1,0 m a 1,5 m. São poucas as ocorrências verificadas para ondas de período mais longo, em torno de 10 s a 12 s e de maior altura, entre 2,5 m a 3,0 m, não havendo registros de ondas com H_s superior a 3 m e T_e superior a 11 s.

3.2 Distribuição do Potencial Energético das Ondas

A Figura 11 apresenta o histograma de distribuição da potência das ondas para o local de coleta dos dados. Para a distribuição de potência, as maiores ocorrências registradas são de ondas com potência da ordem de 10 kW/m, seguidas de 15 kW/m. São observadas poucas ocorrências de ondas com potência mais elevada, da ordem de 75 kW/m. A Figura 12 traz a distribuição de potência sazonal, para a série de dados coletados. Verifica-se que as ocorrências predominantes acompanham o padrão anual, sendo de ondas com potência entre 10 kW/m à 15 kW/m para todas as estações, com exceção do inverno, onde observa-se distribuições de ondas de maior potência, entre 10 kW/m à 20 kW/m. Conforme apresentado na Tabela 2, a estação de inverno é considerada a mais energética, por apresentar os maiores valores médios de H_s .

A Figura 13 apresenta a matriz de potência das ondas (kW/m) calculada para o local de coleta dos dados (classificado como águas intermediárias). Considerando os dados mais frequentes observados no diagrama da Figura 10, tem-se que o estado de mar predominante para a região de estudo consiste em ondas com H_s entre 1,0 m a 1,5 m e T_e entre 5 s a 6 s. Analisando a matriz de potência das ondas para o sítio de coleta dos dados, e combinando os

parâmetros H_s e T_e , tem-se o potencial energético de ondas para o estado de mar mais frequente, variando entre 9,77 kW/m até 25,91 kW/m. Conforme Lisboa, Teixeira e Fortes (2017), a potência média anual em águas profundas para a costa brasileira varia de 5 kW/m a 20 kW/m com baixa variabilidade sazonal, característica encontrada no hemisfério sul. A extração de energia das ondas em locais com alta latitude torna-se atraente devido ao alto valor de potência encontrado em águas intermediárias e profundas.

3.3 Análise Comparativa de Dispositivos Conversores

De acordo com as matrizes de potência dos dispositivos, tem-se que, para o estado de mar predominante, os conversores com princípio de funcionamento de galgamento, SSG e *Wave Dragon*, são os conversores que melhor se adaptariam, com maior valor de potência de saída, em relação aos demais conversores analisados. Para as condições de mar com H_s entre 1,0 m à 1,5 m e T_e de 5 s à 6 s, tem-se uma variação de potência de 397 kW à 1072 kW extraída pelo conversor SSG, enquanto para o conversor *Wave Dragon*, tem-se a potência de 348 kW à 750 kW. Para o conversor SSG, verifica-se que o aumento gradual na combinação entre os parâmetros H_s e T_e proporcionam potências extraídas mais elevadas, entretanto, observando os parâmetros separadamente, tem-se que incrementos em H_s reportam maiores potências, em comparação a incrementos em T_e , para ambos os conversores.

O conversor SSG é designado para instalação ancorado à costa, no entanto, por atuar em águas rasas, o padrão de ondas é menos energético e os impactos ambientais associados podem ser mais significativos. A principal vantagem deste dispositivo é a sua robustez e a possibilidade de ser incorporado em quebra-mares e outras estruturas costeiras, permitindo o compartilhamento de custos (MARGHERITINI; VICINANZA; FRIGAARD, 2009). O conversor *Wave Dragon* ocupa uma elevada área para instalação, consistindo em uma estrutura de elevado peso, o que torna a instalação mais restrita. O *Wave Dragon* é um dispositivo flutuante, amarrado ao fundo oceânico e instalado em águas relativamente profundas. Recomenda-se a sua instalação em profundidades superiores aos 40 m, para que seja aproveitado o potencial das ondas mais energéticas (KOFOED et al., 2006).

Os dispositivos *Pelamis*, AWS, *Oyster* e F-OWC apresentaram os menores valores de potência extraída das ondas, visto que a combinação dos parâmetros H_s e T_e para o estado de mar predominante apresentou valores de até 65 kW para o conversor *Pelamis*, de 2 kW à 28 kW para o conversor AWS, de 20 kW à 85 kW para o conversor *Oyster* e de até 17 kW para o conversor F-OWC. Para investigação detalhada sobre esses conversores, é necessário analisar

o padrão das ondas em maiores profundidades, a fim de analisar a viabilidade de conversão por esses dispositivos, que não se adaptam tão bem em águas de menor profundidade.

O conversor *Pelamis* é designado para instalação em águas profundas, devido a extensão de sua estrutura física e para o melhor aproveitamento energético, devido ao padrão de ondas mais energético encontrado, em relação ao padrão verificado para a região de estudo. Devido a sua característica, o conversor *Pelamis* não se adequa ao estado de mar encontrado. Veigas et al. (2015) verificou que para o requisito “área ocupada”, uma usina composta pelo conversor *Pelamis* requer maior espaço para instalação, do que uma usina que utiliza demais conversores.

Para o conversor AWS, observa-se que as maiores potências extraídas ocorrem para o estado de mar com altos valores entre as combinações de H_s e T_e . Percebe-se pelo diagrama do conversor AWS (Figura 6), que a partir do valor de 4,5 m, é necessário valores a partir de 6 s para T_e , para que o dispositivo possa iniciar o funcionamento, caso contrário, o dispositivo não será efetivo para aproveitamento energético no local. Sendo o AWS um dispositivo submerso, o mesmo não cria impactos visuais, além de ser menos propenso a sofrer com os efeitos resultantes de tempestades, uma vez que na profundidade em que é instalado, os efeitos de tempestades não são sentidos com grande intensidade (PRADO et al., 2006).

O conversor *Oyster* é dependente de maiores valores de H_s e T_e para o aproveitamento da energia das ondas, visto que se consegue extrair até 291 kW para H_s a partir de 4 m e T_e a partir de 6 s. As técnicas envolvidas no fundeio do conversor *Oyster* permitem a fácil remoção para manutenção e reinstalação, característica comum encontrada em dispositivos que permanecem ancorados. O conversor *Oyster* pode ser instalado em profundidades de 12 m, o que em muitos locais, estaria relativamente próximo à costa (WHITTAKER et al., 2007).

Para o estado de mar analisado, o conversor F-OWC apresentou o pior desempenho, visto que é designado para instalação em águas profundas, com ondas mais energéticas. O aumento de H_s possui maior influência na capacidade de extração de potência das ondas pelo dispositivo, em relação ao aumento de T_e . O dispositivo F-OWC é normalmente fixado com amarrações ao leito oceânico, estando portanto, livre para oscilar, o que pode aumentar a absorção da energia das ondas, se o dispositivo for projetado para isso (FALCÃO, 2010). Portanto, para ampliar o aproveitamento do potencial energético de ondas pelo dispositivo, torna-se recomendada a sua instalação em locais de maior profundidade, com elevados valores de H_s e T_e . A Tabela 4 compara a potência extraída pelos dispositivos conversores para o estado de mar predominante da região de estudo.

De acordo com as análises realizadas, infere-se que o conversor mais indicado para a área de estudo, seria o conversor SSG, com o qual seria possível extrair maior potência nas condições de mar predominantes, em comparação aos demais dispositivos observados neste estudo. Embora os dispositivos que melhor se adaptariam ao clima de ondas da região, consistem em dispositivos de galgamento, faz-se necessário verificar as condições locais para instalação, visto que cada dispositivo apresenta suas especificidades. O conversor SSG pode ser instalado próximo à costa ou afastado da mesma, porém, a instalação costeira ou em quebra-mares apresenta vantagens como o compartilhamento de custos de estrutura e proximidade de conexão à rede elétrica, contudo, possui a desvantagem de exposição à ondas menos energéticas, em relação à dispositivos *offshore* (OLIVEIRA et al., 2016).

Em síntese, as tecnologias de conversão possuem desempenhos diferentes em distintos locais e profundidades. Devido às características peculiares de cada conversor, incluindo a potência, capacidade de conversão, eficiência, dentre outros parâmetros, torna-se importante verificar o estado de mar predominante e o seu potencial energético. Além disso, outro critério essencial, consiste em conhecer as horas de duração do estado de mar predominante, o qual será o fator determinante na produção de energia elétrica para cada dispositivo. Assim, a metodologia apresentada neste trabalho, representa uma etapa importante no estudo da prospecção de energia oceânica, para a conversão de energia das ondas em energia elétrica.

4. CONCLUSÃO

Os diagramas de ocorrência conjunta mostraram que o estado de mar mais frequente para a área de estudo corresponde ao padrão de ondas com H_s entre 1,0 m a 1,5 e T_e entre 5 s a 6 s. Para o ponto de coleta de dados, a potência extraída pelos dispositivos conversores é baixa, em comparação a locais de maior profundidade, com predomínio de ondas mais energéticas. O conversor F-OWC apresentou o pior desempenho, enquanto os conversores SSG e *Wave Dragon* foram os dispositivos que melhor se adaptaram ao estado de mar predominante. O dispositivo selecionado para as condições de mar encontradas foi o SSG, que melhor se adaptou ao clima de ondas da região.

Todavia, cada dispositivo possui particularidades, vantagens e desvantagens, de acordo com as condições de mar locais, e com o local e profundidade de instalação. Salienta-se que são necessárias análises aprofundadas a respeito da geração de energia, eficiência e rendimento de conversores, a fim de verificar a real condição para geração de energia elétrica e atendimento de demanda, que os conversores serão capazes de fornecer. Além disso, é

importante verificar a quantidade de horas anuais do estado de mar predominante, para possibilitar a estimativa de geração de energia elétrica a partir do dispositivo conversor.

O principal impasse para a utilização de conversores em larga escala é torná-los viáveis e competitivos com as demais tecnologias renováveis, que figuram em fase mais avançada de desenvolvimento tecnológico. O desafio é promover inovação, ampliar os estudos e aperfeiçoar as tecnologias, a fim de tornar possível o aproveitamento do potencial energético disponível nos oceanos, como uma fonte de energia renovável.

5. REFERÊNCIAS

- ASSIS, L. E.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. E. B. Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2013.
- BABARIT, A. et al. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable Energy**, v. 41, p. 44-63, mai. 2012.
- CARBALLO, R. et al. The intra-annual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain). **Energy**, v. 82, p. 138-146, mar. 2015.
- CARBALLO, R.; IGLESIAS, G. A methodology to determine the power performance of wave energy converters at a particular coastal location. **Energy Conversion and Management**, v. 61, p. 8-18, set. 2012.
- COLI, A. B. **Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS**. 2000. 79 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2000.
- CRESPO, A. J. C. et al. Towards simulating floating offshore oscillating water column converters with Smoothed Particle Hydrodynamics. **Coastal Engineering**, v. 126, p. 11-26, ago. 2017.
- CUCHIARA, D. C. et al. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**, v. 29, n. 3, p. 545-555, mar. 2009.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. 2 ed. [S.l.]: World Scientific, 1991. 353 p.
- FALCÃO, A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 3, p. 899-918, abr. 2010.
- GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, v. 44, p. 296-304, ago. 2012.
- IGLESIAS, G.; CARBALLO, R. Wave energy potential along the Death Coast (Spain). **Energy**, v. 34, n. 11, p. 1963-1975, nov. 2009.
- KOFOED, J. P. et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. **Renewable Energy**, v. 31, n. 2, p. 181-189, fev. 2006.
- LISBOA, R. C. et al. Numerical evaluation of the power output of an oscillating water column wave energy converter installed in the southern Brazilian coast. **Energy**, v. 162, p. 1115-1124, nov. 2018.

- 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, fev. 2017.
- LÓPEZ, I. et al. Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 27, p. 413-434, nov. 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, mai. 2009.
- MELO FILHO, E. Nota sobre o cálculo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para uso em conversores de energia. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO)**, 5., 2012. Rio Grande: FURG, 2012. 9 p.
- MELO FILHO, E.; ROMEU, M. A. R.; HAMMES, G. R. Condições extremas de agitação marítima ao largo de Rio Grande a partir do modelo WW3. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, 4., 2010. Rio Grande: FURG, 2010. 20 p.
- OLEINIK, P. H.; MARQUES, W. C.; KIRINUS, E. de P. Simulação de ondas oceânicas na costa sul-sudeste brasileira para análise do potencial energético. **Vetor**, Rio Grande, v. 26, n. 2, p. 39-50, 2016.
- OLIVEIRA, P. et al. Experimental evaluation of the effect of wave focusing walls on the performance of the Sea-wave Slot-cone Generator. **Energy Conversion and Management**, v. 110, p. 165-175, fev. 2016.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography**, v. 58, n. 1, p. 53-70, mar. 2010. FapUNIFESP (SciELO).
- PRADO, M. G.; GARDNER, F.; DAMEN, M.; POLINDER, H. Modelling and test results of the Archimedes wave swing. **Journal of Power and Energy**, v. 220, n. 8, p. 855-868, 2006.
- RUSU, L.; ONEA, F. The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, p. 1348-1362, ago. 2017.
- SILVA, D.; RUSU, E.; SOARES, C. G. Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the Portuguese nearshore. **Energies**, v. 6, n. 3, p. 1344-1364, 2013.
- STRAUCH, J. C. et al. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 29-37, out./dez. 2009.
- VEIGAS, M. et al. A proposed wave farm on the Galician coast. **Energy Conversion and Management**, v. 99, p. 102-111, jul. 2015.
- WHITTAKER, T. et al. The development of Oyster - A shallow water surging wave energy device. In **Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference**, Porto, Portugal, 11-14 Set. 2007.

ANEXO

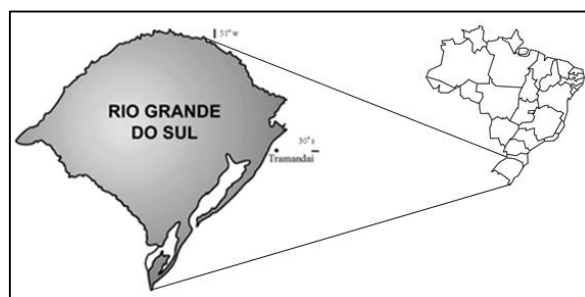


Figura 1 – Localização do ondógrafo fundeado na praia de Tramandaí, litoral do RS. Fonte: Strauch et al. (2009)
 Figure 1 - Location of the anchored ondograph in Tramandaí beach, RS coast. Source: Strauch et al. (2009)

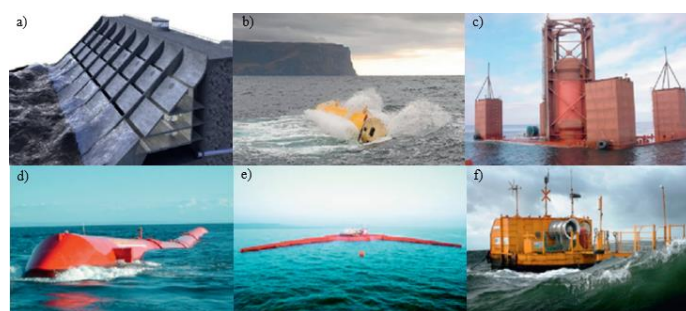


Figura 2 - a) SSG; b) *Oyster*; c) AWS; d) *Pelamis*; e) *Wave Dragon*; f) F-OWC. Fonte: López et al. (2013)
 Figure 2 - a) SSG; b) *Oyster*; c) AWS; d) *Pelamis*; e) *Wave Dragon*; f) F-OWC. Source: López et al. (2013)

Tabela 1 - Principais características dos conversores de energia das ondas analisados.

Table 1 - Main characteristics of analyzed wave energy converters.

Dispositivo conversor	Princípio de funcionamento	Local de instalação
SSG	Galgamento	<i>Onshore</i>
<i>Oyster</i>	Corpos oscilantes	<i>Nearshore</i>
AWS	Corpos oscilantes	<i>Offshore</i>
<i>Pelamis</i>	Corpos oscilantes	<i>Offshore</i>
<i>Wave Dragon</i>	Galgamento	<i>Offshore</i>
F-OWC	Coluna de água oscilante	<i>Offshore</i>

Fonte: López et al. (2013); Silva, Rusu e Soares (2013); Crespo et al. (2017).

Source: López et al. (2013); Silva, Rusu e Soares (2013); Crespo et al. (2017).

		T_e [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
H_s [m]	0,50	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	198	208	218
	1,00	397	437	476	516	556	595	635	675	715	754	794	833	873
	1,50	893	982	1.072	1.161	1.250	1.340	1.429	1.518	1.608	1.697	1.786	1.875	1.965
	2,00	1.588	1.746	1.905	2.064	2.223	2.381	2.540	2.699	2.858	3.016	3.175	3.334	3.493
	2,50	2.481	2.729	2.977	3.225	3.473	3.721	3.969	4.217	4.465	4.713	4.961	5.209	5.457
	3,00	3.572	3.929	4.287	4.644	5.001	5.358	5.715	6.073	6.430	6.787	7.144	7.501	7.859
	3,50	4.862	5.348	5.834	6.321	6.807	7.293	7.779	8.265	8.751	9.238	9.724	10.210	10.695
	4,00	6.350	6.985	7.620	8.256	8.891	9.526	10.161	10.796	11.431	12.066	12.701	13.336	13.971
	4,50	8.037	8.841	9.645	10.448	11.252	12.056	12.860	13.663	14.467	15.271	16.074	16.878	17.682
	5,00	9.923	10.915	11.907	12.899	13.892	14.884	15.876	16.868	17.860	18.853	19.845	20.000	20.000
	5,50	12.006	13.207	14.407	15.608	16.809	18.009	19.219	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	6,00	14.288	15.717	17.146	18.575	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	6,50	16.769	18.446	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000

Figura 3 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas SSG. Fonte: Silva, Rusu e Soares (2013)

Figure 3 - Power matrix (kW) of the SSG wave energy converter. Source: Silva, Rusu e Soares (2013)

		T _e [s]								
		5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0
H _s [m]	0,50	0	0	0	0	0	0	1	3	3
	1,00	20	30	38	42	44	44	45	47	45
	1,50	80	85	92	97	102	103	104	100	104
	2,00	140	147	152	158	155	155	160	161	156
	2,50	192	197	208	202	203	209	211	201	204
	3,00	241	237	237	241	243	230	236	231	235
	3,50	0	271	272	269	268	267	270	260	260
	4,00	0	291	290	290	280	287	276	278	277
	4,50	0	291	290	290	280	287	276	278	277
	5,00	0	0	290	290	280	287	276	278	277
	5,50	0	0	290	290	280	287	276	278	277
6,00	0	0	290	290	280	287	276	278	277	

Figura 4 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas *Oyster*. Fonte: Carballo et al. (2015)
 Figure 4 - Power matrix (kW) of the *Oyster* wave energy converter. Source: Carballo et al. (2015)

		T _e [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
H _s [m]	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,00	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23
	1,50	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53
	2,00	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93
	2,50	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146
	3,00	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210
	3,50	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260
	4,00	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339
	4,50	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382
	5,00	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472
	5,50	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530
	6,00	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619
	6,50	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	743	658	

Figura 5 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas *Pelamis*. Fonte: Carballo et al. (2015)
 Figure 5 - Power matrix (kW) of the *Pelamis* wave energy converter. Source: Carballo et al. (2015)

		T _e [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
H _s [m]	1,00	2	7	13	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105
	1,50	4	15	28	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226
	2,00	8	26	49	73	100	127	150	172	210	247	292	337	366
	2,50	15	43	78	113	159	205	234	263	320	376	438	499	531
	3,00	25	61	111	161	227	293	339	386	453	521	600	680	722
	3,50	35	92	155	218	305	391	454	517	605	694	772	851	913
	4,00	35	114	194	273	380	486	572	659	776	894	961	1.027	1.103
	4,50	0	0	235	332	479	626	722	819	957	1.096	1.168	1.240	1.320
	5,00	0	0	280	400	592	784	899	1.014	1.144	1.274	1.380	1.487	1.569
	5,50	0	0	320	432	641	849	1.033	1.216	1.331	1.446	1.568	1.690	1.778
	6,00	0	0	0	0	680	944	1.155	1.367	1.495	1.623	1.759	1.895	1.963
	6,50	0	0	0	0	720	1.123	1.335	1.547	1.678	1.809	1.963	2.116	2.200

Figura 6 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas AWS. Fonte: Veigas et al. (2015)
 Figure 6 - Power matrix (kW) of the AWS wave energy converter. Source: Veigas et al. (2015)

		T _e [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
H _s [m]	1,00	348	432	516	608	699	798	896	925	953	958	962	941	919
	1,50	485	617	750	899	1.049	1.212	1.375	1.433	1.491	1.509	1.527	1.502	1.477
	2,00	621	802	983	1.191	1.398	1.626	1.853	1.941	2.029	2.061	2.092	2.063	2.034
	2,50	1.123	1.213	1.304	1.609	1.914	2.258	2.602	2.752	2.903	2.972	3.041	3.017	2.993
	3,00	1.624	1.624	1.624	2.027	2.430	2.890	3.350	3.563	3.776	3.883	3.989	3.970	3.951
	3,50	2.581	2.581	2.581	2.783	2.984	3.588	4.191	4.494	4.796	4.870	4.945	4.935	4.926
	4,00	3.538	3.538	2.538	3.538	3.538	4.285	5.032	5.424	5.816	5.858	5.900	5.900	5.900
	4,50	4.719	4.719	4.719	4.719	4.719	5.093	5.466	5.662	5.858	5.879	5.900	5.900	5.900
	5,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	5,50	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	6,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	6,50	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900

Figura 7 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas *Wave Dragon*. Fonte: Veigas et al. (2015)
 Figure 7 - Power matrix (kW) of the *Wave Dragon* wave energy converter. Source: Veigas et al. (2015)

		T _e [s]								
		6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,0
H _s [m]	1,00	8	17	27	42	56	59	52	44	40
	1,50	17	39	61	96	126	132	117	99	89
	2,00	30	69	108	170	224	235	208	177	159
	2,50	47	108	169	266	350	368	324	276	249
	3,00	68	155	244	383	504	530	467	398	358
	3,50	93	212	332	521	686	721	636	542	437
	4,00	121	276	433	680	896	942	831	708	636
	4,50	154	350	548	861	1.130	1.190	1.050	896	805
	5,00	190	432	677	1.060	1.400	1.470	1.300	1.110	994
	5,50	0	523	819	1.290	1.690	1.780	1.570	1.340	1.200
	6,00	0	622	975	1.530	2.020	2.120	1.870	1.590	1.430
6,50	0	730	1.140	1.800	2.370	2.490	2.190	1.870	1.680	

Figura 8 – Matriz de potência (kW) do conversor de energia das ondas F-OWC. Fonte: Babarit et al. (2012)
Figure 8 - Power matrix (kW) of the F-OWC wave energy converter. Source: Babarit et al. (2012)

Tabela 2 – Médias e desvios padrão sazonal e anual para H_s, T_e e θ na profundidade de coleta dos dados.
Table 2 - Seasonal and annual means and standard deviations for H_s, T_e and θ in the depth of data collection.

Estação	H _s (m)	T _e (s)	θ (°)
Primavera	1,18 ± 0,39	5,26 ± 0,63	128,36 ± 41,77
Verão	1,32 ± 0,42	5,70 ± 0,89	138,74 ± 30,72
Outono	1,15 ± 0,34	5,95 ± 1,17	124,54 ± 35,81
Inverno	1,37 ± 0,42	6,14 ± 1,37	147,88 ± 44,03
Anual	1,23 ± 0,39	5,92 ± 1,17	131,56 ± 39,69

Fonte: do autor.
Source: author.

Tabela 3 – Comparação de parâmetros estatísticos de onda obtidos da literatura.
Table 3 - Comparison of statistical wave parameters obtained from the literature.

Autor	H _s (m)	T _e (s)
Oleinik, Marques e Kirinus (2016)	1,25	7,5 - 9,0
Cuchiara et al. (2009)	1,0 - 3,0	6,0
Coli (2000)	1,0 - 1,5	5,0 - 6,0
Pianca, Mazzini e Siegle (2010)	2,0 - 2,6	7,6 - 8,3

Fonte: do autor.
Source: author.

		θ [°]									
		50-75	75-100	100-125	125-150	150-175	175-200	200-225	225-250	250-275	275-300
H _s [m]	0-0,3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,3-0,6	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0,6-0,9	68	410	12	0	0	0	0	0	0	0
	0,9-1,2	0	56	571	108	0	0	0	0	0	0
	1,2-1,5	0	0	6	395	183	0	0	0	0	0
	1,5-1,8	0	0	0	1	177	148	2	0	0	0
	1,8-2,1	0	0	0	0	0	54	91	3	0	0
	2,1-2,4	0	0	0	0	0	0	6	21	3	0
	2,4-2,7	0	0	0	0	0	0	0	0	9	3
	2,7-3,0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2

Figura 9 – Diagrama de ocorrência para a direção (°) e altura significativa (m) da série de dados. Fonte: do autor
Figure 9 - Occurrence diagram for the direction (°) and significant height (m) of the data series. Source: author

		T _e [s]							
		4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
H _s [m]	0,5-1,0	201	341	159	97	47	2	0	0
	1,0-1,5	255	546	345	137	28	6	0	0
	1,5-2,0	48	238	140	68	36	13	0	0
	2,0-2,5	0	29	18	22	10	3	2	0
	2,5-3,0	0	5	10	2	3	1	1	0
	3,0-3,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 10 – Diagrama de ocorrência de H_s e T_e da série de dados. Fonte: do autor
Figure 10 - Diagram of occurrence of H_s e T_e of the data series. Source: author

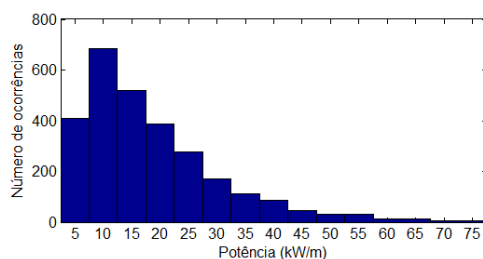


Figura 11 – Distribuição de potência das ondas (kW/m) para a série de dados. Fonte: do autor
 Figure 11 - Distribution of wave power (kW/m) for the data series. Source: author

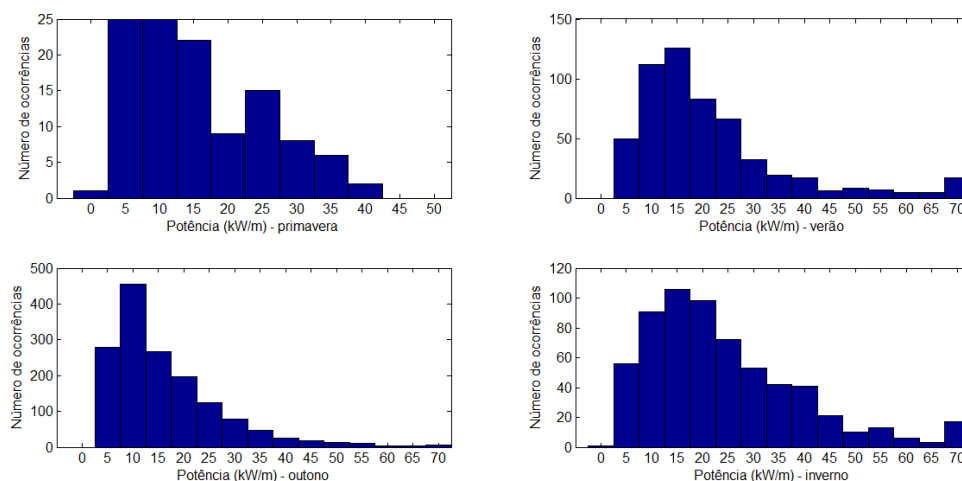


Figura 12 – Distribuição de potência das ondas (kW/m) para as estações do ano. Fonte: do autor
 Figure 12 - Distribution of wave power (kW/m) for the seasons of the year. Source: author

		T _p [s]								
		4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	11,0	12,0
H _s [m]	0,25	0,49	0,61	0,72	0,81	0,87	0,92	0,95	0,97	0,98
	0,5	1,96	2,44	2,88	3,23	3,49	3,66	3,78	3,86	3,92
	0,75	4,41	5,50	6,48	7,27	7,84	8,24	8,51	8,69	8,81
	1,0	7,85	9,77	11,51	12,92	13,95	14,65	15,13	15,45	15,66
	1,25	12,26	15,27	17,99	20,19	21,79	22,89	23,64	24,13	24,47
	1,5	17,66	21,98	25,91	29,07	31,38	32,97	34,04	34,75	35,24
	1,75	24,04	29,92	35,26	39,57	42,71	44,87	46,33	47,30	47,96
	2,0	31,39	39,08	46,06	51,68	55,78	58,61	60,51	61,78	62,65
	2,25	39,73	49,47	58,29	65,40	70,60	74,18	76,58	78,19	79,29
	2,5	49,05	61,07	71,96	80,75	87,16	91,58	94,54	96,54	97,88
2,75	59,35	73,89	87,08	97,70	105,46	110,81	114,40	116,81	118,44	
3,0	70,63	87,94	103,63	116,28	125,51	131,87	136,14	139,01	140,95	

Figura 13 – Matriz de potência (kW/m) para o local de coleta de dados. Fonte: do autor
 Figure 13 - Power matrix (kW/m) for the data collection site. Source: author

Tabela 4 – Comparação das potências extraídas (kW) pelos conversores para o estado de mar predominante.

Table 4 - Comparison of the extracted potentials (kW) by the converters to the predominant sea state.

Dispositivo conversor	Potência mínima extraída (kW)	Potência máxima extraída (kW)
SSG	397	1072
Wave Dragon	348	750
Oyster	20	85
Pelamis	-	65
AWS	2	28
F-OWC	-	17

Fonte: do autor.
 Source: author.