

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MARIANA AGUIRRE NUNES

CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL E  
LEVANTAMENTO TEÓRICO DE TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE  
ONDAS EM ENERGIA ELÉTRICA APLICÁVEIS A ESTA REGIÃO

PONTAL DO PARANÁ

2018

MARIANA AGUIRRE NUNES

CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NA REGIÃO SUL DO BRASIL E  
LEVANTAMENTO TEÓRICO DE TECNOLOGIAS DE CONVERSÃO DE ENERGIA DE  
ONDAS EM ENERGIA ELÉTRICA APLICÁVEIS A ESTA REGIÃO

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Oceanografia com habilitação em Pesquisa Oceanográfica, ao curso de graduação em Oceanografia, Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná.

Orientadores:  
Dr. Arthur Antônio Machado  
Prof. Dr. Maurício Almeida Noernberg.

PONTAL DO PARANÁ

2018

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente ao meu orientador Arthur, por ter tanta paciência e disposição, por ter me dado a oportunidade de trabalhar com essa temática que me interessava desde o início da graduação. Por ter me incentivado, me auxiliado, e me dado total liberdade para fazer meu trabalho do meu jeito. Por ter estado presente - mesmo que distante. E por ter se empenhado para que eu pudesse realizar esse trabalho da melhor forma possível, apesar do pouco tempo que tivemos. E ao meu co-orientador Maurício Noernberg por ter me aceitado de última hora, e pelos palpites sucintos e sensatos.

Ao Dani Lainequer, que foi meu companheiro de guerra inseparável nesses anos de graduação. Pelos passeios de barco, pelas idas pra ilha, pela paciência nos momentos complicados, pela alegre companhia em todos os momentos, pelos ensinamentos que me proporcionou, e que apesar da extrema chatura, sempre foi e será muito importante pra mim.

Às minhas mais queridas e mais próximas amigas - Luanete, Janinha, Yara, Vanderléia, e em especial à miudinha (Ligia Tebechrani) por ter sido minha dupla nos trabalhos de tema livre - onde sempre escolhíamos trabalhar com ondas - pelos momentos de diversão durante as monografias (rrrelógió - piadinha interna), e por ter estado tão presente nos últimos meses do meu trabalho.

Às “Queridinhas”, pois formamos um grupo maravilhoso no início da graduação - foi muito divertido ter vocês presentes. Em especial a “Ju de Óreo”, que apesar de ter nos abandonado no caminho, não deixou de ser querida. E aos demais colegas de turma também, que apesar de não sermos muito próximos, fizeram parte desse período importante. Que todos vocês tenham muito sucesso na vida.

Ao querido professor Carlos Soares, que foi um dos melhores professores que já tive. Mais incentivadores e empolgados em sala, e também fora dela.

Aos professores Érica e Bersano, que me ensinaram muito também fora da sala de aula, me proporcionaram ótimas oportunidades e ensinamentos durante grande parte da graduação, e aos meus queridos amigos de laboratório e de Mirassol.

À cidade de Pontal, por me ensinar a ser forte, por ter me mostrado uma parte de mim que eu não conhecia, e por me transformar numa pessoa melhor.

Ao meu grande amigo Alessandro, por ter estado presente em momentos de tanta necessidade.

Aos meus amigos e amigas goianas pela diversão nas férias, e aos meus parentes postiços, Eliane, Acir, Amanda, Amy, Julie e Bree, por fazerem parte da minha vida, me incentivarem, e por terem participado de momentos tão bons da minha vida.

E por último e mais importante, à minha família, em especial ao meus queridos pais, pois sem o apoio e a confiança deles eu não teria feito essa graduação e muito menos realizado um trabalho tão prazeroso como foi esse. Amo muito vocês.

A todos que de alguma forma fizeram parte desse período tão importante na minha vida, só tenho a agradecê-los.

## RESUMO

A energia elétrica é um bem essencial à vida moderna, entretanto, os atuais métodos de produção de energia vêm causando diversos impactos ambientais. Na era das energias de fontes renováveis, surgiram os conversores de energia de onda (WEC - *Wave Energy Converters*), uma tecnologia emergente, limpa, porém de custo ainda relativamente elevado quando comparada à outras fontes renováveis. Com o intuito de calcular o potencial energético das ondas na costa sul do Brasil, e avaliar possíveis tecnologias conversoras aplicáveis à esta região, foram comparados dados de quatro boias da Rede Ondas, com dados de oito pontos gerados pelo modelo WaveWatch III. No período analisado, a direção predominante de ondas incidentes na costa sul do Brasil foi entre sul e leste, com predominância maior de sudeste. O maior potencial energético encontrado pelas boias da Rede Ondas foi em Florianópolis (SC), com potência média de 15,24 kW/m e potência máxima de 560,61 kW/m; e o menor em Pontal do Paraná (PR), com potência média de 4,46 kW/m e máxima de 41,84 kW/m. No geral, os dados do modelo foram bastante correlatos com os dados das boias. A partir do levantamento teórico das tecnologias conversoras, o WEC que pareceu mais apropriado para implantação na região sul foi o WaveNET da empresa Albatern, (do tipo *nearshore/offshore, wave activated body, point absorber*) principalmente devido a sua capacidade de geração de energia com ondas de 0,5 a 6 m de altura, de instalação em matrizes, e por já ter sido testado em escala comercial. Os WEC são uma forma de energia renovável bastante promissora, mas que ainda necessita de muitos testes, aprimoramentos e investimentos. A costa brasileira tem um grande potencial energético de ondas - principalmente a região sul, a qual poderia ser mais explorada para instalação, testes e desenvolvimentos dessas tecnologias, visando possíveis exportações e principalmente o aumento da matriz energética renovável do país.

Palavras-chave: Clima de ondas. Potencial energético das ondas. Conversores de energia de onda. WaveWatch III.

## ABSTRACT

Electricity is essential to the modern world, although the current methods of energy production are leading to serious environmental problems. In the era of renewable energies, the wave energy industry arises. Wave energy converters (WEC) are a clean, emergent, but still an expensive alternative among the renewables. With the purpose of calculating the wave power in the southern Brazilian coast as well as to assess the possible applicable technologies to this area, data from four buoys from the Rede Ondas project were compared with numerical modelling data from WaveWatch III. In the period considered, the predominant wave direction was between south and east, with more predominance from southeast. The highest power value (from Rede Ondas) was observed in Florianópolis (SC), with mean wave power of 15,24 kW/m and maximum of 560,61 kW/m; the lowest was found in Pontal do Paraná (PR), with mean wave power of 4,46 kW/m, and maximum of 41,84 kW/m. Overall, the modelling data matched with the buoy data. From the technologies cited, the most appropriate for the southern region appears to be the WaveNET, from Albatern (nearshore, wave activated body, point absorber) mainly because of its capability to generate electricity from a wide range of wave heights (0,5 - 6 m), the possibility to build wave farms, and because it has already been tested in commercial scale. WEC are a very promising form of renewable energy, but still need more tests, improvements, and investments. The Brazilian coast has a large wave potential (especially in the southern region) which could be exploited for development, installation, and testing of these technologies, aiming possible exporting, and mainly the increase of the renewable energy matrix in the country.

Keywords: Wave climate. Wave Power. Wave energy converters. WaveWatch III.

## LISTA DE SIGLAS

D <sub>P</sub>	— Direção de pico
E	— Leste
ESE	— Les-sudeste
kW	— Quilowatts
H <sub>s</sub>	— Altura significativa
INPH	— Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias
IRENA	— International Renewable Energy Agency
N	— Norte
NE	— Nordeste
NNE	— Nor-nordeste
NNW	— Nor-noroeste
NW	— Noroeste
m	— Metros
P	— Potência
S	— Sul
SE	— Sudeste
SSE	— Su-sudeste
SSW	— Su-sudoeste
SW	— Sudoeste
T <sub>P</sub>	— Período de pico
W	— Oeste
WNW	— Oés-noroeste
WSW	— Oés-sudoeste

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>9</b>
1.2 OBJETIVOS.....	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>13</b>
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>16</b>
3.1 CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NA COSTA SUL.....	16
3.1.1 Dados Rede Ondas .....	16
3.1.1.1 Paraná - Pontal do Paraná .....	16
3.1.1.2 Santa Catarina - Florianópolis .....	21
3.1.1.3 Rio Grande do Sul - Cassino.....	23
3.1.1.4 Rio Grande do Sul - Tramandaí.....	24
3.1.2 Modelo WWIII .....	25
3.1.2.1 Paraná .....	25
3.1.2.2 Santa Catarina.....	27
3.1.2.3 Rio Grande do Sul .....	30
3.2 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDAS.....	33
3.2.1 Tipos de conversores.....	33
3.2.2 Exemplos de conversores .....	36
3.2.2.1 LIMPET.....	36
3.2.2.2 The Mighty Whale .....	37
3.2.2.3 WaveNET - Albatern .....	38
3.2.2.4 WaveSurfer - Ocean Energy Industries .....	39
3.2.2.5 Anaconda - SeaEnergy.....	41
3.2.2.6 Wave Clapper e Power Wing - Eco Wave Power .....	42
3.2.2.7 WaveRoller .....	43
3.2.2.8 Pelamis Wave Power.....	44
3.2.2.9 Wave Dragon.....	45
3.2.2.10 Wello Penguin.....	46
3.2.2.11 Archimedes wave swing.....	47
<b>4 DISCUSSÃO</b> .....	<b>49</b>
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>62</b>
<b>6 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>63</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um bem essencial à sociedade moderna, desempenhando um papel importantíssimo no desenvolvimento econômico da humanidade, e sendo amplamente utilizada em diversas áreas. O consumo energético mundial é atualmente bastante elevado, e estima-se que vá aumentar ainda mais nas próximas décadas (1). Sabendo que os métodos atuais de geração de energia vêm contribuindo com diversos problemas ambientais (mudanças climáticas), países desenvolvidos vêm buscando métodos alternativos para produção de energia que causem o mínimo possível de impacto ambiental — as energias de fontes renováveis. Em meio a evolução das energias renováveis, surgiram as indústrias conversoras de energia de ondas do mar, uma metodologia emergente, limpa, e de alto rendimento. Apesar de ser uma tecnologia nova e ainda não economicamente competitiva com outras formas de energia renovável (como a eólica, por exemplo), o interesse por parte de países desenvolvidos nessa metodologia tem crescido bastante.

A ideia de converter as ondas superficiais do oceano em energia elétrica vem de antes dos anos 1800, e teve suas primeiras patentes registradas em 1799 pelo francês *Monsieur* Girard e seu filho. Na Europa, o desenvolvimento de pesquisas e estudos sobre conversão de energia de ondas foi intensificado após o aumento dos preços dos combustíveis, e desde então surgiram vários projetos governamentais e particulares nessa linha de pesquisa (1).

As fontes de energia renováveis representam 14% do fornecimento global (2), e considerando somente países industrializados, esse valor cai para apenas 6%. No Brasil, as energias renováveis representam 46,9% da matriz energética - sendo a hidreletricidade e a energia de biomassa as representantes mais relevantes (3), (4). Apesar dessa grande participação de energias renováveis, os estudos sobre conversão de energia de ondas no Brasil ainda são bem recentes e relativamente pouco desenvolvidos.

Em 2012 foi instalada a primeira usina para conversão de energia de ondas no Brasil. Um projeto piloto no Porto do Pecém, no Ceará. Entretanto, em 2016 se encerrou o contrato com a empresa responsável pela usina (Tractebel Energia - atualmente chamada ENGIE Brasil) e ela ficou abandonada. Havia planos de retomada do projeto em 2017, mas até meados de 2018 não houve novas informações.

Pode-se entender o termo “onda” como uma perturbação de um meio, onde não há o transporte ou movimentação desse meio para outro ponto, somente energia é

transportada. Entretanto, na prática, as ondas no oceano transportam energia e massa, segundo a Deriva de Stokes. O movimento ondulatório consiste em deslocar as partículas de água em equilíbrio, para uma posição de desequilíbrio - o que gera um movimento basicamente sinusoidal - e para retornar à posição anterior é necessária uma força restauradora (5).

Há diversos tipos de ondas que podem ocorrer nos oceanos. Elas são classificadas de acordo com a escala, em termos de comprimento de onda e períodos específicos. Em menor escala, temos as ondas capilares, seguidas pelas ondas capilares-de-vento, depois as gravitacionais (que serão abordadas neste trabalho), e em escalas bem maiores temos os seiches, tsunamis, *storm surges*, e marés astronômicas (6).

As ondas superficiais mais conhecidas são as que ocorrem na interface oceano-atmosfera: são formadas pelo vento soprando na superfície do oceano, e têm a força gravitacional como sua principal força restauradora (5). Explicando de forma simplificada a geração das ondas de vento: quando o vento age sobre a superfície do oceano, as primeiras ondas a se formarem são as capilares - possuem no máximo 1,73 cm de comprimento de onda ( $\lambda$ ), e sua principal força restauradora é a tensão superficial. Se o vento continuar a agir sobre a superfície, as pequenas ondas capilares continuam adquirindo energia, aumentando tanto em altura ( $H$ ) quanto em  $\lambda$ , e quando o  $\lambda$  excede os 1,73 cm, a tensão superficial não é mais capaz de atuar como força restauradora dominante, e a gravidade passa a ser a principal força restauradora - assim temos as ondas de gravidade (7). Uma variedade de forças perturbadoras e restauradoras podem gerar ondas na superfície dos oceanos; entretanto, as ondas exploradas pelos conversores de energia são geralmente as geradas pelo vento (8).

Por ser uma tecnologia muito nova no Brasil, os termos referentes aos dispositivos conversores de energia de onda (WEC - sigla em inglês para *Wave Energy Converter*) ainda não foram completamente traduzidos, e portanto serão referidos aqui pelos termos e siglas em inglês. Atualmente há diversos dispositivos conversores de energia de ondas, alguns já em uso, outros ainda na fase de protótipos, e outros apenas na teoria. Eles podem ser classificados de acordo com a localização em *shoreline*, *nearshore* e *offshore*, dependendo da profundidade em que são instalados, não necessariamente dependendo da distância que estão da costa. Dispositivos *shoreline* ou *onshore* são colocados exatamente na costa; *nearshore*, em águas relativamente rasas, e *offshore*, em profundidades onde as ondas não são afetadas pelo fundo (9). Podem ser classificados também de acordo com o princípio de funcionamento, existindo centenas de modelos.

O Brasil possui uma linha de costa de aproximadamente 9000km de extensão, entre as latitudes 4°N e 34°S (10), sendo a região sul responsável por aproximadamente 16% dessa extensão (mais de 1400km). Esta região tem o regime de ondas determinado pela Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e pela passagem de frentes frias sinóticas. Segundo(10), toda a costa do Paraná (PR), e grande parte da costa de Santa Catarina (SC) (até Cabo de Santa Marta) é formada por embaiamentos rochosos (“*rocky embayed coasts*”), no geral com praias dominadas por ondas. E de Cabo de Santa Marta até o fim da costa do Rio Grande do Sul (RS), são costas do tipo dunas-barreira (“*barrier dunes*”), com praias dominadas por ondas de alta energia. Segundo (11), há uma tendência de decréscimo da energia das ondas gravitacionais de sul para norte na costa brasileira, que resulta da influência dos fortes ventos associados a passagem de frentes frias vindas de sul. Elas afetam mais as regiões sul e sudeste do Brasil, pois vão perdendo força a medida que se deslocam em direção ao norte. Podem ser observados eventos de ondas de alta energia com maior frequência nos meses de outono e inverno, associados à passagem desses fortes ventos.

Diversos autores dissertam sobre a falta de dados para caracterização do clima de ondas na costa brasileira. (12) diz que mesmo com o desenvolvimento de redes como GOOS/Brazil (*Global Ocean Observing System*), o Programa Nacional de Boias (PNBOIA), o *Monitoring Network Waves in Shallow Waters*, entre outros, o Brasil ainda carece de uma série de dados longa e confiável, pois devido a baixa quantidade de sistemas operacionais, aliados a dificuldade de logística e o curto tempo que esses sistemas ficam operando, há apenas uma curta série de dados, com diversos intervalos de tempo onde não há dados.

Segundo (13), os trabalhos para caracterização do clima de ondas no PR tiveram início com Bandeira em 1974. Duas outras campanhas foram feitas pela Portobrás e pelo INPH (Instituto Nacional de Pesquisas Hidroviárias) em 1983 e 1985 respectivamente. Marone e Camargo coletaram dados de ondas em 1994, Martins em 2002, e Porto Lima em 2008. Portanto são dados descontínuos e de locais ligeiramente diferentes da costa paranaense, tornando precária a caracterização do clima de ondas nessa região. A costa do PR se estende por 126km de praias dominadas por ondas e praias modificadas por maré, onde a maior parte do tempo (63%) chegam ondas de vento, com os maiores *swells* chegando no outono; a energia mais alta na costa é associada a ventos de S-SE (14). A direção predominante das ondas é de S-SE e SE (13), sendo a altura média significativa (a 18m de profundidade) de 1,6m, e o período médio de 8,4s.

De acordo com (15) o clima de ondas na costa de SC foi resumido por (16), (17), (18), (19), (20), (21), (22) e (23) como tendo um swell dominante de sul, com período de 12s e altura média entre 1 - 1,5 m (chegando a 2m no inverno) mais distante da costa; enquanto mares gerados mais localmente chegam de leste a nordeste, com período de 7 s e altura média de 1 - 1,25 m durante outono e inverno particularmente.

A costa do RS se estende por aproximadamente 620 km, e devido a processos sedimentológicos, sua plataforma continental (entre as latitudes de 29° - 34° S aproximadamente) é rasa (100 - 140 m), larga (100 - 200 km) e de declividade suave (0,03° - 0,08°), sendo uma das mais largas do Brasil, com mais de 80 km (24). É do tipo dominada por ondas, com o fluxo de energia das ondas controlando o comportamento da praia. Em águas rasas, ondas de S-SE têm maior frequência de ocorrência, com altura significativa ( $H_s$ ) variando entre 0,5 - 1,5m (25). (26) encontrou  $H_s$  de 1,5m no litoral NE do RS, a uma profundidade de 15 - 20 m.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Considerando primeiramente o imenso potencial energético disponível nos oceanos, aliado à necessidade de desenvolvermos tecnologias limpas para a produção de energia elétrica, e ainda somados ao fato do Brasil possuir uma extensa linha de costa, com grande potencial para extração de energia de ondas, este trabalho tem como objetivo principal calcular e avaliar o potencial energético das ondas para a costa sul do Brasil, e fazer o levantamento teórico de tecnologias para conversão de energia de ondas em energia elétrica, que possam ser aplicadas à esta região.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Calcular o potencial energético das ondas na costa do PR, do SC e do RS;

Analisar a correlação entre os dados de onda obtidos por fundeios e os gerados pelo modelo WaveWatch III®;

Fazer um levantamento teórico de tecnologias conversoras de energia de ondas;

Avaliar a aplicabilidade das tecnologias conversoras citadas à região sul do Brasil;

## 2 METODOLOGIA

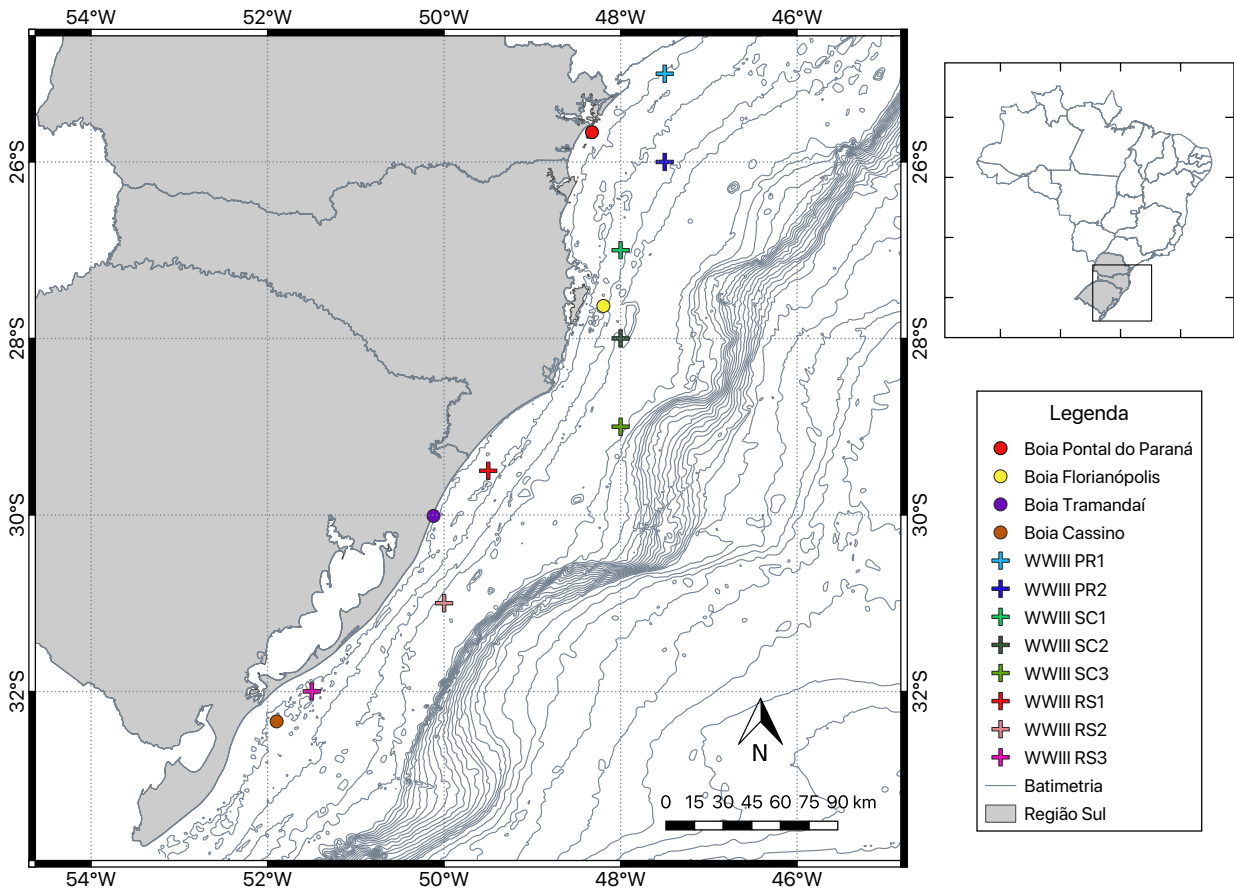
Os dados de ondas utilizados no presente estudo são de duas fontes diferentes: fundeios e modelos. Os dados instrumentais de fundeios foram de ondógrafos e boias meteo-oceanográficas instaladas ao longo da costa sul brasileira, provenientes da Rede Ondas - Rede de Monitoramento de Ondas em Águas Rasas. Foram usados dados de quatro boias: uma fundeada ao largo da costa de Pontal do Paraná (PR) (25° 39' 46" S, 48° 19' 27" W), uma perto de Florianópolis (SC) (27° 37' 56" S, 48° 11' 42" W), outra próxima à costa de Tramandaí (RS) (30° 0' 40" S, 50° 7' 12" W), e outra nas proximidades da Praia do Cassino (RS) (32° 20' 23" S, 51° 53' 53" W). Os períodos dos dados podem ser vistos na [Tabela 1](#). Todas as boias se encontravam em manutenção até a conclusão deste trabalho, e há descontinuidade no período dos dados.

Já os dados de modelo, foram utilizados os disponibilizados pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) do modelo WaveWatch III®, com resolução espacial de 1,25° de longitude e 1° de latitude, e resolução temporal de 3 horas, do período de 2005 a 2017. Os dados instrumentais de fundeios foram utilizados para verificar se os dados de modelos disponíveis são correlatos a eles. Para o presente estudo foram utilizados 8 pontos da grade do modelo ao longo da costa sul brasileira, sendo 2 na costa do PR, 3 na costa de SC, e 3 na costa do RS. A localização das boias e dos pontos do modelo podem ser vistos na [Figura 1](#). Os dados de onda modelados citados estão disponíveis no site da NOAA: <ftp://polar.ncep.noaa.gov/pub/history/waves>.

TABELA 1. PERÍODOS DOS DADOS REFERENTES ÀS BOIAS E AOS PONTOS DO MODELO.

Boia	Período dos dados (mês/ano)	Geração dos dados
Pontal do Paraná	12/2013 – 08/2015	A cada 1 hora
Florianópolis	01/2002 – 08/2005	A cada 1 hora
Tramandaí	11/1962 – 09/1963 e 11/2006 – 07/2016	A cada 12 horas
Cassino	01/2016 – 11/2016	A cada 0,5 hora
Pontos WWIII	01/2005 – 12/2007	A cada 3 horas

FIGURA 1 - ÁREA DE ESTUDO COM A POSIÇÃO APROXIMADA DAS BOIAS DA REDE ONDAS (CÍRCULOS) E OS PONTOS DO MODELO WWIII (CRUZES). BATIMETRIA APROXIMADA DO ATLÂNTICO SUL.



Para calcular o potencial energético das ondas na região Sul do Brasil, foi utilizada a equação de “potência por unidade de comprimento de crista de onda” (KW/m) segundo (3). A densidade média de energia total ( $E_T$ ) para ondas de gravidade, é dada pela equação a seguir, expressa em Nm/m<sup>2</sup>:

$$E_T = E_C + E_P = \frac{1}{2} \rho g a^2$$

onde  $E_C$  é a densidade média de energia cinética (Nm/m<sup>2</sup>),  $E_P$  é densidade média de energia potencial (Nm/m<sup>2</sup>),  $\rho$  é a massa específica da água,  $g$  é a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>),  $a$  é a amplitude (m).

O fluxo médio de energia é a taxa que a energia das ondas se propaga por unidade de comprimento de crista, através de um plano vertical perpendicular à direção de propagação da onda. É obtido a partir da velocidade de grupo  $c_g$  e da densidade de energia total  $E_T$ , como na equação seguinte:

$$P = E_T \cdot c_g$$

A velocidade de propagação da energia da onda é dada pela seguinte equação:

$$c_g = \frac{gT}{4\pi}$$

O fluxo médio de energia  $\mathbf{P}$  é calculado para ondas monocromáticas simples através da equação:

$$P = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T$$

O mar pode ser modelado como um processo aleatório, resultado da superposição de um grande número de componentes monocromáticas. Assim, parâmetros de ondas como período, altura e direção devem ser tratados por métodos estatísticos. Os parâmetros estatísticos mais utilizados são a altura significativa  $\mathbf{H}_s$  e o período médio de energia  $\mathbf{T}_e$ . O fluxo de energia para um mar real é calculado através da equação a seguir, onde  $\mathbf{S}(\mathbf{f}, \boldsymbol{\theta})$  é a distribuição de densidade de energia em termos de frequência e direção.

$$P = \frac{\rho g^2}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} S(f, \theta) f^{-1} df d\theta$$

A integração da equação acima leva a uma expressão da potência por unidade de comprimento de crista de onda, conforme mostrado na equação abaixo:

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

Como  $\rho g^2 / 64\pi$  equivale a 490,6, a potência  $\mathbf{P}$  em kW/m foi calculada através da equação final, para todas as regiões propostas deste trabalho:

$$P[kW/m] = 0,4906 H_s^2 T_e$$

Os dispositivos de conversão foram classificados primeiramente de acordo com a localização (*shoreline*, *nearshore* ou *offshore*) e quanto ao princípio de funcionamento. Foram descritos ainda os potenciais de cada um (segundo os fabricantes) e foram analisados quanto à viabilidade de instalação na costa Sul do Brasil.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 CÁLCULO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DAS ONDAS NA COSTA SUL

Foi calculado o potencial das ondas na costa sul do Brasil a partir dos dados obtidos de quatro boias do projeto Rede Ondas (Pontal do Paraná - PR, Florianópolis - SC, Cassino e Tramandaí - RS) e de 8 pontos do modelo WaveWatch III® da NOAA (2 no PR, 3 em SC e 3 em RS).

##### 3.1.1 Dados Rede Ondas

Os dados de P média e máxima, Hs média e máxima, Tp médio e máximo, e Dp segundo a Rede Ondas podem ser vistos na [Tabela 2](#). A boia de Florianópolis registrou as maiores Hs (média e máxima), maiores Tp (médio e máximo), e maiores P (média e máxima). Além disso, teve a Dp mais de leste comparada às demais localizações - enquanto Pontal do Paraná, Cassino e Tramandaí se mantiveram nos quadrantes entre ESE e SSE, Florianópolis teve Dp entre E e ENE.

TABELA 2. VALORES DE HS, TP, P E DP RELATIVOS ÀS BOIAS DA REDE ONDAS NA COSTA SUL DO BRASIL.

Localização da boia	Hs média (m)	Hs máxima (m)	Tp médio (s)	Tp máximo (s)	P média (kW/m)	P máxima (kW/m)	Dp (°)
Pontal do Paraná	1,00	2,26	9,00	16,70	4,46	41,84	138,98
Florianópolis	<b>1,71</b>	<b>7,24</b>	<b>10,60</b>	<b>21,80</b>	<b>15,24</b>	<b>560,61</b>	79,63
Cassino	1,24	5,52	9,42	20,00	7,15	298,97	146,15
Tramandaí	1,17	4,95	8,09	21,50	5,49	258,44	108,77

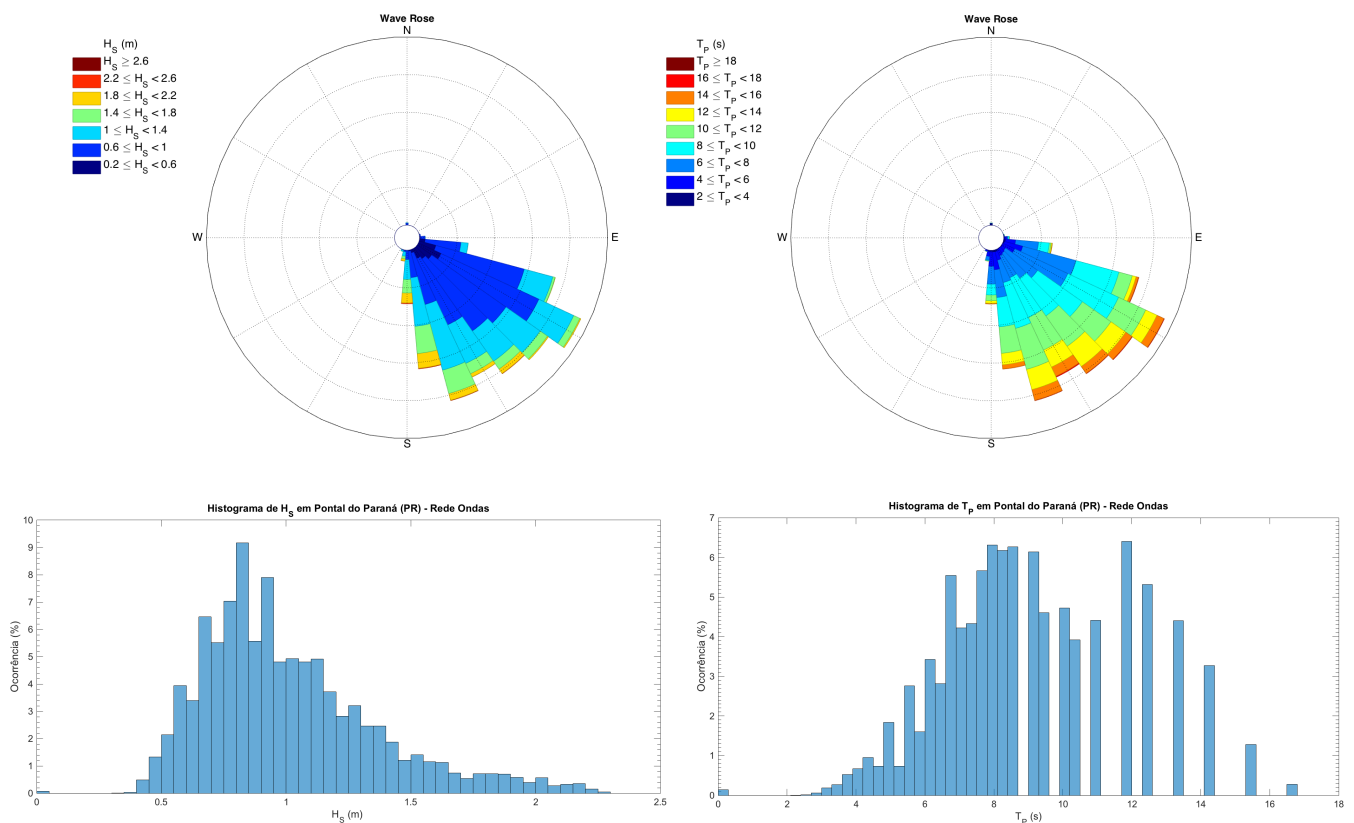
##### 3.1.1.1 Paraná - Pontal do Paraná

A partir dos gráficos e histogramas podemos observar que houve predominância de ondas vindas das direções entre S e E, com maior concentração entre SSE e ESE. As menores frequências de ocorrência foram próximas de E e S. Entre ESE e quase SSE houve predominância de ondas com Hs entre 0,6 e 1m, seguido de Hs entre 1 e 1,4 m, e poucas entre 1,4 e 1,8m. A partir de SE há aumento na frequência de ondas entre 1,8 e 2,2 m e há ocorrência de ondas entre 2,2 e 2,6 m. Quanto mais a S, menor a frequência

de ondas entre 0,2 e 1 m, e maior a frequência das ondas de 1 a 2,2 m. A  $H_s$  máxima foi entre S e SE com 2,6 m, e a  $H_s$  de maior frequência de ocorrência foi no entorno dos 0,8 m (Figura 2).

Houve ocorrência de todos os intervalos de  $T_p$  (2 a 18 s) em todas as direções citadas. Entre ESE e SE houve leve predominância de  $T_p$  entre 6 e 10 s, seguido por 10 e 12 s, e 12 e 14 s, com menor ocorrência dos  $T_p$  mais altos (entre 14 e 18 s). A partir de SE em direção a S, há diminuição da frequência de  $T_p$  entre 6 e 8 s, e quase permanência na frequência dos  $T_p$  entre 8 e 18 s. O  $T_p$  máximo foi entre ESE e SSE com 16,7 s, e a maior frequência de ocorrência foi principalmente entre 7 e 9 s (Figura 2).

FIGURA 2 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE  $H_s$  E  $T_p$  DA BOIA DA REDE ONDAS EM PONTAL DO PARANÁ.



### Paraná - por estações

No geral, em todas as estações houve ondas entre S e E, porém com maior frequência entre os quadrantes de SSE e ESE. Sendo que houve aumento da  $H_s$  de E para S. As ondas de E foram as menos frequentes, e as de S as de maior  $H_s$ . Os menores  $T_p$  ficaram distribuídos em todas as direções, e os maiores ficaram mais concentrados entre SSE e ESE. A maior potência média foi encontrada no outono (5,28

kW/m), com desvio de 0,88 entre as estações. A maior P máxima foi encontrada no verão e no outono (41,85 kW/m), com desvio de 1,03 entre as estações. Os dados de Hs, Tp, P e Dp de cada estação podem ser vistos na [Tabela 3](#).

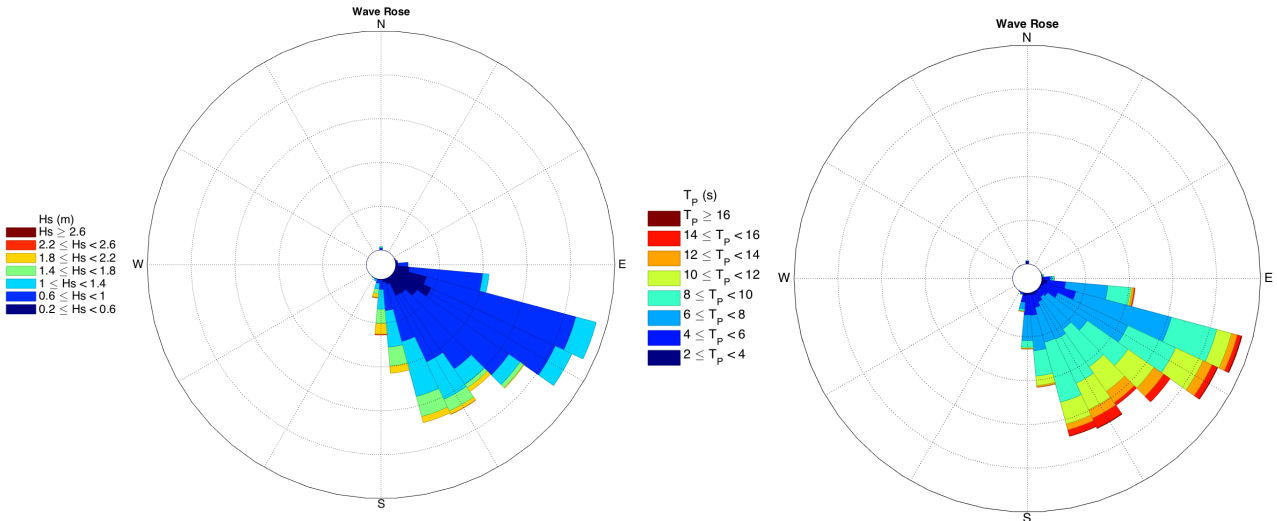
TABELA 3. VALORES DE HS, TP, P E DP RELATIVOS À BOIA DA REDE ONDAS EM PONTAL DO PARANÁ, SEPARADOS POR ESTAÇÕES DO ANO.

Parâmetro / Estação	Primavera	Verão	Outono	Inverno	Desvio Padrão
<b>Hs Média (m)</b>	<b>1,05</b>	0,91	<b>1,05</b>	1,04	0,07
<b>Hs Máxima (m)</b>	2,20	<b>2,26</b>	<b>2,26</b>	2,24	0,03
<b>Tp Médio (s)</b>	8,12	8,22	<b>9,76</b>	9,61	0,88
<b>Tp Máximo (s)</b>	16,70	16,70	16,70	16,70	0,00
<b>P Média (kW/m)</b>	4,40	3,34	<b>5,28</b>	5,09	0,88
<b>P Máxima (kW/m)</b>	39,65	<b>41,85</b>	<b>41,85</b>	41,11	1,03
<b>Dp Médio ( ° )</b>	132,67	135,23	146,55	138,29	6,03

## Verão

Foram contabilizados 4236 dados horários de ondas no verão. A direção predominante de incidência das ondas foi entre ESE e SE, com a grande maioria entre 0,6 e 1,0 m de Hs. Já as ondas entre S e SE foram menos frequentes, porém de maior Hs - entre 0,6 e 1,4 m, sendo que quanto mais de S maiores as ondas. A Hs máxima foi de S, com 2,6 m. Os Tp foram mais consistentes, ou seja, todos os intervalos (de 2 a 16 s) ocorreram em todas as direções, sendo os mais frequentes entre 6 e 10 s, seguidos de 10 a 12 s, e o menos frequente entre 12 e 16 s. Houve uma ligeira predominância de Tp entre 6 e 8 s na direção de ESE quando comparada às demais direções. O Tp máximo encontrado foi de ESE com 16,7 s ([Figura 3](#)).

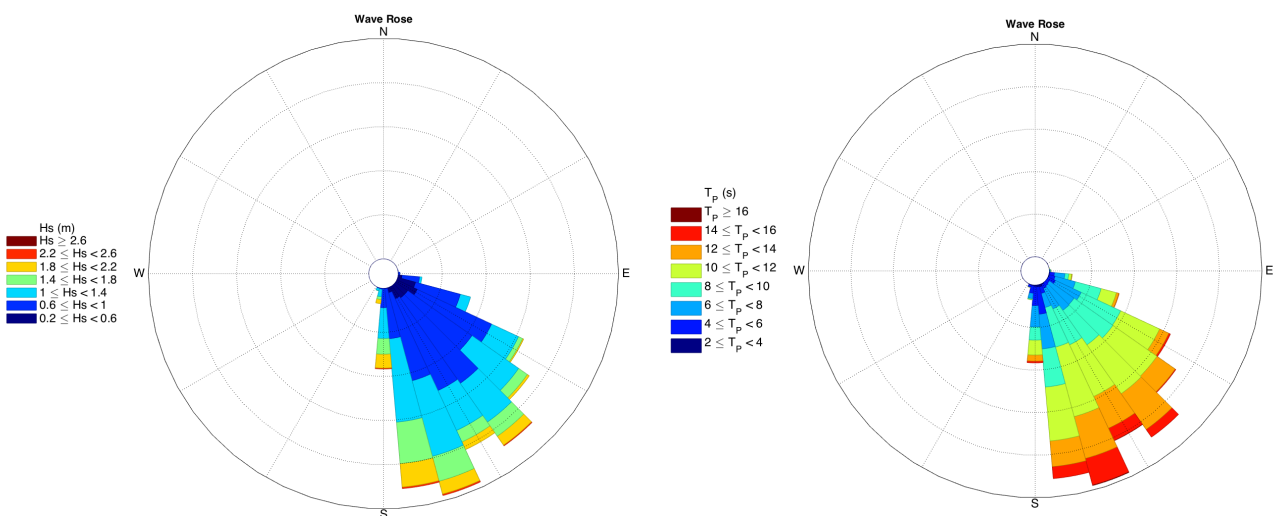
FIGURA 3 - WAVE ROSES DE HS E TP EM PONTAL DO PARANÁ, NO VERÃO.



## Outono

Foram contabilizados 4277 dados horários de ondas no outono. A direção predominante foi entre SSE e SE (com maior concentração em SSE), sendo a maioria com Hs entre 0,6 e 1,4 m. As ondas de SSE foram um pouco maiores que as de SE, e tiveram Hs predominantes entre 1 e 1,8 m. A Hs máxima de 2,26 m foi proveniente de SE - SSE. No geral, houve predominância de Tp entre 8 e 12 s, seguido de Tp entre 12 e 14 s. Mais próximo de S, aumentou a frequência de períodos baixos, entre 2 e 4 s. A frequência de períodos entre 14 e 16 s foi maior entre S e SE do que entre SE e ESE. O Tp máximo foi de 16,7 s, proveniente de SSE ([Figura 4](#)).

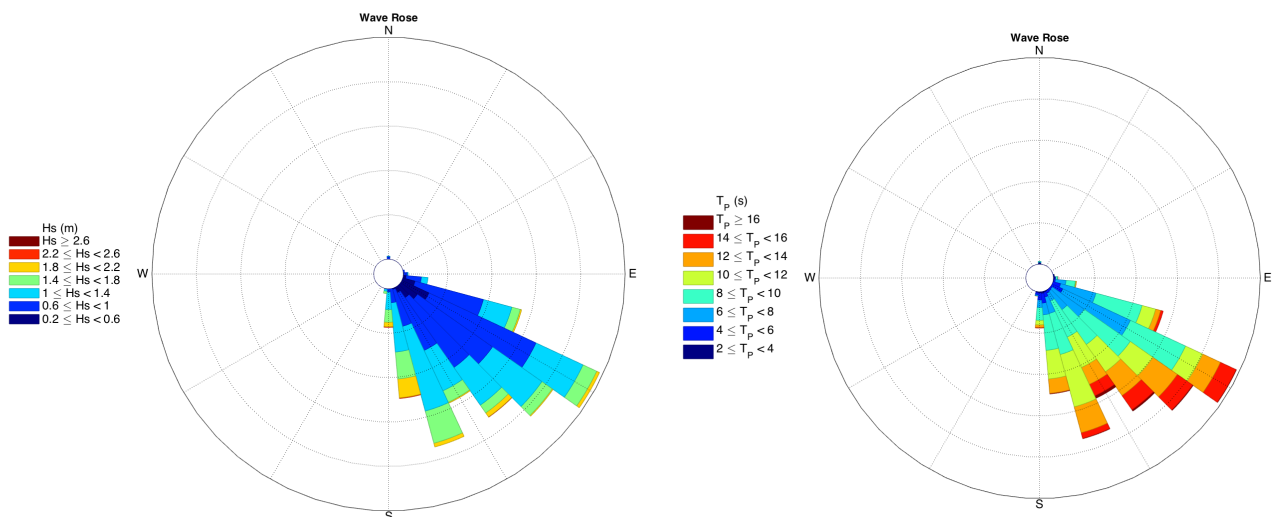
FIGURA 4 - WAVE ROSES DE HS E TP EM PONTAL DO PARANÁ, NO OUTONO.



## Inverno

Foram contabilizados 3331 dados horários de ondas no inverno. A direção predominante das ondas foi entre ESE e SSE (com maior concentração em SE), e Hs predominante entre 0,6 e 1,4 m, seguido de ondas entre 1 e 1,4 m. No entorno de SE, predominância de ondas com Hs entre 0,6 e 1,4 m; sendo que quanto mais em direção a S, menor a frequência dessas alturas. Em SSE, há um aumento da frequência de ondas entre 1 e 1,4 m. Em todas as direções ocorrem ondas com Hs entre 1,4 e 2,2 m, entretanto, mais próximo a S a frequência dessas alturas é maior que nas outras direções. No geral, houve predominância dos períodos entre 8 e 10 s em todas as direções; sendo que entre ESE e SE houve um aumento do Tp entre 6 e 8 s, e em SSE aumento do Tp entre 10 e 12 s. O Tp entre 12 e 16 s teve frequência considerável principalmente entre SSE e quase ESE, porém não deixando de ocorrer nas demais direções. Entre SSE e quase ESE, houve grande frequência de períodos entre 14 e 16 s, chegando ao máximo de 16,7s em SSE ([Figura 5](#)).

FIGURA 5 - WAVE ROSES DE HS E TP EM PONTAL DO PARANÁ, NO INVERNO.

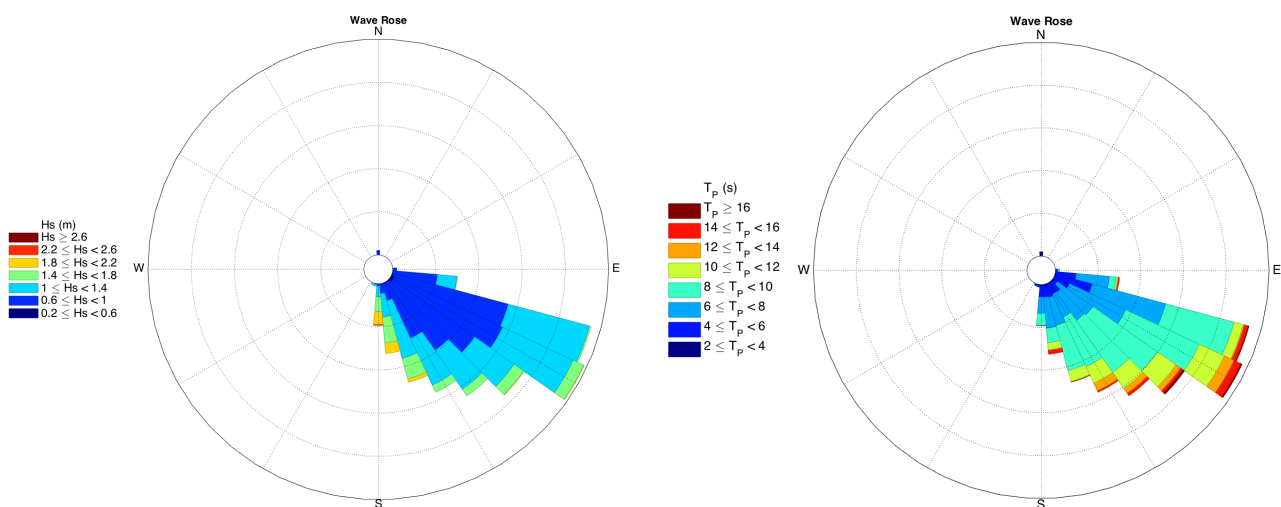


## Primavera

Foram contabilizados 2238 dados horários de ondas na primavera. Houve predominância de incidência de ondas nas direções entre ESE e SE principalmente. As Hs predominantes foram entre 0,6 e 1,4 m, com ocorrência de algumas ondas de 1,4 a 1,8 m (mais para SE). Indo de SE para SSE, ainda houve predominância de ondas com

Hs entre 0,6 e 1,4 m, porém com diminuição da frequência - quanto mais próximo de S, menor a frequência de ondas pequenas (entre 0,6 e 1 m) e maior a frequência de ondas maiores (acima de 1,4 m). De ESE a SE, a frequência de ondas entre 1,4 e 1,8 m foi aproximadamente constante, aumentando quanto mais próximo a S; bem como há aumento considerável da frequência de ondas entre 1,8 e 2,2 m nessa mesma direção. E proveniente de S, apesar de ser a direção com menor frequência de ondas incidentes, é a direção onde houve a maior Hs registrada, de 2,20 m. Os intervalos de Tp foram bem constantes em praticamente todas as direções. O intervalo de Tp predominante foi de 8 a 10 s, tendo sido menos frequente na direção S. O segundo intervalo mais frequente foi de 6 a 8 s, quase constante em todas as direções, e com um pico de frequência em ESE. Os períodos de 10 a 16 s, também ocorreram praticamente em todas as direções, porém em menor frequência que os demais. Os períodos acima de 16 s só ocorreram entre ESE e SE, com baixa frequência ([Figura 6](#)).

FIGURA 6 - WAVE ROSES DE HS E TP EM PONTAL DO PARANÁ, NA PRIMAVERA.



### 3.1.1.2 Santa Catarina - Florianópolis

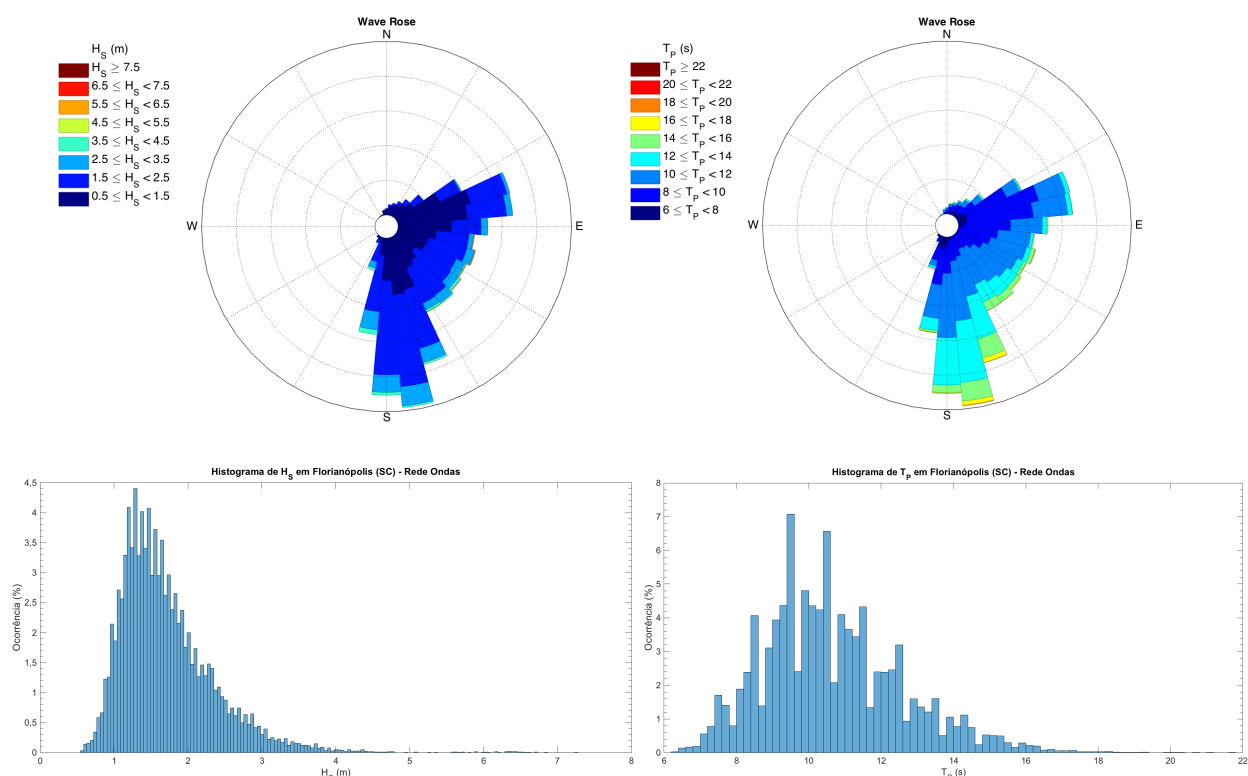
Os dados da boia mostram que as ondas incidentes foram predominantes entre os quadrantes de ENE e S (quase até SSW) com maior concentração em três áreas principais em ordem crescente de predominância: “área 1” aproximadamente entre S e SSE ( $165^\circ - 195^\circ$ ); “área 2” entre ENE e quase E, e “área 3” entre E e SSE. Próximo a SW e de NE a N houve menor incidência.

Na área 1 houve grande predominância de ondas entre 1,5 e 2,5 m, seguido de ondas entre 0,5 e 1,5 m (com frequências variadas) e 2,5 a 4,5 m com frequências

aproximadamente constantes. Na área 2 as alturas predominantes foram entre 0,5 e 1,5 m, seguido de 1,5 a 2,5 m, e com pequena ocorrência de ondas entre 2,5 e 3,5 m. Na área 3 as alturas predominantes também foram entre 1,5 e 2,5 m, seguido de 0,5 a 1,5 m, com pouca incidência de ondas entre 2,5 e 3,5 m, e com ocorrência de algumas ondas maiores que 3,5 m. A altura máxima foi proveniente de aproximadamente SE, com 7,24 m. A partir do histograma podemos observar que há maior ocorrência de ondas entre 1,2 e 1,8 m; e abaixo de 0,8 m e acima de 3 m há redução considerável da frequência.

Na área 1 o período predominante foi de 10 a 14 s, seguido de 14 a 16 s, e algumas ocorrências entre 16 e 20 s. Na área 2 o período predominante foi de 8 a 10 s, seguido de 10 a 12 s, e com baixas ocorrências, períodos entre 12 e 14 s. Na área 3 o período predominante foi principalmente de 10 a 12 s, sendo que mais para ESE aumentou a frequência de períodos entre 8 e 10 s, e diminuiu os de 12 a 14 s; enquanto mais para SE aumentou a frequência de períodos entre 12 e 14 s e diminuiu os períodos entre 8 e 10 s. Em toda a área 3 houve ocorrência de períodos entre 14 e 18 s, sendo que mais a SE a frequência foi mais alta que a ESE. O período máximo foi de 21,8 s proveniente de aproximadamente S. A partir do histograma, podemos observar dois picos maiores de frequência em 9,5 e em 10,5 s aproximadamente, e algumas concentrações entre 8,5 e 12,5 s. Acima dos 15 s de período e abaixo dos 7 s, a frequência diminuiu consideravelmente. As  $H_s$  mais frequentes foram entre 1,2 e 1,8 m ([Figura 7](#)).

FIGURA 7 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE  $H_s$  E  $T_p$  DA BOIA DA REDE ONDAS EM FLORIANÓPOLIS.



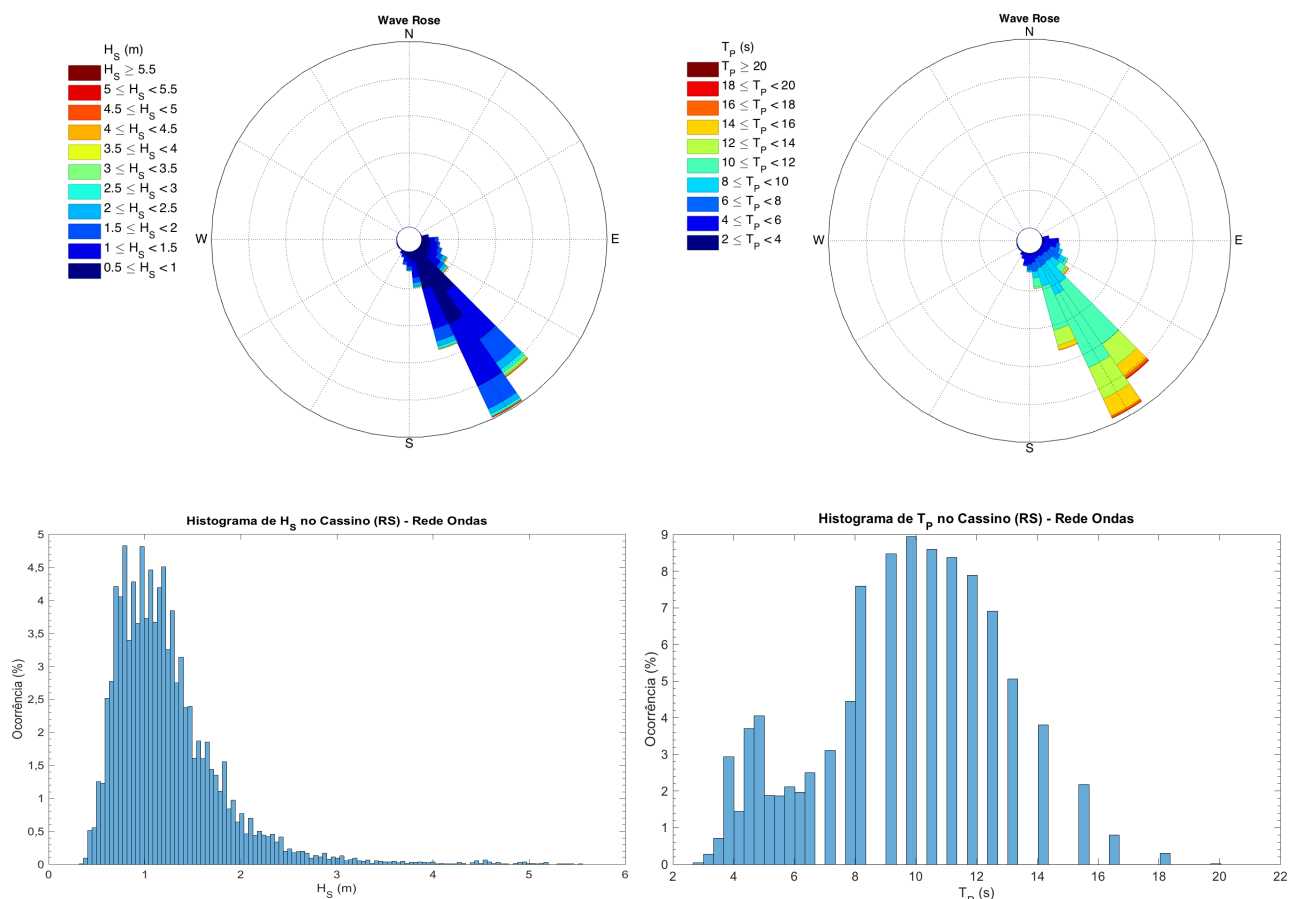
### 3.1.1.3 Rio Grande do Sul - Cassino

Os dados da boia mostram que as ondas incidentes foram provenientes dos quadrantes entre E e SSW, entretanto com grande predominância das direções entre SE e SSE.

Em todas as direções houve predominância de ondas com  $H_s$  entre 0,5 e 1,5 m. Houve incidência de ondas com  $H_s$  entre 1,5 e 2 m, 2 e 2,5 m, e 2,5 e 3 m entre SE e SSE, porém com frequências cada vez menores, quanto maiores as  $H_s$ . Ainda entre SE e SSE, porém num ângulo menor de abrangência, houve baixa incidência de ondas maiores que 2,5 m. A  $H_s$  máxima foi de 5,52 m, proveniente de quase SE ( $147^\circ$ ). A maioria das ondas ocorreu entre 0,6 e 1,5 m, como pode ser observado no histograma da [Figura 8](#).

Em todas as direções houve ocorrência constante dos períodos entre 4 e 8 s. No geral, o  $T_p$  predominante foi entre 10 e 12 s. Entre as direções SE e SSE, houve predomínio dos  $T_p$  entre 10 e 12 s, seguido de 8 e 10 s, e 12 e 14 s. Os  $T_p$  entre 14 e 16 s ocorreram nesse intervalo de direções (entre SE e SSE), porém com maior concentração mais próximo de SE; além disso, em SE houve incidência de ondas com  $T_p$  maior que 16 s. O  $T_p$  máximo foi de 20 s, proveniente de SE. A partir do histograma ([Figura 8](#)) podemos perceber que a distribuição dos  $T_p$  mais frequentes foi bem ampla, com pequena concentração entre 8 e 13 s.

FIGURA 8 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE  $H_s$  E  $T_p$  DA BOIA DA REDE ONDAS EM CASSINO.

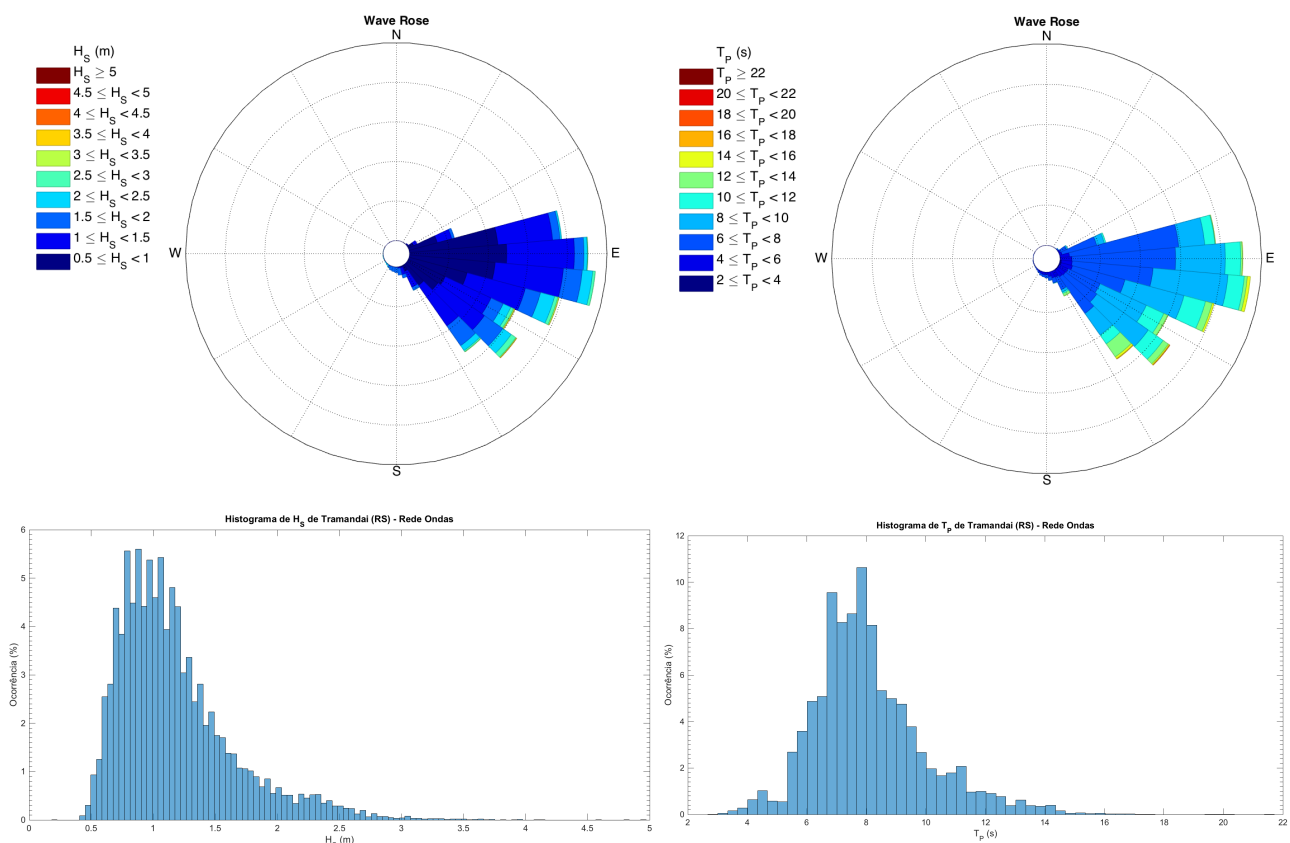


### 3.1.1.4 Rio Grande do Sul - Tramandaí

Os dados da boia mostram que as ondas incidentes foram predominantes das direções entre ENE e SE, com maior concentração no entorno da direção E. Próximo a E as  $H_s$  predominantes foram entre 0,5 e 1,5 m, com pouca ocorrência de ondas entre 1,5 e 3 m. Entre ESE e SE há diminuição da frequência de ondas entre 0,5 e 1 m, e aumento da frequência de ondas entre 2 e 2,5 m. Também há ocorrência de ondas entre 2,5 e 3,5 m. No quadrante S houve incidência de ondas, porém com baixíssima frequência e  $H_s$  entre 1 e 1,5 m. Com base no histograma, podemos observar que a maioria das ondas incidentes tem entre 0,7 e 1,3 m; e que a frequência de ondas acima de 2 m é bem baixa. A  $H_s$  máxima foi de 4,95 m proveniente de SE.

Próximo a E o  $T_p$  predominante foi entre 6 e 10 s, seguido de 10 a 12 s. De ESE a SE há diminuição na frequência de ondas incidentes, porém os períodos se mantêm quase constantes em relação ao quadrante descrito anteriormente. Em todas as direções há ocorrência de ondas com  $T_p$  entre 12 a 14 s e 14 a 16 s, porém há maior concentração desses intervalos de  $T_p$  entre SSE e SE. O maior  $T_p$  foi de 21,5 s proveniente de SE. A partir dos histogramas podemos observar que os  $T_p$  mais frequentes ocorreram entre 6,8 e 8,5 s ([Figura 9](#)).

FIGURA 9 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE  $H_s$  E  $T_p$  DA BOIA DA REDE ONDAS, EM TRAMANDAÍ.



### 3.1.2 Modelo WWIII

Os dados de P média e máxima, Hs média e máxima, Tp médio e máximo, e Dp calculados a partir do modelo WWIII podem ser vistos na [Tabela 4](#). Os pontos de Santa Catarina apresentaram os maiores valores de Hs média e máxima, Tp médio, P média e máxima. O maior Tp máximo foi encontrado em um dos pontos do Rio Grande do Sul.

TABELA 4. VALORES DE HS, TP, P E DP GERADOS PELO MODELO WWIII PARA OS 8 PONTOS NA COSTA SUL DO BRASIL.

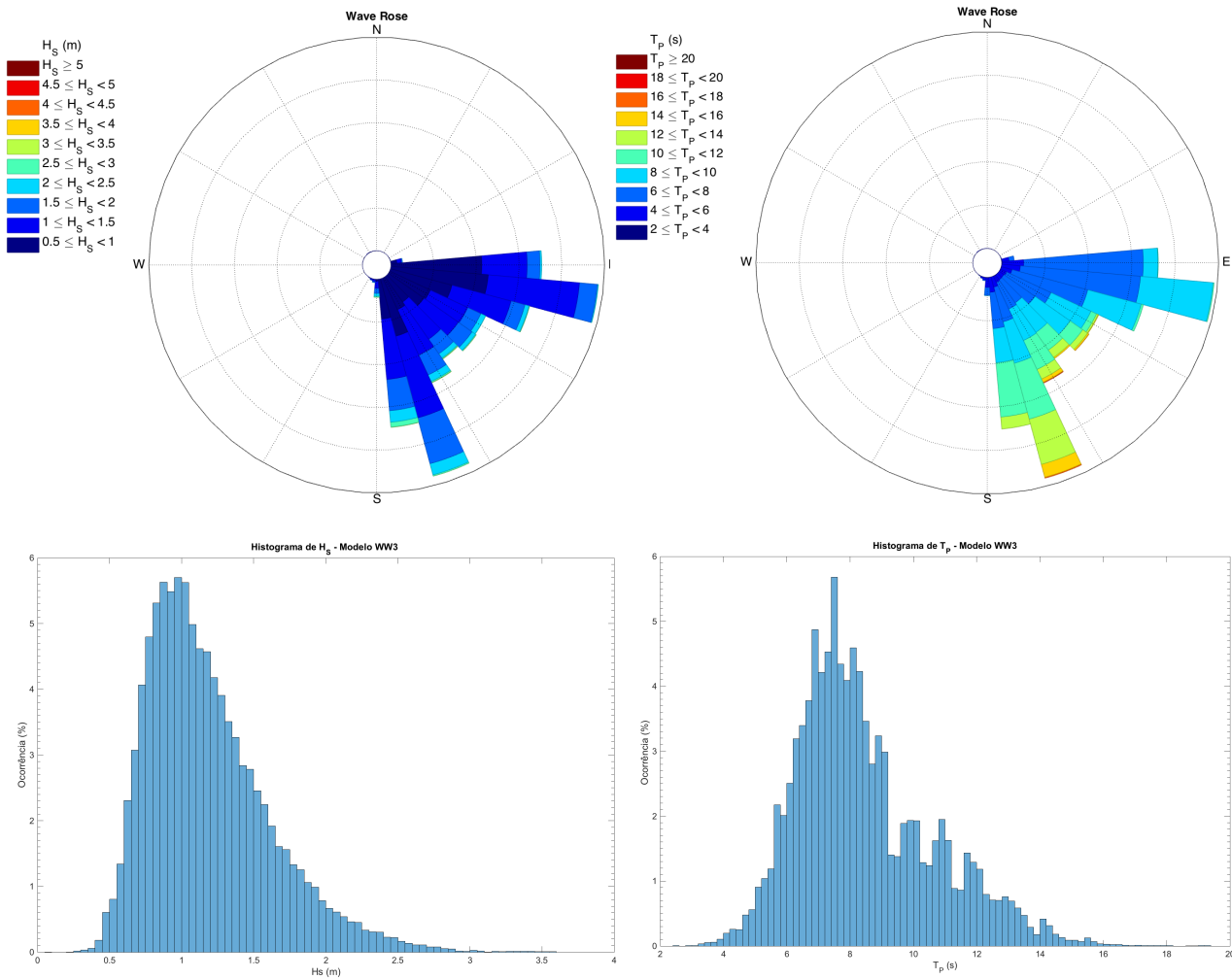
Ponto	Hs média (m)	Hs máxima (m)	Tp médio (s)	Tp máximo (s)	Potência média (kW/m)	Potência máxima (kW/m)	Dp (°)
PR1	1,17	3,60	8,43	19,35	5,75	123,03	129,97
PR2	1,66	5,40	8,89	19,18	12,13	274,38	130,98
SC1	1,63	5,73	<b>9,04</b>	18,76	11,86	302,18	124,16
SC2	1,81	5,82	8,92	19,86	14,45	330,02	128,97
SC3	<b>2,07</b>	<b>7,58</b>	8,93	20,04	<b>18,90</b>	<b>564,88</b>	129,97
RS1	1,50	6,02	8,73	20,81	9,76	369,99	125,88
RS2	1,99	6,85	8,69	20,83	17,05	479,51	124,26
RS3	1,44	4,71	8,22	<b>21,45</b>	8,44	233,45	122,42

#### 3.1.2.1 Paraná

A partir dos gráficos na [Figura 10](#) podemos observar que as ondas incidentes no Paraná foram provenientes dos quadrantes entre S e quase ENE, com maior concentração em S e E.

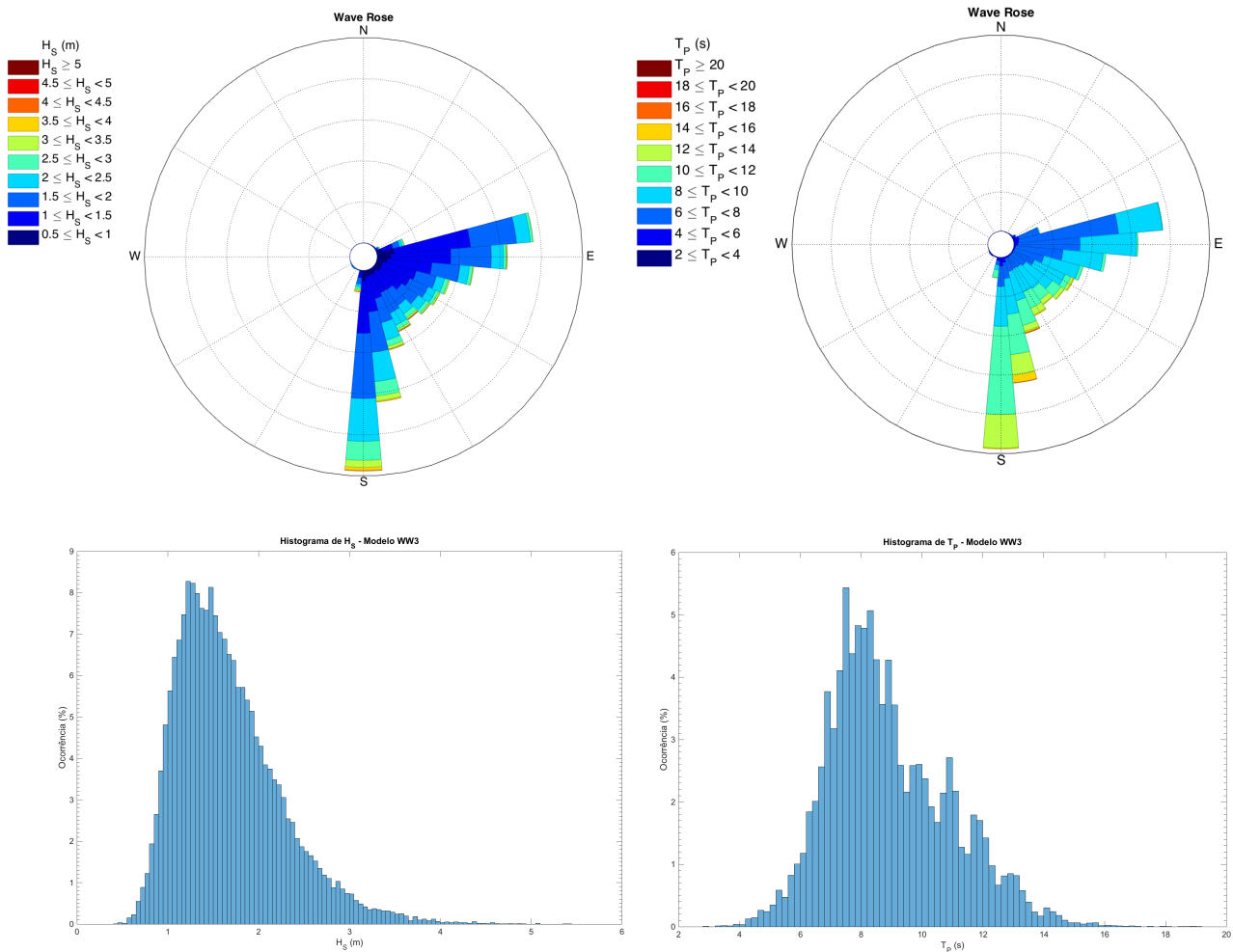
No ponto PR1 a maioria das ondas foram provenientes de SSE e ESE. Houve predominância de ondas entre 0,5 e 1,5 m, seguido de ondas entre 1,5 e 2 m em menor frequência. E ainda em menor ocorrência, ondas entre 2,5 e 3,5 m nas direções entre SE e S. A Hs máxima foi de 3,6 m. Entre E e ESE houve predominância de Tp entre 6 e 10 s, com baixa frequência de Tp entre 10 e 12 s. Entre SE e S houve predominância de Tp entre 6 e 10 s, porém os Tp entre 10 e 12 s também foram ficando mais frequentes a medida que se segue em direção a S. Mais próximo de S e SSE há aumento na frequência de Tp entre 12 e 14 s. E há ainda a ocorrência de Tp entre 14 e 16 s principalmente entre SSE e SE. O Tp máximo foi de 19,35 s.

FIGURA 10 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO PR1.



No ponto PR2 a maioria das ondas foi proveniente de S e entre E e ENE ([Figura 11](#)). Houve predominância de ondas entre 1 e 2 m, seguido de ondas entre 2 e 2,5 m. Houve também incidência de ondas entre 2,5 e 4 m em todas as direções, porém com frequência decrescente. Em SE houve ocorrência de ondas maiores que 4 m. A H<sub>s</sub> máxima foi de 5,4 m. Os T<sub>p</sub> predominantes foram aumentando há medida que vai se afastando da direção E e se aproximando da S. Próximo de E foram mais frequentes os T<sub>p</sub> entre 6 e 10 s, enquanto em S o mais frequente foi entre 10 e 12 s. O T<sub>p</sub> entre 8 e 10 s se manteve praticamente constante em todas as direções de ondas incidentes. Próximo a SE ocorreram T<sub>p</sub> maiores que 14 s. O T<sub>p</sub> máximo foi de 19,18 s.

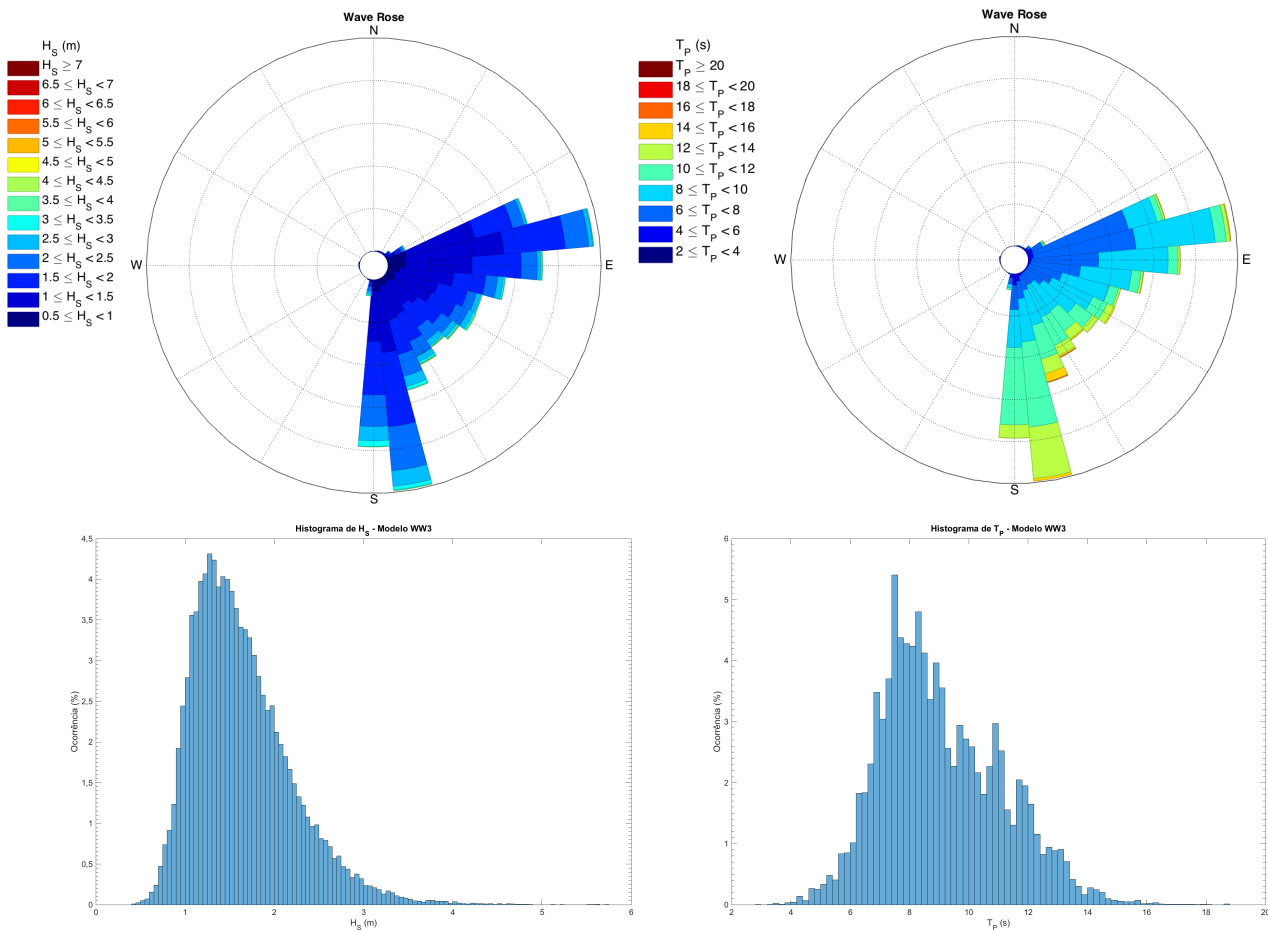
FIGURA 11 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO PR2.



### 3.1.2.2 Santa Catarina

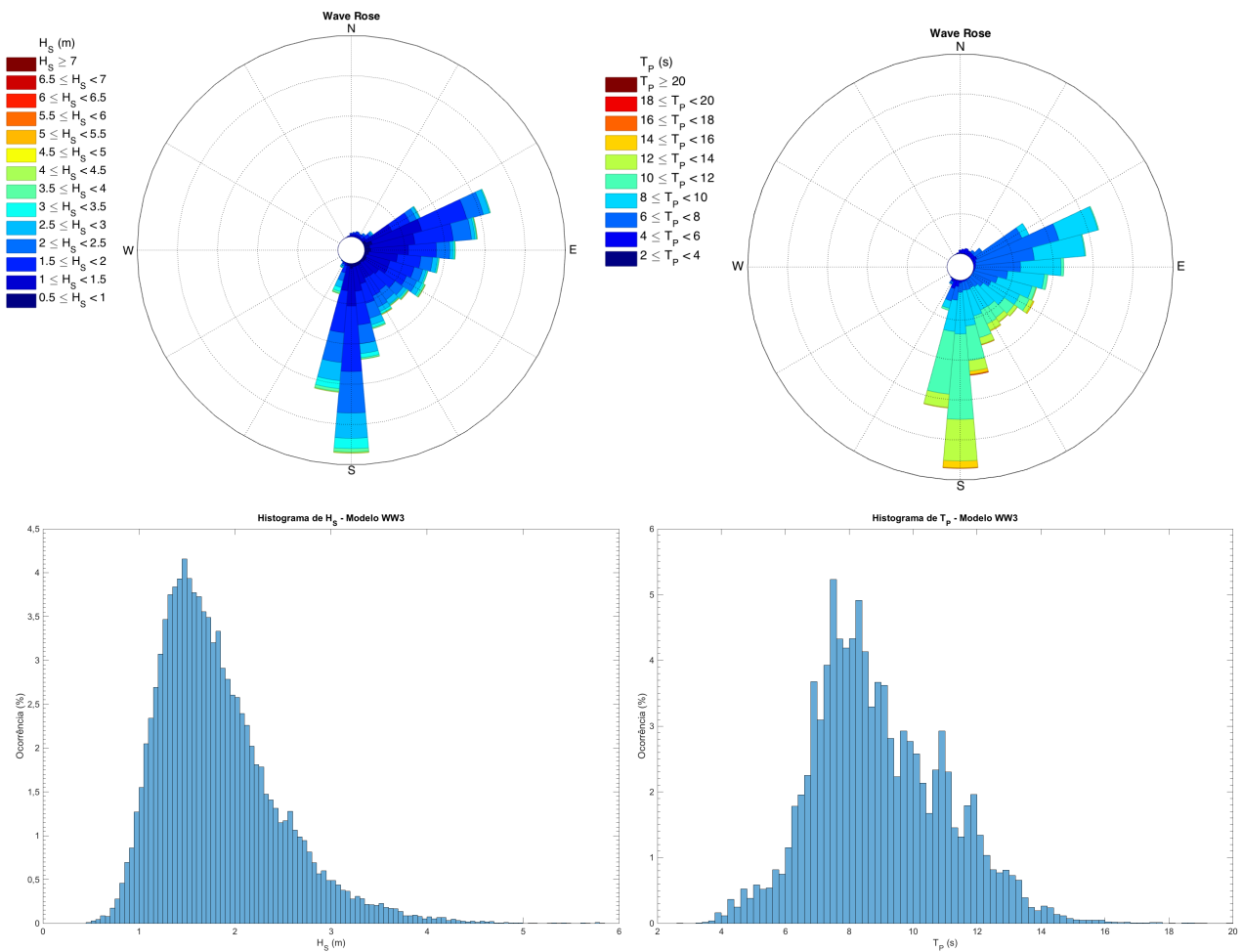
No ponto SC1 as direções de maior incidência foram entre S e quase ENE. Em todas as direções houve incidência de ondas entre 1 e 3 m. A Hs predominante foi de 1 a 1,5 m, seguida de 1,5 a 2 m, 2 e 2,5 m, e 2,5 e 3 m (com frequências decrescentes). Se afastando de E e indo em direção a S ocorrem ondas de 3 a 3,5 m. E no entorno da direção SE ocorrem ondas maiores que 3,5 m. A Hs máxima foi de 5,73 m. Em todas as direções houve ocorrência de Tp entre 4 e 10 s com frequência quase constante, sendo mais frequentes próximo a ENE e E. Também houve ocorrência de Tp entre 10 e 12 s em todas as direções, porém com frequência menor próximo de E, e aumentando em direção a S. Em SSE houve incidência de ondas com Tp maior que 14 s. O Tp máximo foi de 18,76 s ([Figura 12](#)).

FIGURA 12 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO SC1.



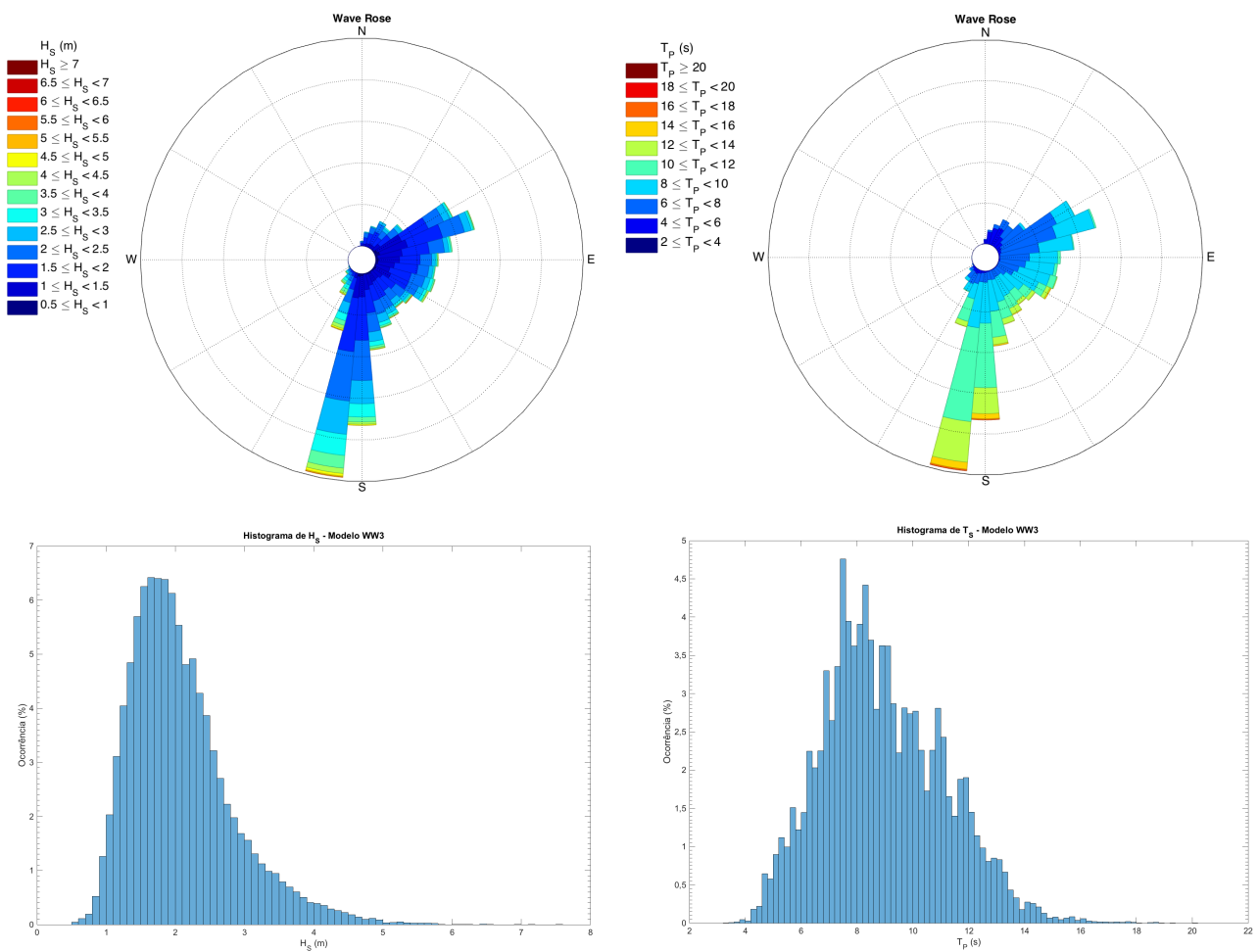
No ponto SC2 as ondas incidentes foram de NE até SSW, com maior concentração no entorno de S e de ENE. Em todas as direções houve incidência de ondas entre 0,5 e 3,5 m, entretanto para ondas acima de 1 m a frequência de incidência começou a diminuir (quanto maior a  $H_s$  menor a frequência de incidência). Houve incidência de ondas entre 3,5 e 4,5 m em quase todas as direções, porém com maior concentração próximo a SE. A  $H_s$  máxima foi de 5,82 m. Nos quadrantes entre ENE e E houve predominância de  $T_p$  entre 6 e 10 s, enquanto de SE a S essa predominância mudou para  $T_p$  entre 10 a 12 s, e 12 a 14 s - esse último com menor frequência. Próximo a S ocorreu o  $T_p$  máximo de 19,86 s ([Figura 13](#)).

FIGURA 13 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO SC2.



No ponto SC3 a incidência de ondas foi bastante ampla, indo de SSW até N, porém com maior concentração no entorno da direção S, seguido do quadrante entre SSE e ENE. Houve incidência de ondas até 4 m em quase todas as direções, exceto de N a NNE que a  $H_s$  máxima foi de 2,5 m. No entorno de S até SE houve ocorrência de ondas maiores que 5 m. A frequência de incidência de ondas entre 1 e 1,5 m foi quase constante em todas as direções, seguida de  $H_s$  entre 1,5 e 2 m (que teve aumento em S e ENE), seguida dos demais intervalos de  $H_s$  maiores, com frequência decrescente de incidência (maiores  $H_s$  ocorrendo com menor frequência). A  $H_s$  máxima foi de 7,58 m. No entorno de ENE o  $T_p$  predominante foi entre 6 e 8 s, enquanto no entorno de S o  $T_p$  predominante foi entre 10 e 12 s. O intervalo de 8 a 10 s foi quase constante em todas as direções. No entorno de S houve grande incidência de ondas com  $T_p$  entre 12 e 14 s, havendo redução dessa frequência próximo de SE. O  $T_p$  máximo foi de 20,04 s (Figura 14).

FIGURA 14 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO SC3.



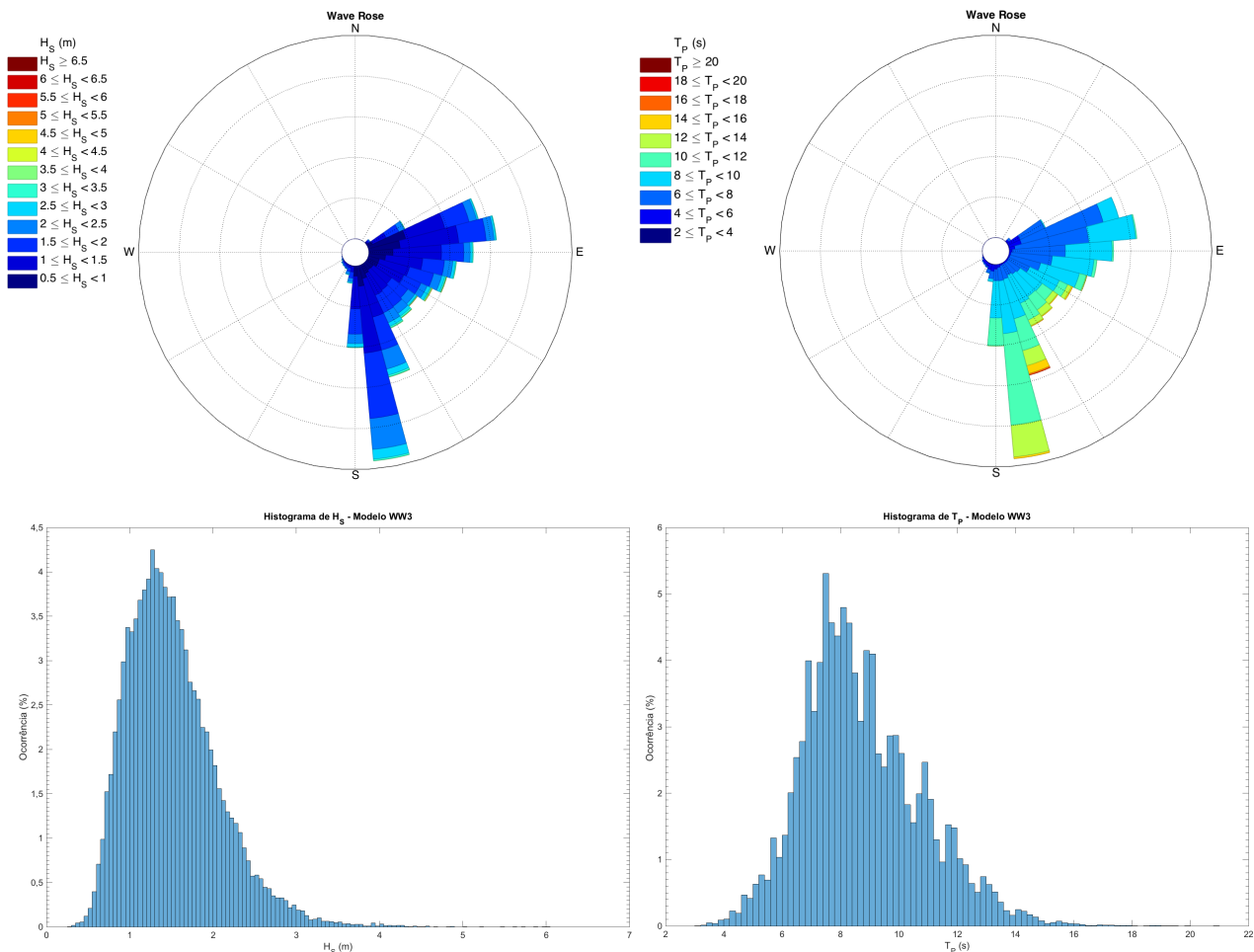
### 3.1.2.3 Rio Grande do Sul

Os gráficos mostram que as ondas incidentes foram provenientes de direções entre SSW e NE. A maior frequência de ondas incidentes foi no entorno da região S, seguido de aproximadamente ENE.

No ponto RS1 a direção de maior incidência foi próximo a S (quase SSE), com  $H_s$  predominante entre 1 e 2 m, seguido de 2 a 2,5 m. Havendo também incidência de ondas entre 2,5 e 3,5 m, porém com baixa frequência. Entre E e ENE houve incidência crescente de  $H_s$  entre 0,5 e 1 m; e incidência quase constante de  $H_s$  entre 1 e 3 m. Entre SSE e ESE aproximadamente, a frequência de ondas entre 0,5 e 2 m foi praticamente constante; com incidência de ondas entre 2,5 e 3,5 m, porém com baixa frequência. Em SE houve incidência (baixa) de  $H_s$  acima 4 m. A  $H_s$  máxima foi de 6,02 m. Os  $T_p$  entre 6 e 8 s foram mais frequentes próximo a ENE e E, reduzindo em direção a S. Os  $T_p$  entre 8 e 10 s foram quase constantes em todas as direções. Entre S e ESE houve incidência de ondas

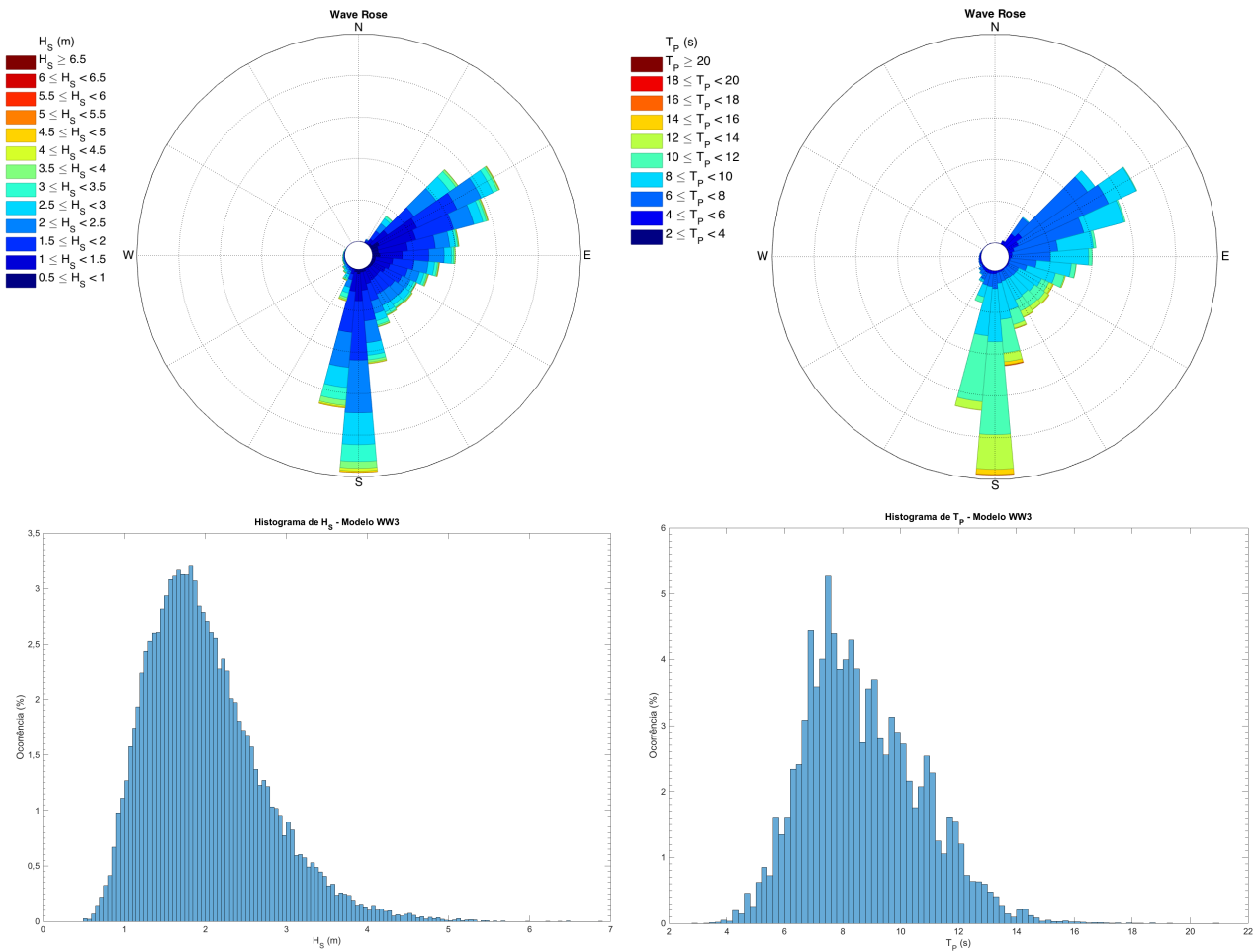
com  $T_p$  entre 10 e 12 s, tendo ocorrido um pico desses intervalos de  $T_p$  em S. Em SSE houve incidência (baixa) de  $T_p$  maior que 14 s. O  $T_p$  máximo foi de 20,81 s ([Figura 15](#)).

FIGURA 15 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE  $H_s$  E  $T_p$  DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO RS1.



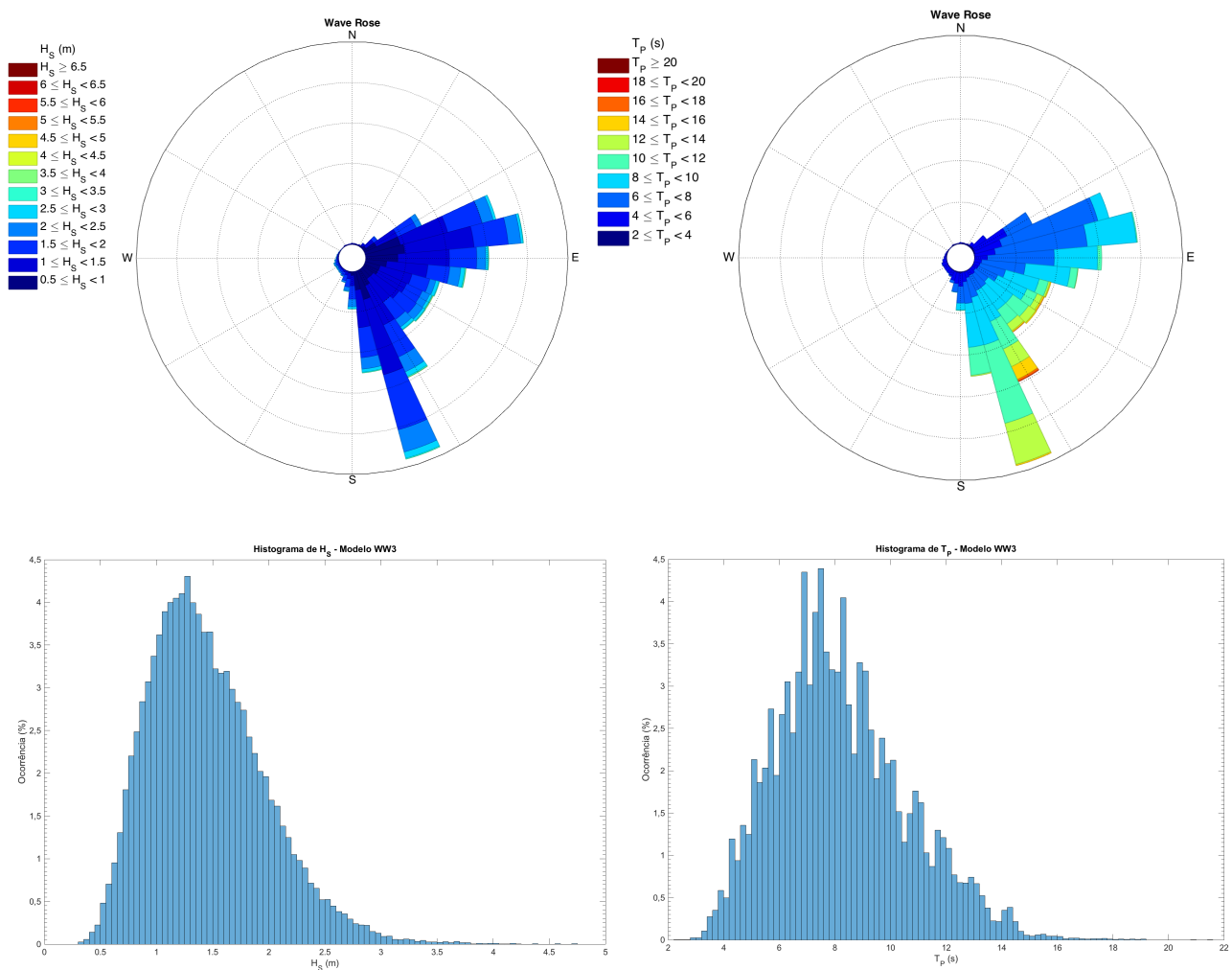
No ponto RS2 houve incidência predominância de S, e de quase ENE. Em S a  $H_s$  predominante foi entre 1,5 e 2,5 m, seguido de 2,5 a 3 m, 3 e 3,5 m e com bem menos frequência, ondas maiores que 3,5 m. Próximo a ENE as  $H_s$  predominantes foram entre 1 e 2 m, seguido de 2 a 2,5 m; houve ainda incidência de ondas maiores que 2,5 m, porém com bem menos frequência. Aproximadamente entre SSE e E, as  $H_s$  foram quase constantes, tendo sido mais predominantes as de  $H_s$  entre 1 e 2,5 m, seguida de 2,5 e 3 m; ainda com incidência de ondas maiores que 3 m porém com frequência bastante baixa. Os  $T_p$  entre 8 e 10 s foram quase constantes em todas as direções, sendo que entre NE e ENE houve predominância de  $T_p$  entre 6 e 8 s; enquanto em S predominaram  $T_p$  mais altos, entre 10 e 12 s. O  $T_p$  máximo foi de 20,83 s ([Figura 16](#)).

FIGURA 16 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO RS2.



No ponto RS3 predominaram ondas de SSE e de E quase ENE. Em todas as direções as  $H_s$  predominantes foram entre 1 e 2 m, porém com frequências de incidência diferentes, sendo a mais frequente próximo a S. Houve pouca incidência de ondas acima de 2,5 m. A  $H_s$  mais alta foi de 4,71 m. Os  $T_p$  entre 8 e 10 s foram quase constantes em todas as direções, exceto no entorno de NE e quase SSW, onde não ocorreram. Entre ENE e E, quase não houve  $T_p$  maior que 10 s. No entorno de SE e quase S houve incidência de ondas entre 10 e 14 s, e alguns maiores que 14 s. O  $T_p$  máximo foi de 21,45 s ([Figura 17](#)).

FIGURA 17 - WAVE ROSES E HISTOGRAMAS DE HS E TP DOS DADOS DO MODELO, NO PONTO RS3.

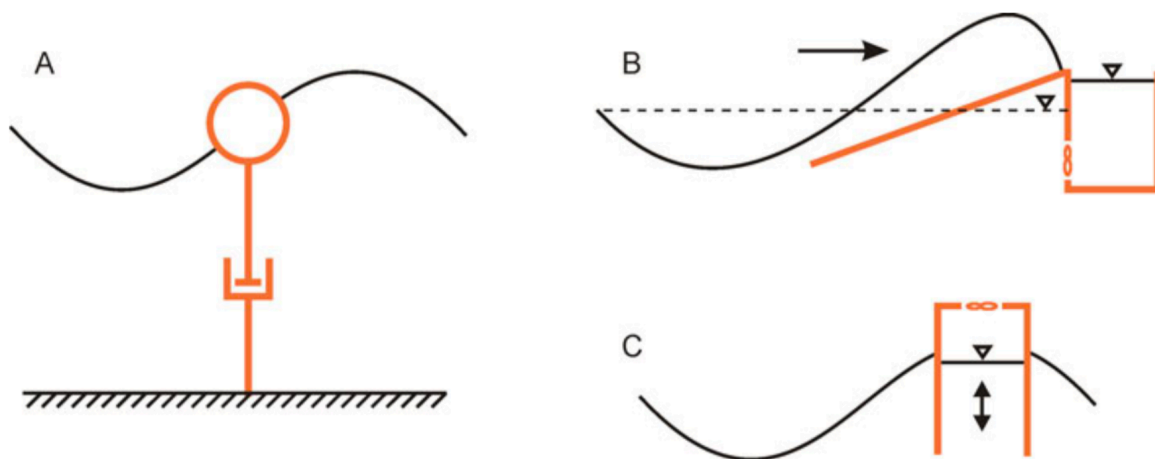


## 3.2 TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO DE ENERGIA DE ONDAS

### 3.2.1 Tipos de conversores

Há uma grande diversidade de sistemas conversores de energia de ondas disponíveis atualmente, isso devido às diversas formas possíveis de se absorver a energia das ondas. Dada essa diversidade de sistemas, e as particularidades no funcionamento de alguns modelos, não há ainda uma descrição sistemática na literatura disponível que classifique os WEC em categorias. Diversos autores vêm criando classificações baseadas principalmente no princípio de funcionamento dos WEC. (9) classificou os WEC de forma sucinta em três categorias principais, de acordo com o princípio de funcionamento: A) *Wave activated bodies* (corpos ativados por ondas), B) *Overtopping devices* (galgamento) e C) *Oscillating water column* (coluna de água oscilante), que podem ser vistos na [Figura 18](#).

FIGURA 18 - CLASSIFICAÇÃO GENERALIZADA DOS WEC. **A. WAVE ACTIVATED BODIES;** **B. OVERTOPPING DEVICES;** **C. OSCILLATING WATER COLUMN.**



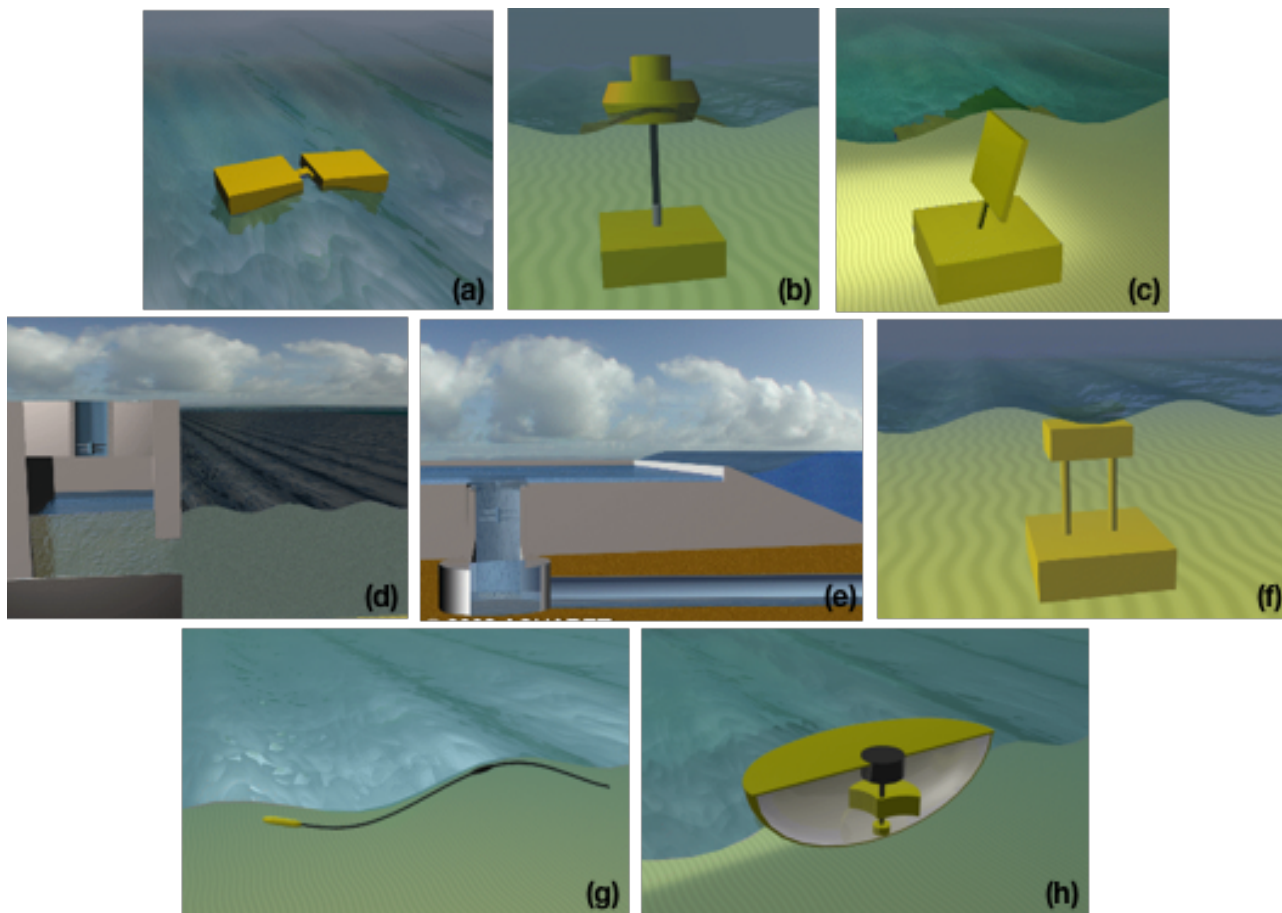
Fonte: Waters (2018).

Dentro dessas três categorias, podemos citar oito tipos principais de conversores (27), que se encaixam de alguma maneira nas categorias acima, e podem ser vistos na [Figura 19](#).

- a) *Attenuator* (Atenuador): É um dispositivo flutuante, que possui as partes oscilantes (braços) posicionadas paralelamente à direção das ondas incidentes. O dispositivo captura a energia do movimento relativo entre os braços quando a onda está passando por eles — categoria A.
- b) *Point absorber* (absorvedor pontual): É uma estrutura flutuante que absorve energia de todas as direções a partir de seus movimentos na superfície ou próximo a ela. A boia flutua a partir de um eixo vertical, que fica fixado ao fundo. A energia do movimento da boia é transformada posteriormente em energia elétrica por um transformador que pode ser de diversas formas, dependendo da configuração do equipamento — categoria A.
- c) *Oscillating wave surge converter*: Ficam fixos no fundo, com um braço/placa oscilante direcionado para a superfície. O braço oscila como um pêndulo inverso montado em uma articulação, que oscila em resposta à movimentação das ondas, capturando a energia. A estrutura fica toda submersa — categoria A.

- d) *Oscillating water column*** (coluna de água oscilante): Pode ser de dois tipos: fixo ou flutuante. A estrutura básica é oca, parcialmente submersa, com uma parte aberta (abaixo da linha d'água), de maneira que fique uma camada de ar sobre uma camada de água. A movimentação das ondas faz com que a coluna de água oscile verticalmente dentro da estrutura, comprimindo/descomprimindo a camada de ar acima dela. Essa camada de ar flui para/da atmosfera, através de uma turbina que gira independentemente da direção do fluxo de ar. A rotação da turbina é usada para a geração de energia. Pode ser do tipo *shoreline* (estrutura fixa num costão rochoso) ou *nearshore* (sistema flutuante) — categoria C.
- e) *Overtopping device***: É um dispositivo que possui uma espécie de reservatório, cujas bordas criam um desnível com o nível do mar local, e que armazenará temporariamente a água proveniente das ondas quebrantes. Dentro do reservatório há uma turbina que será responsável por gerar energia. A água que entra no reservatório, passa pela turbina e retorna para o mar — categoria B.
- f) *Submerged pressure differential*** (dispositivo conversor por diferença de pressão): É um tipo de dispositivo geralmente fundeado próximo à costa. Possui uma parte fixa ao fundo, e outra oscilante em um eixo vertical. O movimento das ondas passando sobre o dispositivo causa aumento e diminuição do nível d'água acima dele, que por diferença de pressão se movimenta através do eixo. A variação de pressão faz com que a parte oscilante do equipamento bombeie um fluido através do sistema, gerando energia — categoria A.
- g) *Bulge wave***: consiste em um tubo de borracha cheio de água a baixa pressão, direcionado às ondas. Fica abaixo da superfície, atracado ao fundo, com uma das extremidades “livre”. A movimentação das ondas causa variações de pressão ao longo do tubo criando uma protuberância (*bulge*). Enquanto essa protuberância viaja através do tubo, ela aumenta de tamanho, acumulando energia, que ao chegar ao final do tubo girará uma turbina, que é responsável pela geração de energia — categoria A.
- h) *Rotating mass* ou *Gyroscope*** (Giroscópio): Dispositivo com formato de meia esfera, com um eixo central interno, e um peso que gira ao redor desse eixo a partir do movimento das ondas que passam. A movimentação do peso promove a geração de energia — categoria A.

FIGURA 19 - PRINCIPAIS TIPOS DE TECNOLOGIAS CONVERSoras DISPONÍVEIS ATUALMENTE. (A) ATTENUATOR; (B) POINT-ABSORBER; (C) OSCILLATING WAVE SURGE; (D) OSCILLATING WATER COLUMN; (E) OVERTTOPING; (F) SUBMERGED PRESSURE DIFFERENTIAL; (G) BULGE WAVE; (H) GYROSCOPE.



Fonte: Aquaret (2008). Disponível em <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>

### 3.2.2 Exemplos de conversores

#### 3.2.2.1 LIMPET

O sistema conhecido com LIMPET (*Land Installed Marine Power Energy Transmitter*), foi o primeiro WEC utilizado comercialmente. É um dispositivo do tipo *shoreline*, construído sobre um costão rochoso na Ilha de Islay, na Escócia, com princípio de funcionamento OWC. Ele é constituído de três câmaras de água (totalizando numa superfície de 169 m<sup>2</sup> de água), ligadas a uma câmara de ar, que é conectada a uma turbina Wells<sup>[1]</sup> de 2,6 m de diâmetro, e quando a água se movimenta devido às ondas, o

<sup>1</sup> Uma turbina Wells gira sempre na mesma direção, independente da direção do fluxo de ar que passa por ela.

ar da câmara é comprimido girando a turbina ([Figura 20](#)). O dispositivo possui potência de 500 kW ([28](#)).

FIGURA 20 - NO CANTO SUPERIOR ESQUERDO, FOTO DO DISPOSITIVO LIMPET NA COSTA DA ILHA DE ISLAY, ESCÓCIA, EM 1991; NO CANTO SUPERIOR DIREITO E EM BAIXO, ESQUEMAS MOSTRANDO O FUNCIONAMENTO DO SISTEMA.

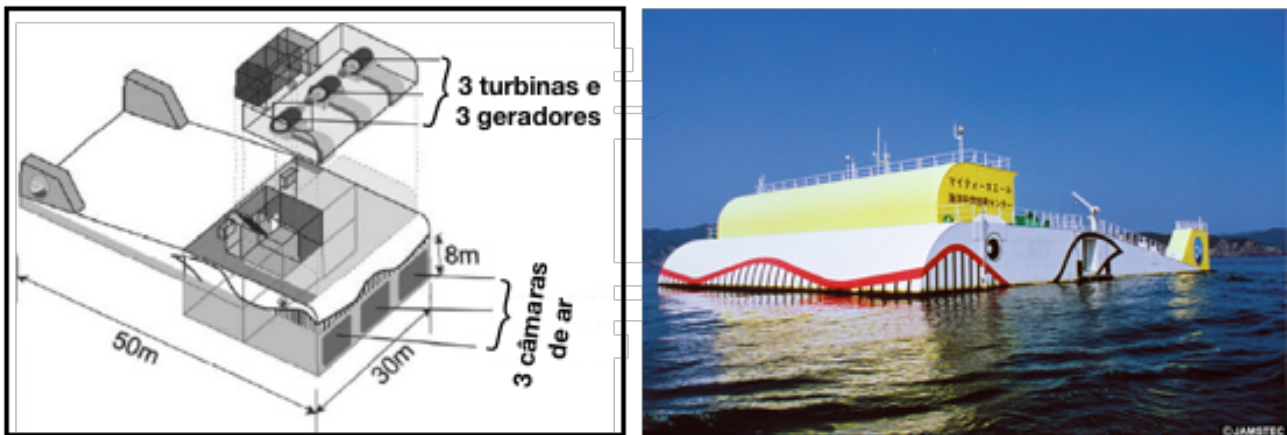


Fonte: Foto no canto superior esquerdo: FALCÃO; HENRIQUES, 2016; esquemas de funcionamento (adaptados) - superior direito: [orizzontenergia.it](http://orizzontenergia.it); inferior: [coastalenergyandenvironment.web.unc.edu](http://coastalenergyandenvironment.web.unc.edu).

### 3.2.2.2 The Mighty Whale

É um dispositivo OWC (categoria C), do tipo *nearshore* ou *offshore*, criado pelo *Japan Marine Science and Technology Center* (JAMSTEC). É uma estrutura flutuante com 50 m de comprimento, 30 m de largura, 12 m de altura, e aproximadamente 4400 toneladas. Contém três câmaras de ar dispostas lado a lado, na parte da frente do dispositivo. Cada câmara de ar possui 80 m<sup>2</sup> e é conectada a uma turbina Wells, que faz funcionar um gerador de eletricidade. As câmaras de ar ficam dispostas na direção da incidência de ondas. A energia é transferida por cabos submarinos para uma central em terra, o dispositivo não contém partes submersas, e fica atracado ao fundo. Um protótipo para mar aberto foi montado em 1998, e ficou em teste no mar até 2002; a potência máxima gerada foi de 110kW. ([29](#)), ([30](#)), ([31](#)) ([Figura 21](#)).

FIGURA 21 - NA ESQUERDA, ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO MIGHTY WHALE, E NA DIREITA, FOTO DO DISPOSITIVO SENDO TESTADO NO JAPÃO.

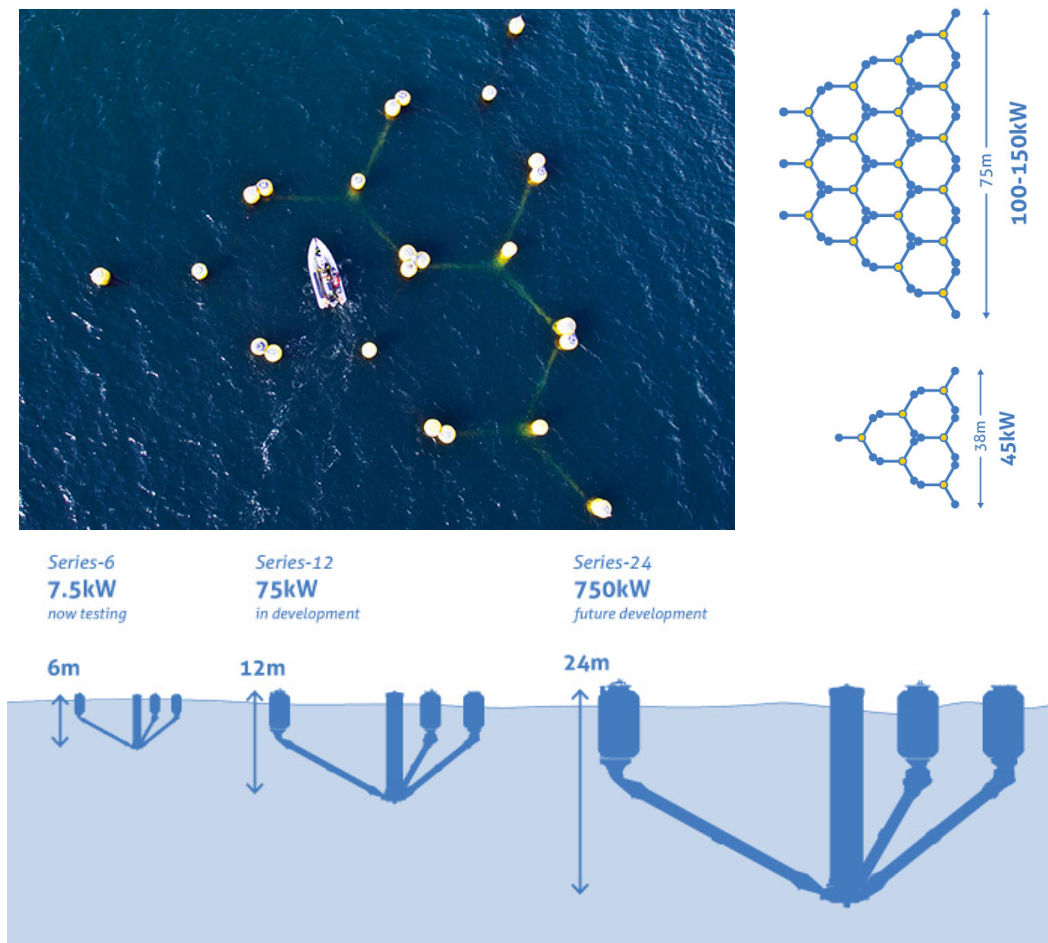


Fonte: JAMSTEC. Disponível em: <http://www.jamstec.go.jp/>.

### 3.2.2.3 WaveNET - Albatern

O dispositivo WaveNET é constituído por um conjunto de três boias interconectadas com um lastro cilíndrico central (chamados de SQUID), em matrizes de formato hexagonal, com capacidade de movimento em todas as direções (Figura 22). É do tipo *nearshore* ou *offshore*, e possui três modelos diferentes: WaveNET Series-6, Series-12 e Series-24. O Series-6 foi projetado para utilização em profundidade mínima de 20m, tem capacidade para gerar energia com ondas de 0,3 a 6 m de altura, e cada unidade SQUID possui potência de 7,5 kW. Já foi produzido em escala comercial e atualmente está em fase de testes no mar. O Series-12 ainda está em fase de desenvolvimento e cada unidade SQUID tem de capacidade de 75kW. A profundidade mínima para instalação é de 30 m, e a altura máxima de ondas suportadas é 12 m. O Series-24, com desenvolvimento ainda para o futuro, terá quatro vezes o tamanho do Series-6, e capacidade de 750kW por unidade SQUID. O WaveNET possui a vantagem de ser formado por vários módulos individuais (SQUIDs) que interconectados formam uma matriz (cada módulo pode fazer três conexões), podendo portanto ser ajustado para o tamanho desejado. Além disso, caso um módulo estrague, os outros se mantêm em funcionamento. Devido a sua capacidade de se movimentar em todas as direções, é capaz de captar a órbita completa das partículas de água em movimento ondulatório, e o potencial não aproveitado por um módulo, pode ser absorvido pelo módulo seguinte.

FIGURA 22 - NA PARTE SUPERIOR ESQUERDA, VISTA AÉREA DE UM SISTEMA WAVENET SENDO MONTADO; NA SUPERIOR DIREITA: DIAGRAMA DE UNIDADES WAVENET SERIES-6, COM 7,5 KW CADA; PARTE INFERIOR: ESPECIFICAÇÃO DOS TAMANHOS E PROPORÇÕES DOS SERIE-6, SÉRIES-12, E SERIES-24.



Fonte: Albatern. Disponível em [albatern.co.uk](http://albatern.co.uk).

### 3.2.2.4 WaveSurfer - Ocean Energy Industries

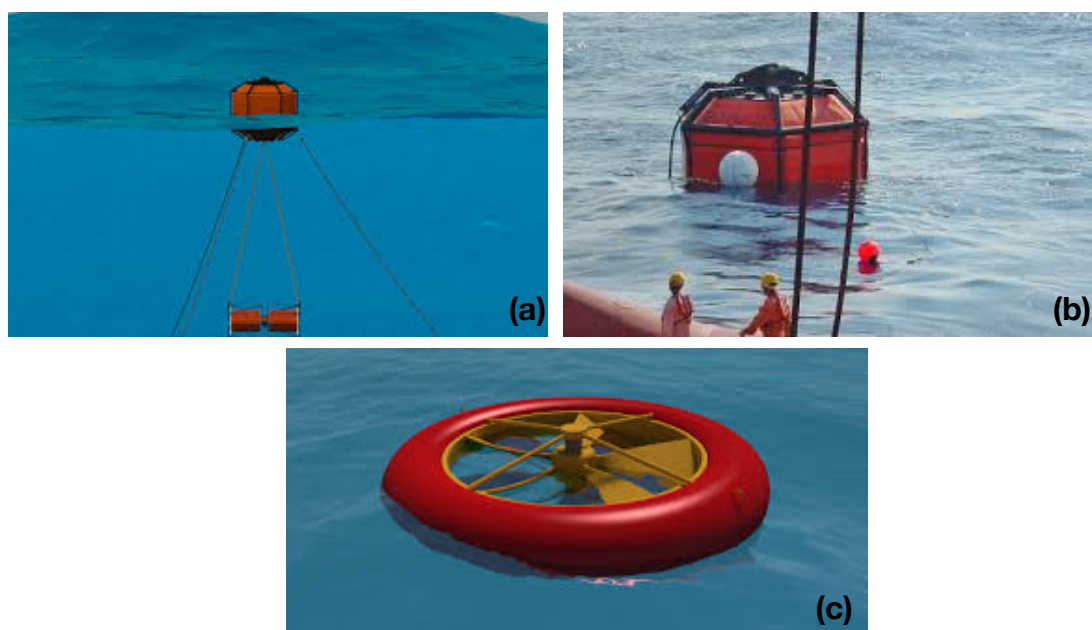
WaveSurfer é um conversor *offshore* do tipo *point absorber* (categoria A), e pode ser atracado em diferentes profundidades. Ele utiliza a profundidade finita que as ondas conseguem influenciar, e a força de arrasto da água. É composto de duas partes principais: (1) uma parte flutuante ancorada ao fundo, e (2) uma parte submersa e presa à primeira, contendo rotores e um gerador elétrico. A parte submersa fica a uma profundidade de aproximadamente metade do comprimento de onda, onde a água não possui movimento. A parte flutuante se move de acordo com o movimento da onda (sobe com a passagem da crista, e desce com a cava), arrastando a parte submersa com ela. Essa movimentação da parte submersa através de uma água “imóvel” para uma parte que sofre influência das ondas, faz com que os rotores girem devido à resistência da água (força de arrasto). Os compartimentos onde ficam os rotores são moldadas para que a

água gere mínima resistência em uma direção, e máxima resistência na direção oposta. O gerador é equipado com uma tecnologia que mantém a rotação constante. Segundo o fabricante, possui alta durabilidade, pois as peças responsáveis pela geração e transformação da energia ficam submersas a uma profundidade onde a água é relativamente imóvel. Além disso, não há conexões rígidas entre as duas partes - elas são conectadas por cabos ou linhas flexíveis ([Figura 23](#)). O sistema opera com ondas de diversas alturas e períodos. Devido ao seu design modular e a possibilidade de ser construído em diversas escalas, pode ser instalado em locais variados — ilhas, marinas, comunidades costeiras, instalações navais, podendo ser usado também como gerador autônomo em plataformas oceânicas remotas — de petróleo, navais, oceanográficas — e pode ser conectado em matriz (*wave farm*<sup>[2]</sup>).

Segundo a empresa, o equipamento tem as seguintes especificações:

- Potência de 1kW a 10MW em cada unidade;
- Vida útil mínima de 25-35 anos antes da necessidade de reparos significativos;
- Operável em ondas de no mínimo 0,5 m de altura (não especifica altura máxima);
- Material: plástico, borracha, aço;
- Transporte da energia por cabos submarinos;
- Escalas: unidade-única, multi-unidades, *wave farms* multi-megawatt.

FIGURA 23 - (A) ILUSTRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO WAVESURFER; (B) DISPOSITIVO WAVESURFER SENDO TESTADO NO MAR; (C) ILUSTRAÇÃO DE UM WAVESAILER.



Fonte: Ocean Energy Industries. Disponível em: <http://oceanenergyindustries.com> .

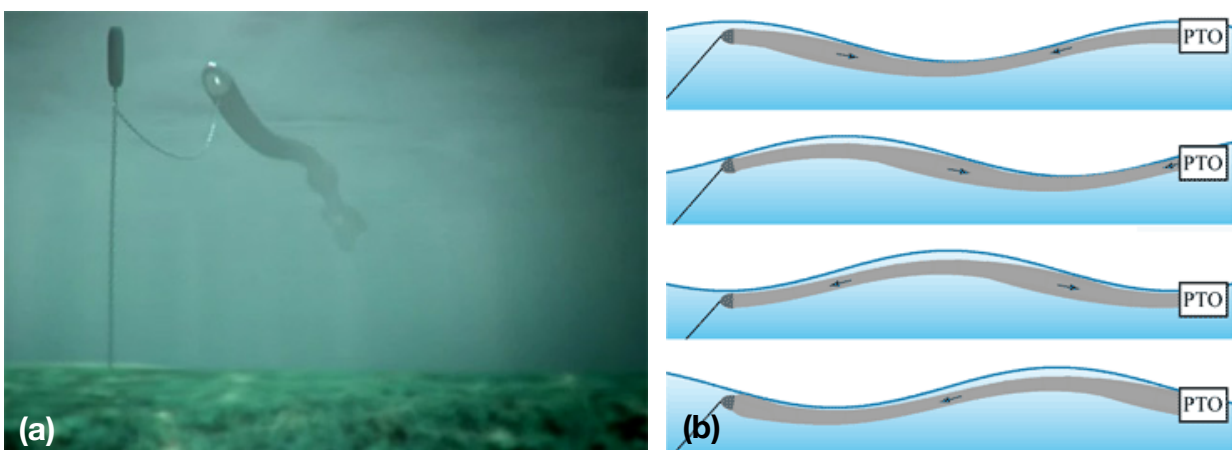
<sup>2</sup> *wave farms* - termo utilizado para descrever um local onde há diversos equipamentos (unidades) conversores ligados em matriz, formando uma “fazenda” de produção de energia de ondas.

Além deste, a empresa desenvolveu um mini conversor, o WaveSailer. É um dispositivo flutuante projetado para fornecer energia elétrica para barcos à vela, iates, botes salva-vidas, podendo ser liberado na água enquanto o barco está ancorado, atracado ou em baixa velocidade. Tem o tamanho de um colete salva-vidas e é capaz de produzir energia com ondas tão pequenas quanto 30cm (Figura 23c). Não há especificação da potência.

### 3.2.2.5 Anaconda - SeaEnergy

É um dispositivo do tipo *bulge wave* (categoria A), *nearshore*. As protuberâncias (*bulge*) que se formam transportam uma potência concentrada como um fluxo oscilatório interno. A potência da protuberância é transformada em potência elétrica por um transformador (PTO - *Power Take-off*) na parte de trás do dispositivo (Figura 24b). Na proposta inicial, o tubo tinha 150m de comprimento e 7m de diâmetro, entretanto foi alterado para 200m de comprimento e 5,5m de diâmetro. Experimentos iniciais e teorias preveem uma potência de 1MW para um tubo com essas últimas características em um estado de mar de 50kW/m. Em agosto de 2017, foi noticiado que a empresa responsável pelo Anaconda recebeu financiamento para continuar desenvolvendo o dispositivo que levou seis anos para ter sua patente desenvolvida (Figura 24).

FIGURA 24 - ILUSTRAÇÕES DE UM DISPOSITIVO ANACONDA (A) NO MAR; E (B) MOSTRANDO A DIREÇÃO DE DESLOCAMENTO DA PROTUBERÂNCIA, E O POSICIONAMENTO DO PTO.



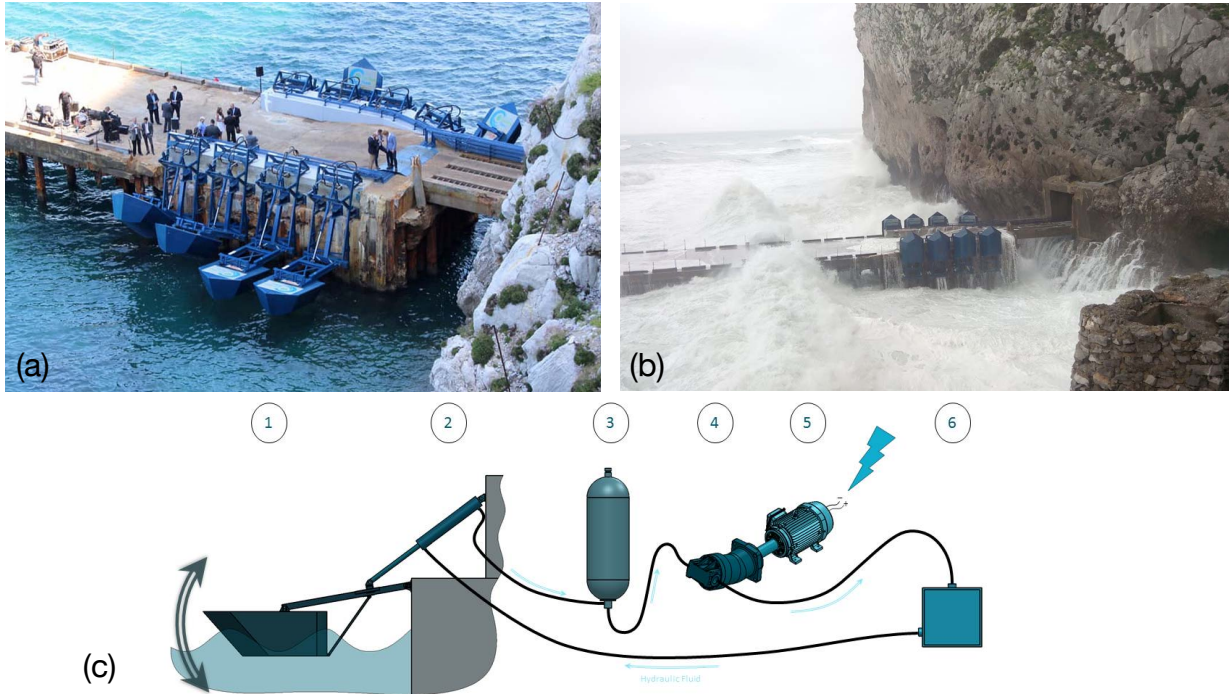
Fonte: University of Southampton - ECCD - SERG. Disponível em: <http://www.energy.soton.ac.uk/anaconda-wave-energy-converter-concept/>.

### 3.2.2.6 Wave Clapper e Power Wing - Eco Wave Power

A empresa israelense Eco Wave Power (EWP) desenvolveu um WEC flutuante, que fica acoplado por braços mecânicos a qualquer tipo de estrutura artificial do tipo molhes, cais, piers, plataformas fixas ou flutuantes (é do tipo *onshore*) ([Figura 25a](#)). Ele extrai energia das ondas pelos flutuantes através dos movimentos de sobe e desce das ondas (categoria A), desnível d'água, antecâmara hidráulica, e fluxo incidente das ondas. A energia do movimento dos flutuantes é transmitida para uma estação em terra, que converte a energia em pressão num fluido, que é utilizado para girar um gerador, produzindo eletricidade. Tem a vantagem de que somente os flutuantes e os braços ficam na água, enquanto todo o equipamento conversor fica em terra, aumentando a durabilidade do conjunto, além de facilidade para manutenção. Além disso, os flutuantes são equipados com sensores que monitoram a performance do equipamento e o ambiente ao redor, fornecendo os dados em tempo real para a base em terra. Em caso de tempestades, o sistema reconhece o tipo de ondas e, de forma independente, decide se é necessário parar a extração de energia e erguer as boias acima do nível d'água ou submergi-las para proteger o sistema de possíveis danos mecânicos. Quando o mar volta ao normal com ondas na altura suportada, o sistema volta a operar normalmente ([Figura 25b](#)).

Em 2012, foi instalada a primeira usina com potência de 10kW, em dois quebra-mares no Mar Negro, tendo tido desempenho acima do esperado. Em 2014 foi instalada uma usina no porto de Jaffa (Israel), que se tornou o local de desenvolvimento de pesquisas e melhoramentos do sistema. Também em 2014, a empresa assinou um contrato com o governo de Gibraltar (Espanha) para construção de uma usina em escala comercial com 5MW de potência, e em 2016 deu início à primeira fase dessa estação. Atualmente a empresa tem projetos com mais de 111MW de potência.

FIGURA 25 - (A) DISPOSITIVO WAVECLAPPER EM TESTE EM ISRAEL; (B) WAVECLAPPER COM AS BOIAS RECOLHIDAS DURANTE TEMPESTADE; (C) ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO WAVECLAPPER: 1. FLUTUANTE SE MOVE A PARTIR DO MOVIMENTO DAS ONDAS; 2. MOVIMENTO MEXE O PISTÃO, COMPRIMINDO O FLUIDO HIDRÁULICO; 3. ACUMULADOR DE FLUIDO COMPRIMIDO; 4. QUANDO LIBERADO, O FLUIDO COMPRIMIDO GIRA UM MOTOR HIDRÁULICO; 5. MOTOR HIDRÁULICO GIRA O GERADOR ELÉTRICO, PRODUZINDO ENERGIA LIMPA; 6. FLUIDO HIDRÁULICO RETORNA PARA UM TANQUE, ONDE É ARMAZENADO ATÉ A PASSAGEM DA PRÓXIMA ONDA.



Fonte: Eco Wave Power. Disponível em: <https://www.ecowavepower.com> .

### 3.2.2.7 WaveRoller

É um dispositivo do tipo *oscillating wave surge converter, nearshore*, que deve ser instalado a uma distância de 0,3 - 2 km da costa, em profundidades entre 8 e 20m. O dispositivo tem o formato de um painel, que ocupa toda a seção vertical do fundo à superfície da água, podendo ficar totalmente submerso ou não, dependendo do estado da maré. Ele absorve energia das ondas que já sofreram ação do fundo. Um único painel pode absorver de 1,5 a 2MW. Com o movimento do painel, pistões hidráulicos bombeiam fluidos para um circuito hermeticamente fechado, que fica totalmente submerso. O fluido em alta pressão é responsável pelo funcionamento do gerador que vai produzir energia. A energia é transmitida por um cabo submarino e conectada à matriz energética (Figura 26).

FIGURA 26 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UM CONVERSOR WAVEROLLER.



Fonte: WaveRoller. Disponível em <http://aw-energy.com/waveroller/>

#### 3.2.2.8 Pelamis Wave Power

O conversor Pelamis é do tipo *offshore, attenuator*, operante em profundidades de no mínimo 50 m, e consiste em seções cilíndricas semi-submersas, conectadas por juntas flexíveis que se movimentam uma em relação a outra com a passagem das ondas. O movimento induzido pelas ondas, sofre resistência de cilindros hidráulicos, que bombeiam óleo em alta pressão através de motores hidráulicos, que promovem a produção de energia através de geradores elétricos. A eletricidade de cada junta é transmitida para um único “cabo umbilical” que transmitirá a eletricidade para uma junção central no fundo. Pode ser conectado em matriz ([Figura 27](#)).

A empresa produziu seu primeiro protótipo em tamanho real em 2004, e foi testado nas ilhas de Orkney, na Escócia, entre 2004 e 2007. O dispositivo tinha suposta capacidade de 750kW, e foi o primeiro conversor a gerar energia elétrica para uma rede de abastecimento.

Houve três gerações de conversores Pelamis: P1, P2 e P3. O Pelamis P2 tem 180m de comprimento, 4m de diâmetro e aproximadamente 1350 toneladas, sendo constituído por cinco tubos cilíndricos, e quatro juntas flexíveis. É de instalação relativamente fácil e rápida (aproximadamente 90min) e a remoção é feita em poucos minutos.

Aguçadoura *wave farm* foi a primeira *wave farm* do mundo, ficava 5km *offshore* da cidade de Porto, em Portugal. Tinha três dispositivos Pelamis geração 1 (P1) e capacidade total de 2,25MW. Entretanto, funcionou por apenas dois meses após sua abertura oficial em setembro de 2008, devido a problemas financeiros com a empresa australiana que a comandava.

FIGURA 27 - PELAMIS P2 EM FUNCIONAMENTO NA WAVE FARM DE AGUÇADOURA, EM PORTUGAL.

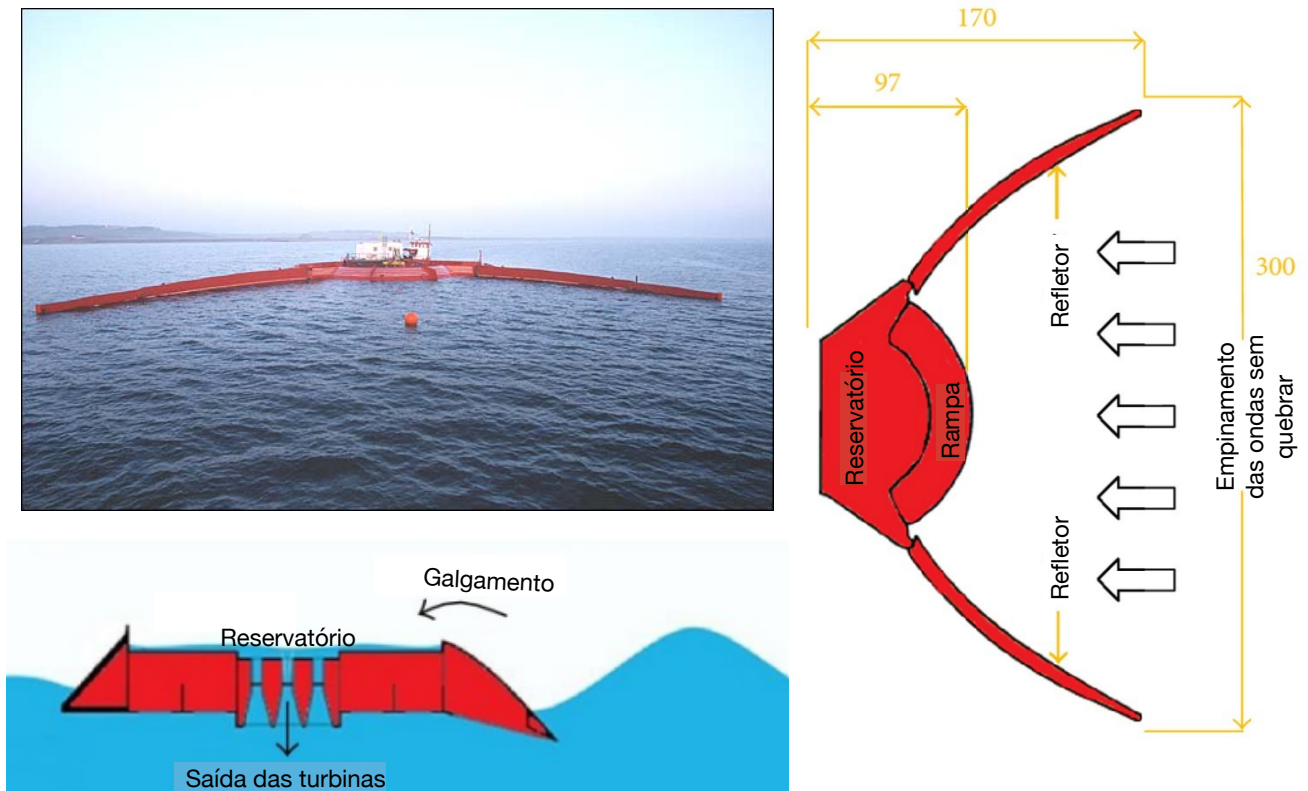


Fonte: EMEC. Disponível em: <http://www.emec.org.uk/press-release-council-takes-ownership-of-pelamis-device/>

### 3.2.2.9 Wave Dragon

É um dispositivo com funcionamento por *overtopping* (galgamento) (categoria B), flutuante. Os componentes principais são o reservatório (que fica acima do nível d'água), os braços refletores (que têm a função de direcionar as ondas na seção central, causando aumento de amplitude) e a rampa onde as ondas sobem em direção ao reservatório. A água fica armazenada por um tempo no reservatório, e sai por turbinas (responsáveis por gerar a energia) de volta para o mar, num sistema semelhante ao das hidrelétricas. Fica atracado ao fundo por um sistema de correntes. As dimensões físicas podem ser ajustadas ao regime de ondas do local onde se pretende instalar o dispositivo - sendo que o de maiores dimensões possui 390m de largura x 220m de comprimento, 190m de cada braço refletor, 19m de altura, profundidade mínima de 30m para instalação (considerado *offshore*), 54000 toneladas (é provavelmente o dispositivo mais pesado conversor de energia de ondas) e potencial de 11MW (valor estimado para um regime de ondas de 48kW/m) (32), (33) (Figura 28).

FIGURA 28 - SUPERIOR ESQUERDO: WAVE DRAGON EM FUNCIONAMENTO; DIREITO E INFERIOR: ESQUEMAS DE FUNCIONAMENTO DO WAVEDRAGON

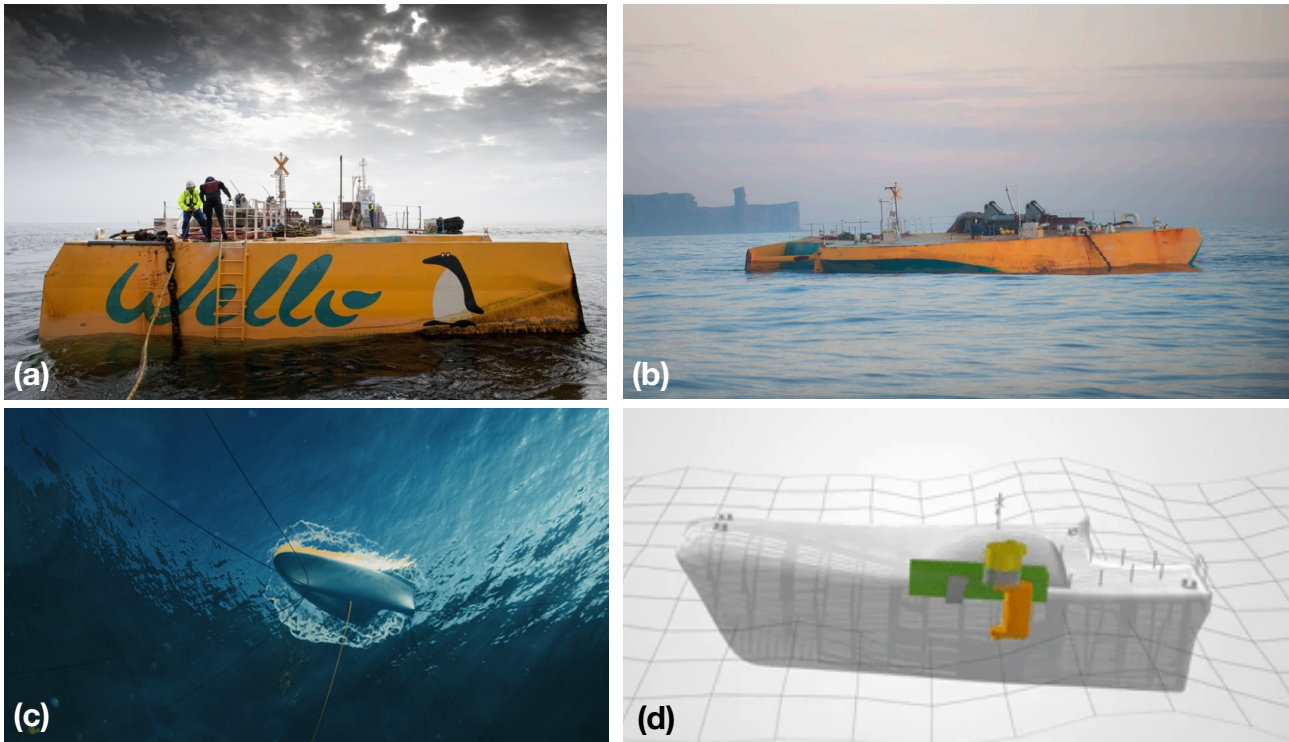


Fonte: Wave Dragon. Disponível em: <http://www.wavedragon.net>

### 3.2.2.10 Wello Penguin

É um sistema *offshore* ou *nearshore* do tipo *rotating mass*, que usa o movimento das ondas para girar um rotador interno. A forma assimétrica do dispositivo faz com que ele capture a energia das ondas em todas as direções. A energia é conduzida do rotor para o gerador usando o mesmo eixo, eliminando perdas de conversão. Tem o formato parecido com o de uma lancha, com 30 m de comprimento, 16 m de largura, 220 toneladas e 600 kW (34) (Figura 29).

FIGURA 29 - (A) E (B) WELLO PENGUIN EM TESTES NO MAR; (C) VISTA DO FUNDO MOSTRANDO O DISPOSITIVO ATRACADO AO FUNDO; (D) MODELAGEM DO FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO. DETALHE PARA O ROTADOR INTERNO EM COR LARANJA.

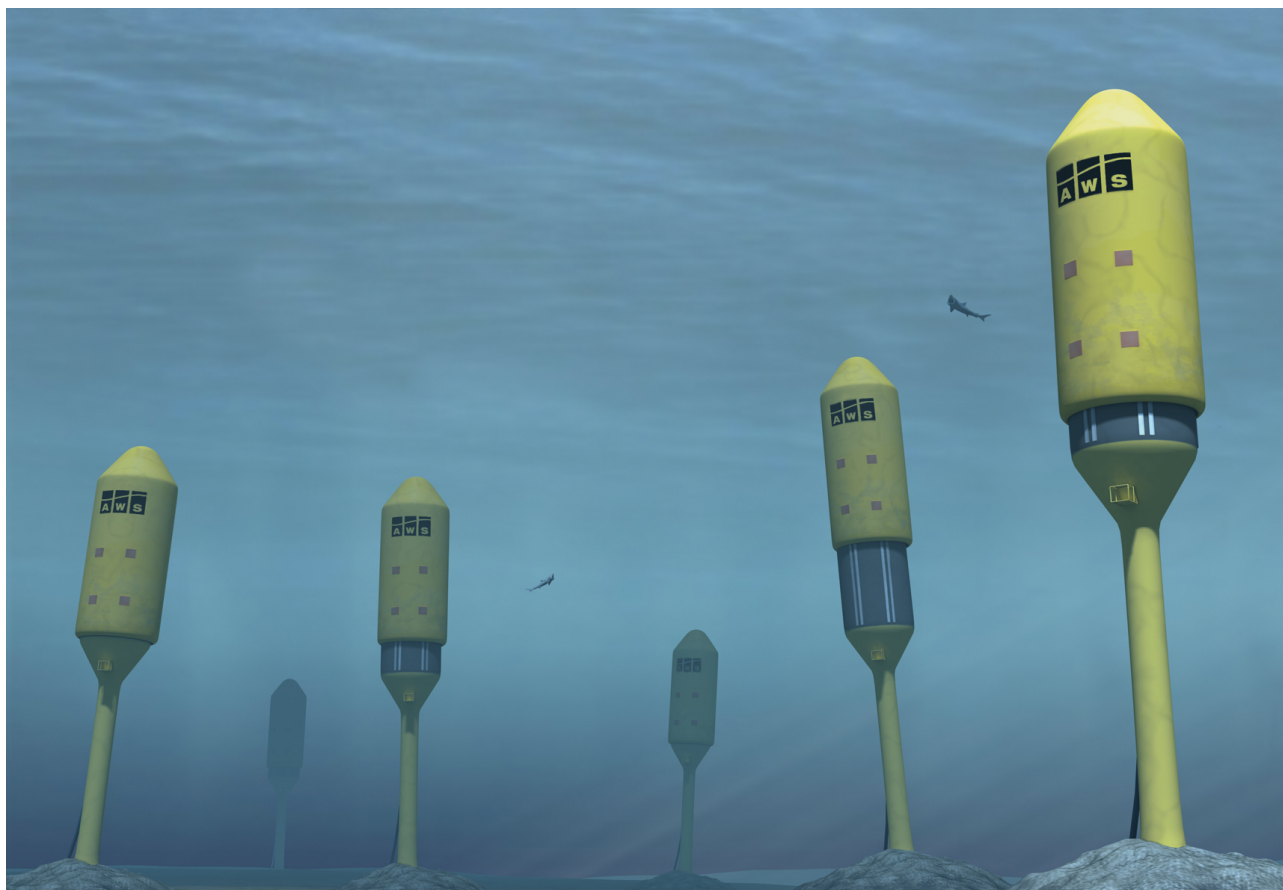


Fonte: Wello. Disponível em: <https://wello.eu> .

### 3.2.2.11 Archimedes wave swing

É um conversor *nearshore* ou *offshore*, classificado como *submerged pressure differential*. Utiliza a movimentação da coluna d'água abaixo da superfície para absorver energia. É constituído de duas partes: um compartimento cilíndrico fixo ao fundo e cheio de ar, e uma parte que se move verticalmente acima dele, gerando energia mecânica, que será depois transformada em energia elétrica. Com a passagem da crista da onda, a pressão aumenta no compartimento de ar, movendo o cilindro para baixo; com a passagem da vaga, o oposto acontece. Tem 30 m de altura e 25 m de diâmetro. Estima-se que seja capaz de gerar de 6 a 9 GW num único ano, dependendo da intensidade das ondas. Por ser um apenas um projeto, não há informações muito precisas sobre potencial, custos, etc ([Figura 30](#)).

FIGURA 30 - REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DE UMA WAVE FARM DE ARCHIMEDES WAVE SWING.



Fonte: Poulikkas (2014).

## 4 DISCUSSÃO

A partir dos dados das boias da Rede Ondas, podemos observar que Florianópolis teve os maiores valores para todos os parâmetros analisados (Hs, Tp e P). A Dp também foi diferenciada: enquanto as demais localidades tiveram Dp predominante entre SSE e ESE, a Dp de Florianópolis foi mais desviada para E e ENE. Segundo (18), o litoral catarinense é dominado por ondulações de E, com Tp e Hs médios de 8s e 1,25 m respectivamente; seguido de ondulações de S, com Tp e Hs médios de 12 s e 1,2 a 2 m respectivamente — condizendo com os dados da boia (ver Tabelas 1 e 3). Segundo (24), a posição geográfica da zona costeira de SC favorece a influência de massas de ar oceânicas, que geram instabilidade no oceano. A instabilidade gerada pelos centros de pressão nessa região podem resultar em grande agitação marítima. A Hs máxima registrada em Florianópolis foi de 7,24 m, influenciando na P máxima, que foi aproximadamente o dobro das P máximas no RS, e 13 vezes maior que a do PR. (20) obteve dados de dois anos (de uma boia a 35km da costa e 80m de profundidade) e encontrou *swells* predominantes de S (170°) com Tp de 12 s e Hs entre 1 - 1,5 m. Já as ondas geradas localmente foram predominantes de ENE (70°) com Tp de 7 s e Hs de 1 m. Resultados muito semelhantes aos obtidos no presente trabalho (Figura 7).

Os menores valores de todos os parâmetros foram registrados no Paraná, exceto Tp médio, cujo menor valor foi em Tramandaí. (36) encontrou duas direções principais de ondulação: ENE e SSE/SE, com Tp variando entre 6 e 10 s, e Hs entre 0,5 e 1,5 m. A boia da Rede Ondas registrou ondulações somente entre S e E, porém os Tp e Hs foram exatamente como os registrados por (36). Segundo este mesmo autor, ondas de ENE são geradas pela ASAS, enquanto as de SE são relacionadas à atividades ciclônicas.

Com base nas análises feitas por estações do ano no Paraná (da Rede Ondas), o outono foi a estação com ondas mais energéticas. Apesar dos pequenos desvios, teve os maiores valores para todos os parâmetros analisados. Detalhe que a Hs máxima foi igual para outono e verão, bem como os Tp máximos, logo, a P máxima também foi idêntica para as duas estações (ver equação final da P). Apesar de ter registrado o maior valor de Hs máxima, o verão teve a menor Hs média de todas as estações. (13) também fizeram uma análise por estações no PR e encontraram valores semelhantes para Dp, Hs e Tp, porém os pontos analisados por eles foram mais distantes da costa e mais profundos.

As boias do RS registraram dados de ondas bem restritas de SSE para Cassino e mais de E/SSE em Tramandaí. (37) resumiram o clima de ondas na plataforma sul do Brasil (28,5° - 34°S) como tendo direção predominante de E-SE (100° e 160°), com Hs

entre 1 e 1,5 m,  $T_p$  entre 6 e 14 s, com predominância de 8 s (mares locais) e 12 s (*swell*). Os dados foram condizentes com o do presente trabalho. Os mesmos autores falam ainda sobre os depósitos de lama nessa região: apesar dela atenuar a energia de ondas num pico de baixa frequência, tem pouco efeito sobre as ondas num pico de alta frequência.

No geral, os dados do modelo foram bastante correlatos com os da boia. No PR, onde foram registrados os menores valores para os parâmetros, o modelo também registrou os menores valores. Entretanto, os pontos do modelo são em profundidades e distâncias da costa maiores que as da boia, tendo registrado portanto valores mais elevados que ela, uma vez que nessas condições as ondas sofrem menos influência do fundo. As distâncias e profundidades aproximadas de cada boia e de cada ponto do modelo podem ser vistas na [Tabela 5](#).

TABELA 5 - DADOS DE DISTÂNCIA DA COSTA (KM) E PROFUNDIDADE (M) DE TODAS AS BOIAS E PONTOS DO MODELO WWIII. DADOS APROXIMADOS E OBTIDOS A PARTIR DO GOOGLE EARTH.

Local	Distância da costa (km)	Profundidade (m)
<b>Boias</b>		
<b>Pontal do Paraná</b>	10	16
<b>Florianópolis</b>	22	69
<b>Tramandaí</b>	1	1
<b>Cassino</b>	27	27
<b>WWIII</b>		
<b>PR1</b>	25	24
<b>PR2</b>	100	69
<b>SC1</b>	57	67
<b>SC2</b>	57	103
<b>SC3</b>	89	179
<b>RS1</b>	27	35
<b>RS2</b>	56	109
<b>RS3</b>	24	21

Nos dados gerados pelo modelo, os pontos de SC também apresentaram os maiores valores de  $H_s$  média e máxima,  $T_p$  médio,  $P$  média e máxima, e RS apresentou o maior  $T_p$  máximo. O ponto SC3 apresentou os maiores valores de  $H_s$ , com 2,07 m para  $H_s$  média e 7,58 m para  $H_s$  máxima. Considerando que dos 8 pontos gerados pelo

modelo, SC3 é o mais distante da costa, era de se esperar que os maiores valores de Hs fossem encontrados nessa região.

A boia do PR ficava a aproximadamente 10 km da costa e 16 m de profundidade. As boias do RS estão a 1 km da costa e 1 m de profundidade (Tramandaí), e a 27 km da costa e 27 m de profundidade (Cassino) e ainda assim registraram valores maiores que a boia do PR para os parâmetros analisados. Ou seja, se as boias de ambos os estados estivesse em profundidades/distâncias semelhantes, talvez tivéssemos dados bem maiores para RS do que os dados obtidos pelas boias atuais. Ambos estados possuem plataformas rasas e extensas, onde as ondas sofrem mais influência do fundo (refração e atrito) e perdem energia até chegarem à costa (ver descrição da costa do RS na [Introdução](#)). Os mapas batimétricos do PR e do RS evidenciam essas informações (Figuras 31 e 32).

FIGURA 31 - MAPA BATIMÉTRICO DO PR EVIDENCIANDO A PLATAFORMA LONGA E RASA.

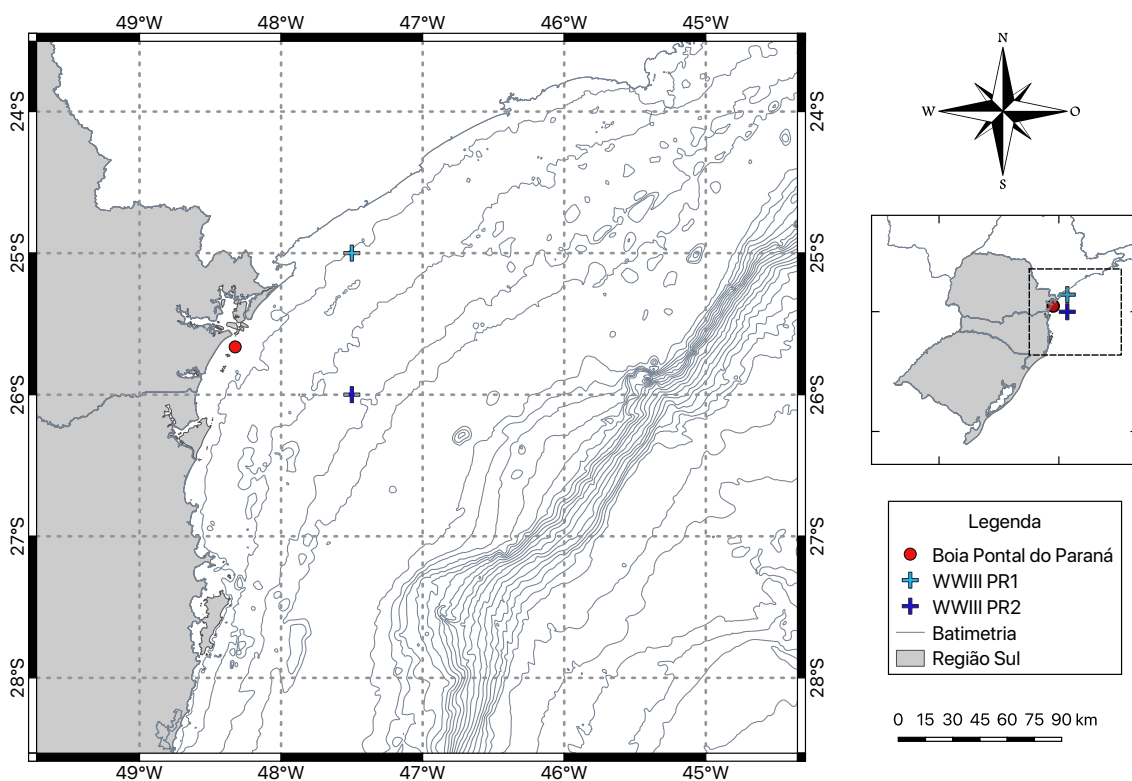
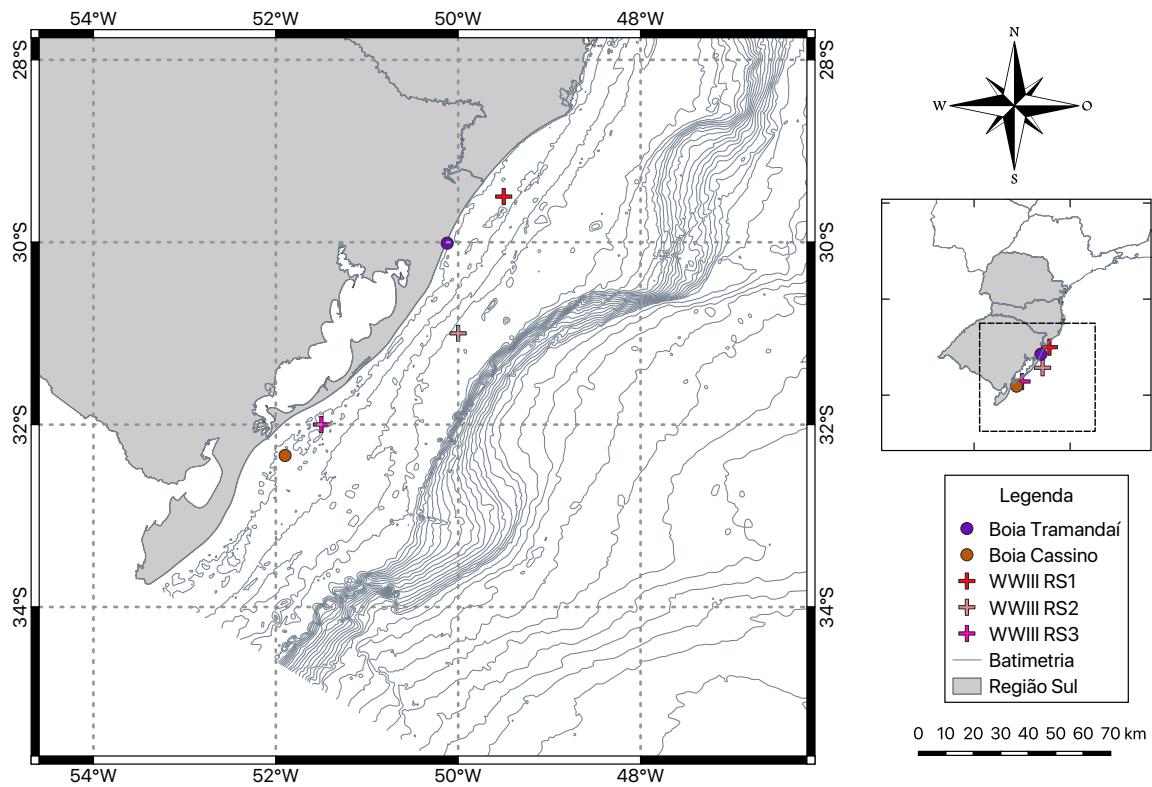
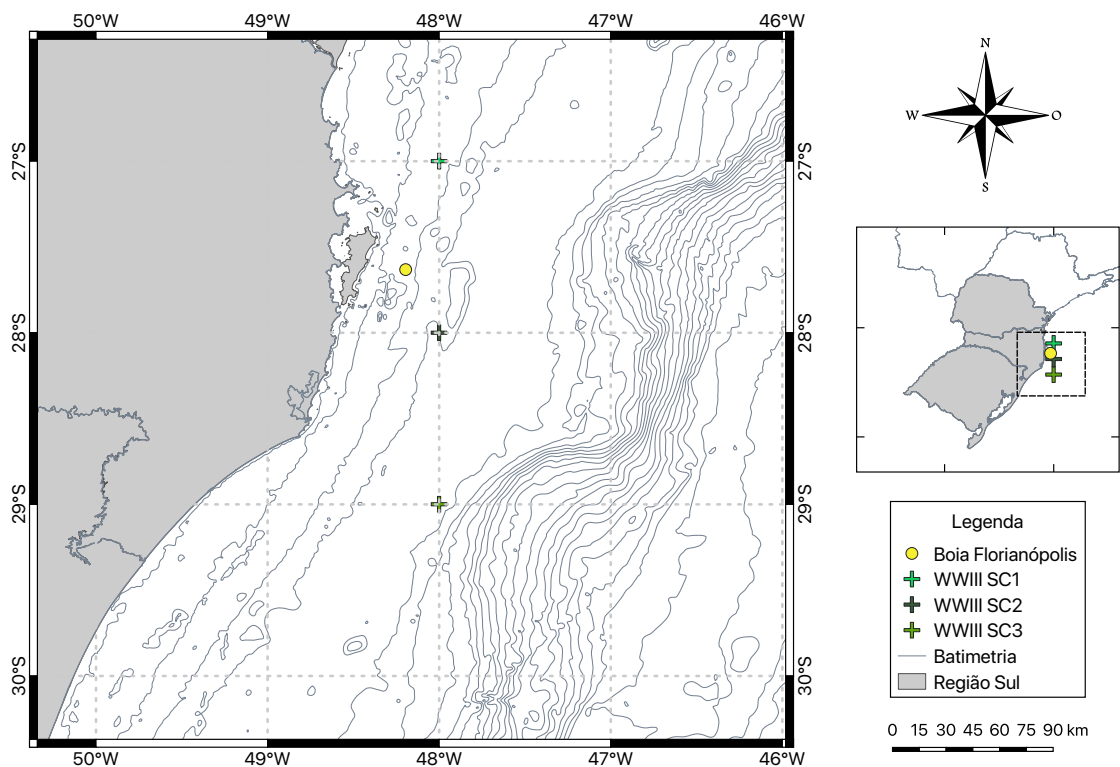


FIGURA 32 - MAPA BATIMÉTRICO DO RS EVIDENCIANDO A COSTA RASA, LONGA E DE POUCA INCLINAÇÃO.



Já a boia de SC, que registrou os maiores valores, fica posicionada mais a E, mais distante da costa, em profundidade aproximada de 69 m, a 22 km da costa; ou seja, as ondas incidentes nesse local sofrem menos influência da batimetria, perdendo menos energia ao atingirem a costa. A [Figura 33](#) evidencia essas informações.

FIGURA 33 - MAPA BATIMÉTRICO DE SC EVIDENCIANDO A PLATAFORMA MAIS CURTA QUE OS DEMAIS ESTADOS (PR E RS)



Partindo da equação utilizada para calcular a potência no presente trabalho ( $P = 0,4906 * H_s^2 * T_p$ ), notamos a importância da  $H_s$  na fórmula. A maior  $H_s$  foi registrada em Florianópolis (7,24 m) e a  $P$  máxima também (560,61 kW). Os maiores valores de  $T_p$  máximo foram registrado em Florianópolis (21,8 s) e Tramandaí (21,5 s), entretanto, as  $P$  máximas dessas regiões foram bem distintas (258,44 kW em Tramandaí), uma vez que o parâmetro mais importante no cálculo da  $P$  é a  $H_s$ .

Como já foi dito anteriormente, ainda não há uma classificação muito sistemática dos WEC, muitas vezes havendo divergência ou sobreposição na classificação de um mesmo conversor por diferentes autores. No caso de (9) que fez uma classificação simplificada em apenas três categorias: A, B e C (consultar [seção 3.2.1](#)), o autor facilita a classificação dos WEC deixando aberto para as centenas de conversores existentes, que variam com o modo de funcionamento. (38) fazem uma revisão de conversores e os classificam por localização, tipo e modo de operação. Segundo eles, o Archimedes Wave Swing é do tipo *point absorber*, com modo de operação *submerged pressure differential*. E segundo (27), *point absorber* e *submerged pressure differential* são dois tipos diferentes de WEC (classificação que foi usada neste trabalho). Outra classificação existente para os WEC é em relação aos modos de conversão da energia. Há diferentes tipos de transformadores, chamados de *Power Takeoff* (PTO) na literatura estrangeira, que não foram abordados neste trabalho mas podem ser encontrados em (39).

Outra classificação existente é em relação ao local de instalação/distância da costa. Os dispositivos *shoreline* ou *onshore* são os instalados “em terra”, exatamente na costa. Têm a vantagem de estarem próximos à rede de distribuição de energia, a manutenção é mais fácil, e como as ondas sofrem perda de energia a medida que se aproximam da costa, teoricamente eles têm a menor probabilidade de serem danificados (38) - porém em costas onde a energia das ondas é muito alta isso pode não ser verdade, devendo-se analisar casos específicos com cautela. Além disso, é um tipo de dispositivo que depende muito da geologia e geometria do local onde será instalado, não permitindo portanto uma produção em massa. Segundo esse mesmo autor, a definição de *nearshore* e *offshore* para classificação dos WEC é muito confusa, uma vez que não há consenso sobre a profundidade correspondente de cada um, variando entre dezenas e centenas de metros, sendo que alguns autores utilizam o comprimento de onda para essa classificação: 1/4 do comprimento de onda seria raso (40), e acima de 1/3 seria fundo (41) - para regiões onde o clima de ondas é bastante definido, é mais fácil classificar quanto ao comprimento de onda, entretanto em locais onde o espectro das ondas é muito amplo

essa classificação se torna mais abstrata (baseado na Teoria de Airy). Apesar da falta de consenso nesse ponto da classificação dos WEC, (38) simplifica dizendo que os *nearshore* geralmente ficam fixados ao fundo, com uma parte oscilante, que captará a energia das ondas. Assim como os *shoreline*, que ficam em contato com ondas relativamente menos energéticas, estando menos sujeitos a avarias ocasionadas por eventos extremos. Já os conversores *offshore*, tem a vantagem de estarem em contato com ondas mais energéticas, sendo teoricamente mais “eficientes” no processo de captação da energia. Por esse mesmo motivo, precisam ser mais resistentes, adicionando custo à produção e manutenção deles.

Entre todos os dispositivos citados neste trabalho, o que parece melhor se adaptar às diversas situações e estados de mar, além de ter uma boa relação captação de energia vs tamanho do dispositivo, é o tipo *point absorber*. Dentre os citados, dois deles são desse tipo: WaveNET e WaveSurfer.

O WaveNET tem capacidade de movimento em qualquer direção - uma grande vantagem, visto que não restringe a absorção de energia de ondas vindas de qualquer direção. Considerando somente o WaveNET Series-6, que já está sendo testado em escala comercial, ele tem a capacidade de gerar energia num *range* de altura de ondas bastante amplo (0,3 a 6 m), mostrando que é um equipamento versátil e resistente. Por ser formado por módulos individuais que podem ser conectados em matriz, possibilita a instalação em locais variados (desde que na profundidade adequada). Tem o potencial bem especificado no site (de 7,5 kW por unidade SQUID). O WaveSurfer também pode ser conectado em matrizes, tem material aparentemente resistente, e possui o potencial teórico bem especificado ([Figura 34](#)) no site da empresa.

FIGURA 34 - TABELA MATRIZ DE POTÊNCIA DO CONVERSOR WAVESURFER, RELACIONANDO ALTURA DE ONDA (WAVE HEIGHT) E POTÊNCIA ÚTIL (POWER OUTPUT).

POWER MATRIX					
Model	WS-1	WS-2	WS-3	WS-4	WS-5
Nominal Power Output (kW)	50	200	700	1100	2100
Max Power Output (kW)	120	370	1120	2500	6500
Wave height, m	POWER OUTPUT (kW)				
0.5	3	6	11	17	33
1	13	23	45	69	132
1.5	30	52	101	156	297
2	53	92	179	277	528
2.5	82	144	280	433	824
3	119	208	404	623	1187
3.5	162	283	549	848	1616
4	211	369	717	1108	2110
4.5	267	467	908	1402	2671
5	330	577	1121	1731	3297
5.5	399	698	1356	2094	3989
6	475	831	1614	2493	4748
6.5	557	976	1894	2926	5572
7	646	1131	2197	3393	6462
7.5	742	1298	2522	3895	7418
8	844	1477	2870	4431	8440
8.5	953	1667	3240	5002	9528
9	1068	1869	3632	5608	10682
9.5	1190	2083	4047	6249	11902
10	1319	2308	4484	6924	13198

Fonte: Ocean Energy Industries. Disponível em <https://oceanenergyindustries.com/wavesurfer/power-matrix>

Os conversores do tipo *oscillating wave surge converter* (WaveRoller), *submerged pressure differential* (Archimedes Wave Swing) e *overtopping* (Wave Dragon), são conversores de dimensões bastante elevadas. O WaveRoller precisa ficar em local relativamente raso, onde as ondas estejam sofrendo ação do fundo. Por esse motivo acaba ficando sujeito a possíveis ondas de alta energia geradas por eventos climáticos, que são bastante frequentes na região sul do Brasil. Além de ser grande, é fixo ao fundo, podendo gerar certo impacto no local de instalação - em locais como o sul do RS por exemplo, onde o fundo é lamoso, e a passagem de eventos climáticos é bastante frequente, não seria adequado. Ainda devido à proximidade com a praia, pode estar sujeito a choques com embarcações de pesca ou recreio, pois dependendo da amplitude de maré, pode ficar totalmente ou parcialmente submerso. No caso de Pontal do Paraná por exemplo, onde ainda há pesca artesanal, poderia haver conflito entre estas atividades. O Archimedes Wave Swing fica totalmente submerso, e precisa de grandes profundidades, portanto deve ser instalado longe da costa, o que aumenta o custo e a dificuldade de instalação e manutenção, porém, por esse motivo recebe ondas mais energéticas, devendo-se portanto, fazer uma análise do custo benefício.

Os conversores Mighty Whale (OWC flutuante) e Wello Penguin (*rotating mass*), têm a geometria parecida com a de um barco/lancha (inclusive o Wello Penguin foi

propositalmente feito dessa maneira), e ficam atracados ao fundo. O primeiro ocupa uma área de mais de 1500 m<sup>2</sup>, e o segundo mais de 480 m<sup>2</sup>. Devido às suas grandes proporções, e pelo fato de ficarem atracados ao fundo, não são adequados perto de rotas de navio por exemplo, pelo alto risco de colisão. Mares próximos a regiões como Paranaguá, Itajaí e Rio Grande, que possuem portos, não seriam locais interessantes para instalação desses equipamentos. Segundo (32), a manutenção é relativamente fácil, considerando que poderiam ser rebocados e atracados a um local de ancoradouro (como um porto) para que sejam feitos os devidos reparos, ou em caso de tempestades muito fortes se aproximando. Mas considerando as grandes dimensões e conseqüentemente o peso dos equipamentos (4400 toneladas do Mighty Whale e 220 do Wello Penguin), não deve ser uma tarefa muito fácil, tornando isso uma desvantagem. Entre os dois, o Wello Penguin parece ser mais eficiente, pois é menor, mais leve, e teoricamente tem potência de 600 kW, enquanto o Mighty Whale teve potência máxima gerada (por testes no mar) de 110 kW. Mas como não é especificado o estado de mar/tamanho de ondas suportadas, não é possível afirmar a eficiência comparada entre os dois.

O Pelamis (*attenuator*) tem formato diferente dos dois anteriores, mas também se encaixa nas colocações feitas em relação a tamanho, área ocupada, e distribuição não adequada para regiões portuárias com trânsito de navios de grande porte. Além disso, não é mais fabricado, tirando-o portanto da lista de possibilidades para a área de estudo. O Anaconda (*bulge wave*) tem formato parecido com o do Pelamis, porém com princípio de funcionamento totalmente distinto, é feito de outros materiais, e é posicionado em um local diferente - Pelamis fica na superfície e Anaconda abaixo da linha d'água - mas ainda não está disponível no mercado.

O Wave Dragon (*overtopping*) precisa de uma área bastante extensa pra operar, pois tem um formato muito peculiar, com "braços abertos" para promover reflexão das ondas, ocupando assim uma grande área, não sendo recomendado para regiões com trânsito intenso de navios. É o dispositivo mais pesado entre todos os citados, e provavelmente um dos mais pesados do mercado (54000 toneladas), o que deve dificultar a manutenção, e provavelmente a instalação. É o único que especifica o potencial do equipamento a partir do regime de ondas: 11 MW para regime de 48 kW/m. Considerando que a maior potência média encontrada na região sul foi de 15,24 kW, o rendimento de um Wave Dragon instalado em qualquer uma das regiões estudadas seria provavelmente muito baixo, tornando-o uma opção inviável. Entretanto considerando-se as potências máximas, só o PR teve valores abaixo de 48 kW/m, as demais regiões foram acima de 250 kW/m.

O único dispositivo *shoreline* citados foram o LIMPET (OWC) e o Wave Clapper (sem classificação). O LIMPET precisa ser montado em um costão rochoso, portanto sua área de possível instalação varia entre o norte do PR e o norte de RS, pois as demais regiões do RS não possuem costões rochosos. Devido ao barulho da turbina do equipamento, é mais apropriado que seja instalado em um local pouco habitado, ou onde haja menos circulação de pessoas. Além disso, precisa ser em uma costa relativamente alta, pois o equipamento é de grande porte. É de difícil instalação, pois é construído numa área grande e de intensa quebra de ondas, demandando portanto um projeto de engenharia bastante elaborado. Na Escócia, onde está instalado um dispositivo como esse, foi necessário escavar uma grande área, deixando uma “parede” (para proteger das ondas) que foi elevada com blocos artificiais, para que fosse possível instalar o dispositivo; e depois de instalado, a parede foi derrubada. Por esses motivos, pode ser de grande impacto à área de instalação. (Detalhes e imagens sobre o LIMPET e os procedimentos de instalação podem ser vistos em [28](#)). É necessário avaliar a disponibilidade e a proximidade de ligação direta com a rede de distribuição de energia, o clima de ondas local, acessibilidade para os instaladores, a aceitação da comunidade, e a amplitude de maré local. Além da alta produção de ruídos, pode ser considerado de alto impacto visual. Já o Wave Clapper, deve ser instalado em estruturas artificiais como molhes ou cais, o que elimina parcialmente a necessidade de construção de uma estrutura para instalá-lo. Seria uma opção interessante para regiões portuárias, até mesmo para produzir energia para os portos. Mas como não há especificação de altura de onda mínima, e os portos das regiões de estudo são construídos em locais de mar relativamente calmo, não é possível dizer se o equipamento seria eficiente nessa situação — o Porto de Paranaguá por exemplo fica dentro da Baía de Paranaguá. Já na entrada do canal para o porto de Itajaí, há um molhe que recebe ondas que talvez sejam suficientes para geração de energia com esse conversor.

Uma classificação geral de todos os WECs analisados aqui pode ser vista na [Tabela 6](#). Detalhes sobre a hidrodinâmica, a relação do formato, o tipo de movimento, a eficiência de absorção de energia pelos WEC, podem ser encontrados em [\(39\)](#).

TABELA 6. CLASSIFICAÇÃO DOS WEC QUANTO A LOCALIZAÇÃO, CATEGORIA, PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO, E POTÊNCIA ESTIMADA. IMPORTANTE SALIENTAR QUE ESTE ÚLTIMO QUESITO É SEGUNDO OS SITES DAS EMPRESAS DESENVOLVEDORAS, QUE NÃO INFORMARAM O RANGE DE ONDAS E ESTADO DE MAR PARA ESSAS POTÊNCIAS.

<b>Nome</b>	<b>Localização</b>	<b>Categoria</b>	<b>Princípio de funcionamento</b>	<b>Potência estimada</b>
LIMPET	<i>Onshore</i>	C	<i>OWC</i>	500kW
The Mighty Whale	<i>Nearshore</i>	C	<i>OWC</i>	110kW
WaveNET	<i>Nearshore / Offshore</i>	A	<i>Point absorber</i>	7,5kW/unidade
WaveSurfer	<i>Offshore</i>	A	<i>Point absorber</i>	1kW a 10MW
Anaconda	<i>Nearshore</i>	A	<i>Bulge wave</i>	1MW
Wave Clapper	<i>Shoreline</i>	A	Não se aplica	-
WaveRoller	<i>Nearshore</i>	A	<i>Oscillating wave surge converter</i>	15kW
Pelamis	<i>Offshore</i>	A	<i>Attenuator</i>	750kW
Wave Dragon	<i>Offshore</i>	B	<i>Overtopping</i>	11MW
Wello Penguin	<i>Nearshore / Offshore</i>	A	<i>Gyroscope</i>	600kW
Archimedes Wave Swing	<i>Offshore</i>	A	<i>Submerged pressure differential</i>	6-9MW/ano

O andamento dos WECs no Brasil: Em 2012 foi instalado no porto do Pecém no Ceará, a primeira usina conversora de energia de ondas no Brasil. Um conversor do tipo *shoreline*, que não se aplica a nenhuma das classificações dadas neste trabalho. Com princípio de funcionamento semelhante ao do Wave Clapper e Power Wing, porém com design bem diferente, o protótipo da usina era composto de dois módulos: cada um com um flutuador de 10 m de diâmetro, que ficavam acoplados a dois braços mecânicos fixados ao molhe. Os flutuadores se moviam para cima e para baixo, movimentando os braços mecânicos que acionavam uma bomba pressurizadora de água doce, e fazia girar uma turbina, gerando então energia. O diferencial estava no sistema de alta pressão que era responsável por movimentar a turbina - foi desenvolvido e patenteado pela Coppe (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia) e se assemelha ao princípio de funcionamento de uma hidrelétrica. A usina tinha potencial de 100 kW. O protótipo ficou em funcionamento até 2014, quando as obras de ampliação do porto e o encerramento do contrato com a empresa financiadora ocasionaram a paralização da usina por tempo indeterminado.

no Rio de Janeiro, a 14 km da praia de Copacabana, perto da Ilha Rasa. O conversor em desenvolvimento é do tipo *nearshore* (será instalado a 20 m de profundidade), classificado como *point absorber*. É uma estrutura cilíndrica de 11 m de altura e 4,5 m de diâmetro. Possui um o eixo central fundado no leito marinho, e um flutuante ao seu redor, que sobe e desce a partir do movimento das ondas, fazendo funcionar um gerador de movimento unidirecional, que será responsável por gerar energia. Um cabo transmissor levará energia para a costa. Segundo Alexandre Beluco, engenheiro do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, talvez a energia ondomotriz não seja de extremo interesse para o país, pois o Brasil possui diversas outras formas de obter energia elétrica. Entretanto, Estefen diz ser importante que o Brasil se mantenha competitivo nesse ramo, para que no futuro não necessitemos importar esse tipo de tecnologia, e para nos mantermos entre os países que estão buscando dominá-la (42), (43).

De acordo com um relatório do IRENA (44), há quatro obstáculos principais a serem superados pelas energias do oceano antes de alcançarmos uma implantação em massa desse sistema: tecnológico, econômico, sócio-ambiental, e infraestrutural. A grande maioria das tecnologias de conversão ainda está em fase de desenvolvimento e testes, sendo poucas as empresas que possuem equipamentos já em escala comercial, e com testes no mar. Isso significa que o entendimento sobre essas tecnologias ainda tem muito o que melhorar e desenvolver, tanto em relação ao próprio recurso (as ondas em si, e os potenciais locais), quanto ao design e desenvolvimento em massa (em matrizes) dos equipamentos, para uma produtividade satisfatória. Entretanto, para que haja um desenvolvimento mais acelerado dessas tecnologias, é necessário que os desenvolvedores compartilhem conhecimentos e riscos já enfrentados.

Uma vez ultrapassada a barreira do desenvolvimento tecnológico, existe a questão econômica. Por ser uma tecnologia nova e ainda cheia de incertezas, no geral ainda não há tanto investimento de empresas, órgãos financiadores, ou até mesmo do governo (na Europa há bastante investimento). Considerando ainda o grande interesse econômico e imenso mercado que existe em torno do petróleo, o investimento em tecnologias sustentáveis de produção de energia ainda não é tão grande quanto deveria, e talvez a barreira econômica seja a mais difícil de ser ultrapassada. O fator competitividade depende primariamente de custos e riscos, fatores esses que ainda não são totalmente conhecidos pelos desenvolvedores.

Após desenvolver a tecnologia e conseguir o investimento necessário, é preciso aplicá-la. A partir daí entram as questões sócio-ambiental e de infraestrutura. Os WECs

têm a vantagem de serem livres de emissão de carbono, porém não são totalmente livres de outros riscos ambientais e sociais. Alguns equipamentos possuem fluidos que podem ser poluentes em caso de vazamento; dependendo do tipo de equipamento, pode ocorrer conflitos com outras atividades locais (como a pesca, por exemplo), ou até mesmo gerar impacto sonoro e/ou visual relevantes. Entretanto, devemos levar em consideração que podem ser gerados muitos empregos desde a fase de desenvolvimento tecnológico, até a implementação e manutenção desses dispositivos. A infraestrutura da cidade/região escolhida, também precisa estar preparada para receber esse tipo de dispositivo, a matriz energética precisa ser adaptada, a população deve ser consultada. Além disso, não há regulamentação sobre a instalação e funcionamento dos conversores, tudo isso ainda precisa ser desenvolvido e aprimorado.

Um fator importante a ser apontado após este trabalho, é que a maioria das informações sobre os WECs é proveniente do próprio site das empresas desenvolvedoras, o que faz com que haja uma natureza muito “comercial” nas informações fornecidas. Praticamente todas citam de alguma forma o baixo impacto ambiental e o alto rendimento quando comparados a outros conversores, porém não há quesitos específicos apontados em relação a essas comparações, não há exemplos “concretos” que corroborem com as informações dadas. Com essa imprecisão de informações em relação ao potencial dos conversores analisados, não foi possível avaliá-los de acordo com esse quesito para possível implantação na costa sul brasileira.

Além dos obstáculos citados pelo relatório do IRENA (44), uma das grandes limitações para a produção de energia renovável, é seu armazenamento. Apesar do oceano estar sempre em movimento, há momentos onde a movimentação de ondas é mais intensa ou menos intensa, gerando irregularidades na geração de energia, o que não é interessante para a matriz energética de uma cidade, por exemplo. Pode haver momentos em que a geração será muito baixa, sendo insuficiente, e pode haver momentos de pico de geração, quando provavelmente será desperdiçada a energia remanescente. A bateria é uma das metodologias mais conhecidas de armazenamento de energia, porém (45) não acredita que seja possível utilizá-las em escalas muito grandes. Há outras metodologias de armazenamento de energia sendo estudadas, e podem ser vistas com mais detalhes em (45).

Os estudos sobre o potencial energético das ondas na costa do Brasil ainda são muito escassos, havendo uma pobre caracterização desse recurso. Entretanto, com o aumento do interesse em fontes de energia renováveis, vem aumentando a quantidade de estudos sobre conversores de energia de ondas, juntamente com trabalhos que

caracterizem o potencial energético de ondas no país. Dentro desta temática podemos citar: (3), (4), (11).

## 5 CONCLUSÃO

O regime de ondas na costa sul do Brasil possui direção predominante entre os quadrantes S e E, com maior predominância de SE, e potencial energético elevado - principalmente devido a constante passagem de sistemas frontais vindos de S. A costa de Santa Catarina apresentou ondas mais energéticas quando comparada ao Paraná e Rio Grande do Sul. No geral, os dados de altura significativa ( $H_s$ ), período de pico ( $T_p$ ) e direção predominante ( $D_p$ ) gerados pelo modelo foram bastante correlatos com os da Rede Ondas, resultando em dados de potência ( $P$ ) também correlatos.

A partir da breve revisão feita sobre os tipos de WEC, é possível perceber a falta de consenso na classificação dos dispositivos quanto à localização, o princípio de funcionamento, e principalmente quanto às informações de potência. E devido a falta dessas informações precisas, não foi possível estimar a viabilidade de instalação dos WEC a partir do cálculo do potencial energético das ondas na costa sul do Brasil.

Os WEC são uma tecnologia muito promissora dentre as formas de energias renováveis, porém ainda precisam de muito aprimoramento antes da utilização em grande escala. O baixo investimento no desenvolvimento dessas tecnologias ainda é realidade na maioria dos países (principalmente os emergentes, como o Brasil), mas em países da Europa, já foram feitos muitos avanços.

O Brasil tem um imenso potencial energético para ser explorado na área de ondas, mas talvez por não ter tanta necessidade/urgência no desenvolvimento dessas tecnologias, não há tantos estudos e investimento nessa área - visto que há muitas outras formas de produção de energia no país. Porém seria interessante para o país se manter nessa linha de pesquisa, tanto para possível exportação de tecnologias desenvolvidas, como para o próprio uso em locais remotos como ilhas e plataformas de petróleo. Vale lembrar que há uma diferença entre “ser” uma região de alto potencial energético, e “ter capacidade” para explorá-lo.

## 6 REFERÊNCIAS

1. CLÉMENT, A. McCULLEN, P.; FALCÃO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN, K.; PETRONCINI, S.; PONTES, M. T.; SCHILD, P.; SJÖSTRÖM, B. O.; SØRENSEN, H. C.; THORPE, T. Wave energy in Europe: current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 6, n. 5, p. 405-431, 2002.
2. UNPD [United Nations Development Programme]. **World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability**. New York, NY: United Nations Development Programme, 2000.
3. ASSIS, L.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. Avaliação e Aproveitamento da Energia de Ondas Oceânicas no Litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 21–29, 2013.
4. CONTESTABILE, P.; FERRANTE, V.; VICINANZA, D. Wave Energy Resource along the Coast of Santa Catarina (Brazil). **Energies**, v.8, n.12, p.14219-14243, 2015.
5. OPEN UNIVERSITY TEAM. **Waves, tides and shallow-water processes**. v. 4, 1997.
6. LEFÈVRE, J. M.; COTTON, P. D. Ocean Surface Waves. In: **International Geophysics Journal**. Satellite Altimetry and Earth Sciences. v. 69, p. 305–328, 2001.
7. TOWNSEND, D. W. **Oceanography and marine biology** - An introduction to marine science. Sinauer Associates Inc., 2012.
8. PECHER, A.; KOFOED, J. P. **Handbook of Ocean Wave Energy**. Springer International Publishing, v. 7, 2017.
9. WATERS, R. Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter. **Acta Universitatis Upsaliensis. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology** 580. 130 p. Upsala. 2008.
10. KLEIN, A. H. F.; SHORT, A. D. Brazilian Beach Systems: Introduction. In: **Brazilian Beach Systems**, Switzerland: Springer, v. 17, 2016.
11. 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, 2010.
12. RODRÍGUEZ, M. G. Brazilian Coastal Processes: Wind, Wave Climate and Sea Level . In: **Brazilian Beach Systems**, Switzerland: Springer, v. 17, 2016.
13. NEMES, D.; MARONE, E. Caracterização das ondas de superfície na plataforma interna do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 69, 2013.
14. ANGULO, R. J.; BORZONE, C. A.; NOERNBERG. M. A.; QUADROS, C. J. L.; SOUZA, M. C.; ROSA, L. C. The State of Paraná Beaches. In: **Brazilian Beach Systems**, Switzerland: Springer, v. 17, 2016

15. KLEIN, A. H. F.; SHORT, A. D.; BONETTI, J. Santa Catarina Beach Systems. In: **Brazilian Beach Systems**, Switzerland: Springer, v. 17, 2016
16. ALVES, J. H. G. M. **Refração do espectro de ondas oceânicas em águas rasas**: aplicações à região costeira de São Francisco do Sul, SC. Florianópolis. (Tese de mestrado) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil, 89p, 1996.
17. ALVES, J. H. G. M, MELO, E. Measurements and modelling of wind waves at northern coast of Santa Catarina, Brazil. **Revista Brasileira de Oceanografia** 49(1/2):13–28, 2001.
18. ARAUJO, C. E. S.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. **Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast**. In: Proceedings of the sixth international conference on coastal and port engineering in developing countries, COPEDEC VI, Colombo, Sri Lanka, Paper no. 097; p 15, 2003.
19. KLEIN, A. H. F. **Morphodynamics of headland-bay beaches**: examples from the coast of Santa Catarina State, Brazil. (Tese de doutorado) Faculdade de Ciências do Mar e do Ambiente. Universidade do Algarves, Faro, Algarve, Portugal, 198p, 2004.
20. SILVA, G. M. **Orientação da linha de costa e dinâmica dos sistemas praia e duna**: praia de Moçambique, Florianópolis, SC. (Tese de doutorado) Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil, 293p, 2006.
21. HESP, P. A.; GIANNINI, P. C. F.; MARTINHO, C. T.; SILVA, G. M.; ASP, N. E. **The Holocene barrier systems of the Santa Catarina coast, southern Brazil**. In: Dillenburg SR, Hesp PA (eds) Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil. Springer, Berlin, pp 93–134, 2009.
22. SIGNORIN, M. **Análise e comparação do clima de ondas do litoral Norte, Centro e Sul de Santa Catarina utilizando modelagem numérica**. (Monografia) Oceanografia, Universidade do Vale do Itajaí, Itajaí, SC, Brasil, 82p, 2010.
23. PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal of Oceanography** 58(1):53–70, 2010.
24. DILLENBURG, S. R.; BARBOZA, E. G.; TOMAZELLI, L. J.; HESP, P. A.; CLEROT, L. C. P.; AYUP-ZOUAIN, R. N. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: **Geology and Geomorphology of Holocene Coastal Barriers of Brazil**, Berlin: Springer, 2009.
25. CALLIARI, L. J.; TOLDO, E. E. Ocean Beaches of Rio Grande do Sul. In: **Brazilian Beach Systems**, Switzerland: Springer, v. 17, 2016.
26. MOTTA, V. F. Relatório Diagnóstico Sobre a Melhoria e o Aprofundamento do Acesso pela Barra do Rio Grande. Porto Alegre, **Relatório do Instituto de Pesquisas Hidráulicas**, UFRGS, p 144, 1969.
27. **The European Marine Energy Centre LTD**. Disponível em: <<http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices/>>. Acesso em Agosto 2018.
28. **Islay LIMPET wave power plant** - Publishable Report, 1998.

29. FALCÃO, A. F. O.; HENRIQUES, J. C. C. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1391-1424, 2016.
30. **International Energy Agency**. Disponível em: <<https://www.iea.org>>. Acesso em Agosto 2018.
31. WASHIO, Y.; OSAWA, H.; NAGATA, Y.; FUJII, F.; FURUYAMA, H.; FUJITA, S. The Offshore Floating Type Wave Power Device "Mighty Whale" Open Sea Tests; Part1: An overview of the experimental system and the mooring operations. **JAMSTEC**, 2000.
32. JOUBERT, J. R.; VAN NIEKERK, J. L.; REINECKE, J.; MEYER, I. **Wave energy converters (WECs)**. Centre for Renewable and Sustainable Energy Studies. Faculty of Engineering, 2013
33. **Wave Dragon**. Disponível em: <<http://www.wavedragon.net>>. Acesso em: Setembro 2018.
34. **Wello**. Disponível em: <<https://wello.eu>>. Acesso em: Setembro 2018.
35. POULLIKKAS, A. Technology prospects of wave power systems. **Electronic Journal of Energy & Environment**, Sharjah, 2014.
36. PORTOBRAS. **Campanha de medições de ondas em Paranaguá – PR, período 21.08.1982 a 21.01.1993**. Rio de Janeiro, Inst. Pesq. Hidrog. (INPH), Div. Lev. (DIDELE), 23p, 1983.
37. CUCHIARA, D. C.; FERNANDES, E. H.; STRAUCH, J. C.; WINTERWERP, J. C.; CALLIARI, L. J. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**. p. 445- 555, 2009.
38. DREW, B.; PLUMMER, A. R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy**. v. 223, Bath, 2009.
39. ADERINTO, T.; LI, H. Ocean Wave Energy Converters: Status and Challenges. **Energies**, 26 p., Kingsville, 2018.
40. DUCKERS, L. Wave energy. In **Renewable energy** (Ed. G. Boyle), 2ª ed., Oxford University Press, Oxford, 2004.
41. FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Mar. Struct.**, 20, 185–201. 2007.
42. **Revista Planeta**. Disponível em: <<https://www.revistaplaneta.com.br/energia-que-vem-do-mar/>>
43. **Wave Energy** - Renewable Energy Research <[http://www.bluebird-electric.net/wave\\_power\\_energy\\_generation.htm](http://www.bluebird-electric.net/wave_power_energy_generation.htm)>
44. MOFOR, L.; GOLDSMITH, J.; JONES, F. Ocean Energy: Technology readiness, patents, deployment status and outlook. **International Renewable Energy Agency**, 2014.

45. TRAINER, T. Some problems in storing renewable energy. **Energy Policy**, Elsevier, Wadalba, 2017.