

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS ARARANGUÁ**

**NÁGILA LUCIETTI SCHMIDT**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA**

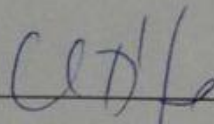
**ARARANGUÁ  
2017**

NÁGILA LUCIETTI SCHMIDT

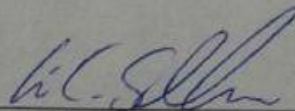
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA DE ENERGIA

Trabalho de conclusão de curso na modalidade de artigo científico para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Araranguá.

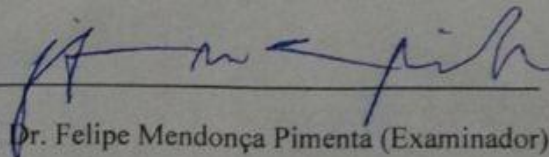
Aprovado em: 10/07/2017



Prof. Dra. Carla de Abreu D'Aquino (Orientadora)



Prof. Dr. César Cataldo Scharlau (Examinador)



Prof. Dr. Felipe Mendonça Pimenta (Examinador)

# ANÁLISE COMPARATIVA DE CONVERSORES DE ENERGIA DE ONDAS OCEÂNICAS

NÁGILA LUCIETTI SCHMIDT<sup>1</sup>

## RESUMO

O presente trabalho realizou uma análise comparativa de conversores de energia de ondas oceânicas, abordando a caracterização do estado de mar mais frequente e as matrizes de potência de dispositivos conversores, para uma série de dados de ondas coletadas no litoral de Tramandaí/RS. A metodologia da pesquisa consistiu no cálculo dos parâmetros estatísticos de onda, dos quais foram construídos diagramas de ocorrência para verificar o espalhamento dos dados para a série completa e para as estações do ano, de modo a verificar o estado de mar predominante. Com o auxílio de matrizes de potência de dispositivos conversores de energia das ondas, foram cruzados os dados dos diagramas de ocorrência com as matrizes de potência para cinco diferentes dispositivos conversores, a fim de verificar qual dispositivo conversor melhor se adapta ao clima de ondas analisado, em termos de absorção de potência das ondas. Também foi realizada uma breve análise da disponibilidade do potencial energético das ondas oceânicas de acordo com a diminuição da profundidade, à medida que as ondas se propagam em direção à costa, a fim de investigar a modificação que ocorre na potência das ondas quando estas sofrem a influência do fundo oceânico. De acordo com os resultados obtidos, os conversores que melhor aproveitariam a potência de ondas para o estado de mar predominante em Tramandaí são o SSG (*Sea Slot-cone Generator*) e *Wave Dragon*, sendo o dispositivo SSG o que melhor se adaptou a todas as profundidades analisadas.

Palavras-chave: Energia das ondas. Matrizes de potência. Dispositivos conversores.

---

<sup>1</sup>Graduanda do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Araranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Araranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88905-355. E-mail: nagila.schmidt@grad.ufsc.br

## 1 INTRODUÇÃO

A expansão das energias renováveis no contexto energético mundial propicia o desenvolvimento tecnológico e a produção de novos conhecimentos na área energética. Além disso, a utilização das fontes renováveis de energia pode contribuir para diversificar os suprimentos de energia, estimular o crescimento econômico de regiões costeiras e remotas, além de proporcionar vantagens ambientais quando comparadas as fontes tradicionais de geração de energia (ASSIS, 2010; MAGAGNA; UIHLEIN, 2015).

Estima-se que 0,02% da energia contida nos oceanos seria capaz de atender a atual demanda mundial por energia elétrica (AMUNDARAIN et al., 2010). A energia oceânica engloba possibilidades de aproveitamento energético pela energia das ondas, energia das marés, energia das correntes marítimas e energia do gradiente térmico e do gradiente de salinidade dos oceanos (BAHAJ, 2011; AMUNDARAIN et al., 2010; MARJANI et al., 2008). A princípio, as tecnologias de aproveitamento da energia das ondas e das marés são as mais aprimoradas, dentre as tecnologias de energia oceânica, e dispõem de potencial para tornarem-se viáveis entre curto-médio prazo (MAGAGNA; UIHLEIN, 2015).

Dentre as formas de energia oceânica disponíveis, a energia de ondas é considerada uma das fontes de energia renovável com maior potencial de desenvolvimento para os próximos anos (IGLESIAS; CARBALLO, 2009; FALCÃO, 2010; LÓPEZ et al., 2013). Estima-se que o potencial energético global disponível nas ondas oceânicas seja da ordem de 2,11 TW (GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012). As ondas oceânicas constituem-se de um recurso mais previsível, em relação a intermitências, e possuem maior densidade energética quando comparada ao recurso solar e eólico, visto que uma usina de ondas possui densidade energética entre 2 a 3 kW/m<sup>2</sup>, enquanto as usinas solares possuem de 0,1 a 0,2 kW/m<sup>2</sup> e as usinas eólicas entre 0,4 a 0,6 kW/m<sup>2</sup> (KHAN et al., 2017; LEHMANN et al., 2017; FALNES, 2007).

O aproveitamento do recurso energético disponível nos oceanos constitui-se de uma possibilidade para atender parte da demanda por energia em diversos países, incluindo o Brasil, dado o notável potencial energético passível de aproveitamento para a geração de energia elétrica em algumas localidades. De acordo com Estefen et al. (2006), a energia proveniente de ondas oceânicas pode acarretar impactos positivos na matriz energética brasileira, visto que o país possui um extenso litoral, com aproximadamente 9000 km. Estima-se que seja possível disponibilizar em torno de 40 GW para o sistema interligado brasileiro,

considerando o aproveitamento do recurso ao longo do litoral das regiões sul e sudeste do país (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013).

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo realizar uma análise comparativa de conversores de energia de ondas oceânicas, a partir do estado de mar predominante para uma região. Além disso, pretende-se investigar a transformação dos parâmetros de onda e a consequente modificação do potencial energético com a diminuição da profundidade, à medida que as ondas se propagam em direção à costa e sofrem a influência do atrito com o fundo oceânico. O local de estudo escolhido foi a praia de Tramandaí/RS, visto a disponibilidade de uma série de dados de ondas cedida pelo Centro de Estudos Costeiros e Oceânicos (CECO) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Nesta seção são descritos os principais pressupostos teóricos relacionados à energia de ondas oceânicas, bem como ao potencial energético disponível e as transformações que ocorrem nos parâmetros de onda e, por consequência, em sua potência, à medida que as ondas se propagam em direção à costa. Além disso, será explanado de forma geral o estado atual da energia oceânica a nível nacional e mundial, bem como as iniciativas que estão sendo tomadas para alavancar o setor.

### **2.1 Energia das ondas no contexto mundial e nacional**

A energia de ondas tem despertado interesse crescente, principalmente na União Europeia, a qual figura-se em primeiro plano no contexto do desenvolvimento de dispositivos e protótipos conversores de energias oceânicas. A União Europeia tem o objetivo de atingir 100 GW de capacidade instalada com tecnologias de energia das ondas e de marés até o ano de 2050. Para atingir essa meta, uma série de desafios relacionados ao setor deve ser superada, no que tange a maturação tecnológica, estabelecimento de mercado, questões administrativas e ambientais, e disponibilidade de conexão à rede em áreas remotas e afastadas da costa (MAGAGNA; UIHLEIN, 2015).

Com o intuito de dar suporte ao crescimento e desenvolvimento do setor de energia oceânica, a Comissão Europeia lançou em 2014 a “Comunicação Energia Azul” (*Blue Energy Communication*), a qual destacou a contribuição esperada para o cenário de energia das ondas

na União Europeia, bem como, a definição de um cenário para o desenvolvimento e utilização das energias oceânicas até 2020.

O projeto Comunicação Energia Azul estabeleceu um plano de implantação dividido em duas fases, sendo a primeira coincidente com a criação do Fórum de Energia Oceânica, do qual é esperada a criação de um roteiro estratégico para definir metas objetivando o desenvolvimento industrial do setor, bem como um cronograma efetivo para implantação. A segunda fase do plano de ação prevê a criação de uma Iniciativa Industrial Europeia (*European Industrial Initiative*) para as energias oceânicas, assim como já foi implantado para outros setores de renováveis, a exemplo da energia eólica (MAGAGNA; UIHLEIN, 2015).

Atualmente, a União Europeia responde por 45% do desenvolvimento de tecnologias e protótipos conversores de energia das ondas (MAGAGNA; UIHLEIN, 2015). Até a data, a maior parte das infraestruturas, tais como, centros de ensaio de energia das ondas e locais de implantação de dispositivos, estão localizados em águas europeias, conforme Figura 1.



Figura 1 – Desenvolvedores de tecnologias em roxo e infraestruturas dedicadas em vermelho (Fonte: MAGAGNA; UIHLEIN, 2015).

Na Austrália, a necessidade de reduzir a emissão de dióxido de carbono, levou o Governo Australiano a promover o plano RET (*Renewable Energy Target*) para as energias renováveis, com o intuito de assegurar que no mínimo 23,5% da produção de energia elétrica na Austrália até o ano de 2020, seja proveniente de fontes renováveis de energia. Essa política australiana integra o compromisso internacional do governo em reduzir as emissões de gases do efeito estufa em 80%, até o ano de 2050, abaixo dos níveis encontrados em 2000.

Para alcançar o plano RET nacional, a Austrália necessita gerar cerca de 20 TWh de energia renovável adicional por ano até 2020. Neste contexto, a energia das ondas oceânicas consiste em uma alternativa para auxiliar no cumprimento desta meta, visto que o país é

reconhecido como uma das regiões mais promissoras do mundo para o aproveitamento da energia das ondas (MORIM et al., 2014; MORIM et al., 2016). De acordo com Behrens et al. (2015) há capacidade para gerar até 40 TWh anual de energia elétrica em todo o comprimento da isóbata de 25 metros no Sudeste da Austrália. O aproveitamento de cerca de 50% dessa energia disponível nas ondas por meio de dispositivos conversores seria suficiente para atingir o objetivo do plano RET australiano (MORIM et al., 2016). Atualmente, o dispositivo CETO 6 implantado na costa da cidade de Perth na Austrália, representa o sistema de geração de energia por ondas mais avançado em operação no mundo. O dispositivo utiliza boias subaquáticas ancoradas ao fundo oceânico e, além de gerar energia pelo movimento vertical das ondas na estrutura, também é utilizado para dessalinização da água do mar (MAGAGNA; MONFARDINI; UIHLEIN, 2016).

No Brasil, o convênio firmado entre a COPPE/UFRJ (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia/Universidade Federal do Rio de Janeiro), ELETROBRÁS e o Governo do Estado do Ceará, em 2004, permitiu o desenvolvimento de estudos e projetos executivos para a implantação da primeira usina de energia das ondas das Américas, instalada no Porto de Pecém, distante sessenta quilômetros de Fortaleza, Ceará. O protótipo instalado é capaz de gerar 50 kW, sendo composto por dois módulos (Figura 2a).

Cada um destes módulos consiste em um flutuador, um braço e uma bomba. O princípio de funcionamento baseia-se na ação de flutuadores conectados a braços mecânicos, os quais atuam sob a influência dos flutuadores, como um pistão de uma bomba horizontal, enviando água pressurizada para um tanque de estocagem (câmara hiperbárica). A água pressurizada é direcionada para uma turbina hidráulica conectada a um gerador elétrico, produzindo eletricidade. Espera-se capacitar o local para receber os vinte módulos previstos para o projeto, perfazendo 500 kW de potência instalada na usina de Porto do Pecém (BESERRA et al., 2005). Entretanto, devido ao fim do contrato de pesquisa entre a COPPE e a Tractebel Energia, bem como, pela reforma do Porto do Pecém, o projeto encontra-se desativado. Outro projeto em desenvolvimento pela COPPE/UFRJ, em parceria com Furnas e a empresa *Seahorse Wave Energy*, diz respeito a um conversor *offshore*, a ser instalado a 14 km da costa da praia de Copacabana, Rio de Janeiro, o qual possui potência instalada de 100 kW. O conversor consiste de um flutuador vertical de 11 metros de altura e 4,5 metros de diâmetro (Figura 2b), acionado pelo movimento das ondas.



Figura 2 – Dispositivos para conversão de energia das ondas: a) Usina do Porto do Pecém (Fonte: SILVA, 2012).  
b) Conversor *offshore* na praia de Copacabana (Fonte: COPPE/UFRJ, 2013).

O cenário brasileiro para a energia das ondas possui uma boa perspectiva de crescimento. Embora a tecnologia de conversão de energia das ondas esteja em desenvolvimento no país, o setor ainda possui grandes desafios a superar, no que diz respeito a coletas de dados de onda, testes e instalação de estruturas, bem como a disseminação do conhecimento na área e a ampliação da visibilidade desse tipo de tecnologia (VECCHIA, 2016; ZANDOMENEGO, 2016).

A Figura 3 aborda o estado tecnológico das energias oceânicas a nível mundial e as perspectivas para desenvolvimento ao longo dos próximos anos.

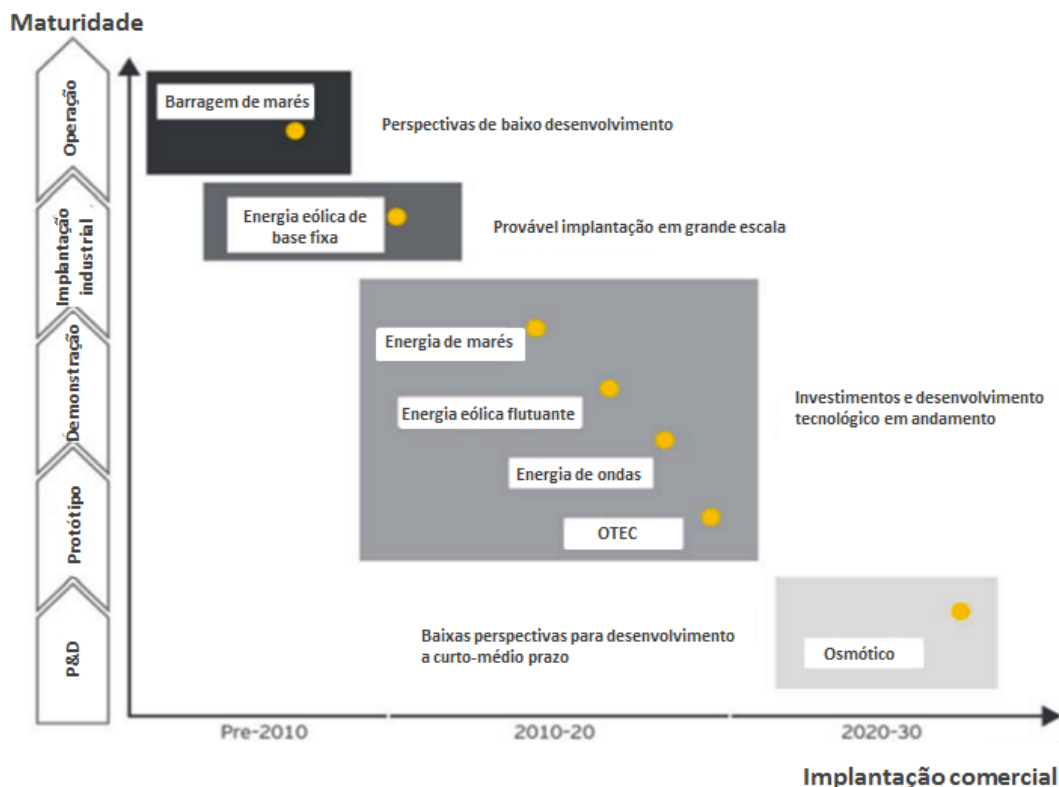


Figura 3 – Estado tecnológico da energia oceânica e perspectivas de desenvolvimento (Fonte: ECORYS, 2013).



Conforme observado na Figura 3, apenas a tecnologia de extração da energia de marés por meio de barragens está em operação no momento, sendo alguns projetos praticados em escala comercial, enquanto as demais tecnologias não atingiram maturação suficiente para serem lançadas no mercado de energias renováveis. A energia das ondas, sobretudo, possui o maior número de sistemas em desenvolvimento e testes, contudo, encontra-se em fase de demonstração e testes de protótipos (ECORYS, 2013).

Vários fatores encorajam o desenvolvimento de tecnologias de energia oceânica, incluindo políticas nacionais que visam a descentralização da geração de energia, a promoção das energias renováveis e a diminuição da necessidade de importação de combustíveis fósseis (ECORYS, 2013). Portanto, o estado tecnológico apresentado para a energia de ondas deve ser encarado como um estímulo para novos estudos no setor, incluindo a investigação da disponibilidade do recurso energético em diferentes locais e profundidades, de modo a encontrar tecnologias que melhor se adaptam as condições de mar local existentes.

O Brasil, através das iniciativas em projetos de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D), conforme citados anteriormente, demonstra interesse em investir em projetos que visam a conversão de energia oceânica em energia elétrica. Além disso, o país possui interesse em acompanhar o desenvolvimento de tecnologias para o setor, ao passo que o litoral brasileiro possui potencial energético de ondas para ser explorado.

## **2.2 Caracterização das ondas oceânicas**

A energia carregada pelas ondas pode ser interpretada como uma forma concentrada da energia solar, uma vez que o aquecimento desigual da superfície terrestre ocasiona zonas de alta e baixa pressão, forçando o ar a se movimentar de uma zona à outra para compensar os desequilíbrios de pressões. O movimento do ar devido a este fenômeno ocorre das zonas de alta pressão para as zonas de baixa pressão, ao nível do solo, e de modo contrário, nas camadas mais altas da atmosfera, de modo que este movimento é conhecido como o vento (ASSIS, 2010).

Por meio da atuação de tensões cisalhantes, o vento transfere sua energia para a superfície do mar, na qual, assume a forma de ondas progressivas, que podem ser transportadas por milhares de quilômetros, com baixa dissipação de energia. A parcela de energia transferida e também a altura das ondas geradas pelo vento são dependentes, além da intensidade deste, de sua duração e da dimensão da zona em que o vento irá atuar. Em cada uma das etapas mencionadas, verifica-se a ocorrência de concentração de energia, de forma

que níveis de potência solar em torno de  $100 \text{ W/m}^2$  podem transformar-se em ondas com níveis de potência da ordem de  $1.000 \text{ W}$  por metro de comprimento de onda. Por esse motivo, a energia das ondas pode ser considerada como uma forma de energia concentrada (AMUNDARAIN et al., 2010; ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013; FONSECA; PESSOA, 2013; OSTRITZ, 2012; THORPE, 1999).

As principais características de uma onda consistem em sua altura  $H$ , sendo a distância vertical entre uma crista e uma cava sucessivas da onda, o comprimento de onda  $L$ , que corresponde a distância horizontal entre duas cristas consecutivas, o período de onda  $T$ , o qual é o intervalo de tempo necessário para que a crista da onda percorra uma distância igual ao comprimento de onda, tem-se ainda, a amplitude representada por “ $a$ ”, que corresponde à distância entre os extremos e o nível médio (metade da altura) e a elevação da superfície em relação ao nível médio do mar, representado por  $\eta$  conforme ilustra a Figura 4 (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

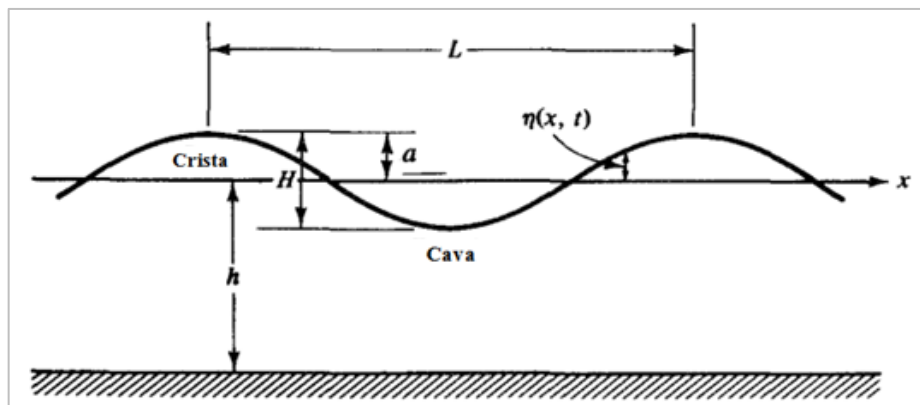


Figura 4 – Características de uma onda senoidal (Fonte: Adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1991).

De acordo com Trujillo e Thurman (2011), as perdas de energia da onda ocorrem, essencialmente, devido ao atrito entre a interação da onda com o assoalho oceânico, quando a profundidade local torna-se menor do que a metade do comprimento da onda, alternando de águas profundas para águas intermediárias, até chegar a águas rasas. Durante esse percurso, a onda perde velocidade e, em razão da conservação de energia, seu comprimento diminui e a sua altura aumenta cada vez mais, tendo como consequência deste processo a variação de potência da onda e a sua posterior quebra em direção à costa (DEAN; DALRYMPLE, 1991). A relação entre a profundidade local ( $h$ ) e o comprimento de onda ( $L$ ) classifica a profundidade relativa das ondas, conforme Figura 5.

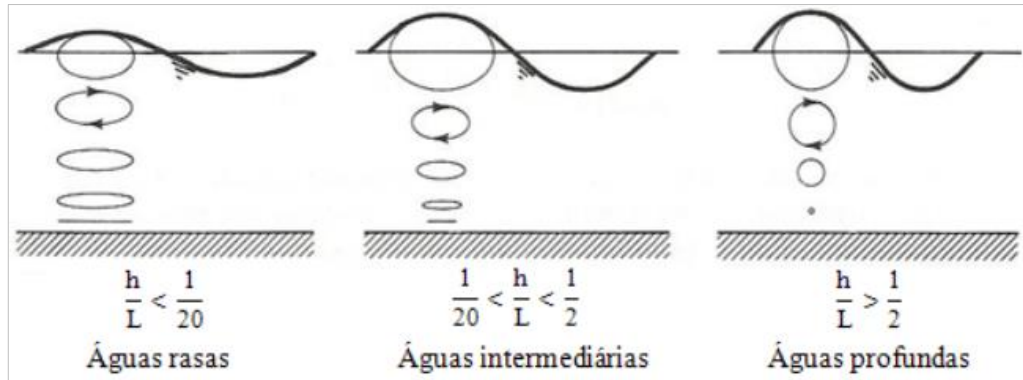


Figura 5 – Trajetórias de partículas de ondas progressivas em diferentes profundidades relativas (Fonte: Adaptado de DEAN; DALRYMPLE, 1991).

Durante a passagem de uma onda, as partículas sofrem forças de deslocamento e de restauração, contendo energia cinética e energia potencial, de acordo com o estágio do movimento. Visto que essencialmente não há transferência significativa de matéria, apenas de energia, as partículas tendem a retomar sua origem após a passagem da onda, deslocando-se em movimento quase circular, quando localizadas em águas profundas, passando a movimento elíptico à medida que se aproximam de águas rasas, tornando-se cada vez mais achatado, conforme observado na Figura 5 (FLEMING, 2012).

### 2.3 Avaliação do potencial energético de ondas oceânicas

A expectativa de converter a energia das ondas oceânicas em energia elétrica, por meio do uso de equipamentos conversores, tem contribuído para o desenvolvimento de estudos do clima de ondas das regiões oceânicas, com o objetivo de determinar o potencial energético disponível neste recurso. Além disso, o estudo de viabilidade da extração da energia das ondas também depende da avaliação do potencial energético, o qual se mostra mais intenso em regiões localizadas em altas latitudes (MELO FILHO, 2012; LISBOA; TEIXEIRA; FORTES, 2017), conforme ilustra a Figura 6, pelas faixas de densidade de potência média anual.

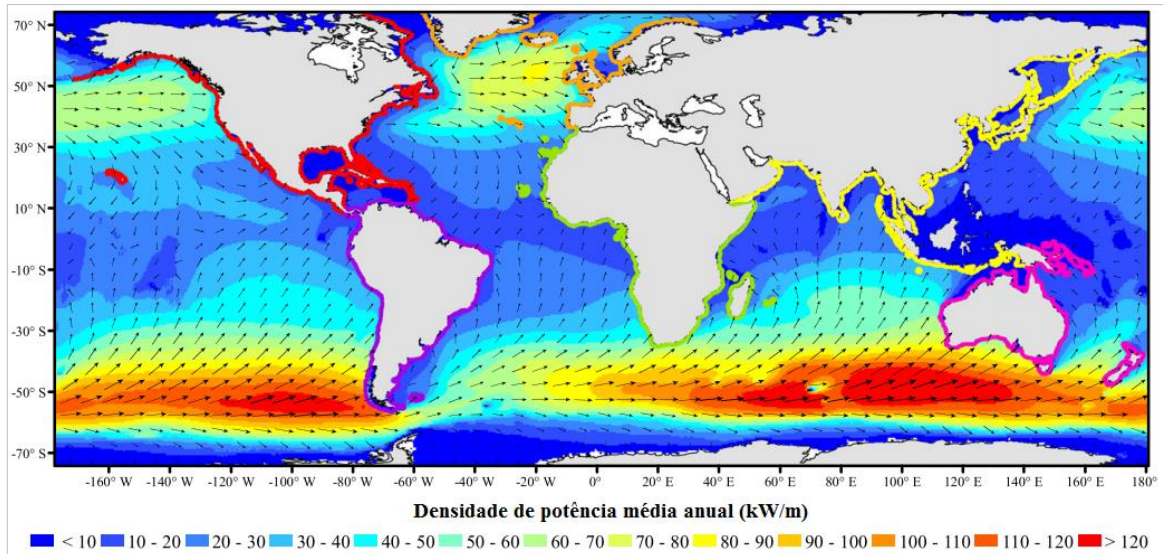


Figura 6 – Densidade de potência média anual (kW/m), apresentada em diferentes tonalidades, e direção média anual, expressa em setas (Fonte: Adaptado de GUNN; STOCK-WILLIAMS, 2012).

São inúmeros os trabalhos desenvolvidos com o objetivo de determinar o potencial energético das ondas oceânicas, em uma série de regiões do globo, incluindo a Europa (IGLESIAS; CARBALLO, 2010; VEIGAS et al. 2015; IGLESIAS et al. 2009; HENRIQUES et al. 2013; MENDES; CALADO; MARIANO, 2012), o Reino Unido (FOLLEY; WHITTAKER, 2009), a China e o Sudeste Asiático (QUIRAPAS et al. 2015; ZHOU; HUANG; ZHANG, 2015; WU; LIU; CHEN, 2015), a África (BERNARDINO; RUSU; SOARES, 2017), os Estados Unidos (DEFNE; HAAS; FRITZ, 2009; GARCÍA-MEDINA; ÖZKAN-HALLER, RUGGIERO, 2014), o Canadá (ROBERTSON; HILES; BUCKHAM, 2014) e o Brasil (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA; 2013; STRAUCH et al. 2009; LISBOA; TEIXEIRA; FORTES, 2017).

O conteúdo energético de uma onda pode ser avaliado em níveis de energia total, a qual se divide em energia potencial e energia cinética, sendo a primeira o resultado do deslocamento da superfície livre da onda e a segunda, o resultado do movimento das partículas da água através do fluido. A energia total é um importante parâmetro, pois indica a forma que as ondas se modificam durante a sua propagação em direção à costa, a energia necessária para a geração de ondas e a disponibilidade de energia que pode ser aproveitada em dispositivos de conversão de energia das ondas (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

De acordo com Dean e Dalrymple (1991), a energia potencial das ondas é resultante do deslocamento de uma massa de sua posição de equilíbrio contra um campo gravitacional. A energia potencial é mínima quando a água está em repouso com elevação uniforme da superfície livre. Porém, o deslocamento de um conjunto de partículas resultantes do

deslocamento da superfície livre requer a realização de trabalho no sistema, ocasionando um aumento de energia potencial. A Equação 1 descreve a energia potencial de uma onda.

$$E_p = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (1)$$

Sendo  $\rho$  a densidade da água do mar equivalente a  $1025 \text{ kg/m}^3$ ,  $g$  a gravidade local correspondente a  $9,81 \text{ m/s}^2$  e  $H$  a altura de onda (m). Carvalho (2010) afirma que a energia cinética é o trabalho realizado por meio da ação de uma força resultante em uma partícula. A energia cinética é igual em magnitude à energia potencial, sendo uma característica de sistemas conservativos em geral (não dissipativos), conforme Equação 2 (SILVA, 2012).

$$E_c = \frac{1}{16} \rho g H^2 \quad (2)$$

A energia total para ondas de gravidade, expressa por unidade de área superficial ( $\text{J/m}^2$ ) é dada pela soma da energia potencial e energia cinética, de acordo com a Equação 3 (SILVA, 2012).

$$E_T = E_p + E_c = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (3)$$

A energia total por onda, por unidade de largura da onda ( $\text{J/m}$ ), é expressa conforme a Equação 4.

$$E_L = \frac{1}{8} \rho g H^2 L \quad (4)$$

Sendo  $L$  o comprimento de onda (m). Ressalta-se que as parcelas de energia potencial e cinética que compõem a energia total, não dependem da profundidade ou do comprimento de onda, sendo proporcionais apenas ao quadrado da altura de onda (OSTRITZ, 2012).

As ondas transportam energia pelo oceano e apenas transportam massa quando propagam-se próximo à costa, devido a interação que ocorre entre as ondas e o fundo oceânico. O fluxo médio de energia ou potência ( $P$ ) pode ser definido como a taxa temporal de energia transferida pelas ondas por unidade de comprimento de crista, através de um plano vertical perpendicular a direção de propagação da onda (ASSIS, 2010; CARVALHO, 2010).

Segundo Silva (2012), o fluxo médio de energia pode ser obtido por meio da velocidade de grupo  $C_g$  e da densidade de energia total, conforme Equação 5.

$$P = E_T C_g = \frac{1}{8} \rho g H^2 C_g \quad (5)$$

A velocidade de grupo, representada por  $C_g$  (Equação 6), consiste na rapidez com que um grupo de ondas se desloca, sendo que este parâmetro, geralmente não é igual à velocidade com a que uma onda viaja dentro do grupo (OSTRITZ, 2012; DEAN; DALRYMPLE, 1991).

$$C_g = \frac{c}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (6)$$

Sendo  $C$  a celeridade da onda,  $k$  o número de onda e  $h$  a profundidade local. Resolvendo a Equação 6, a velocidade de grupo  $C_g$ , para águas profundas, é definida pela Equação 7, conforme segue.

$$C_g = \frac{gT}{4\pi} \quad (7)$$

Por meio da utilização da teoria linear de onda (o que é em geral justificado enquanto a onda não quebra) e considerando a onda em águas profundas, obtêm-se a equação para o fluxo médio de energia de uma onda senoidal, a qual é função da altura e do período das ondas, conforme Equação 8.

$$P[W/m] = \frac{1}{32\pi} \rho g^2 H^2 T \quad (8)$$

A descrição das ondas realizadas acima se refere a ondas monocromáticas, as quais podem ser entendidas como ondas lineares, periódicas (período  $T$ ), planas e progressivas (MELO FILHO, 2012). Porém, o estado de mar real geralmente é modelado como um processo aleatório, resultante da superposição de várias componentes monocromáticas. Neste modelo aleatório, as características da onda, tais como período, altura e direção, são consideradas como variáveis aleatórias, ou seja, não determinísticas (BESERRA, 2007).

Admite-se que as propriedades estatísticas das ondas permanecem constantes para cada estado de mar (com duração de cerca de três a quatro horas). Os parâmetros estatísticos que caracterizam os estados de mar e que serão utilizados para efetuar o levantamento da

potência de ondas disponível em cada região do oceano são a altura de onda significativa  $H_s$  e o período médio de energia  $T_e$  (BESERRA, 2007).

A altura significativa pode ser entendida como a média das alturas do terço superior das ondas individuais, ordenadas da menor até a maior, durante o período de observação, sendo, em termos de energia, a melhor representação de uma onda irregular (MELO FILHO, 2012). É usada quando se faz necessário apenas o valor de altura de onda, como é o caso da aplicação da equação de conservação de energia para estudo das transformações da onda.

O período médio de energia é o período das oscilações de potências dominantes, interpretado fisicamente como o período de uma única onda senoidal com a mesma energia do estado de mar, e é dado pelo pico no espectro de potência (MELO FILHO, 2012; ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013; D'AQUINO, 2004). Deste modo, para o estado de mar real, a Equação 8 passa a ser calculada com base em seus parâmetros estatísticos e expressa em termos de potência por unidade de comprimento de crista de onda (W/m), conforme a Equação 9, para águas profundas (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013).

$$P[W/m] = \frac{1}{64\pi} \rho g^2 H_s^2 T_e \quad (9)$$

## 2.4 Transformação das ondas com a profundidade

As ondas superficiais de gravidade, ao se propagarem em águas rasas, sofrem influência da configuração da batimetria, das correntes e do vento. Em regiões costeiras as características não lineares das ondas se tornam mais importantes, induzindo padrões mais complexos e com maior variabilidade temporal e espacial, em comparação com sua evolução em águas profundas (VIOLANTE-CARVALHO et al., 2010). Devido às modificações relatadas que as ondas sofrem ao se aproximarem da costa, torna-se interessante uma investigação mais detalhada acerca do seu potencial energético em águas rasas e intermediárias, visto que a determinação da disponibilidade de energia contida nas ondas é importante para verificar a viabilidade do aproveitamento desta energia por dispositivos conversores (ZANDOMENEGO; SCHMIDT; D'AQUINO, 2015).

Do ponto de vista da engenharia, torna-se mais viável instalar dispositivos conversores de energia das ondas em águas rasas, pois apesar da perda de energia (5 a 10%) decorrente da aproximação das ondas à costa (principalmente devido ao atrito com o fundo oceânico), o

custo de instalação e manutenção destes dispositivos torna-se menor enquanto há uma maior resistência às grandes ondulações por parte desses dispositivos (OSTRITZ, 2012).

Quando uma onda se aproxima da linha de costa, de acordo com a diminuição da profundidade, parte da onda move-se antes do que o restante, ocasionando uma desaceleração, e, por consequência, resultando na mudança de direção e altura da onda. Esse fenômeno é conhecido por refração, sendo responsável pela rotação das cristas de onda que tendem a se propagarem perpendicularmente à costa e paralelamente aos contornos batimétricos (DEAN; DALRYMPLE, 1991; HENRIQUES et al., 2013). As mudanças nos parâmetros de onda impostas pelas variações de profundidade, podem ser introduzidas pela Lei de Snell, a qual relaciona a mudança de direção de uma onda com a mudança na celeridade da onda, conforme Equação 10.

$$\frac{\sin \theta}{C} = \frac{\sin \theta_0}{C_0} \quad (10)$$

Sendo  $\theta$  definido como o ângulo entre a crista da onda e a linha de contorno batimétrico e  $C$  é definida como a velocidade de uma onda individual para uma dada profundidade, sendo que o índice “0” indica parâmetros na profundidade em que o dispositivo conversor for instalado, ou ainda, a profundidade em que se deseja obter tais parâmetros, enquanto que demais variáveis indicam parâmetros na profundidade de referência (profundidade de coleta dos dados), que para este trabalho corresponde a 17 metros.

Para determinar a altura de onda no local de instalação de um dispositivo conversor, deve-se calcular primeiramente o comprimento de onda, para a profundidade em que os dados de onda foram coletados, conforme Equação 11.

$$L = T \sqrt{\left(\frac{g}{k}\right) \tanh(kh)} \quad (11)$$

Onde  $L$  é o comprimento de onda na profundidade de 17 metros,  $k = 2\pi/L$  é o número de onda e  $h$  é a profundidade do local. De posse dos valores de altura e comprimento de onda na profundidade de coleta dos dados, é possível determinar, por meio da Equação 12, o coeficiente de *shoaling* ( $K_s$ ), o ângulo  $\theta$  em diferentes profundidades pela Equação 13 e o coeficiente de refração ( $K_r$ ) pela Equação 14, conforme abaixo.



$$K_s = \sqrt{\frac{1}{2} \frac{1}{N} \frac{1}{\tanh kh}} \quad (12)$$

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta} = \tanh \frac{2\pi h}{L} \quad (13)$$

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \theta}{\cos \theta_0}} \quad (14)$$

O parâmetro  $N$  foi obtido de tabela consultada em Kamphuis (2010, p. 35). O coeficiente de *shoaling* indica que, à medida que uma onda se aproxima da costa, sua altura cresce tendendo ao infinito. Contudo, esse fato não é verdadeiro, pois existe um limite físico, delimitado pela profundidade, em que a onda quebra e dissipa energia, reagindo contra a fricção junto ao fundo oceânico que está submetida. Salienta-se que o período de onda não é modificado durante as transformações que ocorrem à medida que as ondas se aproximam da costa, isto é, o período de onda é um parâmetro constante durante esse processo (DEAN; DALRYMPLE, 1991; KAMPHUIS, 2010).

Finalmente, a altura de onda na profundidade desejada, considerando os efeitos de refração e *shoaling*, pode ser calculada pela Equação 15.

$$H_0 = HK_s K_r \quad (15)$$

A mudança de direção imposta às ondas pelo processo de refração é muito pequena, podendo ser desprezada para efeitos de cálculo da altura de onda. Conforme observado por Carballo et al. (2014b), o desempenho de dispositivos conversores é uma função dependente da altura significativa e do período médio de onda, assumindo que o desempenho não é influenciado pela direção da onda.

Em águas intermediárias e rasas, a velocidade de grupo tende a variar com a profundidade. Em águas rasas, todos os componentes de onda viajam com mesma velocidade de grupo, visto que, nessa região, a velocidade de grupo é função apenas da profundidade. Vale ressaltar que o grupo de ondas também é formado em águas intermediárias e rasas, porém nessas regiões as ondas se propagam com a mesma velocidade do grupo. O estudo da velocidade de grupo é importante, pois é com essa velocidade que a energia de onda é propagada (OSTRITZ, 2012).

Conforme a Equação 5, a potência das ondas é obtida pela multiplicação da energia total pela velocidade de grupo. Assim, resolvendo a Equação 6, para a velocidade de grupo em águas intermediárias e rasas, encontra-se o cálculo do fluxo médio de energia (potência) para águas intermediárias (Equação 16) e para águas rasas (Equação 17) (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

$$P[W/m] = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh \frac{2\pi h}{L}} \quad (16)$$

$$P[W/m] = \frac{1}{8} \rho g H^2 \sqrt{gh} \quad (17)$$

Verifica-se nas Equações 9, 16 e 17, as quais se referem ao fluxo médio de energia em águas profundas, intermediárias e rasas, respectivamente, que a altura de onda exerce grande influência no potencial energética das mesmas, visto que este parâmetro encontra-se elevado ao quadrado. Portanto, pequenas variações na altura da onda podem impor variações significativas em seu potencial energético (SILVA, 2012).

## 2.5 Dispositivos conversores de energia das ondas

A energia contida nas ondas pode ser aproveitada por meio de dispositivos conversores, os quais são desenvolvidos visando a conversão da energia transportada pelas ondas oceânicas em energia elétrica. Atualmente, são diversos os estudos realizados com o objetivo de melhorar a eficiência de conversão dos dispositivos conversores e aprimorar as tecnologias já existentes, buscando torná-los viáveis para a utilização em maior escala. Dentre os estudos relacionados com dispositivos conversores, pode-se citar Carballo et al. (2015), Vecchia (2016), Gomes et al. (2009), Marjani et al. (2008), Dizadji e Sajadian (2011), Rusu e Onea (2017) e Zancanella (2016).

Os dispositivos conversores podem ser classificados no que diz respeito à distância do local em que estão instalados à linha de costa. Essa classificação não se dá pela distância à costa efetivamente, mas sim pelas diferentes profundidades que existem no local de instalação, uma vez que a onda perde energia ao se aproximar da costa devido aos efeitos de atrito com o fundo oceânico. As classes englobam os dispositivos costeiros (*onshore*), os dispositivos próximos à costa (*nearshore*) e aqueles afastados da costa (*offshore*), e estão atreladas ao nível energético da onda e a facilidade de instalação/manutenção dos

dispositivos, bem como da transmissão da energia elétrica gerada (PAREDES, 2008; VECCHIA, 2016).

Os dispositivos costeiros são aqueles fixos ou incorporados na costa marítima e sua principal vantagem é a fácil manutenção e instalação, uma vez que, na maioria dos casos, a sua localização é acessível. Além disso, essa classe de dispositivos não necessita de sistemas de amarração e longo cabeamento para conexão da energia gerada à rede. Todavia, estes dispositivos estão inseridos em uma zona que recebe a influência das ondas de menor velocidade e comprimento, porém, de maior altura (LÓPEZ et al., 2013; PAREDES, 2008).

Os dispositivos próximos à costa consistem em estruturas instaladas a algumas centenas de metros da costa em profundidades moderadas, entre 10 a 25 metros, incluindo os dispositivos instalados em estruturas artificiais, tais como plataformas, quebra-mares, molhes, entre outros. Normalmente estes dispositivos estão fixos ao fundo do mar. Entretanto, em outros casos, também podem consistir em estruturas flutuantes. Os efeitos dissipativos de energia ocasionados pela arrebentação das ondas devem ser considerados para se obter uma estimativa mais precisa do recurso energético nos locais *nearshore* (ANDRÉ, 2010; LÓPEZ et al., 2013; PAREDES, 2008).

Os dispositivos afastados da costa estão instalados em profundidades superiores aos 40 metros e consistem em dispositivos flutuantes ou estruturas submersas amarradas ao fundo do mar. Como as profundidades envolvidas são superiores, a energia transportada pelas ondas nestes locais é maior. Contudo, por estarem localizados em mar aberto, a confiabilidade e conservação do sistema se tornam um problema, uma vez que essa estrutura deve suportar cargas muito elevadas sem sofrer danos. O sistema de cabeamento para a transmissão da energia gerada é mais complexo, bem como o acesso para instalação e manutenção dos dispositivos, tornando-se um processo oneroso (ANDRÉ, 2010; LÓPEZ et al., 2013; PAREDES, 2008; VECCHIA, 2016). A Figura 7 ilustra a classificação dos dispositivos conversores quanto à sua localização.

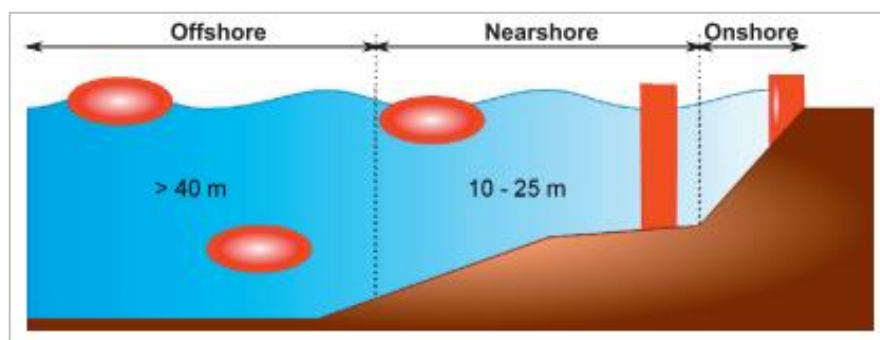


Figura 7 – Classificação de conversores quanto à distância em relação à costa (Fonte: LÓPEZ et al., 2013).

Além da classificação quanto a localização dos dispositivos, também pode-se classificá-los de acordo com o seu princípio de funcionamento. Essa classificação ocorre devido à diversidade encontrada nos dispositivos conversores atualmente. Contudo, existem divergências entre autores, quanto às subclasses e classificação de dispositivos específicos. De modo geral, são consideradas três concepções quanto ao princípio de funcionamento, que compreendem a coluna de água oscilante, os corpos oscilantes de absorção pontual ou progressivos e os dispositivos de galgamento (ANDRÉ, 2010).

A coluna de água oscilante (CAO) consiste em uma estrutura parcialmente submersa, que pode ser instalada tanto fixa como flutuante, estando na costa ou mesmo longe dela (PAREDES, 2008). Basicamente, seu princípio de operação se dá pela compressão e descompressão do ar presente dentro da estrutura. O dispositivo possui abertura em sua parte inferior, na qual, quando a onda incide no dispositivo, o ar é forçado a passar por uma turbina devido ao aumento de pressão na câmara de ar. Quando a onda retorna ao mar, o ar novamente passa pela turbina, porém, perfazendo o sentido inverso de rotação, devido à queda de pressão na câmara de ar.

As turbinas mais utilizadas no caso da CAO são as turbinas do tipo *Wells*, que possuem como principal característica, a capacidade de manter o sentido de rotação, independente do sentido de escoamento do ar. Como exemplo dessa tecnologia, têm-se a central piloto (400 kW) europeia na Ilha de Pico, Açores, e a central LIMPET (500 kW), localizada na Ilha de Islay, Escócia (PAREDES, 2008; SILVA, 2012; VECCHIA, 2016).

Os dispositivos de corpos oscilantes de absorção pontual ou progressivos possuem princípio de funcionamento de acordo com as oscilações dos corpos flutuantes, provocadas pelo movimento das ondas do mar nestes dispositivos. A oscilação dos corpos é responsável por acionar um sistema hidráulico que faz a conversão da energia das ondas em energia elétrica. Quanto ao modo em que se movimentam, os corpos oscilantes de absorção pontual são caracterizados por moverem-se verticalmente ou em torno de um eixo. Os corpos oscilantes de absorção progressiva, por possuírem flutuadores que se movem sobre sua própria estrutura (LÓPEZ et al., 2013).

Os dispositivos de galgamento são caracterizados por converter a energia potencial gravitacional das ondas em energia elétrica, por meio do encaminhamento das ondas incidentes para uma rampa que recolhe as ondas a um reservatório elevado acima do nível do mar. Uma vez recolhidas no reservatório, as ondas, ao retornarem ao mar, passam por uma turbina que produz eletricidade. Esses dispositivos podem estar fixados ou flutuantes, além de permitirem a instalação na costa, próximo à costa ou afastados da mesma. Como exemplo,

pode-se citar o projeto piloto (150 kW) baseado no conversor de energia das ondas SSG (*Sea Slot-cone Generator*), na Ilha de Kvitsoy, na Noruega (ANDRÉ, 2010; PAREDES, 2008; LÓPEZ et al., 2013; MARGHERITINI; VICINANZA; FRIGAARD, 2009).

A Figura 8 mostra os dispositivos SSG, *Oyster*, *Arquimedes Wave Swing* (AWS), *Pelamis* e *Wave Dragon*, respectivamente.

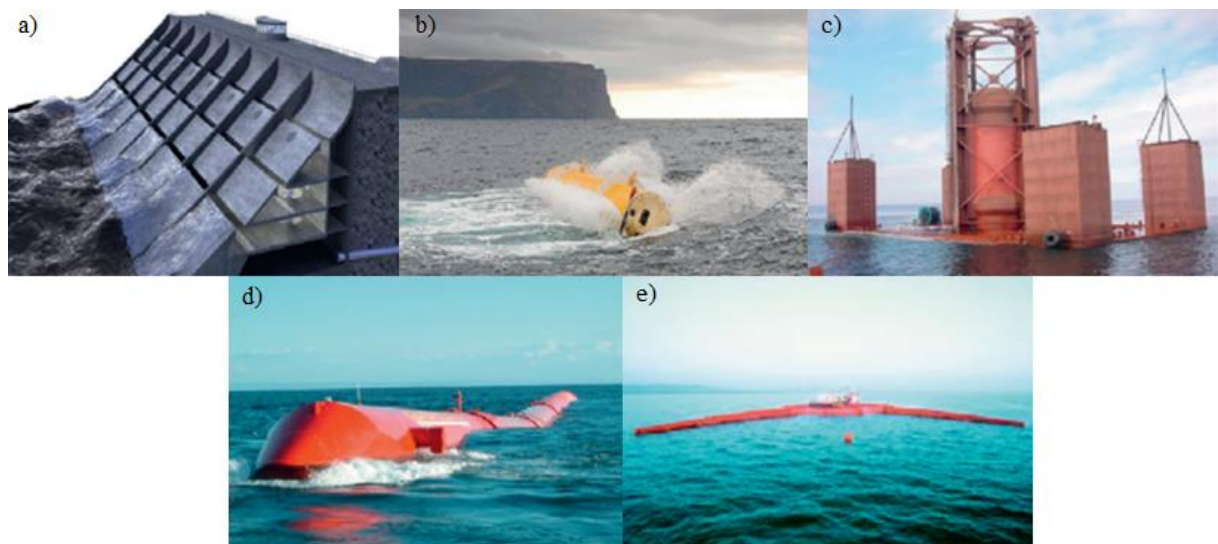


Figura 8 – Dispositivos conversores de energia das ondas: a) SSG; b) *Oyster*; c) *Arquimedes Wave Swing*; d) *Pelamis*; e) *Wave Dragon* (Fonte: LÓPEZ et al., 2013).

O conversor SSG é classificado quanto a sua profundidade de instalação como um dispositivo *onshore* e possui princípio de funcionamento de galgamento (SILVA; RUSU; SOARES, 2013). O conversor *Oyster* é classificado como dispositivo *nearshore*, o qual opera em profundidades de cerca de 20 m e possui princípio de funcionamento de corpos oscilantes (SILVA; RUSU; SOARES, 2013). O conversor AWS é considerado um dispositivo *offshore*, normalmente instalado em profundidades entre 40 m a 80 m. O sistema é composto por uma parte oscilante, a qual é movida verticalmente devido à diferença de pressão ocasionada pela passagem da onda (ZANCANELLA, 2016). O conversor *Pelamis* possui princípio de funcionamento baseado nos corpos oscilantes e é considerado um dispositivo para instalação *offshore* (SILVA; RUSU; SOARES, 2013). O dispositivo *Wave Dragon* é considerado um conversor *offshore*, o qual normalmente opera em águas profundas (25 m a 40 m) e possui como princípio de funcionamento o galgamento (SILVA; RUSU; SOARES, 2013).

Salienta-se que as tecnologias apresentadas consistem em alguns exemplos das muitas tecnologias existentes e em desenvolvimento no mundo, para a conversão da energia das ondas. No momento, as tecnologias mencionadas não se encontram em um estado consolidado (maturação tecnológica), necessitando de maiores testes e pesquisas para serem

utilizadas em grande escala (SILVA, 2012). O principal impasse para a utilização de dispositivos conversores em larga escala é torna-los viáveis e competitivos com as demais tecnologias atuais de energias renováveis, que configuram em fase mais avançada de desenvolvimento tecnológico. Além disso, por se tratar de dispositivos expostos diretamente ao ambiente marinho, os mesmos estão sujeitos aos fatores físicos, tais como, a ação da salinidade e de agentes meteorológicos extremos. O desafio é promover inovação, aperfeiçoar os estudos e tecnologias conversoras, para que, de fato, se possa aproveitar o potencial energético inexplorado disponível nos oceanos como uma fonte de energia renovável.

### 3 METODOLOGIA

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho são descritos nas subseções que seguem, justificando a utilização dos dados de onda e relatando as principais análises realizadas.

#### 3.1 Dados de onda

Os dados de onda utilizados no presente trabalho são oriundos da região costeira de Tramandaí (RS). Os mesmos foram coletados na profundidade de 17 metros, por meio de um ondógrafo direcional *waverider* da *Datawell*, fundeado em novembro de 2006 na praia de Tramandaí (Figura 9).

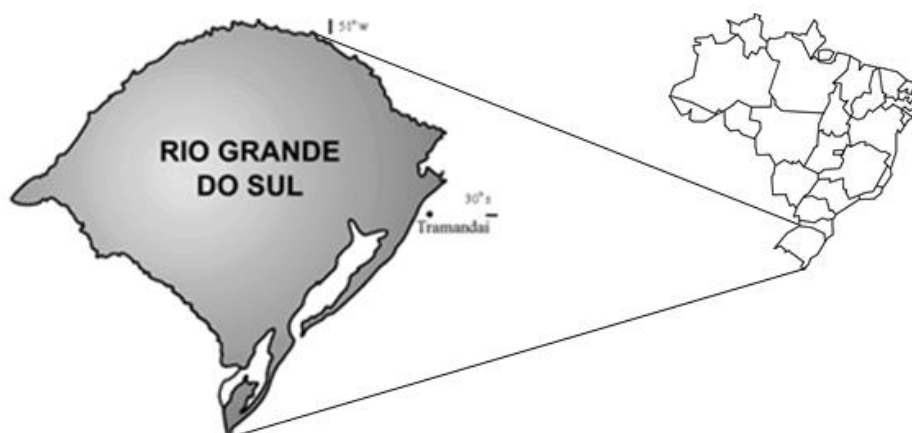


Figura 9 – Localização do fundeio do ondógrafo direcional no litoral do RS, praia de Tramandaí (Fonte: Adaptado de STRAUCH et al., 2009).

A série de dados obtida consiste em registros coletados a partir de novembro de 2006 até setembro de 2007. O fundeio do ondógrafo direcional foi realizado por meio de uma

parceria entre a PETROBRÁS/TRANSPETRO e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, com a finalidade de se obter uma série longa e contínua de dados de onda para a região de Tramandaí, a fim de caracterizar o litoral norte do Rio Grande do Sul (STRAUCH et al., 2009). O ondógrafo direcional consiste em uma boia esférica que capta medidas da altura, do período e da direção das ondas. As medidas de direção se baseiam no princípio de translação, sendo medidas as médias dos deslocamentos horizontais, as quais o ondógrafo está submetido durante a passagem do trem de ondas (COLI, 2000; D'AQUINO, 2004).

São poucos os trabalhos de monitoramento do clima de ondas executados utilizando ondógrafos, pois o equipamento possui alto custo, tanto de aquisição e manutenção, como para o fundeio, além de oferecer grande risco de acidentes, ressaltando o rompimento de sua amarração ao fundo do oceano. Outro problema periódico é a falha de transmissão dos dados do ondógrafo ao receptor em terra, normalmente quando instalado a distâncias muito longas, com transmissão realizada por ondas de rádio (STRAUCH et al., 2009). Essas falhas ocasionam séries com registros descontínuos, dificultando a análise dos dados e conferindo uma estimativa não tão confiável para o clima de ondas da região monitorada.

### **3.2 Análise estatística de dados de onda**

A primeira etapa para a avaliação do clima de ondas em um determinado local é a definição do padrão das ondas, o qual corresponde ao padrão estatístico dos parâmetros descritivos da onda, tais como a altura, período, direção de propagação e energia (CARBALLO; IGLESIAS, 2012; STRAUCH et al., 2009).

Uma análise inicial dos referidos dados foi realizada por Zandomenego, Schmidt e D'Aquino (2015), com o objetivo de estimar o potencial energético no litoral de Balneário Arroio do Silva (SC). Foi considerado que Balneário Arroio do Silva e Tramandaí possuem linha de costa retilínea, associadas a planícies costeiras extensas e arenosas de baixa altitude, de modo que os dois locais estão condicionados às mesmas forçantes oceanográficas, sendo assim, desprezível a diferença entre seus padrões de clima de ondas durante o ano (TESSLER; GOYA, 2005).

Devido às poucas regiões que possuem dados de onda coletados e registrados, optou-se por estudar o clima de ondas da região de Tramandaí pela disponibilidade de dados de onda e pela existência de uma estrutura física na costa (plataforma marítima), a qual poderia comportar dispositivos conversores de onda (Figura 10).



Figura 10 – Plataforma marítima de Tramandaí (Fonte: PLATAFORMA DE TRAMANDAÍ, 2017).

A análise estatística inicial foi executada nos dados de onda coletados a 17 metros de profundidade, para verificar, de forma geral, o padrão e a distribuição dos dados coletados, em termos de altura significativa, período médio de energia e direção das ondas.

De posse dos parâmetros estatísticos de onda, foi possível calcular a potência e energia total das ondas, a fim de explorar a diferença de disponibilidade energética das diferentes estações do ano, bem como para a série completa de dados.

### 3.3 Análise do potencial energético em diferentes profundidades

Para realizar uma análise simplificada sobre a mudança dos parâmetros de ondas de acordo com a profundidade, isto é, as modificações que ocorrem na onda devido a sua aproximação da costa, foram considerados os efeitos dos coeficientes de refração ( $K_r$ ) e *shoaling* ( $K_s$ ). Os cálculos realizados consistiram em extrapolar os dados para profundidades partindo dos 17 m até os 4 m, considerando o intervalo de um metro. A modificação dos parâmetros de onda foi realizada apenas até a profundidade de 4 m devido ao fato de que a extremidade da plataforma de pesca que adentra o mar está situada em profundidade semelhante. A partir desses cálculos, foram obtidos os parâmetros altura significativa e comprimento de onda, para cada profundidade entre 17 m e 4 m de coluna de água.

Salienta-se que, ao aplicar as equações para extrapolação de parâmetros, alguns dados com comprimento de onda de valor muito pequeno apresentaram uma solução inválida, impossibilitando a resolução. Assim, optou-se pela exclusão desses dados (cerca de 10,17%), para possibilitar a resolução da equação do coeficiente de refração das ondas, e obter confiabilidade nos resultados reportados pelos cálculos. Para classificar as ondas quanto à profundidade relativa, foram utilizadas as relações  $L/2 < h$  (águas profundas),  $L/2 > h$  (águas intermediárias) e  $L/20 > h$  (águas rasas), sendo  $L$  o comprimento de onda e  $h$  a profundidade



da coluna de água local (DEAN; DALRYMPLE, 1991). Assim, foi determinado que, para o valor de  $L$  médio encontrado na profundidade de 17 m, pode-se classificar a profundidade de coleta de dados como sendo em águas intermediárias. A partir dos 17 m até os 4 m, também verificou-se que as profundidades são caracterizadas por estarem em águas intermediárias, sendo a profundidade de 4 m o limite para o início das águas rasas. Com isso, foi possível selecionar a equação que corresponde ao cálculo da potência de ondas (Equação 16). Uma vez calculadas a potência e a energia total contida nas ondas para cada profundidade, pode-se realizar a investigação da modificação do potencial energético disponível nas ondas, de acordo com as diferentes profundidades em que a onda percorre, em seu trajeto em direção à costa.

Os principais parâmetros estatísticos de onda empregados na investigação da mudança com a profundidade foram a altura significativa ( $H_s$ ) e o comprimento de onda ( $L$ ), os quais foram extrapolados para cada profundidade estudada. Cabe ressaltar que o período médio de energia ( $T_e$ ) consiste em um parâmetro constante à medida que as ondas se propagam em águas intermediárias e rasas. Este parâmetro não é influenciado pelos efeitos da diminuição de profundidade e também, o mesmo não promove influência na modificação do valor da potência das ondas, conforme visto nas Equações 16 e 17.

### **3.4 Estimativa de extração de potência das ondas por dispositivos conversores**

Para estimar a potência de ondas extraída por um dispositivo conversor foram utilizadas as matrizes de potência dos dispositivos, obtidas a partir da literatura. As matrizes de potência para cada um dos dispositivos foram elaboradas por meio de modelos numéricos, que consistem, essencialmente, em integrar a equação do movimento no domínio do tempo (BABARIT et al., 2012).

Cada dispositivo conversor possui a sua matriz de potência, em que se têm como parâmetros de entrada a altura significativa e o período médio de energia das ondas. A relação entre ambos os parâmetros fornece uma estimativa da potência (kW) gerada por um conversor para um dado estado oceânico. Pode-se caracterizar um estado oceânico de acordo com a altura significativa e o período médio de energia. Entretanto, alguns conversores fornecem a potência gerada em termos do período de pico ( $T_p$ ) ao invés do período médio de energia (ZANCANELLA, 2016).

Uma vez que a grande maioria dos dispositivos conversores não adquiriu maturação tecnológica suficiente e se encontram em fase de testes, as matrizes de potência consistem em

uma alternativa bastante utilizada em diversos trabalhos e construídas por alguns autores (BABARIT et al., 2012; CARBALLO et al., 2014a; ZANCANELLA, 20016; SILVA; RUSU; SOARES, 2013; VEIGAS et al., 2015), a fim de estimar a potência absorvida e a energia gerada por conversores para diferentes estados de mar. As matrizes de potência permitem a análise de resultados de forma rápida e simplificada, sendo empregadas quando demais parâmetros dos conversores não estão disponíveis e quando a modelagem numérica seria a única solução disponível.

Buscou-se analisar quais os dispositivos mais adequados para utilização na região de estudo, de acordo com o estado oceânico predominante. Os dispositivos conversores analisados foram classificados de acordo com o seu local de instalação em *onshore*, *nearshore* e *offshore*, e de acordo com seu princípio de funcionamento, em dispositivos de corpo oscilante e dispositivos de galgamento.

Para a análise dos dispositivos conversores, foram cruzadas as informações entre o diagrama de ocorrência conjunta da altura significativa e período médio de energia e as matrizes de potência absorvida por cada dispositivo conversor estudado.

A seguir, são apresentadas as matrizes de potência dos conversores analisados. A Figura 11 apresenta a matriz de potência do dispositivo conversor de energia das ondas SSG (*Seawave Slot-Cone Generator*), classificado como um dispositivo *onshore*.

		$T_e$ [s]													
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5
Hs [m]	0,50	99	109	119	129	139	149	159	169	179	189	198	208	218	228
	1,00	397	437	476	516	556	595	635	675	715	754	794	833	873	913
	1,50	893	982	1.072	1.161	1.250	1.340	1.429	1.518	1.608	1.697	1.786	1.875	1.965	2.054
	2,00	1.588	1.746	1.905	2.064	2.223	2.381	2.540	2.699	2.858	3.016	3.175	3.334	3.493	3.651
	2,50	2.481	2.729	2.977	3.225	3.473	3.721	3.969	4.217	4.465	4.713	4.961	5.209	5.457	5.705
	3,00	3.572	3.929	4.287	4.644	5.001	5.358	5.715	6.073	6.430	6.787	7.144	7.501	7.859	8.216
	3,50	4.862	5.348	5.834	6.321	6.807	7.293	7.779	8.265	8.751	9.238	9.724	10.210	10.695	11.183
	4,00	6.350	6.985	7.620	8.256	8.891	9.526	10.161	10.796	11.431	12.066	12.701	13.336	13.971	14.606
	4,50	8.037	8.841	9.645	10.448	11.252	12.056	12.860	13.663	14.467	15.271	16.074	16.878	17.682	18.486
	5,00	9.923	10.915	11.907	12.899	13.892	14.884	15.876	16.868	17.860	18.853	19.845	20.000	20.000	20.000
	5,50	12.006	13.207	14.407	15.608	16.809	18.009	19.219	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	6,00	14.288	15.717	17.146	18.575	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	6,50	16.769	18.446	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	7,00	19.448	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	7,50	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000
	8,00	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000	20.000

Figura 11 – Matriz de potência (kW) para o conversor de energia das ondas SSG (Fonte: adaptado de SILVA; RUSU; SOARES, 2013).

A Figura 12 mostra a matriz de potência do dispositivo conversor de energia das ondas *Oyster*, classificado como um dispositivo *nearshore*.

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

Figura 12 – Matriz de potência (kW) para o conversor de energia das ondas *Oyster* (Fonte: adaptado de SILVA; RUSU; SOARES, 2013).

As matrizes de potência dos dispositivos conversores apresentadas na Figura 13, Figura 14 e Figura 15 são indicados para águas profundas (*offshore*), entretanto, os mesmos foram analisados a fim de verificar a sua funcionalidade para as condições de mar em águas intermediárias. A Figura 13 apresenta a matriz de potência do dispositivo conversor de energia das ondas *Pelamis*.

		T <sub>e</sub> [s]																
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
H <sub>s</sub> [m]	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1,00	0	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	0	0	0
	1,50	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33
	2,00	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59
	2,50	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92
	3,00	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132
	3,50	0	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180
	4,00	0	0	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213
	4,50	0	0	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266
	5,00	0	0	0	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328
	5,50	0	0	0	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355
	6,00	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415
	6,50	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481
	7,00	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7,50	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8,00	0	0	0	0	0	0	0	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Figura 13 – Matriz de potência (kW) para o conversor de energia das ondas *Pelamis* (Fonte: adaptado de SILVA; RUSU; SOARES, 2013).

A Figura 14 mostra a matriz de potência do dispositivo conversor de energia das ondas AWS (*Arquimedes Wave Swing*).

		T <sub>e</sub> [s]																
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0
H <sub>s</sub> [m]	1,00	2	7	13	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105	118	131	144	153
	1,50	4	15	28	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226	248	266	285	309
	2,00	8	26	49	73	100	127	150	172	210	247	292	337	366	395	418	442	482
	2,50	15	43	78	113	159	205	234	263	320	376	438	499	531	563	603	643	675
	3,00	25	61	111	161	227	293	339	386	453	521	600	680	722	765	827	888	897
	3,50	35	92	155	218	305	391	454	517	605	694	772	851	913	975	1.036	1.096	1.119
	4,00	35	114	194	273	380	486	572	659	776	894	961	1.027	1.103	1.179	1.227	1.275	1.316
	4,50	0	0	235	332	479	626	722	819	957	1.096	1.168	1.240	1.320	1.401	1.449	1.497	1.547
	5,00	0	0	280	400	592	784	899	1.014	1.144	1.274	1.380	1.487	1.569	1.651	1.691	1.731	1.785
	5,50	0	0	320	432	641	849	1.033	1.216	1.331	1.446	1.568	1.690	1.778	1.867	1.919	1.970	1.977
	6,00	0	0	0	0	680	944	1.155	1.367	1.495	1.623	1.759	1.895	1.963	2.072	2.137	2.202	2.205
	6,50	0	0	0	0	720	1.123	1.335	1.547	1.678	1.809	1.963	2.116	2.200	2.284	2.380	2.380	2.425

Figura 14 – Matriz de potência (kW) para o conversor de energia das ondas AWS (Fonte: adaptado de VEIGAS et al., 2015).

A Figura 15 apresenta a matriz de potência do dispositivo conversor de energia das ondas *Wave Dragon*.

		T <sub>e</sub> [s]														
		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0
H <sub>s</sub> [m]	1,00	203	276	348	432	516	608	699	798	896	925	953	958	962	941	919
	1,50	412	448	485	617	750	899	1.049	1.212	1.375	1.433	1.491	1.509	1.527	1.502	1.477
	2,00	621	621	621	802	983	1.191	1.398	1.626	1.853	1.941	2.029	2.061	2.092	2.063	2.034
	2,50	1.123	1.123	1.123	1.213	1.304	1.609	1.914	2.258	2.602	2.752	2.903	2.972	3.041	3.017	2.993
	3,00	1.624	1.624	1.624	1.624	1.624	2.027	2.430	2.890	3.350	3.563	3.776	3.883	3.989	3.970	3.951
	3,50	2.581	2.581	2.581	2.581	2.581	2.783	2.984	3.588	4.191	4.494	4.796	4.870	4.945	4.935	4.926
	4,00	3.538	3.538	3.538	3.538	2.538	3.538	3.538	4.285	5.032	5.424	5.816	5.858	5.900	5.900	5.900
	4,50	4.719	4.719	4.719	4.719	4.719	4.719	4.719	5.093	5.466	5.662	5.858	5.879	5.900	5.900	5.900
	5,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	5,50	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	6,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	6,50	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
	7,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900
7,50	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	
8,00	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	5.900	

Figura 15 – Matriz de potência (kW) para o conversor de energia das ondas *Wave Dragon* (Fonte: adaptado de VEIGAS et al., 2015).

#### 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados serão apresentados e discutidos, inicialmente, em sua forma geral, observando a série temporal completa de dados e, após, será analisada a sua variação sazonal, em termos do padrão mais frequente e da análise de espalhamento dos dados.

#### 4.1 Análise preliminar dos dados de onda

As Figuras 16 e 17 mostram a distribuição dos parâmetros  $H_s$  e  $T_e$ , respectivamente, coletados pelo ondógrafo, para o conjunto completo da série de dados de onda coletada a 17 m de profundidade.

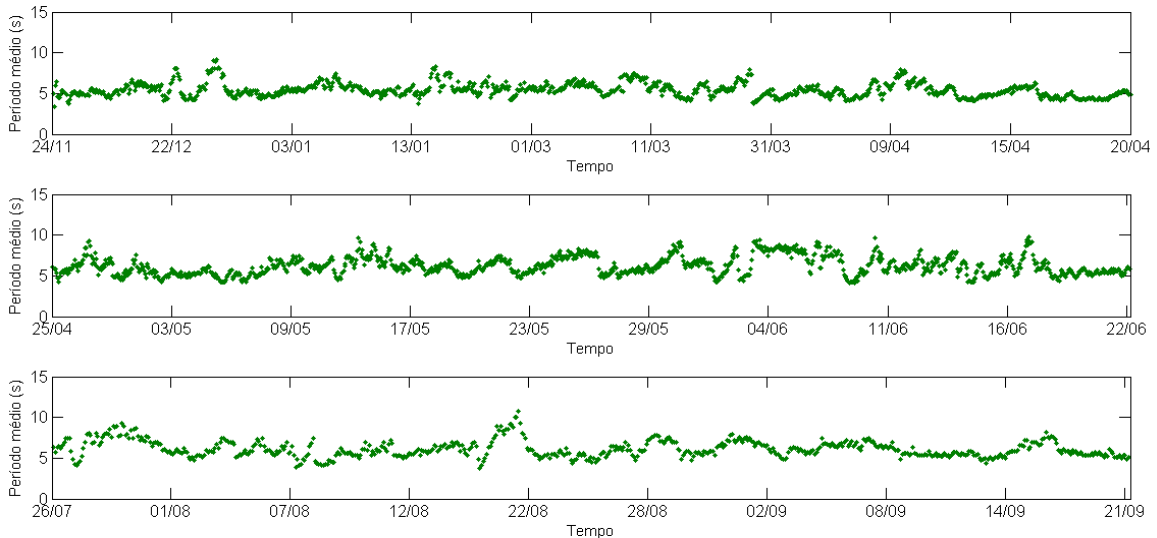


Figura 16 – Série de dados completa para  $H_s$  (Fonte: do autor).

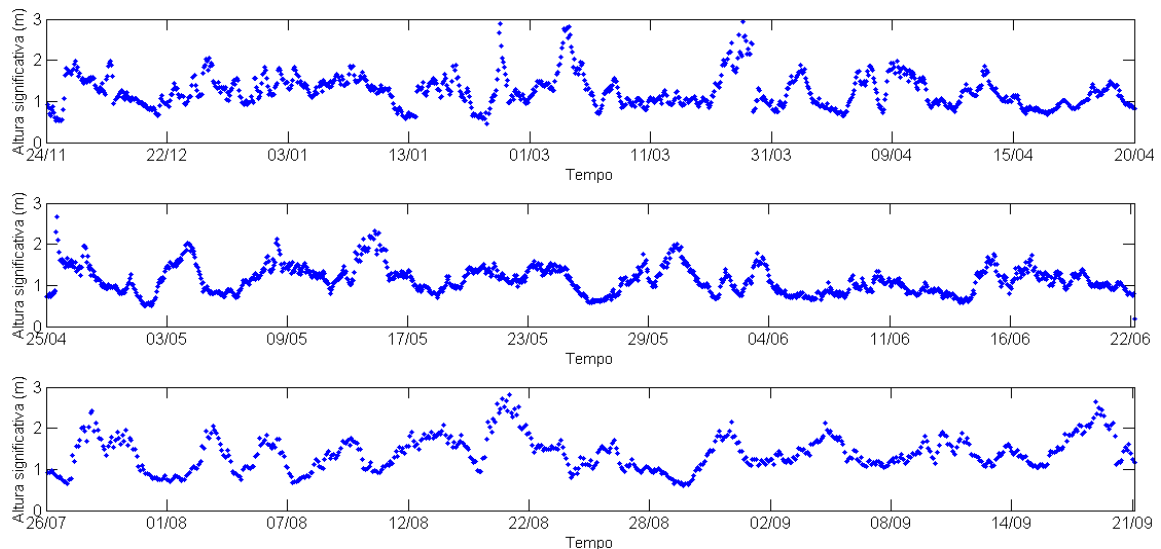


Figura 17 – Série de dados completa para  $T_e$  (Fonte: do autor).

A série de dados foi dividida em três subséries, visto que houve descontinuidade dos registros de dados entre dois períodos durante as medições. Assim, os registros obtidos datam de 24 de novembro de 2006 a 20 de abril de 2007, havendo a primeira descontinuidade dos registros. Em seguida, a série é retomada em 25 de abril a 22 de junho de 2007, havendo nova descontinuidade nos dados. Por fim, a série continua de 26 de julho a 21 de setembro de 2007.

A série de dados de  $H_s$  está distribuída entre os valores de 0,5 m até 2,5 m, sendo estes os valores mais frequentes verificados para a série de dados. As maiores ocorrências de  $H_s$  observadas alcançaram valores próximos aos 3 m. Todavia, são poucas as ocorrências registradas para valores mais elevados de  $H_s$ . A série de dados para  $T_e$  varia entre os valores de 4 s até 8 s, os quais são os valores mais frequentes encontrados. De forma geral, os períodos de onda são curtos, indicando o predomínio de um padrão de ondas que se formam mais próximos a região onde os dados foram coletados.

A Tabela 1 informa as médias e desvios padrão associados para a altura significativa ( $H_s$ ), o período médio de energia ( $T_e$ ), o comprimento de onda ( $L$ ) e a direção de pico das ondas ( $\theta$ ), indicando os valores médios para os períodos sazonais (estações) e para o conjunto total de dados de onda coletados na profundidade de 17 m.

Tabela 1 – Médias e desvios padrão sazonal e anual para  $H_s$ ,  $T_e$ ,  $L$  e  $\theta$  na profundidade de 17 m.

Estação	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$L$ (m)	$\theta$ (°)
Primavera	$1,18 \pm 0,39$	$5,26 \pm 0,63$	$64,28 \pm 11,35$	$128,36 \pm 41,77$
Verão	$1,32 \pm 0,42$	$5,70 \pm 0,89$	$72,15 \pm 13,01$	$138,74 \pm 30,72$
Outono	$1,15 \pm 0,34$	$5,95 \pm 1,17$	$82,38 \pm 21,02$	$124,54 \pm 35,81$
Inverno	$1,37 \pm 0,42$	$6,14 \pm 1,37$	$81,46 \pm 15,79$	$147,88 \pm 44,03$
Anual	$1,23 \pm 0,39$	$5,92 \pm 1,17$	$79,47 \pm 18,45$	$131,56 \pm 39,69$

Fonte: do autor.

As maiores médias para os parâmetros  $H_s$  e  $T_e$  foram obtidas durante o inverno. Baseando-se nessa informação, pode-se inferir que a estação mais energética em termos de potencial de onda é o inverno, seguido do verão. Verificou-se nas equações 9, 16 e 17 que o termo  $H_s$  está elevado ao quadrado. Logo, pequenos incrementos em  $H_s$  interferem significativamente no cálculo do fluxo médio de energia (ou potência) das ondas.

Zandomenego, Schmidt e D'Aquino (2015) obtiveram médias sazonais semelhantes para  $H_s$ . Entretanto, para descrever o período de ondas, o referido trabalho considerou como parâmetro estatístico o período significativo de onda ( $T_s$ ), o qual corresponde ao período médio do último terço da distribuição cumulativa de frequência dos períodos registrados. No presente trabalho, optou-se por utilizar o período médio de energia como parâmetro estatístico de onda, para manter concordância com as referências consultadas. Todavia, o período significativo configura-se em outra forma de analisar o clima de ondas, o qual também pode ser utilizado para fins de cálculo de potência de ondas.

De acordo com Oleinik, Marques e Kirinus (2016), em simulação de ondas realizada para análise do potencial energético na costa sul-sudeste do Brasil, os resultados obtidos para

a região costeira indicaram valor médio de 1,25 m para a altura significativa, enquanto o período médio variou entre 7,5 s e 9 s. Cuchiara et al. (2009) aplicaram o modelo SWAN e encontraram valores de altura significativa variando entre 1,0 m a 3,0 m para a região sul do Brasil, enquanto que o período médio encontrado foi menor que 6 s e as direções predominantes das ondas entre o nordeste e o sul. Coli (2000) descreveu o clima de ondas para o sul do Rio Grande do Sul com base em dados históricos, concluindo que a faixa de altura significativa está entre 1,0 m a 1,5 m e o período médio entre 5 s a 6 s, com direção predominante para o sudeste. Pianca, Mazzini e Siegle (2010), através de dados de reanálise do modelo operacional NWW3, obtiveram alturas médias sazonais entre 2,0 m a 2,6 m, enquanto que o período médio sazonal ficou entre 7,6 s a 8,3 s. Conforme observado nos resultados reportados pela literatura e por observações de muitos autores, os modelos numéricos não possuem uma boa resolução para valores próximos à costa e apresentam a tendência de superestimar os valores medidos (MELO FILHO; ROMEU; HAMMES, 2010).

Em resumo, os valores médios apresentados na Tabela 1 são muito semelhantes aos valores encontrados na literatura, com destaque para o parâmetro  $H_s$ , enquanto que o parâmetro  $T_e$  apresentou valores um pouco menores do que aqueles reportados pela literatura. A Tabela 2 sintetiza os parâmetros de onda calculados por outros autores para a região de estudo.

Tabela 2 – Parâmetros de onda obtidos por demais autores.

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

Fonte: do autor.

De modo a ilustrar a grande influência que  $H_s$  possui na potência das ondas, foi construído o gráfico presente na Figura 18 o qual relaciona a série de dados de  $H_s$  (em azul) com a potência disponível por metro de frente de onda (em vermelho). Percebe-se que para pequenos picos registrados para  $H_s$ , são ocasionadas grandes variações nos valores de potência de onda. A potência calculada na Figura 18 consiste na potência disponível para águas intermediárias (Equação 16).

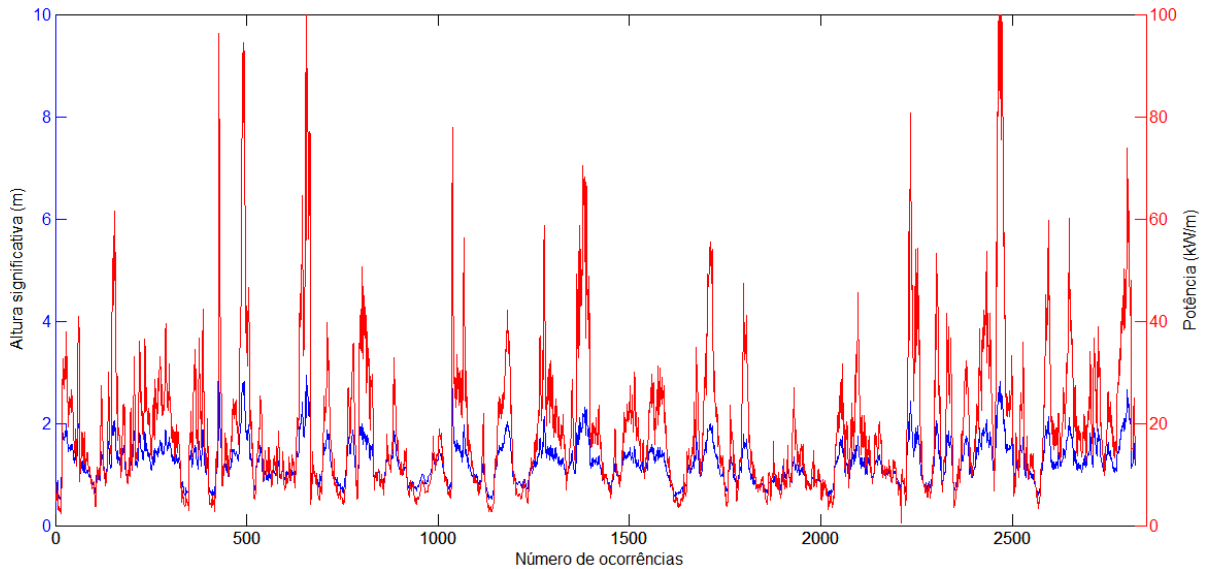


Figura 18 – Série de dados para  $H_s$  e variação da potência de ondas de acordo com  $H_s$  para a profundidade de coleta dos dados (Fonte: do autor).

## 4.2 Diagramas de ocorrência conjunta

O clima de ondas é tradicionalmente representado pelos diagramas de ocorrência ou dispersão (COLI, 2000), os quais apresentam a distribuição conjunta dos parâmetros altura significativa, período significativo e direção das ondas, sintetizando os dados de forma que se possa verificar o espalhamento dos mesmos. Para verificar a dispersão dos dados de onda, foram construídos diagramas de ocorrência conjunta que relacionam a direção e a altura significativa, bem como diagramas que relacionam o período médio de energia com a altura significativa das ondas. A Figura 19 ilustra o espalhamento de dados entre a direção e a altura significativa das ondas para a série de dados completa.

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

Figura 19 – Diagrama de ocorrência para a direção (°) e altura significativa (m) da série de dados completa (Fonte: do autor).



Considerando que  $0^\circ$  indica a direção norte, cada direção está distribuída em intervalos de  $45^\circ$ , de modo que a direção positiva dos ângulos é no sentido horário. As maiores frequências observadas, indicam incidência de ondas entre  $75^\circ$  a  $175^\circ$ , distribuídas desde nordeste até o sul, sendo que a faixa mais frequente se concentra nas direções entre  $100^\circ$  a  $125^\circ$ , correspondendo a faixa de alturas significativas de 0,9 m a 1,2 m, seguido pela faixa de  $75^\circ$  a  $100^\circ$ , com alturas significativas distribuídas entre 0,6 m a 0,9 m e também, na faixa de  $125^\circ$  a  $150^\circ$ , com predominância das alturas significativas de 1,2 m a 1,5 m. De acordo com as classes mais frequentes, observa-se o predomínio de ondas de leste, sudeste e sul.

O padrão observado na Figura 19 mostra que as ondas de menor  $H_s$  são distribuídas de norte a leste e gradualmente, enquanto os valores para  $H_s$  aumentam, a direção de propagação dessas ondas de maior altura dirige-se ao sudeste, sul, sudoeste e oeste. Apesar de poucas observações para as direções sudoeste, oeste e noroeste, são nessas as direções que predominam as ondas com os maiores valores para  $H_s$  sendo, portanto, ondas de maior potencial energético. A Figura 120 apresenta os diagramas polares das direções, relacionando-as com  $H_s$  para o ponto de coleta de dados.

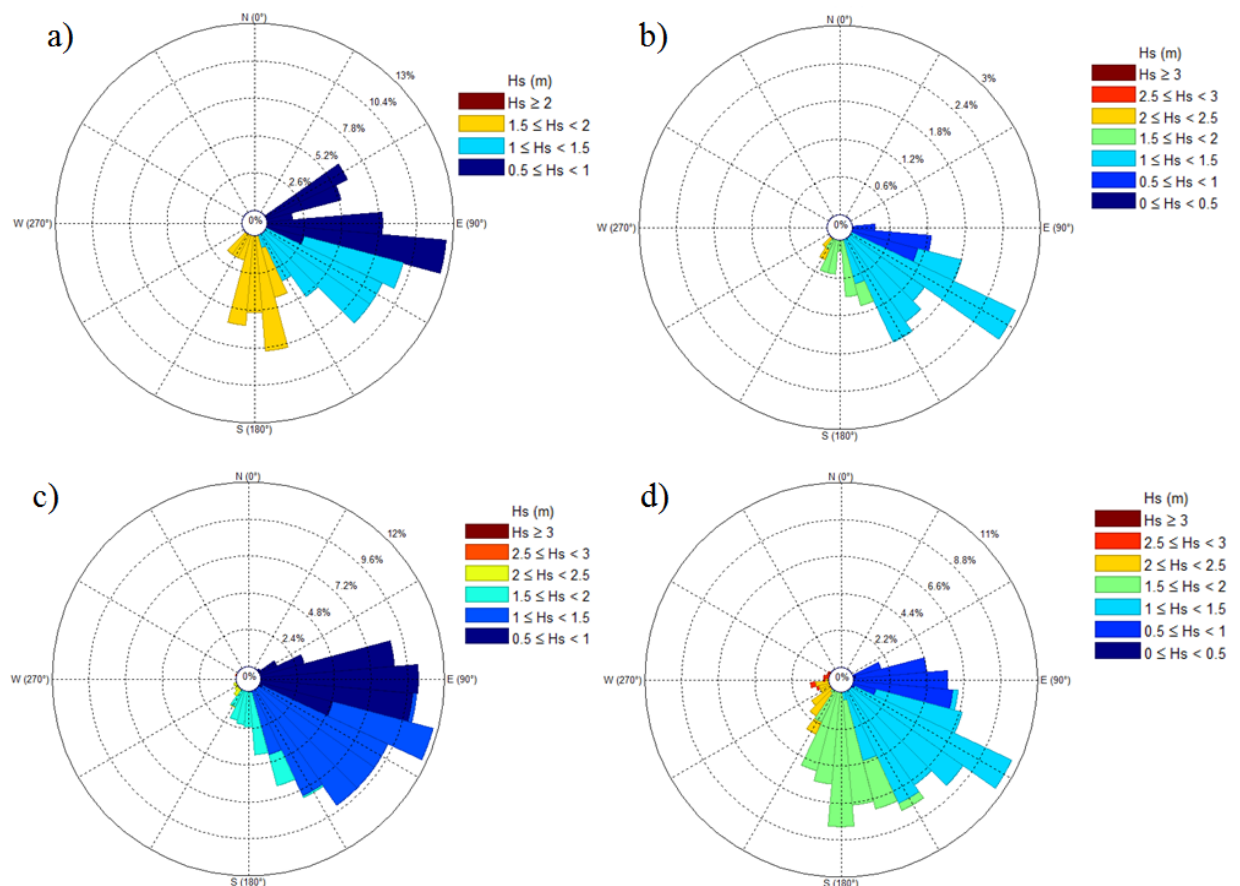


Figura 20 – Diagramas polares de frequência da altura significativa e direção de propagação das ondas: a) na primavera; b) no verão; c) no outono; d) no inverno (Fonte: do autor).

Percebe-se que há o predomínio de ondas de menor  $H_s$  (0,5 m a 1,5 m) nos quadrantes nordeste e sudeste para a primavera e outono, enquanto que no verão e inverno, as ondas com  $H_s$  a partir de 0,5 m até 1,5 m estão mais distribuídas no quadrante sudeste. Uma pequena parcela de ondas de maior altura (2 m a 3 m) se concentra nos quadrantes sudeste, sul e sudoeste (sendo observado na primavera, verão e inverno). Strauch et al. (2009) também constatou que a direção de propagação de ondas mais frequente para a região corresponde à direção sudeste, conforme observado em todas as estações do ano. De modo geral, as estações apresentam direções de onda muito semelhantes. O diagrama polar para a primavera contém uma série de dados menor do que as demais estações, visto que o tempo de coleta de dados durante a primavera foi menor do que para as demais estações.

A Figura 21 mostra o diagrama de ocorrência conjunta (frequência) para valores de  $H_s$  e  $T_e$  da série de dados analisada.

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

Figura 21 – Diagrama de ocorrência conjunta de  $H_s$  e  $T_e$  (número de ocorrências) para a série de dados completa (Fonte: do autor).

As maiores ocorrências de onda concentram-se na faixa de  $T_e$  entre 5 a 6 s e  $H_s$  entre 1,0 a 1,5 m. São poucas as ocorrências verificadas para ondas de período mais longo, em torno de 10 a 12 s e de maior altura, entre 2,5 a 3,0 m, conforme Figura 21. Percebe-se que não há registros de ondas com altura significativa superior a 3 m, bem como, não há registros maiores que 11 s para o período médio de energia.

Os diagramas apresentados nas Figuras 22 e 23 mostram o número de ocorrências relacionando os parâmetros  $H_s$  e  $T_e$  para cada estação do ano.

a)		T <sub>e</sub> [s]						b)		T <sub>e</sub> [s]					
		4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16			4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
H <sub>s</sub> [m]	0,25-0,5	0	0	0	0	0	0	H <sub>s</sub> [m]	0,25-0,5	0	1	0	0	0	0
	0,5-0,75	12	3	0	0	0	0		0,5-0,75	25	7	0	0	0	0
	0,75-1,0	20	4	0	0	0	0		0,75-1,0	53	23	0	0	0	0
	1,0-1,25	15	11	0	0	0	0		1,0-1,25	112	32	3	0	0	0
	1,25-1,5	12	1	0	0	0	0		1,25-1,5	113	34	4	0	0	0
	1,5-1,75	20	0	0	0	0	0		1,5-1,75	50	15	2	0	0	0
	1,75-2,0	12	0	0	0	0	0		1,75-2,0	21	14	4	0	0	0
	2,0-2,25	0	0	0	0	0	0		2,0-2,25	7	10	1	0	0	0
	2,25-2,5	0	0	0	0	0	0		2,25-2,5	3	6	0	0	0	0
	2,5-2,75	0	0	0	0	0	0		2,5-2,75	1	7	0	0	0	0
2,75-3,0	0	0	0	0	0	0	2,75-3,0	1	4	0	0	0	0		

Figura 22 – Diagrama de ocorrência conjunta de H<sub>s</sub> e T<sub>e</sub> para: a) a primavera; b) o verão (Fonte: do autor).

a)		T <sub>e</sub> [s]						b)		T <sub>e</sub> [s]					
		4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16			4-6	6-8	8-10	10-12	12-14	14-16
H <sub>s</sub> [m]	0,25-0,5	0	0	0	0	0	0	H <sub>s</sub> [m]	0,25-0,5	0	0	0	0	0	0
	0,5-0,75	80	50	5	0	0	0		0,5-0,75	15	10	0	0	0	0
	0,75-1,0	283	118	44	0	0	0		0,75-1,0	54	41	0	0	0	0
	1,0-1,25	249	134	8	0	0	0		1,0-1,25	72	79	0	0	0	0
	1,25-1,5	155	142	17	0	0	0		1,25-1,5	73	49	2	0	0	0
	1,5-1,75	57	64	17	0	0	0		1,5-1,75	72	39	4	0	0	0
	1,75-2,0	26	32	16	0	0	0		1,75-2,0	28	44	6	0	0	0
	2,0-2,25	4	5	4	0	0	0		2,0-2,25	9	14	2	0	0	0
	2,25-2,5	1	4	0	0	0	0		2,25-2,5	5	1	6	2	0	0
	2,5-2,75	1	0	0	0	0	0		2,5-2,75	2	1	3	1	0	0
2,75-3,0	0	0	0	0	0	0	2,75-3,0	0	0	1	0	0	0		

Figura 23 – Diagrama de ocorrência conjunta de H<sub>s</sub> e T<sub>e</sub> para: a) o outono; b) o inverno (Fonte: do autor).

As Figuras 22a e 22b mostram os diagramas de ocorrência para a primavera e verão, respectivamente. Os diagramas estão divididos em faixas de altura significativa de 0,25 m, distribuídas até os 3 m, para melhor visualização do espalhamento dos dados por estações. Os baixos valores de ocorrência para a primavera foram ocasionados devido ao tempo de coleta de dados durante a referida estação ter sido menor do que nas outras estações. Entretanto, percebe-se que, apesar dos poucos dados registrados durante a primavera, a característica de estado de mar manteve-se muito próxima das demais estações e do padrão anual encontrado na Figura 21. O diagrama de ocorrência para o verão mostrou-se semelhante ao padrão anual encontrado, com predominância de H<sub>s</sub> entre 1,0 m a 1,5 m e T<sub>e</sub> entre 4 s a 6 s.

As Figuras 23a e 23b trazem os diagramas de ocorrência para as estações de outono e inverno, respectivamente. Percebe-se que, para o outono, a faixa de H<sub>s</sub> predominante diminuiu rapidamente, concentrando-se desde 0,75 m até 1,5 m, enquanto que T<sub>e</sub> permaneceu na faixa de 4 s a 6 s. Para o inverno, é observado um espalhamento de dados mais uniforme entre o intervalo de H<sub>s</sub> de 1,0 a 1,75 m, bem como entre o intervalo de T<sub>e</sub> de 4 s a 8 s.

### 4.3 Distribuição de potência e energia total das ondas

A Figura 24 apresenta o histograma da distribuição de energia total e o histograma de distribuição da potência das ondas para o sítio de coleta dos dados a 17 m de profundidade.

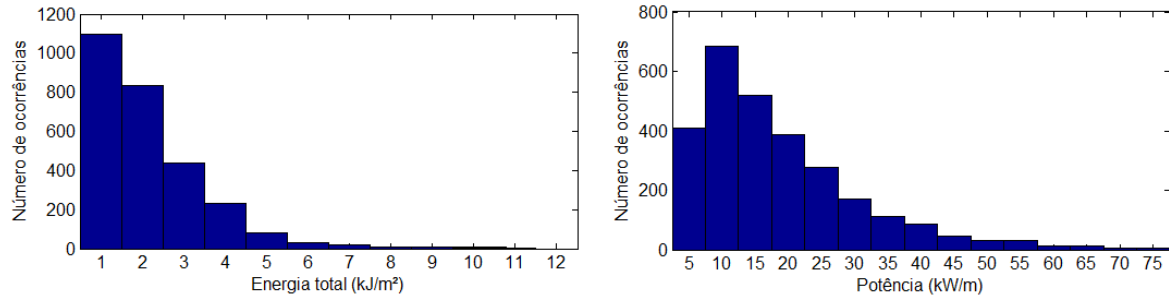


Figura 24 – Distribuição de energia total (kJ/m<sup>2</sup>) e potência (kW/m) para a série de dados (Fonte: do autor).

De acordo com o histograma da Figura 24, as maiores ocorrências registradas são de ondas com energia total da ordem de 1 kJ/m<sup>2</sup> seguido de 2 kJ/m<sup>2</sup>. Para a distribuição de potência, as maiores ocorrências registradas são de ondas com potência da ordem de 10 kW/m seguido de 15 kW/m. São observadas ocorrências de ondas com potência mais elevada, da ordem de 75 kW/m, porém, são baixos os números de ocorrências para ondas mais energéticas. As Figuras 25 e 26 mostram a distribuição de energia total e potência sazonais, respectivamente, de acordo com cada estação do ano, para a série de dados coletados.

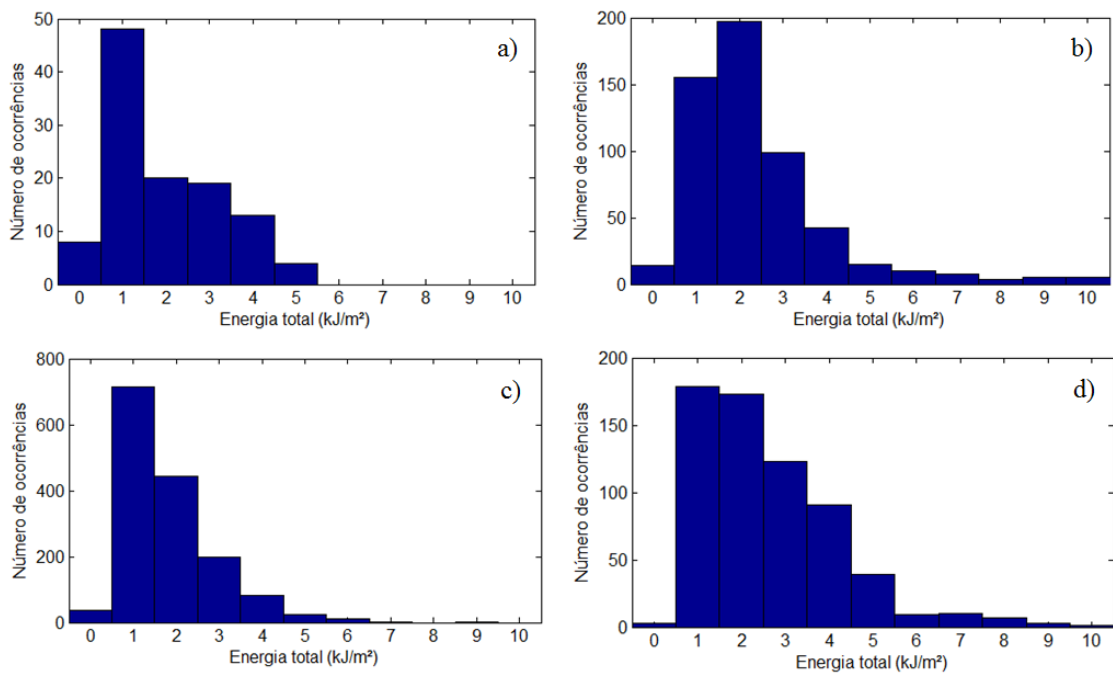


Figura 25 – Histogramas de distribuição de energia total (kJ/m<sup>2</sup>) para: a) primavera; b) verão; c) outono e d) inverno (Fonte: do autor).

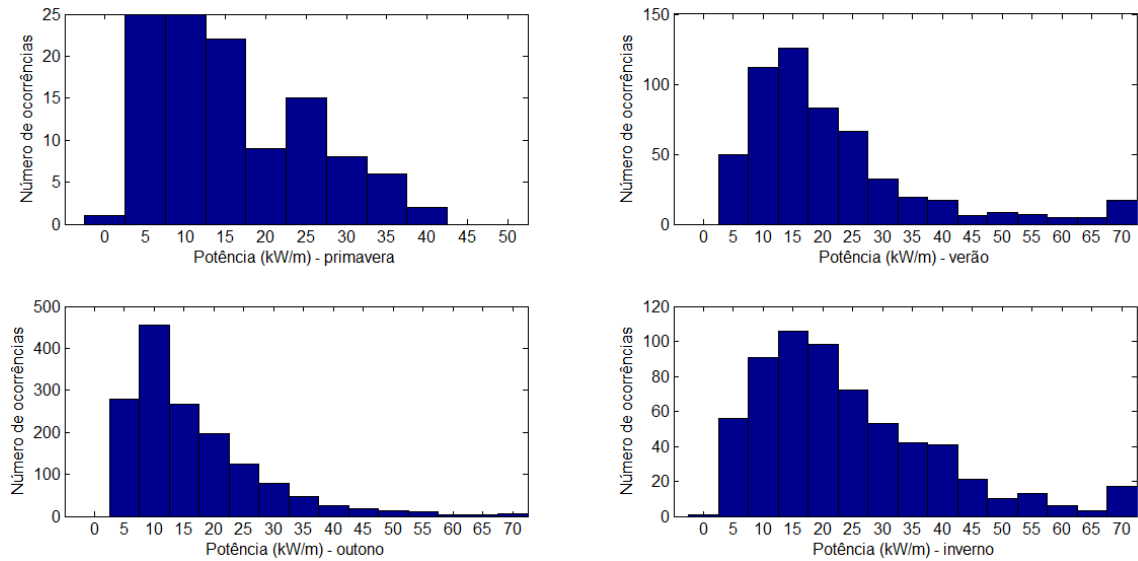


Figura 26 – Histogramas de distribuição de potência das ondas (kW/m) de acordo com as estações do ano (Fonte: do autor).

A Figura 25 apresenta faixas de energia total de 1 kJ/m<sup>2</sup> a 3 kJ/m<sup>2</sup> como sendo mais frequentes para o verão e inverno, pois como já apresentado na Tabela 1, na forma de médias gerais, a estação de inverno é considerada a mais energética, seguida do verão. Para a primavera, as maiores ocorrências observadas são em torno de 1 kJ/m<sup>2</sup>, enquanto que para o outono, têm-se ocorrências mais frequentes na faixa de 1 kJ/m<sup>2</sup> a 2 kJ/m<sup>2</sup>. Na Figura 26, verifica-se que as ocorrências predominantes são de ondas com potência ente 10 kW/m a 15 kW/m, sendo observado para a estação de inverno, distribuições de ondas de maior potência.

A Figura 27 apresenta a matriz de potência por metro de frente de onda (kW/m) disponível para águas intermediárias (classificação do local de coleta dos dados), para H<sub>s</sub> e T<sub>e</sub>, a qual foi obtida pela Equação 16.

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

Figura 27 – Matriz de potência por metro de frente de onda (kW/m) para a profundidade de coleta de dados, de acordo com dados de H<sub>s</sub> e T<sub>e</sub> (Fonte: do autor).

Considerando os dados mais frequentes observados no diagrama da Figura 121, tem-se que o estado de mar predominante para a região de estudo consiste em ondas com  $H_s$  entre 1,0 m a 1,5 m e  $T_e$  entre 5 s a 6 s. Analisando a matriz de potência disponível por metro de frente de onda da Figura 27, e combinando os parâmetros  $H_s$  e  $T_e$ , tem-se que a potência de ondas para o estado de mar mais frequente varia desde 9,77 kW/m até 25,91 kW/m. Conforme Lisboa, Teixeira e Fortes (2017) a potência média anual em águas profundas para a costa brasileira varia de 5 kW/m a 20 kW/m com baixa variabilidade sazonal, característica encontrada no hemisfério sul. A extração de energia das ondas em locais com alta latitude torna-se atraente devido ao alto valor de potência encontrado em águas intermediárias e profundas.

#### 4.4 Análise da modificação de parâmetros de onda de acordo com a profundidade

A Tabela 3 apresenta a variação da potência (kW/m) e energia total (kJ/m<sup>2</sup>) disponível para diferentes profundidades, de acordo com a propagação das ondas em direção à costa.

Tabela 3 – Distribuição de energia total e potência de ondas para diferentes profundidades.

Profundidade (m)	$E_T$ (kJ/m <sup>2</sup> )	P (kW/m)
4,0	1,49	8,88
5,0	1,40	9,18
6,0	1,34	9,50
7,0	1,30	9,83
8,0	1,28	10,16
9,0	1,26	10,50
10,0	1,25	10,85
11,0	1,25	11,20
12,0	1,26	11,55
13,0	1,26	11,91
14,0	1,27	12,26
15,0	1,29	12,61
16,0	1,30	12,96
17,0	1,82	18,63

Fonte: do autor.

De acordo com as relações que permitem verificar a classificação da onda quanto a sua profundidade relativa, tem-se que para a faixa de profundidades apresentadas na Tabela 3, as ondas estão se propagando em águas intermediárias, onde a interação com o fundo oceânico começa a ser perceptível pela onda. Visto que a faixa de profundidades estudadas

compreendem águas intermediárias, a aplicação da equação da potência de ondas para águas intermediárias foi aplicada, retornando os valores da Tabela 3. A Figura 28 mostra a modificação da potência de acordo com a diminuição da profundidade. A energia total contida nas ondas também foi calculada, e pode ser visualizada na Figura 29.

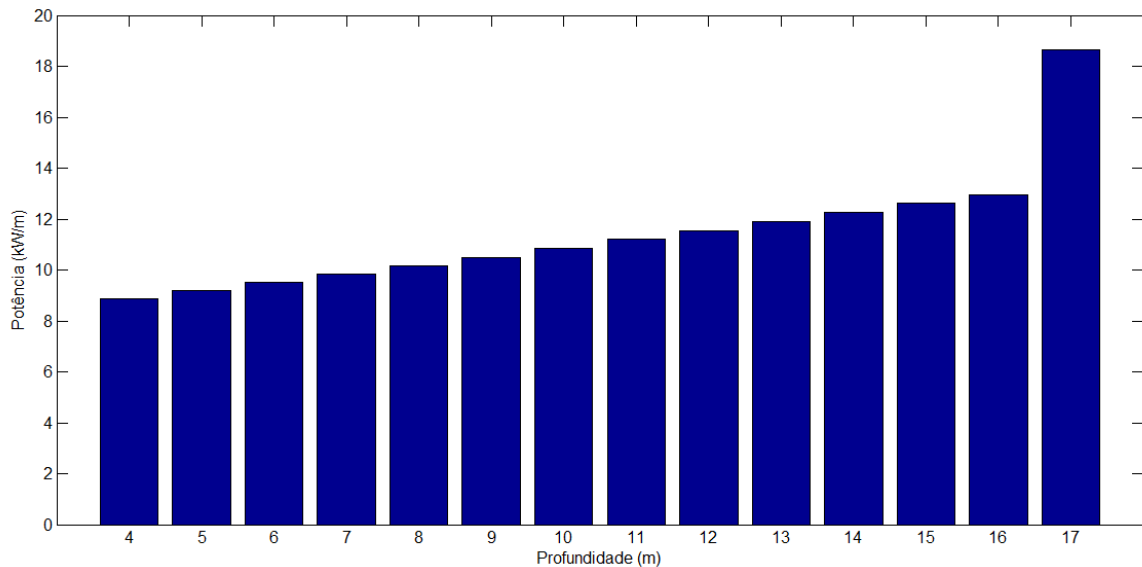


Figura 28 - Variação da potência de ondas (kW/m) para diferentes profundidades (Fonte: do autor).

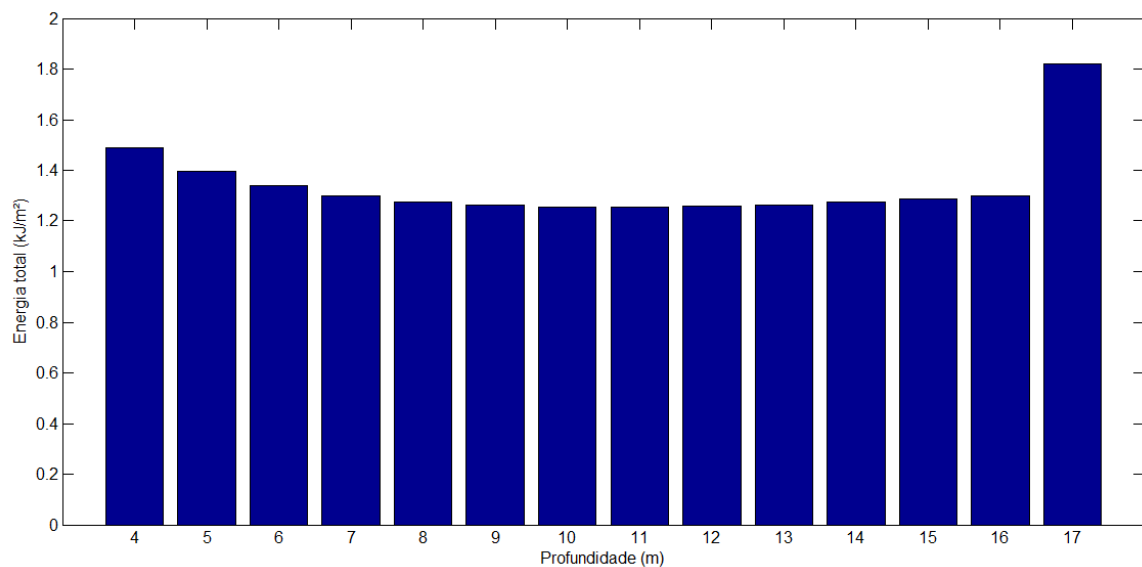


Figura 29 - Variação de energia total de ondas (kJ/m²) para diferentes profundidades (Fonte: do autor).

Conforme observado na Figura 28, a variação da potência com a diminuição da profundidade é pequena, visto que as modificações de altura significativa nesse percurso são mínimas. Esse fato pode ser verificado em praias planas e paralelas com declividade suave, como é o caso do litoral de Tramandaí. Observa-se que a maior variação ocorre entre a transição de 17 m para 16 m de profundidade. Em termos percentuais, ocorre uma diminuição

de 52,4% da potência disponível nas ondas ao se propagarem da profundidade de 17 m até a profundidade de 4 m. Já para a energia total, a maior variação também ocorre na transição entre 17 m para 16 m de profundidade e, basicamente, se mantém constante ao longo do percurso da onda em direção à costa, aumentando suavemente a partir dos 8 m, devido a um pequeno incremento de altura significativa verificada a partir dessa profundidade. Salienta-se que a energia total não é dependente da profundidade do local ( $h$ ) nem do comprimento de onda ( $L$ ), conforme expresso pela Equação 3. Em termos percentuais, a diminuição da energia total registrada entre 17 m e 4 m corresponde a 18,1%.

A Figura 30 apresenta a distribuição de potência nas ondas para as profundidades de 4 m, 8 m, 12 m e 17 m, de acordo com a série de dados analisada.

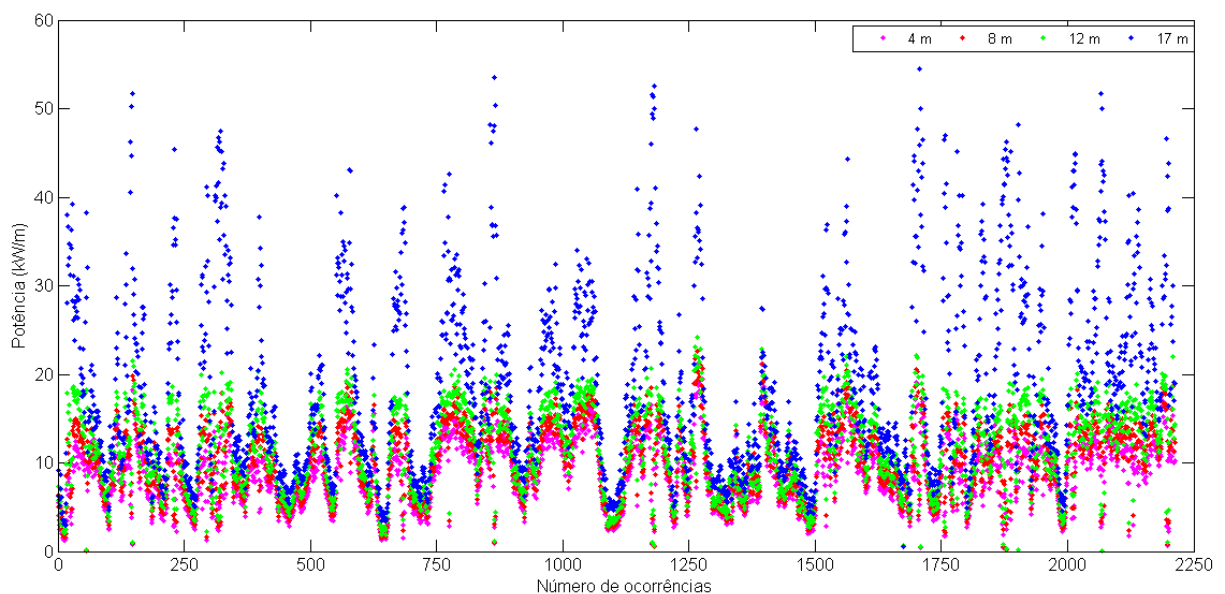


Figura 30 – Distribuição de potência das ondas (kW/m) de acordo com a série de dados para profundidades de 4 m, 8 m, 12 m e 17 m (Fonte: do autor).

Como já mostrado na Figura 28, a variação da potência das ondas de acordo com a mudança de profundidade é mínima. Pode-se observar na Figura 30 que as potências encontradas em 17 m possuem os maiores picos, enquanto que com a diminuição da profundidade, as potências diminuem, mas se observa que para 12 m, 8 m e 4 m, as potências são muito semelhantes, ocorrendo uma diminuição suave em seus valores.

As Figuras 31, 32 e 33 mostram o diagrama de ocorrência conjunta para valores de  $H_s$  e  $T_e$  nas profundidades de 12 m, 8 m e 4 m, respectivamente.



		$T_e$ [s]						
		3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
$H_s$ [m]	0,0-0,25	0	0	1	3	1	0	1
	0,25-0,5	0	4	16	4	4	1	1
	0,5-0,75	2	73	129	72	56	20	1
	0,75-1,0	5	145	297	141	62	36	5
	1,0-1,25	0	145	381	309	129	21	3
	1,25-1,5	0	57	35	10	13	20	8

Figura 31 – Diagrama de ocorrência conjunta de  $H_s$  e  $T_e$  (número de ocorrências) para a profundidade de 12 m (Fonte: do autor).

		$T_e$ [s]						
		3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
$H_s$ [m]	0,0-0,25	0	0	2	3	1	0	1
	0,25-0,5	0	6	17	3	2	1	1
	0,5-0,75	4	77	119	59	52	16	1
	0,75-1,0	3	156	292	131	53	37	4
	1,0-1,25	0	178	422	314	106	15	3
	1,25-1,5	0	7	7	29	51	29	9

Figura 32 – Diagrama de ocorrência conjunta de  $H_s$  e  $T_e$  (número de ocorrências) para a profundidade de 8 m (Fonte: do autor).

		$T_e$ [s]						
		3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10
$H_s$ [m]	0,0-0,25	0	0	2	3	1	0	0
	0,25-0,5	0	5	13	2	2	0	2
	0,5-0,75	4	61	85	39	32	5	0
	0,75-1,0	3	152	231	89	51	34	4
	1,0-1,25	0	202	414	175	61	21	3
	1,25-1,5	0	4	114	231	117	20	3
	1,5-1,75	0	0	0	0	1	18	7

Figura 33 – Diagrama de ocorrência conjunta de  $H_s$  e  $T_e$  (número de ocorrências) para a profundidade de 4 m (Fonte: do autor).

O padrão de espalhamento dos dados para as profundidades de 12 m, 8 m e 4 m são muito semelhantes entre si e também mantém concordância com o padrão de dispersão dos dados observada para a profundidade de 17 m. De modo geral, o maior número de ocorrências concentrou-se em  $H_s$  entre 1,0 m a 1,25 m e  $T_e$  entre 5 s a 6 s. Contudo, pode-se afirmar que as faixas mais frequentes, de modo geral, compreendem  $H_s$  desde 0,75 m a 1,25 m e  $T_e$  desde 4 s até 7 s. Para a Figura 28, na profundidade de 4 m, são observadas algumas poucas ocorrências de ondas com  $H_s$  entre 1,5 m a 1,75 m, um pouco mais altas em relação às profundidades de 12 m e 8 m.

#### 4.5 Análise comparativa de conversores de energia das ondas

A Tabela 4 compara a potência extraída pelos dispositivos conversores para o estado de mar predominante da região de estudo.

Tabela 4 – Comparação entre as potências extraídas (kW) pelos conversores analisados.

Conversor	Potência extraída (kW)
SSG	1072
<i>Oyster</i>	85
<i>Pelamis</i>	65
AWS	28
<i>Wave Dragon</i>	750

Fonte: do autor.

De acordo com as matrizes de potência dos dispositivos conversores, apresentadas na seção 3.4 deste trabalho, tem-se que para o estado de mar predominante para a região de estudo (conforme Figura 21), os conversores SSG e *Wave Dragon* são os conversores que melhor se adaptam, extraindo maior potência das ondas em relação aos demais conversores apresentados. Para as condições de mar com  $H_s$  de 1,5 m e  $T_e$  de 6 s, tem-se a potência de 1072 kW extraída pelo conversor SSG, enquanto que para o conversor *Wave Dragon*, tem-se a potência de 750 kW.

As maiores potências extraídas pelo conversor *Wave Dragon* se dão para ondas de maior  $H_s$  e  $T_e$ , porém, verifica-se que maiores valores de  $H_s$  proporcionam maior influência no aumento da potência extraída. Para o conversor SSG, verifica-se que o aumento gradual na combinação entre  $H_s$  e  $T_e$  proporcionam maiores potências, entretanto, observando os parâmetros separadamente, tem-se que incrementos em  $H_s$  reportam maiores potências, em comparação a incrementos em  $T_e$ .

O conversor SSG foi designado a ser ancorado à costa, no entanto, por atuar em águas rasas, o padrão de ondas encontrado é menos energético e os impactos ambientais associados, podem ser mais significativos (ZANCANELLA, 2016). Apesar deste fato, a principal vantagem deste dispositivo é a sua robustez e a possibilidade de ser incorporado em quebra-mares e outras estruturas costeiras, permitindo o compartilhamento de custos (MARGHERITINI; VICINANZA; FRIGAARD, 2009).

O conversor *Wave Dragon* ocupa uma elevada área para sua instalação, bem como, consiste em uma estrutura com elevado peso, o que torna a sua instalação mais restrita. O referido conversor é amarrado ao fundo oceânico em águas relativamente profundas,

recomenda-se a sua instalação em profundidades superiores aos 40 m, para que seja aproveitado o potencial das ondas mais energéticas (KOFOED et al., 2006).

Os dispositivos *Pelamis*, AWS e *Oyster* apresentam os menores valores de potência absorvida das ondas, visto que a combinação dos parâmetros  $H_s$  e  $T_e$  para o estado de mar mais frequente apresenta o valor máximo de 65 kW para o conversor *Pelamis*, enquanto que o conversor AWS apresenta 28 kW e o conversor *Oyster* apresenta potência de 85 kW.

Para o conversor AWS, observa-se que as maiores potências extraídas ocorrem para o estado de mar que possui altos valores nas combinações entre  $H_s$  e  $T_e$ , sendo observado o valor máximo de 2425 kW, para o estado de mar com  $H_s$  de 6,5 m e  $T_e$  de 13 s. Percebe-se pelo diagrama do conversor AWS, que a partir do valor de 4,5 m para  $H_s$ , é necessário valores a partir de 6 s para  $T_e$ , para que o dispositivo possa absorver potência de ondas, caso contrário, o clima de ondas não será efetivo para aproveitamento em conversores.

Visto que o conversor AWS é um dispositivo submerso, o mesmo não cria impactos visuais, fazendo com que a aceitação pública não seja um problema, além de estar menos propenso a sofrer com os efeitos resultantes de tempestades, uma vez que na profundidade em que é instalado, os efeitos de tempestades não são sentidos com grande intensidade (PRADO et al., 2006).

O conversor *Pelamis* foi designado a ser instalado em águas profundas, visto que sua estrutura física possui grande extensão e o mesmo possui melhor aproveitamento da energia das ondas quando é submetido a um clima de ondas mais energético, de acordo com uma combinação de valores elevados para  $H_s$  e  $T_e$ , maior do que o padrão verificado para a região de estudo. Devido a sua característica, o conversor *Pelamis* não se adequa ao estado de mar encontrado. Para um estudo mais detalhado sobre esse conversor, torna-se necessário obter o padrão das ondas em maiores profundidades, para analisar a viabilidade da conversão da energia das ondas por esse dispositivo. Veigas et al. (2015) analisou quatro diferentes conversores e verificou que para o requisito área ocupada, uma usina composta pelo conversor *Pelamis* requer maior espaço para instalação do que uma usina que utiliza demais conversores.

O conversor *Oyster* também é dependente de maiores valores de  $H_s$  e  $T_e$  para o aproveitamento da energia das ondas, visto que se consegue extrair até 291 kW para  $H_s$  a partir de 4 m e  $T_e$  a partir de 6 s. As técnicas envolvidas no fundeio do conversor *Oyster* permitem que o dispositivo seja facilmente removido para manutenção e reinstalação, quando necessário, característica comum encontrada em dispositivos que permanecem ancorados. O conversor *Oyster* pode ser instalado em profundidades de 12 m, o que em muitos locais,

estaria localizado relativamente próximo à costa. Para o estado de mar predominante da região de estudo, o conversor possui um baixo aproveitamento da energia das ondas, sendo mais recomendável, buscar locais que possuem parâmetros de  $H_s$  e  $T_e$  mais elevados para a instalação desse dispositivo (WHITTAKER et al., 2007).

De acordo com as análises realizadas, pode-se inferir que o conversor mais indicado para a profundidade de 17 m é o conversor SSG, o qual é capaz de absorver maior potência nas condições de mar predominantes para a região, em comparação aos demais dispositivos para a mesma condição de mar.

O estado de mar predominante para as demais profundidades analisadas (12 m, 8 m e 4 m) mostrou-se muito semelhante às condições encontradas para a profundidade de coleta dos dados. Em síntese, o conversor SSG também teria bom desempenho se instalado em uma das profundidades mencionadas e, como é considerado um dispositivo *onshore*, presume-se que a sua instalação na profundidade de 4 m seria interessante do ponto de vista do aproveitamento de potência das ondas. O conversor *Oyster*, apesar de ser considerado um dispositivo *nearshore*, apresenta baixos valores de absorção de potência das ondas para o estado de mar predominante em todas as profundidades analisadas, necessitando de um padrão de mar com maiores valores de  $H_s$  e  $T_e$  para melhor aproveitamento do recurso energético disponível nas ondas.

Conforme verificado, diferentes tecnologias de conversão possuem desempenhos diferentes em diferentes locais de instalação. Devido às características peculiares de cada dispositivo conversor, torna-se importante verificar o estado de mar predominante, bem como as horas de duração desse estado de mar, o qual será o fator determinante na produção de energia gerada por cada dispositivo conversor.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre diferentes tipos de conversores de energia das ondas, de acordo com o estado de mar predominante para a região de Tramandaí/RS. Além disso, buscou-se realizar uma análise simplificada sobre as modificações que ocorrem nas ondas à medida que se propagam em direção à costa.

A diferença entre os valores encontrados para a potência disponível nas ondas em diferentes profundidades foi muito pequena. Essa característica no padrão da potência é comum em litorais que possuem batimetria de pouca declividade e com batimétricas quase paralelas à costa e linha de costa retilínea. Para litorais com batimetria mais irregular, as

análises da variação de potência com a profundidade tornam-se mais interessantes, pois os parâmetros de onda sofrem modificações mais intensas à medida que as ondas se propagam em direção a costa e, como visto, o potencial energético das ondas é modificado. Essa análise é importante para avaliar a viabilidade de instalação de dispositivos conversores de energia das ondas em diferentes profundidades, os quais são influenciados pela altura significativa e pelo período médio de energia das ondas que predominam no local.

Os diagramas de ocorrência mostraram que o estado de mar mais frequente corresponde ao padrão de ondas com  $H_s$  entre 1,0 m a 1,5 e  $T_e$  entre 5 s a 6 s. Quando analisadas as matrizes de potência dos dispositivos conversores de acordo com o estado de mar mais frequente, percebeu-se que, para o sítio de coleta de dados, a potência extraída pelos dispositivos é baixa em comparação a locais de maior profundidade com predomínio de ondas de maior  $H_s$ . Os conversores que melhor aproveitam a potência de ondas para o estado de mar predominante são o SSG e *Wave Dragon*. O dispositivo selecionado para as condições encontradas foi o SSG, o qual se adaptou a todas as profundidades analisadas, visto que o padrão encontrado para o estado de mar predominante é muito semelhante entre profundidades. Todavia, cada dispositivo possui suas particularidades, vantagens e desvantagens, de acordo com as condições de mar predominante, local e profundidade em que forem instalados.

Por fim, salienta-se que se torna necessário uma análise mais aprofundada a respeito da geração de energia, eficiência e rendimento de conversores de energia das ondas, a fim de verificar a real condição de geração de energia e a porcentagem de demanda que os conversores serão capazes de atender. Além disso, também é importante verificar a quantidade de horas anuais que um estado de mar é predominante, pois a partir desse valor, é possível estimar a geração de energia média a partir do dispositivo conversor.

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF OCEAN WAVE ENERGY CONVERTERS**

### **ABSTRACT**

The present work carried out a comparative analysis of energy converters from ocean waves, addressing the most frequent sea state characterization and the power matrices of converter devices, for a wave data time series collected in the coast of Tramandaí/RS. The research methodology consisted in the calculation of the wave statistical parameters, with the ones, were constructed occurrence diagrams to verify the spreading of all data and seasonally, in

order to verify the predominant sea state. With the aid of power matrices of wave energy converters, the data of the occurrence diagrams with the power matrices for five different converter devices were crossed in order to verify which converter device best adapts to the analyzed wave climate, in terms of wave power absorption. A brief analysis was also made of the availability of the energy potential of waves according to the decrease of the depth, as the waves propagate towards the coast, in order to investigate the modification that occurs in the wave power due to the ocean floor. The SSG (Sea Slot-cone Generator) and Wave Dragon are the most suitable converters for the sea state in Tramandaí, being the SSG device, which has adapted to all depths analyzed.

Keywords: Wave energy. Power matrices. Wave energy converters.

## REFERÊNCIAS

- AMUNDARAIN, M. et al. Wave energy plants: Control strategies for avoiding the stalling behaviour in the Wells turbine. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 35, n. 12, p.2639-2648, dez. 2010.
- ANDRÉ, R. A. A. **Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas**. 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto. 2010.
- ASSIS, L. E. **Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul**. 2010. 82 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- ASSIS, L. E.; BELUCO, A.; ALMEIDA, L. E. B. Avaliação e aproveitamento da energia de ondas oceânicas no litoral do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 18, n. 3, p. 21-29, jul./set. 2013.
- BABARIT, A. et al. Numerical benchmarking study of a selection of wave energy converters. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 41, p.44-63, maio 2012.
- BAHAJ, A. S. Generating electricity from the oceans. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 15, n. 7, p.3399-3416, set. 2011.
- BEHRENS, Sam et al. Wave energy for Australia's National Electricity Market. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 81, p.685-693, set. 2015.
- BERNARDINO, M.; RUSU, L.; SOARES, C. G. Evaluation of the wave energy resources in the Cape Verde Islands. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 101, p.316-326, fev. 2017.

BESERRA, E. R. **Avaliação de sítios para o aproveitamento dos recursos energéticos das ondas do mar**. 2007. 198 p. Tese (doutorado) – Programa de Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

BESERRA, E. R. et al. Princípios para implantação da usina piloto de energia das ondas e suas aplicações. In: Congresso Brasileiro de Defesa Do Meio Ambiente, 8, 2005, Rio de Janeiro. **Anais do 8º Congresso Brasileiro de Defesa Do Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.

CARBALLO, R. et al. A high resolution geospatial database for wave energy exploitation. **Energy**, [s.l.], v. 68, p.572-583, abr. 2014a.

CARBALLO, R. et al. A tool for combined WEC-site selection throughout a coastal region: Rias Baixas, NW Spain. **Applied Energy**, [s.l.], v. 135, p.11-19, dez. 2014b.

CARBALLO, R. et al. The intra-annual variability in the performance of wave energy converters: A comparative study in N Galicia (Spain). **Energy**, [s.l.], v. 82, p.138-146, mar. 2015.

CARBALLO, R.; IGLESIAS, G. A methodology to determine the power performance of wave energy converters at a particular coastal location. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 61, p.8-18, set. 2012.

CARVALHO, J. T. **Simulação da distribuição de energia das ondas oceânicas ao largo do litoral brasileiro**. 2010. 143 p. Dissertação (mestrado) – Curso de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

COLI, A. B. **Estudo sobre o clima de ondas em Rio Grande, RS**. 2000. 79 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Oceânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2000.

COPPE/UFRJ (Rio de Janeiro). Planeta Coppe Notícias (Ed.). **Rio de Janeiro terá geração de energia pelas ondas do mar**. 2013. Disponível em: <<http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/rio-de-janeiro-tera-geracao-de-energia-pelas-ondas-do-mar>>. Acesso em: 28 maio 2017.

CUCHIARA, D.C. et al. Determination of the wave climate for the southern Brazilian shelf. **Continental Shelf Research**, [s.l.], v. 29, n. 3, p. 545-555, mar. 2009.

D'AQUINO, C. de A. **Calibração e aplicação do modelo numérico Genesis nas praias de Tramandaí e Imbé – RS**. 2004. 101 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. 2 ed. [S.l.]: World Scientific, 1991. 353 p.

DEFNE, Z.; HAAS, K. A.; FRITZ, H. M. Wave power potential along the Atlantic coast of the southeastern USA. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 34, n. 10, p.2197-2205, out. 2009.

DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of OWC system. **Energy**, [s.l.], v. 36, n. 5, p.2360-2366, maio 2011.

ECORYS Nederland BV. **Study in support of Impact Assessment work for Ocean Energy**. Rotterdam: Ecorys, 2013. 91 p.

ESTEFEN, S. et al. Geração de energia elétrica pelas ondas do mar. In: **Seminário Internacional de Energia de Ondas**. Rio de Janeiro: 2006. p. 02–24.

FALCÃO, A. F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 14, n. 3, p.899-918, abr. 2010.

FALNES, J. A review of wave-energy extraction. **Marine Structures**, [s.l.], v. 20, n. 4, p.185-201, out. 2007.

FLEMING, F. P. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil**. 2012, 85 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Planejamento Energético, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T. J. T. Analysis of the nearshore wave energy resource. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 34, n. 7, p.1709-1715, jul. 2009.

FONSECA, N.; PESSOA, J. Numerical modeling of a wave energy converter based on U-shaped interior oscillating water column. **Applied Ocean Research**, [s.l.], v. 40, p.60-73, mar. 2013.

GARCÍA-MEDINA, G.; ÖZKAN-HALLER, H. T.; RUGGIERO, P. Wave resource assessment in Oregon and southwest Washington, USA. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 64, p.203-214, abr. 2014.

GOMES, M. das N. et al. Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de Rio Grande. **Vetor**, Rio Grande, v.19, n.2, p. 58-73, 2009.

GUNN, K.; STOCK-WILLIAMS, C. Quantifying the global wave power resource. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 44, p.296-304, ago. 2012.

HENRIQUES, J. C. C. et al. Wave energy resource assessment for a breakwater-integrated oscillating water column plant at Porto, Portugal. **Energy**, [s.l.], v. 63, p.52-60, dez. 2013.

IGLESIAS, G.; CARBALLO, R.. Wave energy potential along the Death Coast (Spain). **Energy**, [s.l.], v. 34, n. 11, p.1963-1975, nov. 2009.

IGLESIAS, G.; CARBALLO, R.. Wave energy resource in the Estaca de Bares área (Spain). **Renewable Energy**, [s.l.], v. 35, n. 7, p.1574-1584, jul. 2010.

IGLESIAS, G. et al. Wave energy potential in Galicia (NW Spain). **Renewable Energy**, [s.l.], v. 34, n. 11, p.2323-2333, nov. 2009.



KAMPHUIS, J. W. **Introduction to coastal engineering and management**. 2 ed. [S.l.]: World Scientific, 2010. 654 p.

KHAN, N. et al. Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 72, p.590-604, maio 2017.

KOFOED, J. P. et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 31, n. 2, p.181-189, fev. 2006.

LEHMANN, M. et al. Ocean wave energy in the United States: current status and future perspectives. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 74, p.1300-1313, jul. 2017.

LISBOA, R. C.; TEIXEIRA, Paulo R. F.; FORTES, C. J. Numerical evaluation of wave energy potential in the south of Brazil. **Energy**, [s.l.], v. 121, p.176-184, fev. 2017.

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

MAGAGNA, D.; MONFARDINI, R.; UIHLEIN, A. **JRC ocean energy status report 2016 edition**: technology, market and economic aspects of ocean energy in Europe. Luxemburgo: Joint Research Centre, 2016. 46 p.

MAGAGNA, D.; UIHLEIN, A. Ocean energy development in Europe: Current status and future perspectives. **International Journal Of Marine Energy**, [s.l.], v. 11, p.84-104, set. 2015.

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

MARJANI, A. El. et al. Numerical modelling in wave energy conversion systems. **Energy**, [s.l.], v. 33, n. 8, p.1246-1253, ago. 2008.

MELO FILHO, E. Nota sobre o cálculo do potencial energético de ondas geradas pelo vento para uso em conversores de energia. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica (SEMENGO)**, 5., 2012. Rio Grande: FURG, 2012. 9 p.

MELO FILHO, E.; ROMEU, M. A. R.; HAMMES, G. R. Condições extremas de agitação marítima ao largo de Rio Grande a partir do modelo WW3. In: **Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, 4., 2010. Rio Grande: FURG, 2010. 20 p.

MENDES, R. P. G.; CALADO, M. R. A.; MARIANO, S. J. P. S. Wave energy potential in Portugal - Assessment based on probabilistic description of ocean waves parameters. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 47, p.1-8, nov. 2012.

MORIM, J. et al. A review of wave energy estimates for nearshore shelf waters off Australia. **International Journal Of Marine Energy**, [s.l.], v. 7, p.57-70, set. 2014.

MORIM, J. et al. Wave energy resource assessment along the Southeast coast of Australia on the basis of a 31-year hindcast. **Applied Energy**, [s.l.], v. 184, p.276-297, dez. 2016.

PLATAFORMA DE TRAMANDAÍ (Tramandaí), 2017. Disponível em: <<http://www.plataformadetrandai.com.br/>>. Acesso em: 28 maio 2017.

OLEINIK, P. H.; MARQUES, W. C.; KIRINUS, E. de P. Simulação de ondas oceânicas na costa sul-sudeste brasileira para análise do potencial energético. **Vetor**, Rio Grande, v. 26, n. 2, p. 39-50, 2016.

OSTRITZ, F. F. **Estimativa do potencial energético gerado por ondas na costa do Brasil com ênfase no estado do Ceará**. 2012. 58 p. Dissertação (mestrado) – Programa de Engenharia Oceânica, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

PAREDES, G. M. **Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas**. 2008. 168 p. Dissertação (Mestrado) – Mestrado Integrado em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2008.

PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. **Brazilian Journal Of Oceanography**, [s.l.], v. 58, n. 1, p.53-70, mar. 2010. FapUNIFESP (SciELO).

PRADO, M. G.; GARDNER, F.; DAMEN, M.; POLINDER, H. Modelling and test results of the Archimedes wave swing. **Journal of Power and Energy**, [s.l.], v. 220, n. 8, p. 855-868, 2006.

QUIRAPAS, M. A. J. R. et al. Ocean renewable energy in Southeast Asia: A review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 41, p.799-817, jan. 2015.

ROBERTSON, B. R. D.; HILES, C. E.; BUCKHAM, B. J. Characterizing the near shore wave energy resource on the west coast of Vancouver Island, Canada. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 71, p.665-678, nov. 2014.

RUSU, L.; ONEA, F. The performance of some state-of-the-art wave energy converters in locations with the worldwide highest wave power. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], v. 75, p.1348-1362, ago. 2017.

SILVA, D.; RUSU, E.; SOARES, C. G. Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the Portuguese nearshore. **Energies**, v. 6, n. 3, p. 1344-1364, 2013.

SILVA, J. S. da. **Viabilidade de geração de energia elétrica através de ondas oceânicas no litoral norte do Rio Grande do Sul**: estudo de um sistema híbrido de energias renováveis. 2012. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012. 117 p.

STRAUCH, J. C. et al. O padrão das ondas de verão e outono no litoral sul e norte do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 14, n. 4, p. 29-37, out./dez. 2009.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Y. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 17, p. 11-23, 2005.

THORPE, T. W. **A brief review of wave energy**. Harwell Laboratory, Energy Technology Support Unit, 1999.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essentials of oceanography**. 10. ed. [s.l.]: Pearson Prentice Hall, 2011. 576 p.

VECCHIA, L. C. D. **Modelagem e dimensionamento de um sistema de geração de energia a partir das ondas do oceano**. 2016. 27 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

VEIGAS, M. et al. A proposed wave farm on the Galician coast. **Energy Conversion And Management**, [s.l.], v. 99, p.102-111, jul. 2015.

VIOLANTE – CARVALHO, N. et al. Sobre os mecanismos de imageamento do radar de abertura sintética SAR para a estimação do espectro direcional de ondas geradas pelo vento. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 28, n. 4, p. 593-607, 2010.

WHITTAKER, T. et al. The development of Oyster - A shallow water surging wave energy device. In **Proceedings of the 7th European Wave and Tidal Energy Conference**, Porto, Portugal, 11–14 Setembro 2007.

WU, S.; LIU, C.; CHEN, X. Offshore wave energy resource assessment in the East China Sea. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 76, p.628-636, abr. 2015.

ZANCANELLA, A. C. B. **Estudo comparativo e modelagem dinâmica de conversores de energia a partir de ondas oceânicas**. 2016. 146 P. Dissertação (mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

ZANDOMENEGO, R. **Potencial energético de ondas e solar para conversão em energia elétrica em uma plataforma de pesca**: estimativas e viabilidade econômica. 2016. 33 p. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Curso de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

ZANDOMENEGO, R; SCHMIDT, N L; A D'AQUINO, C de. Estimativa do potencial para geração de energia elétrica em uma plataforma de pesca no sul de Santa Catarina. In: Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense (SICT-SUL), 4., 2015, Santa Rosa do Sul. **Anais do 4º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense**. Santa Rosa do Sul: IFC, 2015. v. 1, p. 702 - 715. Disponível em: <<http://www.criciuma.ifsc.edu.br/sict-sul/images/Anais2015.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2017.

ZHOU, G.; HUANG, J.; ZHANG, G. Evaluation of the wave energy conditions along the coastal waters of Beibu Gulf, China. **Energy**, [s.l.], v. 85, p.449-457, jun. 2015.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Édio e Anélia, os quais foram fundamentais para que eu pudesse concluir mais essa etapa da vida acadêmica e por sempre terem me incentivado a ter dedicação e amor pelos estudos.

À minha professora orientadora Carla de Abreu D'Aquino, por todo o auxílio prestado e conhecimento adquirido durante os anos de iniciação científica e principalmente durante a elaboração deste Trabalho de Conclusão de Curso.

Ao meu namorado Arthur, por todo apoio e compreensão durante a graduação e por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos professores da Universidade Federal de Santa Catarina, por todo conhecimento transmitido ao longo do curso, pelo auxílio prestado sempre que necessário e pela competência de seu trabalho em formar profissionais cada vez melhores.

Por fim, seria injusto citar nomes, pois ao longo desta caminhada foram muitas as pessoas que me auxiliaram de várias formas, seja em relação aos estudos, trabalhos e provas ou proferindo palavras de apoio e incentivo, àqueles que me incentivaram a seguir em frente apesar das muitas dificuldades encontradas no percurso, minha eterna gratidão a todos vocês.