

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - CAMPUS ARARANGUÁ

LEONARDO CASAGRANDE DALLA VECCHIA

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

Araranguá

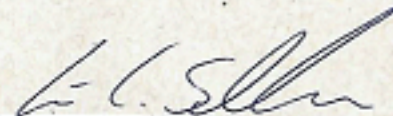
2016

LEONARDO CASAGRANDE DALLA VECCHIA

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

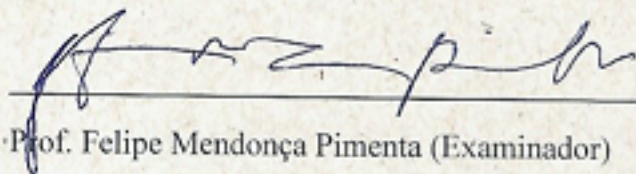
Aprovado em: 07/07/2016



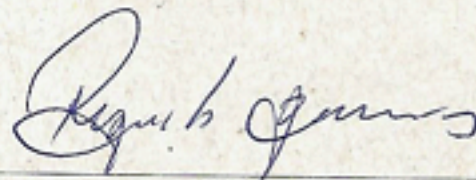
Prof. César Cataldo Scharlau (Orientador)



Prof. Giuliano Arns Rampinelli (Examinador)



Prof. Felipe Mendonça Pimenta (Examinador)



Prof. Reginaldo Geremias (Supervisor)

MODELAGEM E DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS DO OCEANO

Leonardo Casagrande Dalla Vecchia ¹

RESUMO

Este trabalho aborda a modelagem e o dimensionamento de um dispositivo de extração da energia proveniente das ondas do oceano, considerando a utilização de um conversor do tipo Coluna de Água Oscilante (CAO ou OWC, do inglês *Oscillating Water Column*), composto por tubos fixados nos pilares de uma plataforma de pesca, na cidade de Balneário Arroio do Silva/SC. Esta aplicação em particular representa uma condição de operação diferente do que já foi considerada em outros estudos sobre o tema. A modelagem deste dispositivo é realizada utilizando conceitos de mecânica dos fluidos, a fim de descrever as características físicas do escoamento do ar no interior do dispositivo, otimizar o dimensionamento do dispositivo e determinar as perdas de velocidade do escoamento devido à influência das paredes do tubo, as perdas de carga e o afunilamento. Para a conversão do movimento do ar em energia mecânica foi considerada a utilização de uma turbina *Wells*. A simulação no domínio do tempo foi realizada utilizando Matlab/Simulink levando em conta os parâmetros atuais, um regime específico das ondas e a análise dos fluidos realizada no Autodesk CFD. Os resultados obtidos permitem otimizar o dimensionamento do dispositivo e avaliar o desempenho do OWC sob a influência de diferentes fatores.

Palavras-chave: Energia das ondas. Coluna de Água Oscilante. Modelagem.

1 INTRODUÇÃO

A busca por novos dispositivos com capacidade de geração de energia utilizando fontes renováveis é objeto de discussão em todo o mundo devido ao grande apelo para redução de emissões de gases poluentes e minimização dos impactos ambientais. Esses são alguns aspectos que motivam a utilização de fontes renováveis de energia como o sol, o vento, os rios e, nesse caso em especial, as ondas (FALCÃO, 2010).

¹Graduando do Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Aranguá, Rodovia Governador Jorge Lacerda, 3201, Jardim das Avenidas Aranguá, Santa Catarina, Brasil, CEP 88905-355. E-mail: leonardo.casagrande@grad.ufsc.br

A conversão da energia das ondas em energia elétrica tem sido utilizada em diversos países, onde protótipos e plantas de geração são instalados a fim de suprir a demanda energética de pequenas cidades ou outras instalações. Conforme Estefen et al. (2006), a energia obtida a partir das ondas pode ter impactos positivos na matriz energética brasileira, dado que o litoral é extenso, com aproximadamente 9000 km. Estima-se que seja possível disponibilizar aproximadamente 40 GW para o sistema interligado brasileiro, considerando apenas o aproveitamento ao longo do litoral das regiões sul e sudeste (ASSIS; BELUCO; ALMEIDA, 2013).

Vários estudos já foram elaborados sobre a extração da energia das ondas e como transformá-la em energia elétrica utilizando novas tecnologias e dispositivos, como exemplos é possível citar Falcão (2010), Falnes (2007) e Mehrangiz et al. (2013). As tecnologias mais pesquisadas podem ser divididas em: dispositivos de coluna de água oscilante (OWC, do inglês *Oscillating Water Column*), dispositivos de corpos flutuantes e dispositivos de galgamento.

O estudo apresentado nesse trabalho será particularizado para a tecnologia OWC. A principal motivação para essa escolha é a possibilidade de utilizar estruturas já existentes para fixação do equipamento, o que poderia reduzir custos e tempo de instalação. Nesse caso será considerado o funcionamento do dispositivo em uma plataforma de pesca. Ao conhecimento dos autores, a instalação do OWC sob essas condições tem sido pouco estudada em outras pesquisas.

A eficiência de dispositivos OWC tem sido tema de várias pesquisas (GRIMMLER et al., 2012). No entanto, muitos aspectos ainda merecem uma investigação mais aprofundada, por exemplo estabelecer um método para escolha do formato e do dimensionamento mais adequados da estrutura mecânica de dispositivos tubulares para o regime de ondas do local da instalação. Esse estudo tem sido feito com mais frequência apenas para outras configurações deste dispositivo (DIZADJI; SAJADIAN, 2011). Uma das ferramentas que pode ser utilizada na investigação destes aspectos é a simulação de modelos matemáticos que reproduzam o comportamento físico do dispositivo de extração de energia das ondas. Dessa forma, é possível avaliar o desempenho do equipamento sob diversas condições.

Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a elaboração e análise de um modelo matemático para sistemas de geração de energia a partir das ondas do oceano, com o foco em uma aplicação envolvendo um dispositivo do tipo OWC operando em uma plataforma de pesca. Com base nos resultados preliminares apresentados em Vecchia et al. (2015b, 2015a), é realizada uma análise da influência que as paredes do tubo, a perda de carga e o afunilamento do dispositivo causam na velocidade final do ar que escoar em seu interior. Adicionalmente, são avaliadas formas de dimensionamento do dispositivo e sua otimização. A modelagem e o dimensionamento são avaliados a partir de uma análise de dinâmica de fluidos realizadas nos

programas Matlab/Simulink e Autodesk CFD, onde foram definidos parâmetros como tipo de material utilizado, o volume de controle analisado no problema, as condições de contorno, entre outros.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os principais pressupostos teóricos relacionados ao tema estão elencados a seguir.

2.1 Energia das Ondas

A energia das ondas, de certa forma, pode ser considerada uma forma concentrada da energia solar. Tal consideração pode ser feita devido ao processo de geração da maioria das ondas, que se inicia com o aquecimento desigual da superfície da Terra. Esse aquecimento desigual acarreta o surgimento dos ventos que, ao soprarem sobre a superfície do oceano, acabam por transmitir sua energia para as ondas. Depois de geradas, as ondas tem a característica de poder viajar por milhares de quilômetros em alto mar sem que haja uma perda significativa na sua energia. A potência de uma onda é proporcional ao quadrado de sua amplitude e ao seu período, o que faz com que ondas de elevada amplitude e de período elevado excedam normalmente os 50 kW por metro de frente de onda (CRUZ; SARMENTO, 2004; COELHO, 2007).

Como consequência do grande potencial de exploração da energia das ondas, diversos trabalhos vêm sendo realizados com o intuito de modelar ondas oceânicas de forma a obter, a partir das características específicas de cada local, o comportamento da onda no mesmo (CANELLA, 1997; MATOS et al., 2013; CUCHIARA et al., 2006). A partir destes modelos e de dados característicos de onda é possível estimar diversos parâmetros, como o potencial a ser explorado através dos vários métodos possíveis de conversão vistos a seguir.

2.2 Dispositivos Conversores de Energia das Ondas

Os dispositivos que convertem a energia das ondas em energia elétrica podem ser classificados de duas principais formas: através de sua proximidade com a costa ou de acordo com o princípio físico de seu funcionamento (CRUZ; SARMENTO, 2004; SCHÄFER, 2012).

A classificação devido à distância da costa, mostrada na Figura 1, não se dá pela distância propriamente dita, mas sim pela profundidade que existe no local. As classes compreendem os dispositivos costeiros, os próximos a costa e os afastados da costa.

Os dispositivos costeiros (*on-shore*) são aqueles em que a estrutura é fixa e está situada

na orla costeira. Com a redução na profundidade, as ondas do mar próximas a costa acabam interagindo com o fundo oceânico, reduzindo sua velocidade e seu comprimento e aumentando sua altura quanto mais próximo da costa o dispositivo está localizado. Além disto, esta proximidade traz alguns benefícios, como a facilidade de acesso para manutenção e o fato de não requerer sistemas complexos de transmissão da energia gerada (ANDRÉ, 2010; CRUZ; SARMENTO, 2004; CLÉMENT et al., 2002; SILVA, 2012).

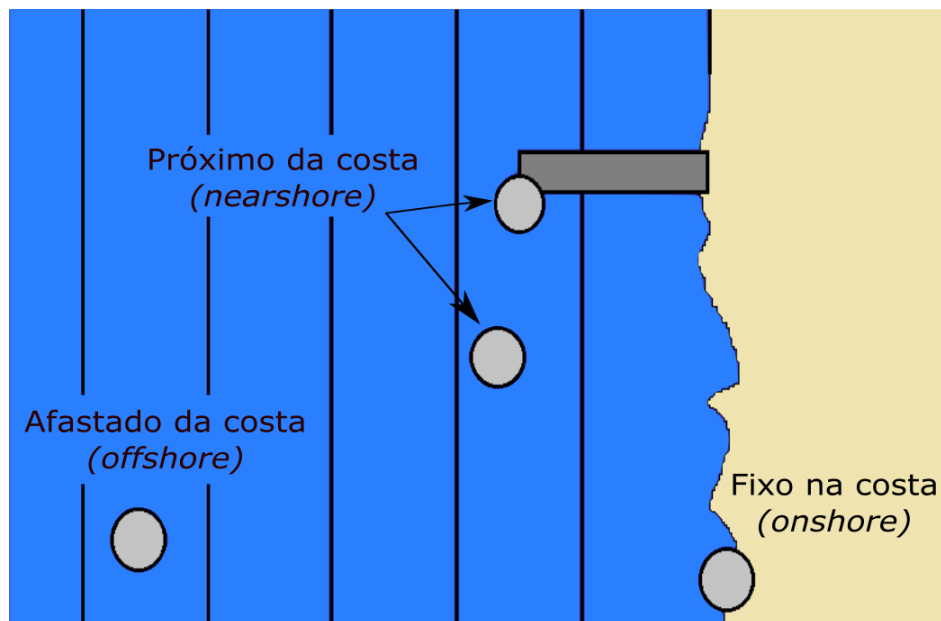


Figura 1 – Classificação de dispositivos quanto à distância à linha de costa. Fonte: adaptado de Paredes (2008)

Os dispositivos próximos da costa (*near-shore*) se caracterizam pela localização a uma profundidade que varia de 8 a 25 metros, onde os efeitos dissipativos da energia por frente de onda devido a arrebentação são importantes para a estimativa da energia da mesma. Além disso, os dispositivos localizados próximos a costa solicitam sistemas de transmissão de energia mais complexos (ANDRÉ, 2010; CRUZ; SARMENTO, 2004; CLÉMENT et al., 2002).

Os dispositivos instalados afastados da costa (*off-shore*) são localizados a mais de 25 metros de profundidade. É a partir dessa distância que se tem um melhor aproveitamento do potencial oferecido pelas ondas. Contudo, o aproveitamento da energia gerada requer um sistema complexo de cabos de transmissão e o acesso para a manutenção desses dispositivos pode ser difícil (ANDRÉ, 2010; CRUZ; SARMENTO, 2004; CLÉMENT et al., 2002).

Os dispositivos conversores de energia das ondas podem possuir uma classificação mais técnica, que leva em conta o princípio físico no qual o seu funcionamento está baseado. Esta classificação compreende os dispositivos de corpos flutuantes de absorção pontual ou progressiva, de coluna de água oscilante e de galgamento.

Os dispositivos de corpos flutuantes de absorção pontual ou progressiva têm seu funcionamento baseado nas oscilações que os corpos flutuantes produzem devido às ondas do mar. Tais oscilações acionam um sistema hidráulico que converte a energia das ondas em energia elétrica. Os corpos flutuantes de absorção pontual são aqueles que os flutuadores se movem verticalmente ou em torno de um eixo, conforme mostrado na Figura 2. Já nos progressivos, os flutuadores se movem sobre sua própria estrutura (ANDRÉ, 2010; CLÉMENT et al., 2002).

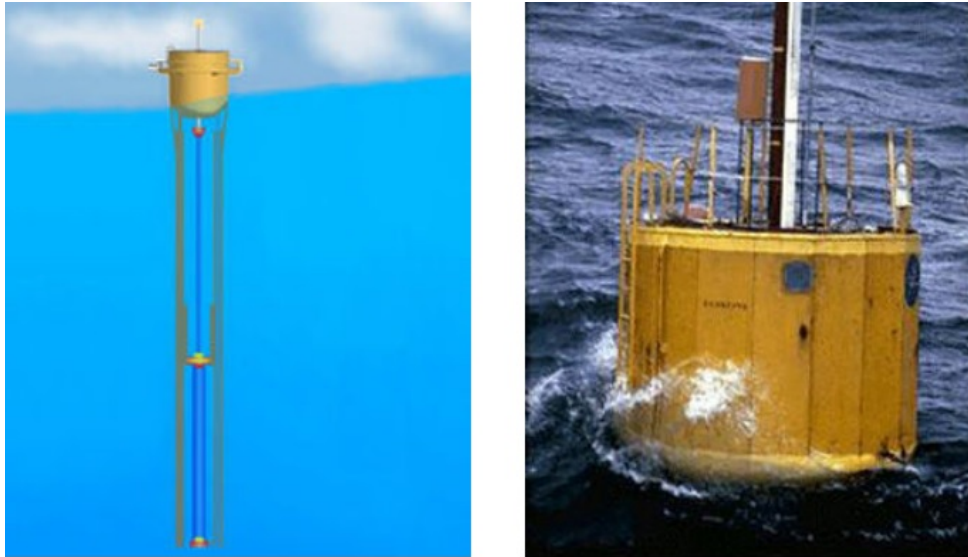


Figura 2 – AquaBuoy: Sistema conversor de energia das ondas do mar de absorção pontual. Fonte: adaptado de Meisen e Loiseau (2009)

No dispositivo de galgamento, as ondas são encaminhadas através de rampas para um reservatório que fica localizado a uma altura superior ao nível do mar. Quando a água retorna ao mar, a mesma passa por turbinas que acionam um gerador. O funcionamento deste dispositivo pode ser observado na Figura 3. Estes dispositivos, geralmente instalados a uma distância maior

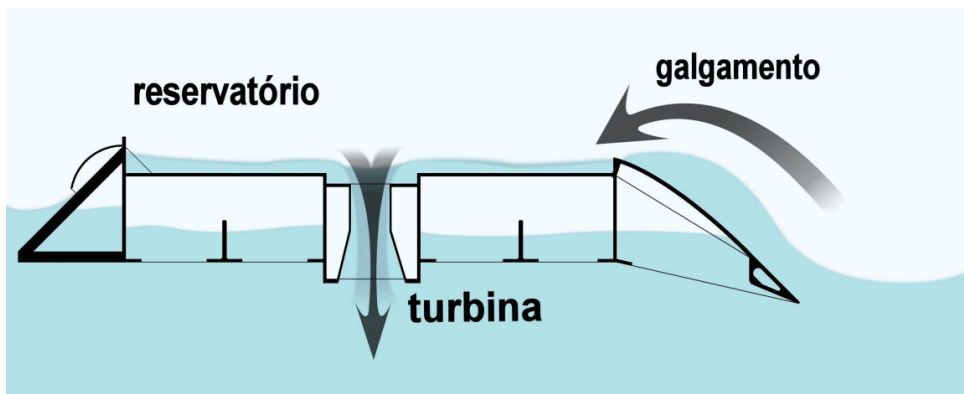


Figura 3 – Projeto WaveDragon: Princípio de funcionamento de um conversor de energia oceânica off-shore do tipo galgamento. Fonte: adaptado de Kofoed et al. (2006)

da costa, possuem a característica de explorar mais plenamente o recurso energético, apresentar menores restrições quanto à sua localização e reduzir os impactos visuais. No entanto, apresentam dificuldades na transmissão da energia, na fixação da estrutura e na manutenção do dispositivo (ANDRÉ, 2010; CLÉMENT et al., 2002).

O OWC é um dispositivo parcialmente submerso instalado próximo à costa que gera energia, basicamente, através da compressão e da descompressão do ar encontrado dentro da estrutura (ANDRÉ, 2010; GOMES et al., 2010; CLÉMENT et al., 2002). Esse movimento do ar se dá devido à entrada e a saída da água na parte inferior deste dispositivo. Mais detalhes do funcionamento e da estrutura serão discutidos na sequência.

2.3 Dispositivo OWC

Os dispositivos OWC são estruturas ocas parcialmente submersas, que possuem abertura para o mar abaixo da superfície livre da água, na sua parte inferior e na superior possuem uma abertura para o ar, que é equipada com uma turbina e um gerador, responsáveis pela geração da eletricidade. A Figura 4 contém um exemplo deste dispositivo (ANDRÉ, 2010; GOMES et al., 2010; CLÉMENT et al., 2002).

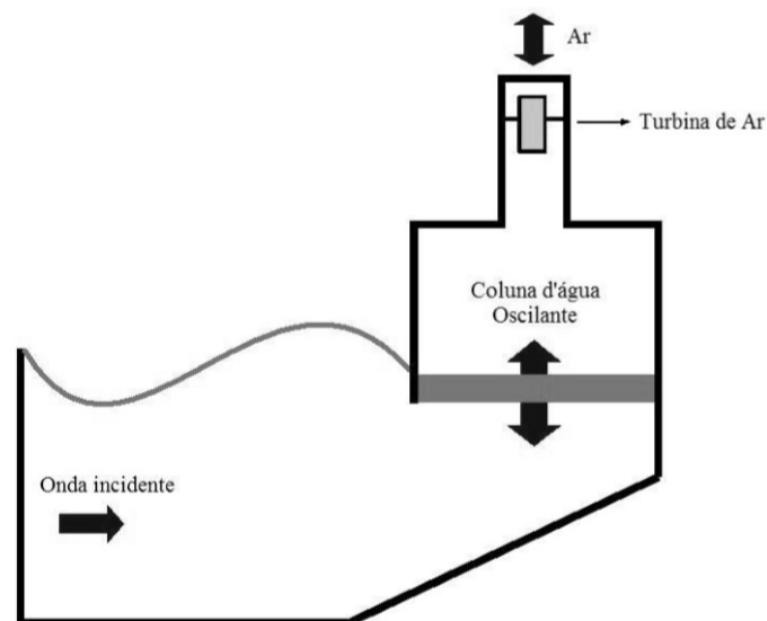


Figura 4 – Dispositivo do tipo OWC. Fonte: adaptado de Gomes et al. (2010)

Nos dispositivos OWC, o processo de geração de eletricidade envolve duas etapas, que podem ser observadas na Figura 5. A primeira etapa consiste na "entrada" da onda no dispositivo

OWC. Nesta etapa, a pressão dentro do dispositivo aumenta, forçando o ar a passar pela turbina. Na segunda etapa, a onda regressa ao mar, fazendo com que o ar passe novamente pela turbina, mas desta vez no sentido contrário (GOMES et al., 2010).

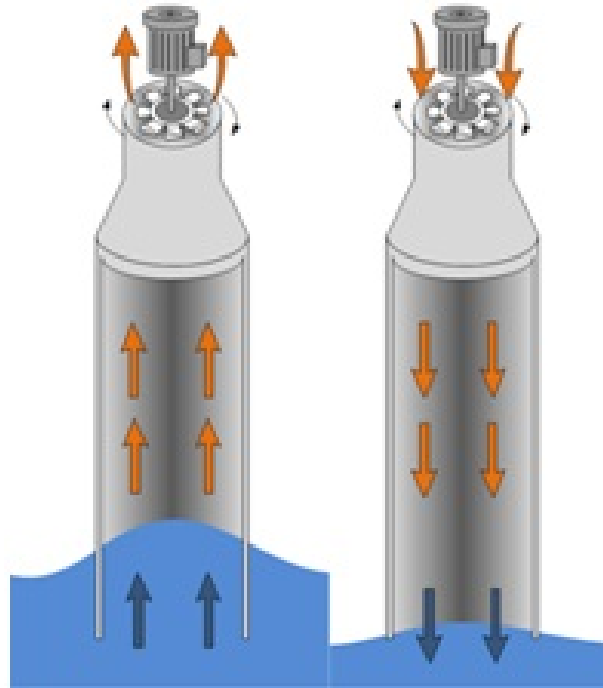


Figura 5 – Princípio de funcionamento do dispositivo de coluna de água oscilante. Fonte: do autor

Para que haja um aproveitamento desses dois sentidos de fluxo de ar, utiliza-se uma turbina do tipo *Wells*, que tem por característica manter o sentido de rotação independentemente do sentido de escoamento do ar. Esta característica é decorrente da simetria existente nas pás desta turbina (ANDRÉ, 2010; DIAS et al., 2013).

A utilização de uma turbina *Wells* não é a única forma de transformar a energia cinética em energia mecânica. Existem estudos avaliando a utilização de outras turbinas em diferentes configurações, bem como variações na estrutura física dos dispositivos de coluna de água oscilante (SCHÄFER, 2012; JAYASHANKAR et al., 2009). Essas variações visam melhorar sua performance ou então adaptar o dispositivo para ser inserido em uma estrutura previamente construída. Como exemplo destas variações, este trabalho estuda a inserção de um dispositivo OWC em uma plataforma de pesca, vista na Figura 6, sendo esta uma configuração vantajosa devido ao aproveitamento da plataforma como uma estrutura já existente.

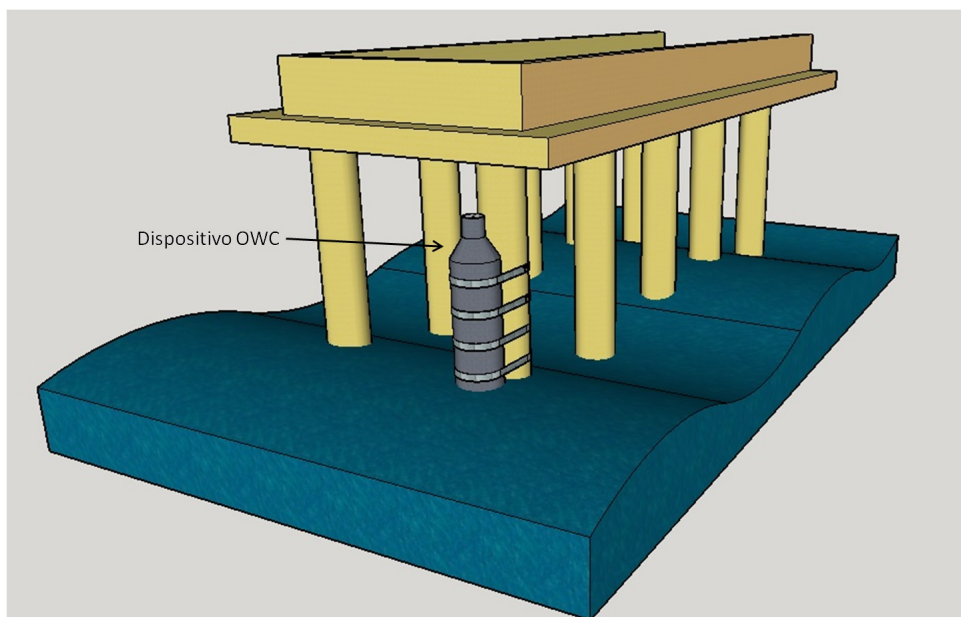


Figura 6 – Instalação do dispositivo na plataforma de pesca. Fonte: do autor

2.4 Potencial brasileiro em energia das ondas

Devido ao extenso litoral brasileiro, estima-se que o Brasil é capaz de receber usinas que juntas produziriam cerca de 87 GW de energia. Segundo especialistas da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), é possível converter cerca de 20 % desta energia, o que equivaleria a 17 % da capacidade total instalada no país (SCHÄFER, 2012).

Em 2011 foi instalada no Brasil a primeira usina de ondas da América Latina, que está localizada no porto de Pecém - Ceará (Figura 7). A partir da instalação dessa usina, a geração de energia elétrica através das ondas começou a ser vista com maior importância no país (SCHÄFER, 2012). Como exemplo desta maior visibilidade é possível citar trabalhos desenvolvidos no último ano no Brasil, onde diferentes abordagens dos dispositivos foram analisadas e foram estimados valores de geração de energia mecânica em termos de potência e de torque (VECCHIA et al., 2015b, 2015a; GONÇALVES; FEIJÓ; ABDALLAH, 2015; MOREIRA, 2015).

Apesar de haver uma boa perspectiva de crescimento, a energia das ondas, no que diz respeito a sua visibilidade e o estudo do seu aproveitamento, são temas ainda pouco conhecidos e estudados no Brasil.



Figura 7 – Usina de ondas no porto de Pecém, Ceará. Fonte: Silva (2012)

2.5 Modelo Matemático

O estabelecimento de modelos matemáticos para dispositivos OWC tem sido tema de pesquisas sob diferentes abordagens. Em Morrison e Greated (1992) é desenvolvido um modelo matemático para um OWC considerando um regime conhecido de ondas e os resultados teóricos são comparados com dados experimentais obtidos em um canal de ondas. Em Brendmo, Falnes e Lillebekken (1997), duas abordagens para a modelagem do OWC são apresentadas. Na primeira, mais adequada para ondas de baixa frequência, a potência de entrada na câmara de ar é obtida como o produto da força da rede de ondas atuando na superfície interna de água pela velocidade vertical desta superfície. Esta superfície é então considerada, sob algumas condições, como um pistão rígido com massa desprezível. Na segunda abordagem, mais geral e também aplicável em regimes de alta frequência, a potência de entrada na câmara de ar é calculada pelo produto do fluxo de volume da superfície interna de água pela pressão do ar na câmara acima do equipamento. Nesta referência também são apresentados os modelos massa-mola equivalentes, assim como os circuitos análogos.

3 METODOLOGIA

Nesta seção são expostos os métodos utilizados para se alcançar os resultados apresentados neste trabalho.

3.1 Modelagem do OWC

O modelo elaborado neste trabalho tem como parâmetro de entrada a velocidade da onda incidente no dispositivo OWC, apresentado na Figura 8, sendo as variáveis de saída a velocidade do ar que passa pela turbina acoplada no topo deste dispositivo e a potência mecânica gerada por esta turbina. Desta forma, optou-se por dividir a análise em etapas. Primeiramente, determinou-se a velocidade da onda incidente baseando-se em modelos de ondas oceânicas e nas características do perfil de ondas encontradas no local. A segunda etapa consistiu em representar o comportamento físico do escoamento do ar no interior do dispositivo, incluindo perdas viscosas, perdas de carga e a aceleração do ar devido ao afunilamento. Por fim, buscou-se na literatura modelos de turbinas utilizadas para esta aplicação e calculou-se a potência mecânica gerada pela turbina baseando-se em parâmetros construtivos pré definidos.

3.1.1 Onda Incidente

Dean e Dalrymple (1991), Bouali e Larbi (2013) apresentam a equação da velocidade da onda incidente no dispositivo na direção z , que é definida por

$$V_1 = \frac{H}{2} \frac{gk}{\omega} \frac{\sinh k(h+z)}{\cosh(kh)} \sin(kx - \omega t) + \frac{3}{16} \frac{H^2 \omega k \sinh 2k(h+z)}{\sinh^4(kh)} \sin 2(kx - \omega t) \quad (3.1)$$

onde H é a altura da onda, g é a aceleração da gravidade, h é a profundidade do local, x é a posição da onda, t é o tempo, z é a variação da posição entre a superfície livre da água e o assoalho oceânico, k é o número de onda, dado por $k = 2\pi/L$, onde L é o comprimento de onda e ω é a frequência da onda, dada por $\omega = 2\pi/T$, onde T é o período da onda.

A variação no espaço da variável z , descrita na equação (3.1), pode ser escrita como $z = \sigma + h$, onde

$$\sigma = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) + \frac{H^2 k \cosh(kh)}{16 \sinh^3(kh)} \cdot [2 + \cosh(2kh)] \cos 2(kx - \omega t) \quad (3.2)$$

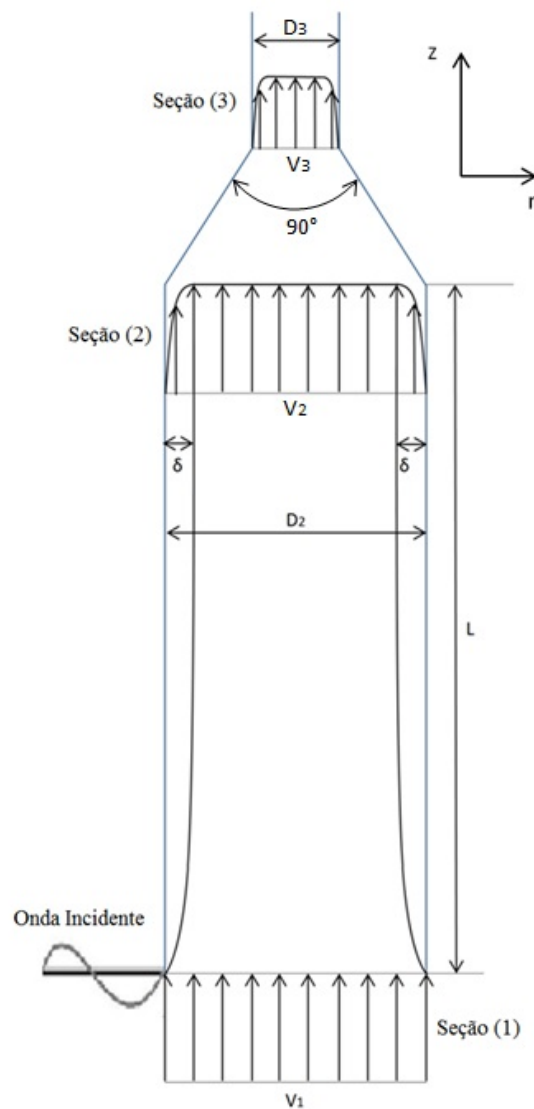


Figura 8 – Diagrama do dispositivo OWC considerado para a modelagem. Fonte: do autor

Para a análise contida neste trabalho, foram desconsideradas as parcelas refletidas e difratadas da onda, sendo tal suposição justificada pela utilização de um tubo de espessura fina que torna as vibrações originadas pelo impacto das ondas incidentes desprezíveis.

3.1.2 Ar no Interior do Dispositivo

Para a modelagem do comportamento físico do ar no interior do dispositivo OWC utilizou-se a velocidade da onda incidente, modelada na subseção 3.1.1, como parâmetro de entrada na seção 1 do tubo da Figura 8. Na análise, foi considerado, assim como em Brendmo, Falnes e Lillebekken (1997), que a coluna de água no interior do dispositivo comporta-se como

um pistão rígido de massa desprezível, sendo possível então desprezar as variações radiais de velocidade. Outra consideração importante foi a de que toda a energia contida na onda é transmitida para o ar logo acima da superfície livre da água, podendo então estabelecer que a velocidade da onda incidente é também a velocidade do ar na base interna do tubo (seção 1).

A modelagem do dispositivo baseou-se em dois conceitos fundamentais de mecânica dos fluidos. O primeiro consiste na formação de uma região onde o fluido que escoar no interior do tubo sofre influência da parede do mesmo, ocasionando assim uma redução na velocidade do fluido escoante dentro desta região, chamada de camada limite (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 1985). Nesse caso, a velocidade na seção 2 depende da espessura da camada limite e da velocidade na seção 1, sendo determinadas pelas seguintes equações

$$Re_L = \frac{V_1 L}{\nu} \quad (3.3)$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{5,48}{\sqrt{Re}} \quad (3.4)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = 2 \left(\frac{y}{\delta} \right) - \left(\frac{y}{\delta} \right)^2 \quad (3.5)$$

$$\frac{\delta}{L} = \frac{0,382}{Re^{1/5}} \quad (3.6)$$

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{y}{\delta} \right)^{1/7} \quad (3.7)$$

onde Re_L é o número de Reynolds baseado no comprimento do tubo, ν a viscosidade do ar, V_1 a velocidade média do escoamento, L o comprimento do tubo, D_2 o diâmetro do tubo na seção 2, δ a espessura da camada limite, y a distância entre a parede e o ponto de análise e V_2 é a velocidade do escoamento na distância y da parede do tubo apresentado na Figura 8. As equações (3.4) e (3.5) foram utilizadas para escoamentos laminares, onde a velocidade do escoamento é baixa resultando em um número de Reynolds inferior à 2300. Já as equações (3.6) e (3.7) foram utilizadas para escoamentos turbulentos, os quais possuem uma velocidade mais elevada que resulta no surgimento de regiões de turbulência. Este escoamento é identificado por um número de Reynolds maior que 2300.

Outro conceito fundamental, chamado de perda de carga, refere-se a perda de energia decorrente de entradas, acessórios, variações de áreas, entre outros, presentes no escoamento. Nesta análise, tal conceito determina a redução da velocidade que o afunilamento presente no dispositivo irá causar, calculada por

$$h_{lm} = K \left(\frac{\bar{V}^2}{2} \right) \quad (3.8)$$

onde K é o coeficiente de perda, definido na Tabela 1 (FOX; MCDONALD; PRITCHARD, 1985).

Além da perda de carga, o afunilamento ocasiona um outro fator importante para o modelo. A lei de conservação da massa estabelece que toda massa que atravessa a seção 2 deve obrigatoriamente atravessar a seção 3 deste tubo. Desta forma, o ar deve sofrer uma aceleração nesta seção respeitando a relação expressa por

$$\bar{V}_3 = \frac{D_2^2}{D_3^2} \bar{V}_2 \quad (3.9)$$

onde \bar{V}_2 , \bar{V}_3 , D_2 e D_3 representam, respectivamente, as velocidades médias na seção 2 e 3 do tubo e os diâmetros da seção 2 e 3 do tubo.

Para a utilização da equação (3.9) foi considerado que o fluido escoante não sofre variação em sua densidade e que o termo da variação temporal da equação original da lei de conservação de massa pode ser desprezado.

Tabela 1 – Coeficientes de Perda para Contrações Graduais: Dutos Circulares e Retangulares.

Ângulo Incluído (θ) [°]	Razão entre Áreas		
	0,5	0,25	0,1
10	0,05	0,05	0,05
15-40	0,05	0,04	0,05
50-60	0,06	0,07	0,08
90	0,12	0,17	0,19
120	0,18	0,27	0,29
150	0,24	0,35	0,37
180	0,26	0,41	0,43

Fonte: adaptado de Fox, McDonald e Pritchard (1985)

3.1.3 Turbina

Para a modelagem da conversão da velocidade do ar em energia mecânica foi considerada uma turbina *Wells* devido a sua característica de manter o mesmo sentido de rotação independentemente do sentido do escoamento do ar. A Figura 9 apresenta as velocidades e forças atuando nas pás desta turbina que, juntamente com a equação (3.10), mostram a relação entre a velocidade absoluta V , o ângulo de ataque α e a velocidade relativa W .

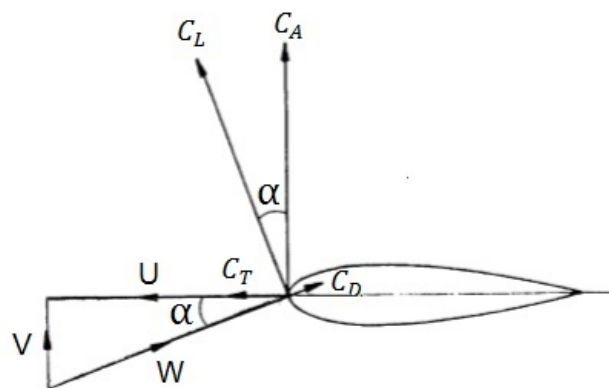
$$W = \frac{V}{\sin \alpha} \quad (3.10)$$

Dias et al. (2013) apresenta um estudo teórico referente aos diferentes tipos de per-

fis aerodinâmico das pás deste tipo de turbina, analisando os perfis NACA0012, NACA0015, NACA0018, NACA0020 e NACA0021. Neste trabalho, assim como em Dias et al. (2013), Raghunathan, Tan e Ombaka (1985) e Webster, Gato et al. (1999), optou-se por utilizar o perfil NACA0021 devido ao seu melhor desempenho. A equação que determina a potência mecânica obtida através da turbina *Wells* pode ser escrita como

$$P_{mec} = \left(\frac{1}{2}\right) \eta \rho A_{var} V_3^3 \quad (3.11)$$

onde η é a eficiência da turbina, ρ é a densidade do ar, A_{var} é a área varrida pelas pás da turbina e V_3 é a velocidade absoluta do escoamento.

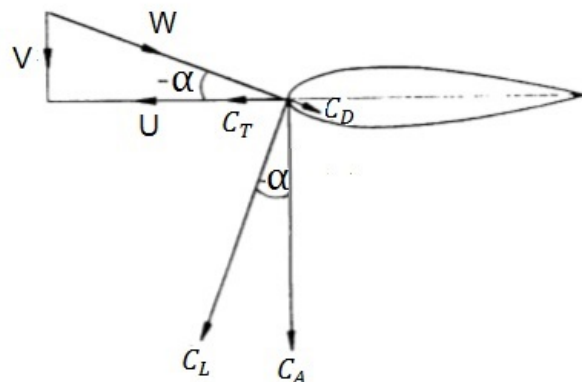


Velocidades:

V : Velocidade Absoluta α : Ângulo de Ataque

U : Velocidade Radial

W : Velocidade Relativa



Forças:

C_L : Sustentação C_T : Tangencial = $C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)$

C_D : Arrasto C_A : Axial = $C_L \cos(\alpha) + C_D \sin(\alpha)$

Figura 9 – Diagrama de forças e velocidades na admissão e exaustão de ar de uma turbina Wells Fonte: adaptado de Dhanasekaran e Govardhan (2005)

3.2 Dimensionamento do OWC

O dimensionamento do dispositivo tem por objetivo definir os principais parâmetros construtivos do tubo a fim de se obter, respeitando também as limitações impostas pelo problema, a maior velocidade na seção 3, o que resulta em uma maior geração de energia. Tal análise teve como base os valores utilizados em Vecchia et al. (2015b, 2015a). A partir destes valores, mantiveram-se fixos os parâmetros do regime de ondas e foram variados os parâmetros construtivos analisados (comprimento do tubo, os diâmetros 2 e 3 e o ângulo incluído), comparando então o impacto que essa variação teria, em termos de magnitude, na velocidade da seção 3 do tubo.

Para a análise do comprimento do tubo, iniciou-se este parâmetro com 2m e este valor foi incrementado em 0,1 m até 4 m. Cada valor de comprimento resultou em uma velocidade média na seção 3 e estas velocidades foram comparadas entre si para se definir o valor ótimo. Utilizando os valores contidos na Tabela 1, aplicou-se esta mesma metodologia para a análise do diâmetro 3 e do ângulo incluído. Para a determinação do diâmetro 2, foram consideradas as dimensões dos pilares da plataforma de pesca com o objetivo de viabilizar uma futura instalação do dispositivo.

3.3 Avaliação do modelo e do dimensionamento

Para avaliar o dimensionamento realizado na seção 3.2, o modelo proposto neste trabalho foi implementado no programa Matlab/Simulink. Este modelo foi simulado utilizando os parâmetros do tubo original, apresentado por Vecchia et al. (2015b, 2015a), e os parâmetros do tubo otimizado pelo dimensionamento, sendo os resultados destas simulações comparados em termos de velocidade e potência mecânica gerada.

O dimensionamento também é avaliado utilizando o programa Autodesk CFD, onde o tubo original e o tubo otimizado são simulados com uma velocidade constante na entrada e as respostas em termos de velocidade na seção 3 do tubo são comparadas.

A avaliação do modelo foi realizada comparando as simulações no programa Autodesk CFD e no programa Matlab/Simulink. No primeiro, elaborou-se o desenho do tubo otimizado. Foram estipuladas duas condições de contorno: na saída do tubo inferiu-se pressão igual a zero, com o objetivo de mostrar que esta superfície está aberta para o ambiente e na entrada utilizou-se a velocidade da onda incidente. No segundo, implementou-se o modelo, elaborado neste trabalho, com os parâmetros do tubo otimizado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Onda Incidente

Para a simulação do modelo apresentado, buscou-se dados de ondas que melhor representasse o perfil de ondas da cidade de Balneário Arroio do Silva. A cidade de Tramandaí, localizada a aproximadamente 130 km ao sul da cidade sob análise, possui características oceanográficas interessantes no que diz respeito a análise feita no presente trabalho. A linha de costa retilínea, associada a planícies costeiras extensas e arenosas de baixa altitude, são características encontradas na zona costeira de Tramandaí, sendo encontradas também na cidade de Balneário Arroio do Silva (TESSLER; GOYA, 2011). Adicionalmente, Siegle e Asp (2007), Alves et al. (2009) e Pianca, Mazzini e Siegle (2010) mostram que, na região que abrange ambas as cidades, o regime de ondas se mostra muito similar.

A Tabela 2 apresenta os valores de período significativo, altura significativa e profundidade encontrados na cidade de Tramandaí. Tais valores foram fornecidos pelos autores de Strauch et al. (2009), onde foi estabelecida a climatologia da zona costeira de Tramandaí. Os principais resultados dessa climatologia são apresentados na Tabela 3.

A Tabela 2 apresenta também o valor de comprimento de onda, calculado a partir das equações presentes em Silva (2012) e dos dados de onda contidos na mesma tabela.

Tabela 2 – Características da onda.

Características	Valores
Período significativo (T)	7,4 s
Altura significativa (H)	1,2 m
Comprimento (L)	75,7 m
Profundidade (h)	17,0 m

Fonte: do autor

Tabela 3 – Climatologia da zona costeira de Tramandaí.

Característica	Estação	Direção predominante	Valores mais frequentes
Alturas significativas	Verão	SE	Entre 0,0 e 3,0 m
	Outono	SSE	Entre 0,0 e 1,5 m
Períodos de pico	Verão	SE	Entre 9 e 12 s
	Outono	SSE	Entre 9 e 12 s
Energia de pico	Verão	SE	Entre 0 e 3 m ² /(Hz.rad)
	Outono	SSE	Entre 0 e 4 m ² /(Hz.rad)

Fonte: adaptado de Strauch et al. (2009)

A velocidade vertical da onda incidente pode ser visualizada na Figura 10.

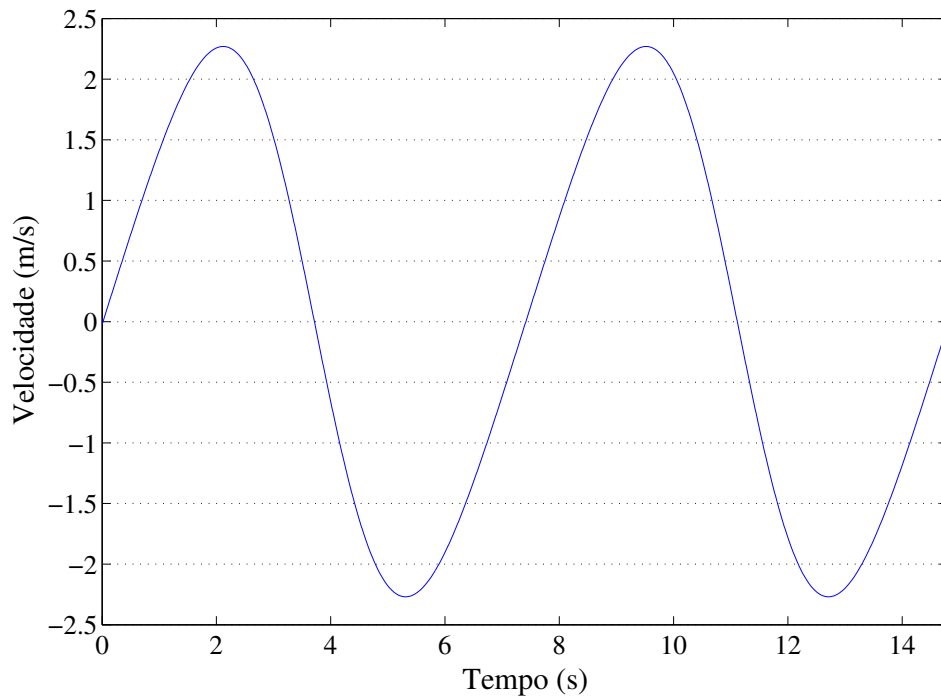


Figura 10 – Velocidade vertical da onda incidente no dispositivo OWC. Fonte: do autor

4.2 Dimensionamento do OWC

Os resultados e discussão referentes ao dimensionamento do OWC são apresentados nesta subsecção.

4.2.1 Comprimento do tubo

Assim como apresentado na subsecção 3.2, para verificar o comprimento do tubo ótimo para o problema exposto, os parâmetros foram variados com um incremento de 0,1 m entre os valores inicial de 2 m e final de 4 m. A Figura 11 mostra que a razão entre a velocidade média na seção 3 e a velocidade média na seção 1 do tubo variou entre 3,58 (para um comprimento de tubo de 2 m) e 3,56 (para um comprimento de tubo de 4 m). A partir destes valores, é possível notar que o comprimento do tubo não interfere de forma significativa nos resultados do problema, pois uma variação de 2 m neste parâmetro acarretou numa variação de apenas 0,64 % na velocidade final.

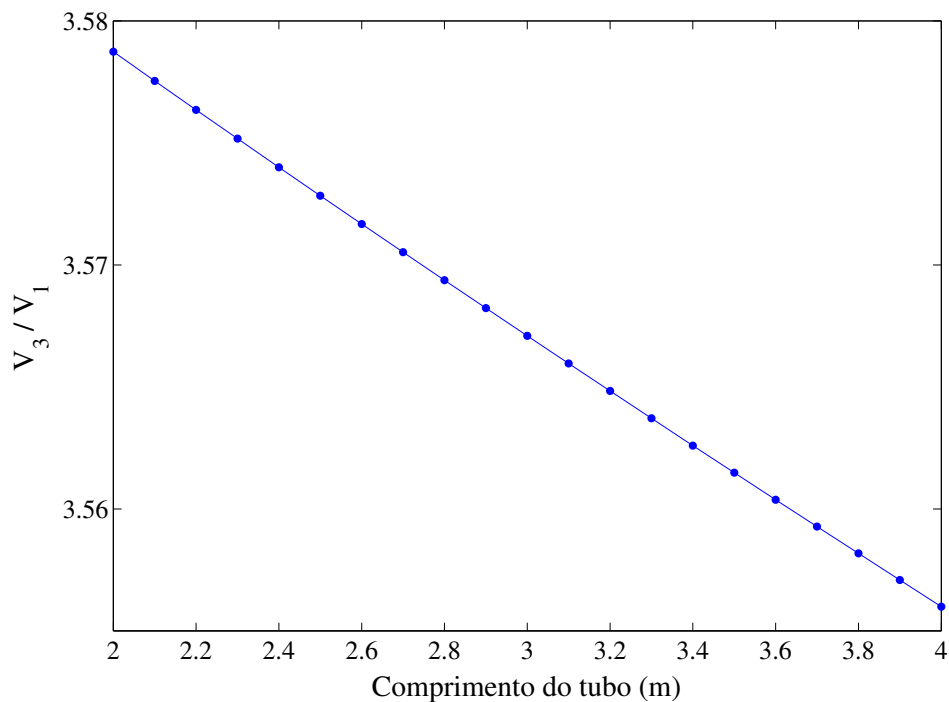


Figura 11 – Resposta da velocidade na seção 3 à variação do comprimento do tubo. Fonte: do autor

4.2.2 Diâmetros 2 e 3

A Figura 12 mostra como ocorre a variação da razão entre a velocidade média na seção 3 e a velocidade média na seção 1 do tubo em relação aos valores de Razão entre Áreas (RA) vistos na Tabela 1. Analisando nesta figura um ângulo incluído intermediário de 90° , uma diminuição na RA de 0,5 para 0,25 resulta em um acréscimo de 94,23 % na velocidade. Para uma redução de RA ainda maior, para 0,1, a velocidade sofre um aumento de 379,71 %, o que acarreta em um aumento significativo para a geração de energia. Desta forma, definiu-se a RA de 0,1 como valor ótimo.

4.2.3 Ângulo Incluído

Partindo da análise feita na subseção 4.2.2, onde a Razão entre Áreas de 0,1 foi definida como ótima, é possível fazer uma análise particular da relação entre a variação do ângulo incluído e a velocidade na seção 3 do tubo.

A Figura 12 mostra que a razão entre a velocidade média na seção 3 e a velocidade média na seção 1 variou entre 7,37 (para um ângulo incluído de 180°) e 9,51 (para um ângulo incluído de 10°). O aumento do ângulo incluído de 10 para 180 graus acarreta em uma redução de 22,54 % na velocidade sob análise. Porém, quando o ângulo do afunilamento é muito baixo, é

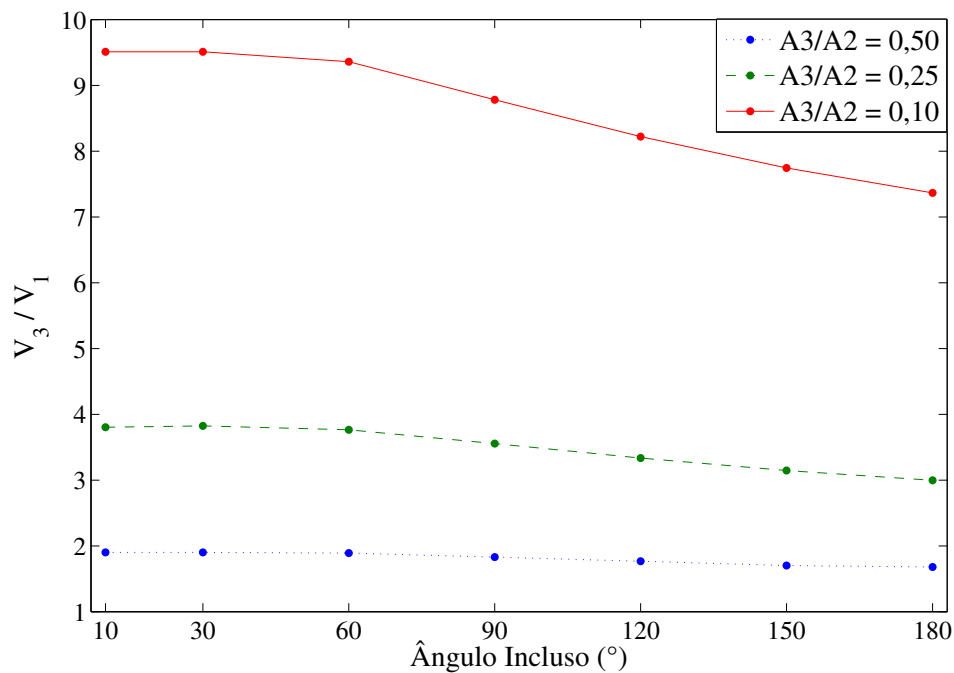


Figura 12 – Resposta da velocidade na seção 3 à variação da Razão entre Áreas e do Ângulo Incluído.
Fonte: do autor

necessário um comprimento de tubo maior para que haja a transição do diâmetro 2 para o 3 da Figura 8. Para a solução ótima (ângulo incluído igual a 10°), por exemplo, seria necessário um acréscimo no comprimento do tubo de cerca de 3 m, o que seria inviável devido a limitações construtivas.

Sendo assim, optou-se por adotar o valor de 60° , que implica em uma redução de apenas 1,59 % na razão entre as velocidades e mantém valores aceitáveis em termos construtivos.

4.3 Avaliação do modelo e do dimensionamento

Para realizar as simulações, foram considerados os parâmetros construtivos dos tubos original e otimizado apresentados na Tabela 4 e os parâmetros da turbina *Wells* para o perfil NACA0021, apresentados na Tabela 5.

Com o objetivo de avaliar o dimensionamento realizado neste trabalho, o modelo elaborado foi simulado no Matlab/Simulink, comparando as respostas em termos de velocidade e potência do dispositivo quando alterados os parâmetros construtivos do dispositivo original, vistos em Vecchia et al. (2015b), para os parâmetros construtivos do dispositivo otimizado.

A resposta em termos de velocidade apresenta valores médios com uma diferença de cerca de 160 % entre os dispositivos original e otimizado, sendo que tal diferença pode ser

visualizada na Figura 13.

Tabela 4 – Parâmetros dos dispositivos.

Parâmetro	Tubo Original	Tubo Otimizado
Comprimento do tubo (<i>m</i>)	3	3
Diâmetro 2 (<i>m</i>)	1,0	0,79
Diâmetro 3 (<i>m</i>)	0,5	0,25
Ângulo Incluso (°)	90	60

Fonte: do autor

Tabela 5 – Parâmetros da turbina *Wells* para o perfil NACA0021.

Parâmetro	Perfil NACA0021	
	Tubo Original	Tubo Otimizado
Eficiência	0,71	0,71
Raio da turbina (<i>m</i>)	0,2475	0,1225
Área Varrida (<i>m</i> ²)	0,1924	0,0471

Fonte: adaptado de Dias et al. (2013)

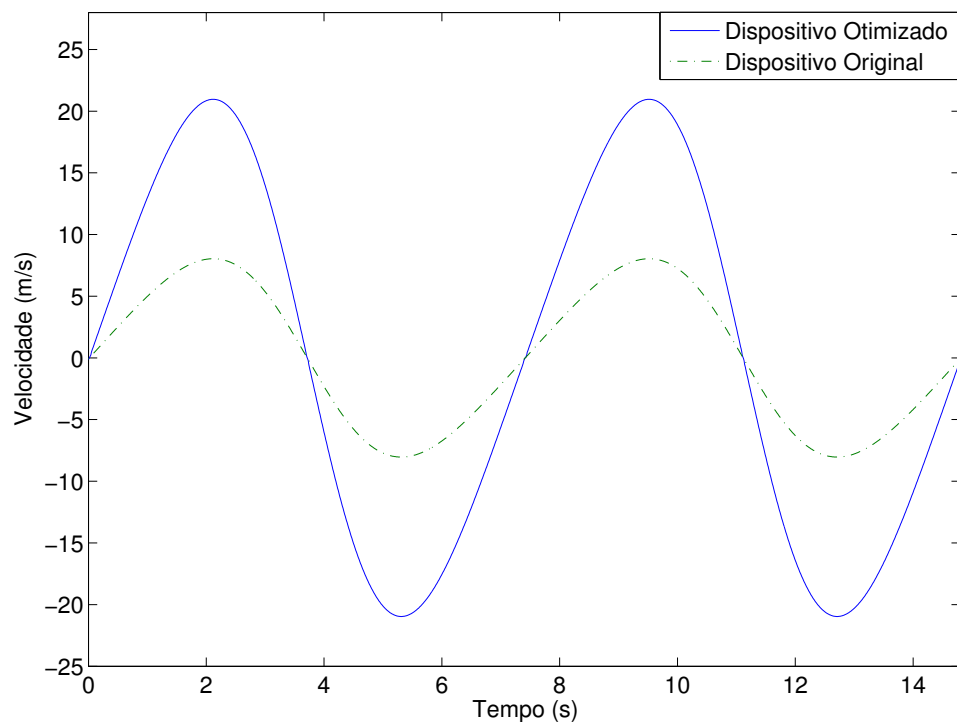


Figura 13 – Comparação da velocidade no dispositivo original e no dispositivo otimizado. Fonte: do autor

Para ilustrar a otimização do dimensionamento do dispositivo, também foram realizadas simulações com o Autodesk CFD. Considerando uma velocidade de entrada de 1,42 m/s na

seção 1, o dispositivo original apresenta uma velocidade média na saída de 4,24 m/s. Com a mesma velocidade de entrada, o dispositivo otimizado apresenta uma velocidade média na saída de 12,57 m/s, o que representa um aumento de cerca de 196 % na velocidade da seção 3 quando comparado com o dispositivo original. A Figura 14 apresenta os resultados das análises em regime permanente de fluidos no dispositivo original e no dispositivo otimizado.

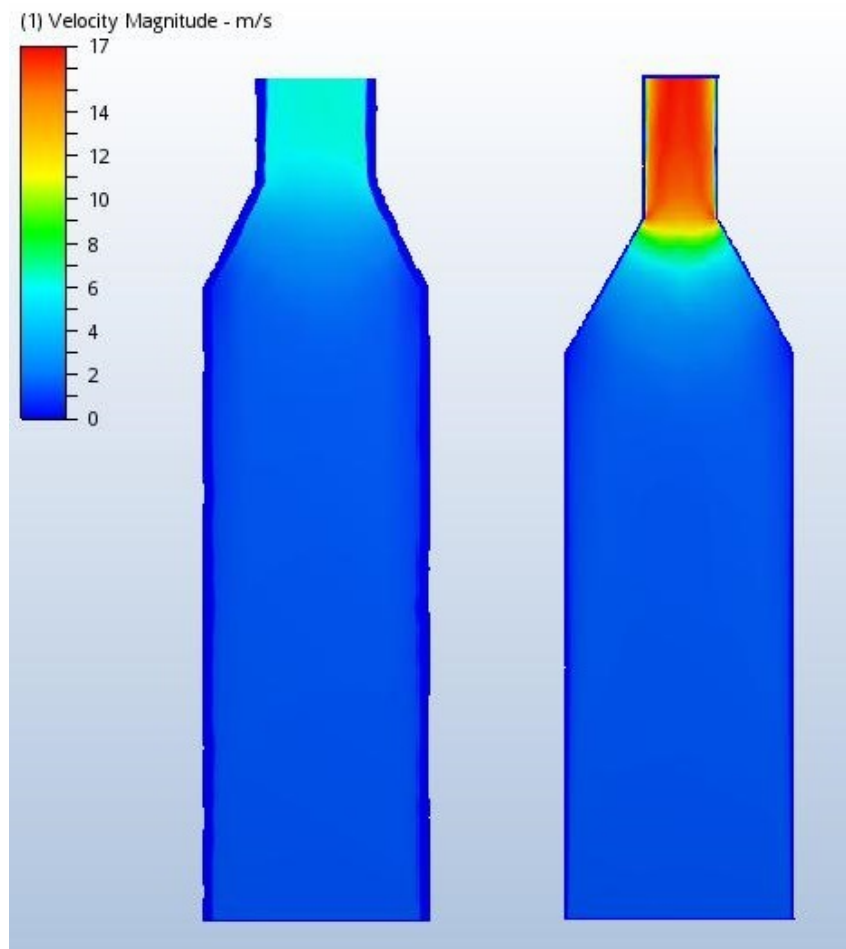


Figura 14 – Análise da velocidade no dispositivo original (à esquerda) e dispositivo otimizado (à direita). Fonte: do autor

A comparação da otimização também foi feita em termos de potência mecânica, onde o valor médio obtido após a otimização foi comparado com o valor obtido em Vecchia et al. (2015b), cujo modelo não considera a perda de carga devido ao afinilamento, apenas as perdas por viscosidade. Desta forma, o valor encontrado em Vecchia et al. (2015b) foi recalculado, acrescentando-se a equação (3.8) na análise de Vecchia et al. (2015b) e adotando os mesmos procedimentos utilizados neste trabalho. O valor médio da potência mecânica utilizando os valores do dispositivo original foi de cerca de 17 W e o valor encontrado com a otimização do OWC foi de aproximadamente 74 W. Este aumento na potência de 335 %, evidenciado na

Figura 15, ocorre devido à proporção da potência com a velocidade ao cubo, vista na equação (3.11).

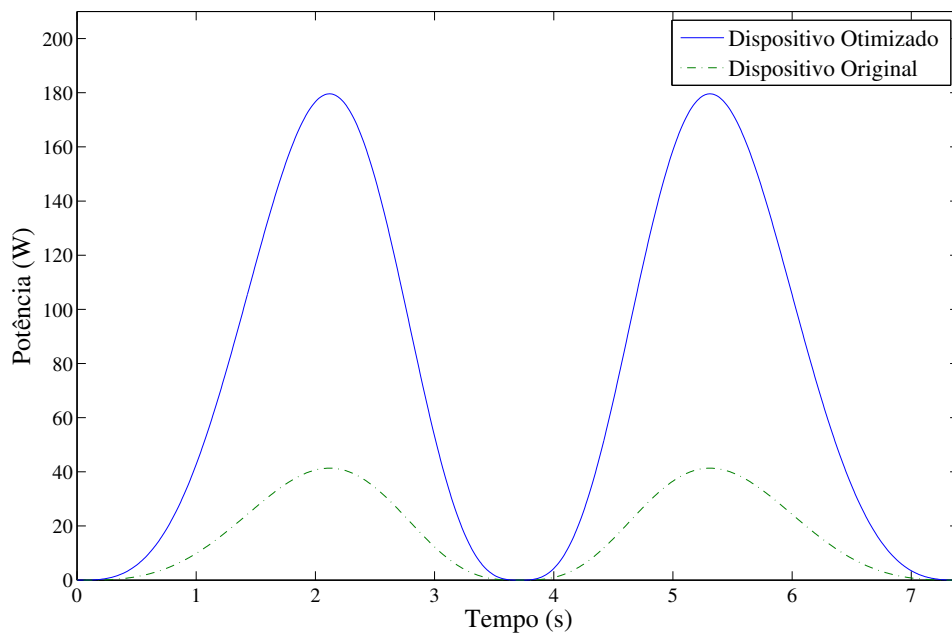


Figura 15 – Comparação da potência no dispositivo original e no dispositivo otimizado. Fonte: do autor

Para avaliar o modelo, uma comparação entre os resultados alcançados no Matlab/ Simulink e no Autodesk CFD foi realizada. No AutoDesk CFD não foi possível inserir como entrada a velocidade de onda exatamente igual à modelada na subseção 3.1.1. Desta forma, utilizou-se a seguinte equação, em ambos os programas, para representar a velocidade de entrada da onda

$$V_1 = 2,27 \text{ sen}(0,85t) \quad (4.1)$$

onde V_1 é a velocidade vertical da onda e t é o tempo.

A comparação entre os resultados de simulação para a seção 3 mostraram uma diferença na velocidade do ar entre os modelos de 4,85 % nesta seção do tubo. Este resultado mostra que o modelo implementado no Matlab/Simulink apresenta resultados muito próximos aos obtidos através da simulação do programa de dinâmica dos fluidos. É importante salientar que o Autodesk CFD representa melhor o sistema físico, uma vez que esse programa utiliza em suas simulações modelos de turbulência mais sofisticados, como o modelo *k-epsilon*, possuindo assim resultados mais condizentes com a realidade. Estes resultados são melhor vistos na Figura 16.

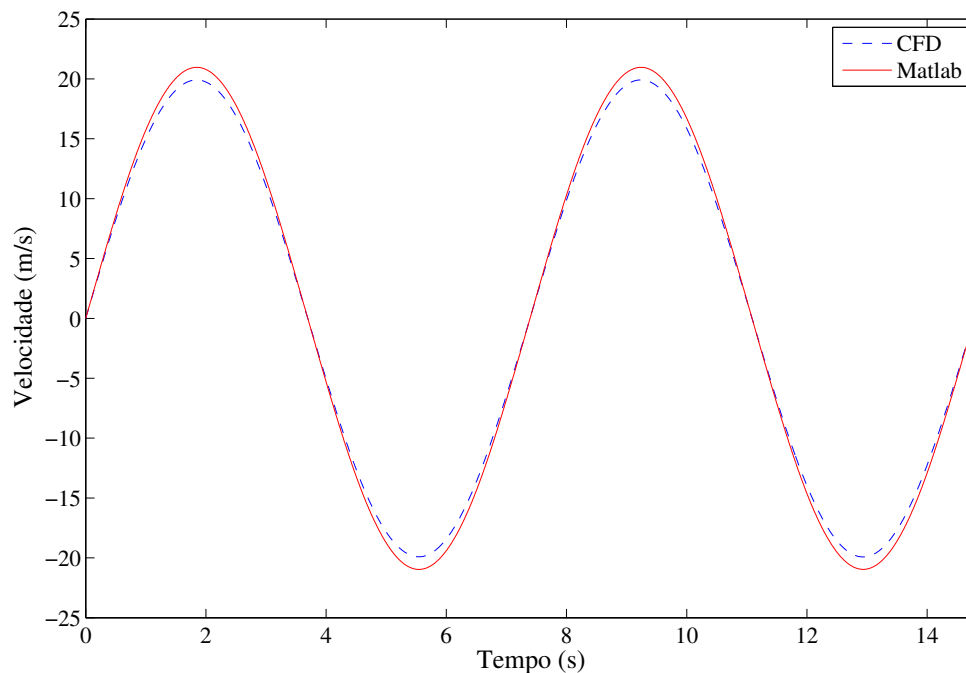


Figura 16 – Comparação entre os resultados obtidos no Matlab/Simulink e no Autodesk CFD, referentes a velocidade na seção 3 do tubo. Fonte: do autor

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um estudo sobre a modelagem e dimensionamento de um dispositivo conversor da energia das ondas em energia cinética e mecânica. Foram analisadas as influências do dimensionamento do tubo na velocidade de saída do ar, considerando as perdas viscosas nas paredes do tubo e as perdas de cargas e ganho de velocidade devido ao afinamento. A partir de uma função que representa a onda incidente, estimou-se a potência mecânica gerada por uma turbina do tipo *Wells* com o perfil aerodinâmico NACA0021. Os resultados obtidos a partir da otimização do dimensionamento do dispositivo são avaliados utilizando um programa de dinâmica de fluidos computacional, sendo obtido um aumento de 196 % na velocidade da seção 3 e um aumento de 335 % na potência mecânica gerada. Como as simulações foram realizadas em dois diferentes programas, os resultados da velocidade do ar em uma seção do dispositivo foram comparados e se mostraram muito próximos, sendo a diferença de apenas 4,85 % na seção 3. Esses aspectos demonstram que o modelo implementado representa adequadamente o sistema físico.

Atualmente, estão sendo desenvolvidos trabalhos na análise de fluidos e no dimensionamento de uma turbina específica para esta aplicação, visando a máxima eficiência do sistema.

Adicionalmente, o modelo de um gerador para conversão da energia mecânica em elétrica está sendo elaborado para estimar a energia elétrica gerada pelo sistema.

MODELING AND DESIGN OF A POWER GENERATION SYSTEM FROM OCEAN WAVES

ABSTRACT

This work discusses the modelling and the design of an energy extraction device from ocean waves, considering the use of a converter device called Oscillating Water Column (OWC), composed by fixed tubes in a concrete pillar of a fishing pier, in Balneário Arroio do Silva/SC - Brazil. This application in particular represents a different condition than has been considered in other studies on the subject. The modelling of this device is performed using concepts of fluid mechanics, in order to describe the physical characteristics of the air flow within the device. These concepts are also applied to optimize the device design and to determine the losses of flow velocity due to the influence of the tube's walls, the head losses and the contraction. The conversion of the air movement into mechanical energy is performed considering the use of a Wells turbine. The simulation in the time domain was performed using Matlab/Simulink taking into account the current parameters and a specific regime of the waves. The fluid analysis was performed using Autodesk CFD. The results allow to optimize the device design and to evaluate the performance of OWC under the influence of different factors.

Keywords: Wave energy, Oscillating Water Column, Modelling.

REFERÊNCIAS

- ALVES, J. H. G. d. M. et al. Reconstituição do clima de ondas no sul-sudeste brasileiro entre 1997 e 2005. *Revista Brasileira de Geofísica*, SciELO Brasil, v. 27, n. 3, p. 427–445, 2009.
- ANDRÉ, R. A. A. *Modelação de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas*. 112 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) — Universidade do Porto, 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*, v. 18, n. 3, p. 21–29, 2013.
- BOUALI, B.; LARBI, S. Contribution to the geometry optimization of an oscillating water column wave energy converter. *Energy procedia*, Elsevier, v. 36, p. 565–573, 2013.

- BRENDMO, A.; FALNES, J.; LILLEBEKKEN, P. Linear modelling of oscillating water columns including viscous loss. *Oceanographic Literature Review*, v. 5, n. 44, p. 65–75, 1997.
- CANDELLA, R. N. *Estudo de casos de ondas no Atlântico Sul através de modelagem numérica*. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Oceânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1997.
- CLÉMENT, A. et al. Wave energy in europe: current status and perspectives. *Renewable and sustainable energy reviews*, Elsevier, v. 6, n. 5, p. 405–431, 2002.
- COELHO, L. M. E. *Conversores de acção directa no aproveitamento de energia das ondas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) — Universidade Técnica de Lisboa, 2007.
- CRUZ, J. a. M. B. P.; SARMENTO, A. N. A. *Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos tecnológicos, Econômicos e Ambientais*. [S.l.]: Instituto do Ambiente, 2004. 61 p.
- CUCHIARA, D. C. et al. Modelagem numérica do comportamento das ondas na costa do rio grande do sul. *II Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica*, p. 1–15, 2006.
- DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. [S.l.]: World Scientific, 1991.
- DHANASEKARAN, T.; GOVARDHAN, M. Computational analysis of performance and flow investigation on wells turbine for wave energy conversion. *Renewable energy*, Elsevier, v. 30, n. 14, p. 2129–2147, 2005.
- DIAS, G. d. C. et al. Análise teórica da influência de perfis sobre a potência de uma turbina wells empregada em dispositivos de conversão de energia das ondas. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 23, n. 1, p. 44–56, 2013.
- DIZADJI, N.; SAJADIAN, S. E. Modeling and optimization of the chamber of owc system. *Energy*, Elsevier, v. 36, n. 5, p. 2360–2366, 2011.
- ESTEFEN, S. et al. Geração de energia elétrica pelas ondas do mar. In: *Seminário Internacional de Energia de Ondas*. Rio de Janeiro: [s.n.], 2006. p. 2–24.
- FALCÃO, A. F. d. O. Wave energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 14, n. 3, p. 899–918, 2010.
- FALNES, J. A review of wave-energy extraction. *Marine Structures*, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 185–201, 2007.
- FOX, R. W.; MCDONALD, A. T.; PRITCHARD, P. J. *Introduction to fluid mechanics*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1985.
- GOMES, M. das N. et al. Modelagem computacional de um dispositivo do tipo coluna de água oscilante para a costa de rio grande. *VETOR-Revista de Ciências Exatas e Engenharias*, v. 19, n. 2, p. 58–73, 2010.
- GONÇALVES, W. M.; FEIJÓ, F. T.; ABDALLAH, P. R. Energia de ondas: uma proposta de inserção tecnológica e econômica no brasil. *Revista de Iniciação Científica da ULBRA*, n. 6, 2015.

- GRIMMLER, J. d. A. et al. Constructal design of a three-dimensional oscillating water column (owc) wave energy converter (wec). *International Journal of Advanced Renewable Energy Research (IJARER)*, v. 1, n. 10, p. 34–37, 2012.
- JAYASHANKAR, V. et al. A twin unidirectional impulse turbine topology for owc based wave energy plants. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 34, n. 3, p. 692–698, 2009.
- KOFOED, J. P. et al. Prototype testing of the wave energy converter wave dragon. *Renewable energy*, Elsevier, v. 31, n. 2, p. 181–189, 2006.
- MATOS, M. d. F. A. d. et al. Análise comparativa da agitação obtida com o modelo numérico (swan) na modelagem de ondas do litoral setentrional do rio grande do norte, brasil e dados de campo. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, autores, v. 13, n. 3, p. 283–299, 2013.
- MEHRANGIZ, S. et al. Various technologies for producing energy from wave: A review. *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, v. 2, n. 2, p. 289–294, 2013.
- MEISEN, P.; LOISEAU, A. Ocean energy technologies for renewable energy generation. *Global Energy Network Institute*, Citeseer, p. 1–25, 2009.
- MOREIRA, L. d. S. *Estudo comparativo de ondas superficiais geradas através de simulação numérica e experimento para geração de energia ondomotriz*. Dissertação (Graduação em Engenharia de Energia) — Universidade de Brasília, 2015.
- MORRISON, I. G.; GREATED, C. A. Oscillating water column modelling. *Coastal Engineering Proceedings*, v. 1, n. 23, p. 502–511, 1992.
- PAREDES, G. M. *Estudo experimental de um sistema offshore para produção de energia das ondas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade do Porto, 2008.
- PIANCA, C.; MAZZINI, P. L. F.; SIEGLE, E. Brazilian offshore wave climate based on nww3 reanalysis. *Brazilian Journal of Oceanography*, SciELO Brasil, v. 58, n. 1, p. 53–70, 2010.
- RAGHUNATHAN, S.; TAN, C.; OMBAKA, O. Performance of the wells self-rectifying air turbine. *Aeronautical Journal*, Royal Aeronautical Society, v. 89, n. 890, p. 369–379, 1985.
- SCHÄFER, L. B. *Análise Computacional e Otimização Geométrica de um Dispositivo Conversor da Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica do tipo Coluna de Água Oscilante*. Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- SIEGLE, E.; ASP, N. E. Wave refraction and longshore transport patterns along the southern santa catarina coast. *Brazilian Journal of Oceanography*, SciELO Brasil, v. 55, n. 2, p. 109–120, 2007.
- SILVA, J. S. d. *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*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012.
- 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*, v. 14, n. 4, p. 29–37, 2009.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos costeiros condicionantes do litoral brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 17, p. 11–23, 2011.

VECCHIA, L. C. D. et al. Modelagem e simulação de um sistema de geração de energia a partir das ondas em uma plataforma de pesca no sul de santa catarina. In: *4º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense – SICT-Sul*. [S.l.: s.n.], 2015. p. 760–773.

VECCHIA, L. C. D. et al. Modeling of wave energy absorption: A case study for a fishing pier in brazil. In: IEEE. *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2015*. [S.l.], 2015. p. 1–6.

WEBSTER, M.; GATO, L. et al. The effect of rotor blade shape on the performance of the wells turbine. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF OFFSHORE AND POLAR ENGINEERS. *The Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*. [S.l.], 1999. p. 169–173.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Catarina, por colocar a disposição a estrutura necessária para a aquisição de conhecimento ao longo de minha graduação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio à pesquisa, a qual resultou no presente trabalho de conclusão de curso.

A todos que foram meus professores ao longo da graduação. De forma especial agradeço ao meu orientador César Cataldo Scharlau por me auxiliar neste trabalho e nos projetos de pesquisa que proporcionaram um conhecimento mais aprofundado sobre o tema.

Aos meus pais, Lenoir e Amater, por sempre incentivarem a realização de conquistas como esta, fornecendo todo o amor, carinho e suporte para isto.

Ao meu irmão Leonam e minha irmã Aline, por sempre estarem presentes, colocando sua amizade e companheirismo sempre a disposição.

À minha namorada, Alessandra, por ter sempre me dado o apoio e amor necessário para que eu concluísse esta etapa de minha vida de forma tranquila e proveitosa.

À todos os amigos e amigas que estiveram presentes diariamente ao longo da graduação, tornando esta etapa ainda mais especial e marcante.