

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

MARIANA DE OLIVEIRA BARRA COSTA

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO MARÍTIMO DE UM CONCEITO DE *WEC*

Joinville

2018

MARIANA DE OLIVEIRA BARRA COSTA

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO MARÍTIMO DE UM CONCEITO DE *WEC*

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Naval, da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus Joinville, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Naval.

Orientador: Dr. Eng. André Luís Condino Fugarra.

Joinville

2018

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO MARÍTIMO DE UM CONCEITO DE *WEC*

MARIANA DE OLIVEIRA BARRA COSTA

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville (SC), 29 de Junho de 2018.

Banca Examinadora:

Dr. Eng. André Luís Condino Fugarra
Presidente/Orientador

Dr. Eng. Thiago Antonio Fiorentin
Membro

Eng. Esp. Luiz Eduardo Bueno Minioli
Membro

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais Adriana e Francisco, e à minha irmã Maria, que não me deixaram desistir nos momentos difíceis, sempre me encorajando a seguir meus sonhos e pelo amor incondicional.

Agradeço ao meu namorado Félix, pelo amor, pelo carinho e pelo incentivo que foi essencial para a elaboração desse trabalho.

Meus agradecimentos, também, aos meus amigos de faculdade Rafaella, Jordana, Jeniffer, Vinicius, Leonardo e Vitoria, pelos trabalhos juntos, companheirismo e amizade que foi muito importante para a minha formação acadêmica.

Aos meus amigos de infância Lucas e Shaira, por se fazerem presentes no meu dia a dia, mesmo longe, me incentivando a ser melhor sempre.

Ao meu orientador André Fajarra por aceitar me orientar, por achar sempre um tempo para me atender, pela paciência e pelos conselhos.

E, a todos que, de alguma forma, me ajudaram a chegar até aqui e que, sem o apoio de vocês, nunca seria possível a realização desse trabalho.

RESUMO

A poluição ambiental gerada pelas fontes de energia não renováveis e a sua má distribuição é um dos grandes desafios enfrentados pela humanidade. As energias limpas e renováveis, como a eólica, marítima e solar, surgem como uma solução para tal adversidade. Assim, o presente trabalho propõe o estudo analítico de uma tecnologia para geração de energia renovável através das ondas ou *WECs* (*Wave Energy Converter*). A partir da definição do *WEC*, busca estimar a quantidade de energia produzida pelo mesmo em função do calado e do amortecimento do gerador.

Com base na caracterização do sistema de equações do movimento do *WEC*, plataforma equipada com o gerador de energia, é possível determinar as funções de transferência de *heave* e de potência por amplitude de onda dos mesmos. Tendo-se esse resultado, faz o cruzamento espectral com espectros de mar padronizados para definir o espectro de resposta de potência e a potência média.

Assim, o máximo de energia estimada, tendo como base a melhor situação investigada, foi de aproximadamente 58,3kW. Um resultado razoável, se for comparado à *WECs* como as boias australianas, com largura de 11m que suprem 240kW, sendo que o *WEC* do presente trabalho possui largura de, apenas, 9m.

Importante destacar que foi possível estimar a potência com todo o encaminhamento matemático analítico, sendo necessária a realização de algumas simplificações para que equações não-lineares fossem resolvidas.

Palavras-chave: Onda. *WEC*. Energia renovável.

ABSTRACT

The environmental pollution generated by non-renewable energy sources and their maldistribution is one of humanity's greatest challenges. Clean and renewable energies, such as wind, sea and solar, emerge as a solution to such adversity. Therefore, this work proposes the analytical study of a technology to generate renewable energy through waves or WECs (Wave Energy Converter). From the definition of the WEC, we seek to estimate the amount of energy produced by it as a function of the draft and the damping of the generator.

Based on the characterization of the WEC motion equation system, a platform equipped with the power generator, it is possible to determine the Heave RAO's and its power per wavelength. Through this result, the spectral crossing with standardized spectrum is done, to define the spectrum of power response and the average power.

Thus, the estimated maximum energy, based on the best investigated situation, was approximately 58.3kW. A reasonable result, if it is compared to the Australian buoys WEC's, with a width of 11m that supply 240kW, and the WEC of this work has a width of only 9m.

It is important to highlight that it was possible to estimate the power with all analytical mathematical routing, and it is necessary to perform some simplifications so that nonlinear equations could be solved.

Keywords: Wave. WEC. Renewable energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	15
1.1.1	Objetivo Geral.....	15
1.1.2	Objetivos Específicos	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	“ESTADO DA ARTE” DE TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS	16
2.1.1	<i>Onshore</i>	17
2.1.2	<i>Nearshore</i>	18
2.1.3	<i>Offshore</i>	21
2.1.4	WECs ao Redor do Mundo	23
2.2	GEOMETRIA DA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL	24
2.3	HIDRODINÂMICA DAS ONDAS.....	25
2.4	ESPECTROS DE MAR PADRONIZADOS	28
2.5	FORÇAS REATIVAS E DE EXCITAÇÃO AGINDO NA PLATAFORMA.....	30
2.5.1	Teoria Linear de Airy	32
2.5.2	Força Reativa	34
2.5.3	Força Excitante	35
2.6	EQUAÇÃO DE MOVIMENTO.....	36
2.7	SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA	38
3	MÉTODOS	40
3.1	DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA PLATAFORMA E DO GERADOR E DOS DADOS DE ENTRADA	42
3.2	EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DA PLATAFORMA E DO GERADOR.....	45
3.3	MÉTODOS DE ANÁLISE DA RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA.....	45
3.4	FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE <i>HEAVE</i> E DE POTÊNCIA POR AMPLITUDE DE ONDA	48
3.5	ESPECTRO DE MAR.....	49
3.6	ESPECTRO DE RESPOSTA DE POTÊNCIA	49
3.7	POTÊNCIA MÉDIA.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	APROAMENTO 1.....	51
4.1.1	Função de Transferência de <i>heave</i>	52
4.1.2	Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda	54
4.1.3	Espectro Padronizado de Mar – JONSWAP	56
4.1.4	Cruzamento Espectral – Espectro de Resposta de Potência.....	58
4.2	APROAMENTO 2.....	61
4.2.1	Função de Transferência de <i>heave</i>	61
4.2.2	Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda	62
4.2.3	Cruzamento Espectral – Espectro de Resposta de Potência.....	62
4.3	COMPARATIVO ENTRE OS DOIS APROAMENTOS	65
4.3.1	Calado	65
4.3.2	Amortecimento.....	68
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	70
	REFERÊNCIAS	72

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Matriz Energética Mundial.	12
Figura 2 – Boias Australianas.....	14
Figura 3 – Coluna de Água Oscilante.....	17
Figura 4 – Dispositivo de Sobreposição.	18
Figura 5 – Conversor de Onda Oscilante.....	19
Figura 6 – <i>Point Absorber</i> em movimento de <i>heave</i>	20
Figura 7 – Dispositivo Diferencial de Pressão Submerso.	20
Figura 8 – Atenuador.	21
Figura 9 – Dispositivo de Onda de Volume.	22
Figura 10 – Conversor de Massa Rotativa.....	22
Figura 11 – Conceitos de <i>WECs</i> ao Redor do Mundo e suas Especificações.	23
Figura 12 – Conceitos de Fundação para Turbina Eólicas <i>Offshore</i>	24
Figura 13 – Plataforma Semissubmersível para exploração de petróleo.....	25
Figura 14 – Tipos de Ondas.....	26
Figura 15 – Onda Marítima Idealizada.....	27
Figura 16 – Graus de Liberdade de Restauração.....	31
Figura 17 – Plataforma.	32
Figura 18 – Sistema Massa Mola Amortecedor.	37
Figura 19 – Diagrama de Corpo Livre.	37
Figura 20 – Esquema Metodológico.....	41
Figura 21 – <i>London Array Offshore Wind Farm</i>	42
Figura 22 – Modelagem Plataforma.	43
Figura 23 – Resposta no domínio do tempo em regime transiente.	46
Figura 24 – Resposta no domínio do tempo em regime permanente.	47
Figura 25 – Resposta no domínio da frequência.	48
Figura 26 – Função de Transferência de velocidade relativa por Amplitude de Onda para direção nordeste.....	49
Figura 27 – Aproamentos Analisados.	51
Figura 28 – Função de Transferência de <i>heave</i> para o Aproamento 1.	53
Figura 29 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproamento 1.	55
Figura 30 – Espectros Padronizados.....	57
Figura 31 – Espectro de Resposta em Watts ao quadrado por Segundo ao quadrado para o Aproamento 1.	59
Figura 32 – Potência Média para o Aproamento 1.....	60
Figura 33 – Espectro de Resposta de Watts ao quadrado por Segundo ao quadrado para o Aproamento 2.	63
Figura 34 – Potência Média para o Aproamento 2.....	64
Figura 35 – Potência gerada para cada uma das direções em função do calado para o Aproamento 1.	66
Figura 36 – Potência gerada para cada uma das direções em função do calado para o Aproamento 2.	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros Plataforma e Gerador.	43
Tabela 2 – Parâmetros JONSWAP conforme direção de incidência de onda.	44
Tabela 3 – Função de Transferência de <i>heave</i> para o Aproamento 1.	54
Tabela 4 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproamento 1.	56
Tabela 5 – Espectros Padronizados.	58
Tabela 6 – Potência Média para o Aproamento 1.	61
Tabela 7 – Função de Transferência de <i>heave</i> para o Aproamento 2.	61
Tabela 8 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproamento 2.	62
Tabela 9 – Potência Média para o Aproamento 2.	65
Tabela 10 – Influência do Coeficiente de Amortecimento do gerador na Potência Gerada para o Aproamento 1.	68
Tabela 11 – Influência do Coeficiente de Amortecimento do gerador na Potência Gerada para o Aproamento 2.	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas
OTEC – Ocean Thermal Energy Conversion
HMAS – His Majesty's Australian Ship
WEC – Wave Energy Converter
JONSWAP – Joint North Sea Wave Project
OWC – Oscillation Wave Column
PTO – Power Take Off
IRENA – International Renewable Energy Agency
ISSC – International Ship Structures Congress
ITTC – International Towing Tank Conference
RAO – Response Amplitude Operator
EPE – Empresa de Pesquisa Energética

LISTA DE SÍMBOLOS

T	Período de Excitação	[s]
ω	Frequência de Excitação	[rad/s]
k	Número de Onda	[m ⁻¹]
λ	Comprimento de Onda	[m]
ζ	Elevação de Onda	[m]
A	Amplitude	[m]
g	Aceleração Gravitacional	[9,81m/s ²]
h	Profundidade	[m]
H_A	Altura de Onda	[m]
S_ζ	Densidade Espectral de Energia de Onda	[m ² .s]
X	Comprimento de Pista	[m]
α	Fator de Forma	
ω_p	Frequência de Pico	[rad/s]
γ	Parâmetro de Agudez do Espectro	
τ	Parâmetro de Ajuste do Espectro	
m_n	Momento Espectral de Ordem n	[m ² /s ⁿ]
H_s	Altura Significativa	[m]
m_0	Momento Espectral de Ordem Zero	[m ²]
H_{rms}	Altura <i>Root Mean Square</i>	[m]
H_{med}	Altura Média	[m]
D_c	Diâmetro das Colunas	[m]
D_p	Diâmetro dos Pontões	[m]
H	Calado	[m]
L_p	Comprimento dos Pontões	[m]
β	Ângulo de Incidência de Onda	
w	Velocidade Vertical	[m/s]
\emptyset	Função Potencial de Onda	[m ² /s]
F_h	Força de Restauração Hidrostática	[N]
ρ	Massa Específica do Fluido	[kg/m ³]
A_f	Área de Flutuação	[m ²]
P	Pressão	[Pa]
m_a	Massa Adicional Seccional	[kg/m]
C_m	Coefficiente de Massa Adicional Potencial	
S	Área Projetada	[m ²]
F_p	Força nos Pontões	[N]
\dot{w}	Aceleração Vertical	[m/s ²]
F_c	Força nas Colunas	[N]
m_1	Massa da Plataforma com Massa Adicional	[kg]
m_2	Massa do Gerador	[kg]
\ddot{x}_1	Aceleração da Plataforma	[m/s ²]
\ddot{x}_2	Aceleração do Gerador	[m/s ²]
\dot{x}_1	Velocidade da Plataforma	[m/s]
\dot{x}_2	Velocidade do Gerador	[m/s]
c_1	Amortecimento da Plataforma	[N.s/m]
c_2	Amortecimento do Gerador	[N.s/m]

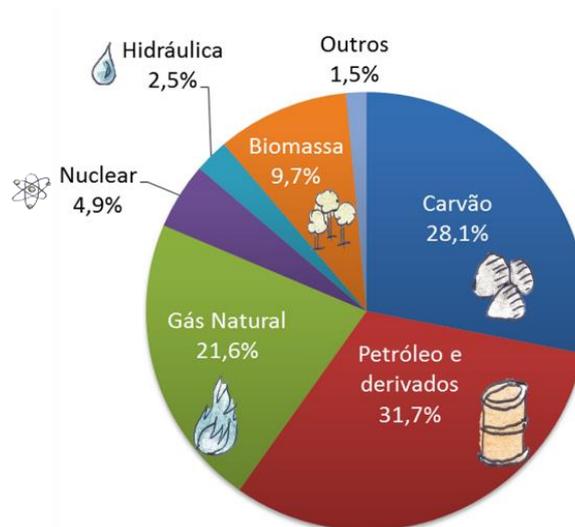
k_1	Restauração da Plataforma	[N/m]
k_2	Restauração do Gerador	[N/m]
F	Força em Função do Tempo	[N]
ε_1	Coefficiente de Amortecimento da Plataforma	
ε_2	Coefficiente de Amortecimento do Gerador	
ω_{nh}	Frequência Natural em <i>Heave</i> da Plataforma	[rad/s]
ω_{nh2}	Frequência Natural em <i>Heave</i> do Gerador	[rad/s]
Pot	Potência	[W]
c	Amortecimento do Sistema de Geração de Energia	[N.s/m]
\dot{x}	Velocidade Relativa	[m/s]
N	Número de Incrementos	
tf	Tempo Final da Resposta no Tempo	[s]
to	Tempo Inicial da Resposta no Tempo	[s]
f_{max}	Frequência Máxima	[Hz]
F_{heave}	Força em <i>Heave</i>	[N]
S_R^{Pot}	Espectro de Resposta de Potência	[W ² /s ²]
RAO_{Pot}	Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda	[W/m]
m_n^{Pot}	Momento Espectral de Ordem n de Potência	[W ² /s ⁿ]
A^{Pot}	Amplitude de Potência	[W]

1 INTRODUÇÃO

“Uma em cada cinco pessoas no planeta – ao todo 1,3 bilhão de pessoas - ainda não tem acesso a eletricidade. Cerca de 2,7 bilhões dependem de madeira, carvão, carvão vegetal ou resíduo animal para cozinhar e aquecer”. (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU, 2015, p. 1). Considerando a economia atual, tal fato dificulta o fim da desigualdade social e a redução da poluição. Logo, os grandes problemas enfrentados pela humanidade por conta da má distribuição de energia são a produtividade econômica e as emissões de poluentes que contribuem para o aquecimento global.

A matriz energética mundial é praticamente composta por fontes não renováveis, como o carvão, o petróleo e o gás natural, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Matriz Energética Mundial.



Fonte: EPE (2015).

“Fontes renováveis como solar, eólica e geotérmica, por exemplo, juntas correspondem a apenas 1,40% da matriz energética mundial, assinaladas como “Outros” no gráfico. Somando à participação da energia hidráulica, as renováveis totalizam 3,9%.” (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, 2015, p.1).

O documento *Crescimento Verde Global: Investimento Industrial em Energia Limpa e Expansão de Oportunidades de Emprego*, apresentado no Fórum de Energia em Viena de

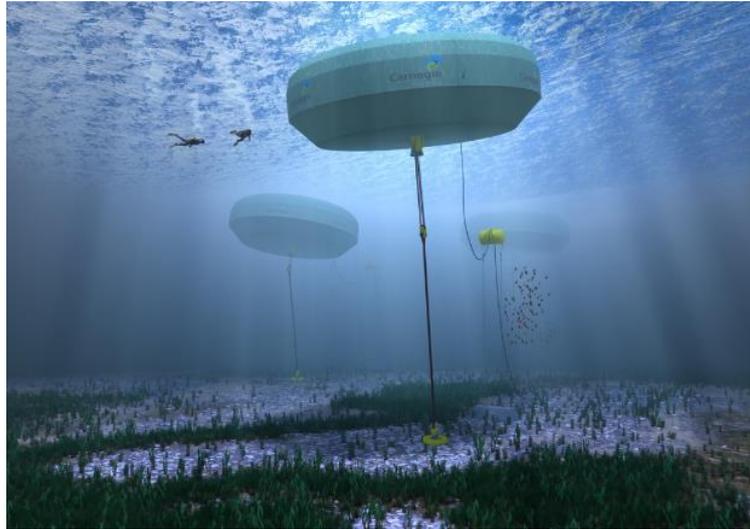
2015, afirma que, das 45 milhões de toneladas mundiais de gases de efeito estufa emitidos em 2010, cerca de 82% foram gerados por fontes de base energética (ONU, 2015). Por isso, a energia limpa e renovável surge como uma solução para todos os grandes problemas enfrentados pela sociedade com relação à energia.

As energias renováveis mais conhecidas são a eólica, a solar e a marítima. A primeira é produzida pela força dos ventos que, a partir do movimento das hélices de um aerogerador, aciona um gerador elétrico. Já a segunda, utiliza painéis fotovoltaicos que criam uma diferença de potencial elétrico por ação da luz solar, gerando assim, energia elétrica. Por último, a energia marítima pode ser extraída a partir das ondas, das correntes, da amplitude das marés ou da conversão de energia térmica dos oceanos (OTEC). Tais fontes renováveis geraram 134 gigawatts adicionais em 2015, o que impediu que 1,5 gigatoneladas de gás carbônico fossem liberadas na atmosfera (ONU, 2016). Esses dados mostram a importância da utilização de fontes de energia renovável para a manutenção do planeta.

Como exemplo de geração de energia renovável a partir do mar, é interessante citar as boias de geração de energia que já são uma realidade na costa da Austrália Ocidental. Elas possuem onze metros de largura e são atingidas permanentemente pelas ondas do Oceano Índico. Aproveitando esse movimento constante, geram cerca de cinco por cento da eletricidade usada na base militar ali perto, em Garden Island (AMY YEE, 2015).

Atualmente, existem na Costa da Austrália Ocidental três boias do projeto piloto da Carnegie Wave Energy. Desde fevereiro de 2015, suprem 240kW cada para a His Majesty's Australian Ship (HMAS) Stirling, maior base naval do país, além de ajudar a tocar uma usina de dessalinização que fornece mais de trinta por cento da água potável das instalações. A energia renovável é uma saída aos países que precisam importar combustível e às bases militares que querem reforçar a segurança. E, também, às regiões de clima tropical, onde a presença de nuvens é frequente, impedindo o aproveitamento da energia solar. Abaixo, na Figura 2, encontra-se um esquema simplificado das boias australianas.

Figura 2 – Boias Australianas.



Fonte: Amy Yee (2015).

A energia das ondas é amplamente disponível e facilmente previsível (em comparação com o vento). Seu potencial é substancial e a quantidade de energia é proporcional ao quadrado da altura da onda (MCCORMICK, 1974). Segundo Mørk et al (2010), o potencial total teórico de energia das ondas é de 32.000TWh/ano, ou seja, aproximadamente duas vezes a energia elétrica global fornecida em 2008 (16.800TWh/ano). Dito isso, é razoável concluir que as ondas, um recurso renovável, podem ser utilizadas para a geração de energia em dispositivos marítimos.

O estudo desenvolvido neste trabalho busca comparar e definir a geração de energia de um *Wave Energy Converter (WEC)* em função de seus parâmetros, cuja geometria se assemelha à de uma plataforma semissubmersível. Essa plataforma se movimenta com a passagem da onda e, em cima da mesma encontra-se um gerador que se movimenta forçado pela plataforma. A partir da velocidade relativa entre ambos é possível estimar a potência fornecida pelo gerador.

Os movimentos da plataforma e do gerador podem ser deduzidos a partir da definição das forças da onda agindo na plataforma e da consideração de termos de inércia, amortecimento e restauração. A geometria de plataforma foi escolhida com o intuito de se analisar as diferentes respostas conforme o ângulo de incidência da onda.

A partir do cruzamento espectral com um espectro de mar padronizado é possível definir a resposta espectral, de modo que se tenha um conjunto da resposta da plataforma ao movimento e de dados reais da onda, obtidos a partir do monitoramento do mar.

Os capítulos do trabalho foram divididos em: fundamentação teórica, métodos, resultados e discussões, conclusão e trabalhos futuros. O primeiro dá a base teórica e

bibliográfica que sustenta o desenvolvimento. Os métodos definem os caminhos seguidos para se chegar ao resultado. Já nos resultados e discussões visualiza-se e debate-se o que se obteve a partir dos métodos. E, por fim, conclui-se o trabalho, discutindo possíveis melhorias em trabalhos futuros.

Espera-se desenvolver com o estudo um conceito simples de *WEC*, definindo as dimensões do mesmo baseado em *WECs* existentes, os parâmetros variáveis e qual a influência dos mesmos na geração de energia.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Propor e avaliar uma tecnologia simples de sistema oceânico capaz de produzir energia elétrica limpa e renovável.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Examinar as forças que agem no *WEC*;
- Definir parâmetros de entrada para o *WEC* com base em *WECs* já existentes;
- Formular a equação do movimento do *WEC*;
- Obter a função de transferência de *heave* e de potência por amplitude de onda do gerador;
- Analisar o potencial energético do *WEC* parametricamente.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica é responsável por embasar o trabalho e será dividida em sete tópicos: “estado da arte” de tecnologias de geração de energia a partir das ondas, geometria da plataforma semissubmersível, hidrodinâmica das ondas, espectros de mar padronizados, forças reativas e de excitação agindo na plataforma, equação do movimento e sistema de geração de energia.

O “estado da arte” faz referência ao que já se tem descoberto sobre o assunto pesquisado, ou seja, quais tecnologias para geração de energia a partir das ondas já existem. No tópico sobre a geometria de plataforma serão descritas as plataformas semissubmersíveis e suas particularidades. Em seguida, serão formuladas as equações e teorias acerca das ondas. Posteriormente, será detalhado o espectro padronizado utilizado: JONSWAP (Joint North Sea Wave Project). Então, será mostrado o encaminhamento matemático das forças de excitação e reativa que agem na plataforma devido à onda. A partir do modelo massa-mola-amortecedor simples serão definidas as equações do movimento. E, por fim, será explicado o modo que se definiu o sistema de geração de energia.

2.1 “ESTADO DA ARTE” DE TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DAS ONDAS

Já existem dispositivos típicos para converter energia das ondas e os mesmos se localizam em três ambientes marinhos diferentes (WORLD ENERGY COUNCIL, 2016): *onshore*, *nearshore* e *offshore*.

O primeiro ambiente é integrado à uma rocha ou quebra-mar e, por esse motivo, tem um potencial de energia reduzido devido à energia perdida pelo atrito com o fundo do mar. Já o segundo, se localiza em águas rasas sendo fixado no solo e também possui o mesmo inconveniente do primeiro: a energia perdida pelo atrito. Por fim, o *offshore* situa-se em águas profundas amarrados ao leito do mar e possui um potencial energético maior, já que o fundo influencia pouco as ondas. Todavia, é mais difícil sua construção e manutenção, além de encontrar-se sob condições mais severas.

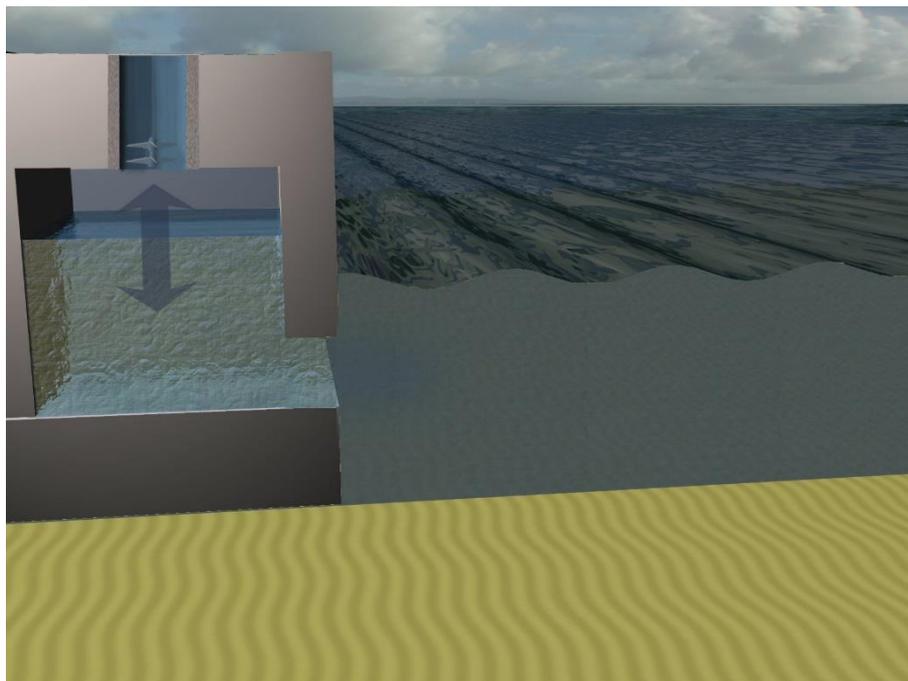
A seguir, será detalhada cada uma das estruturas de geração de energia das localidades explicadas acima.

2.1.1 *Onshore*

Para a localização *onshore*, existem dois dispositivos principais: colunas de água oscilante (OWC) e dispositivos de sobreposição ou conversores de energia de ondas de terminação.

As colunas de água oscilante usam o movimento oscilatório de uma massa de água induzida por uma onda em uma câmara para comprimir ar que aciona uma turbina (Figura 3). A coluna de água atua, assim, como um pistão no volume de ar, à medida que as ondas incidem, aumentando o nível de água na câmara. E, esvaziando quando o nível da água diminui devido à retração das ondas.

Figura 3 – Coluna de Água Oscilante.



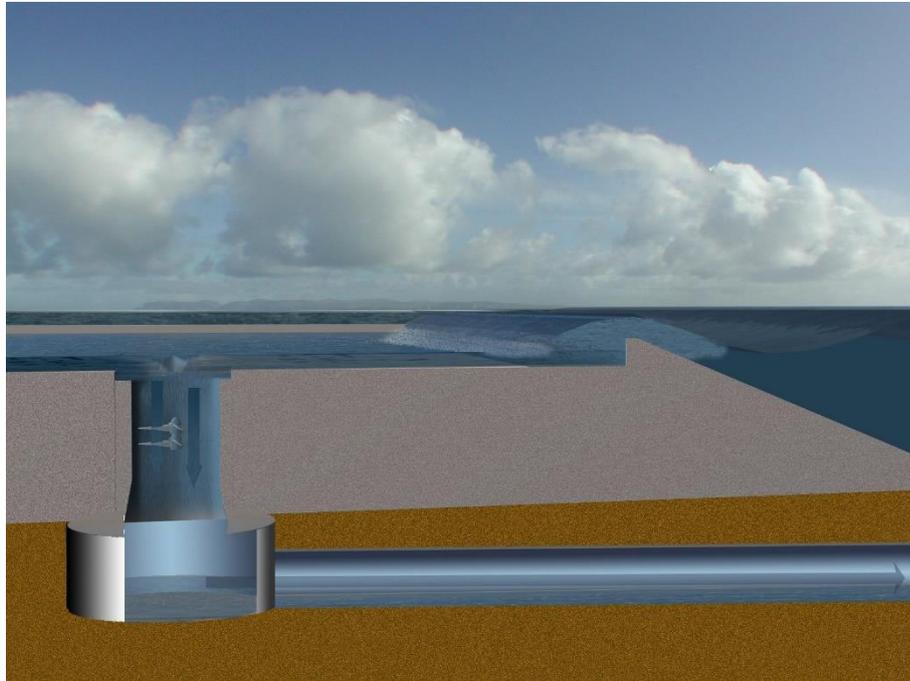
Fonte: AQUARET (2012).

As colunas de água oscilantes são um dos primeiros tipos de conversores de energia das ondas desenvolvidos.

Já os dispositivos de sobreposição convertem a energia das ondas em energia potencial. As ondas quebram na rampa, como mostrado na Figura 4, descem até o reservatório,

que fica acima da superfície livre e ficam contidas ali. Assim, a água armazenada aciona turbinas de baixa carga ao fluir através das mesmas.

Figura 4 – Dispositivo de Sobreposição.



Fonte: AQUARET (2012).

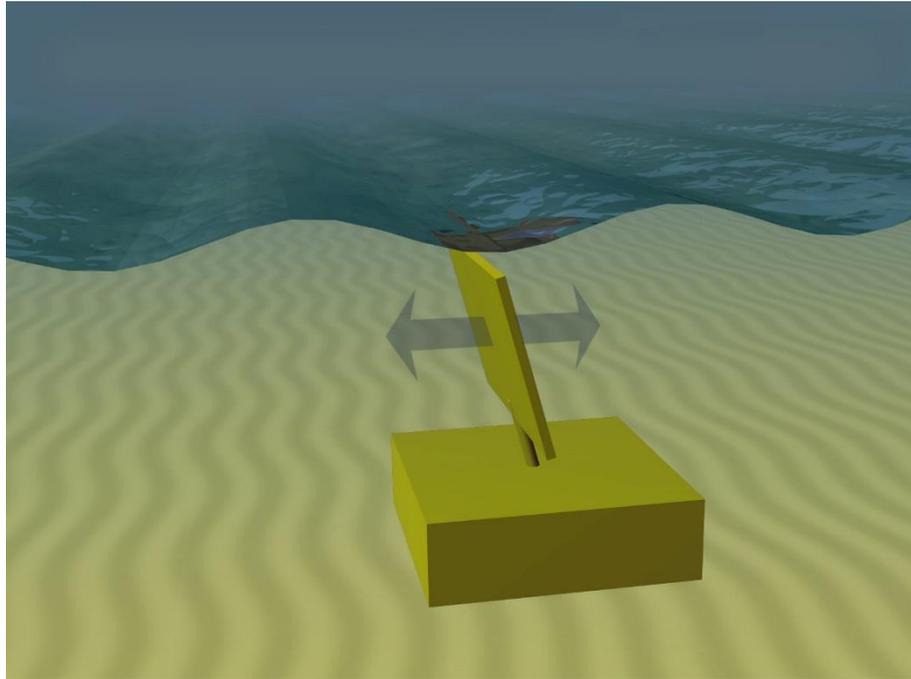
Sugere-se a construção de tais dispositivos para integração em quebra-mares, operação em terra independente e instalação *offshore*.

2.1.2 *Nearshore*

Para o ambiente *nearshore* é possível citar três tecnologias: os conversores de onda oscilantes, os *point absorbers* e os dispositivos diferenciais de pressão submersa.

Os conversores de onda oscilantes exploram o movimento de ondas próximas da costa para induzir o movimento horizontal oscilatório a um *flap*, como mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Conversor de Onda Oscilante.

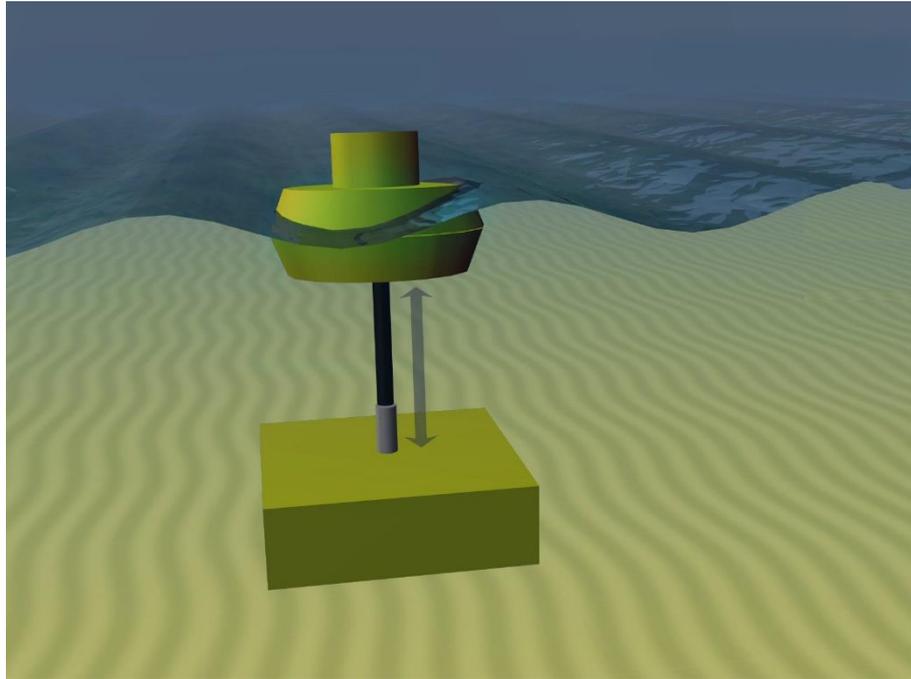


Fonte: AQUARET (2012).

Tais conversores são geralmente montados no fundo do mar, embora existam alguns modelos flutuantes.

Os *point absorbers* são dispositivos que usam o movimento relativo de *pitch* ou de *heave* entre um corpo oscilante e uma estrutura ou componente fixo, amarrado ao fundo do mar, como mostrado na Figura 6.

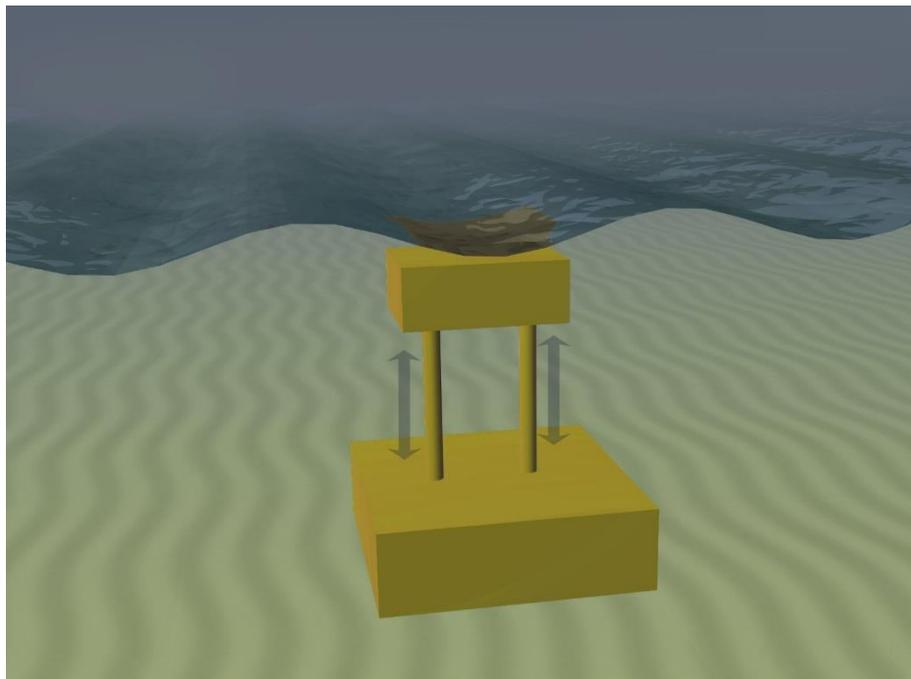
Figura 6 – *Point Absorber* em movimento de *heave*.



Fonte: AQUARET (2012).

Os dispositivos diferenciais de pressão submersos exploram a pressão hidrodinâmica induzida por ondas para forçar um movimento ascendente do dispositivo, que sempre retorna à sua posição inicial quando a diferença de pressão diminui (Figura 7).

Figura 7 – Dispositivo Diferencial de Pressão Submerso.



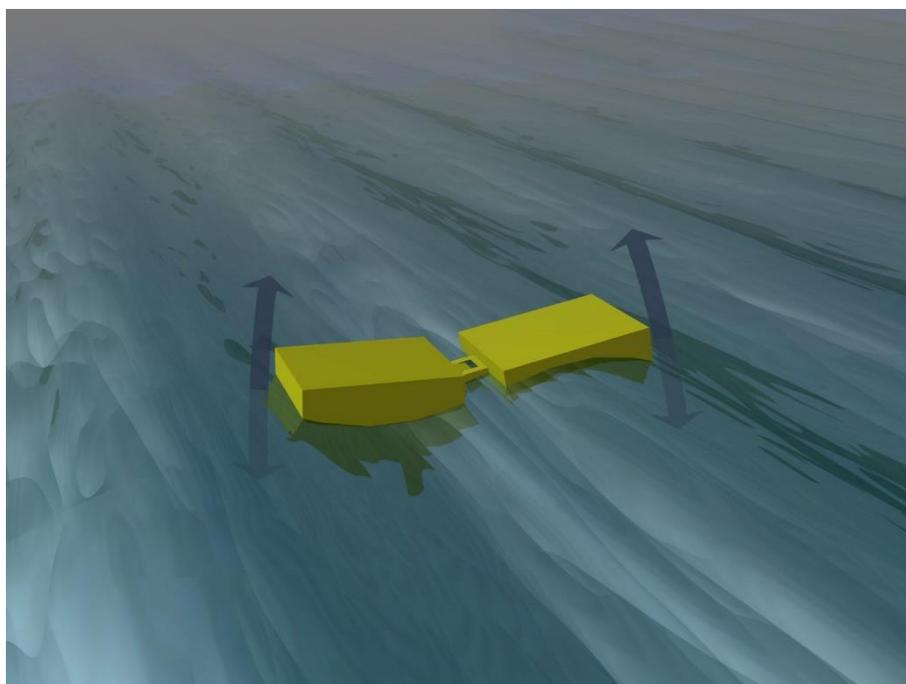
Fonte: AQUARET (2012).

2.1.3 *Offshore*

Por fim, para a localização *offshore*, pode-se definir três principais tecnologias: os atenuadores, os dispositivos de onda de volume e os conversores de massa rotativa.

O atenuador usa a energia da onda para gerar um movimento oscilatório entre componentes estruturais adjacentes. O movimento resultante ativa a tomada de força (PTO), seja bombeando fluidos de alta pressão através de um motor hidráulico ou operando um gerador de acionamento direto (Figura 8).

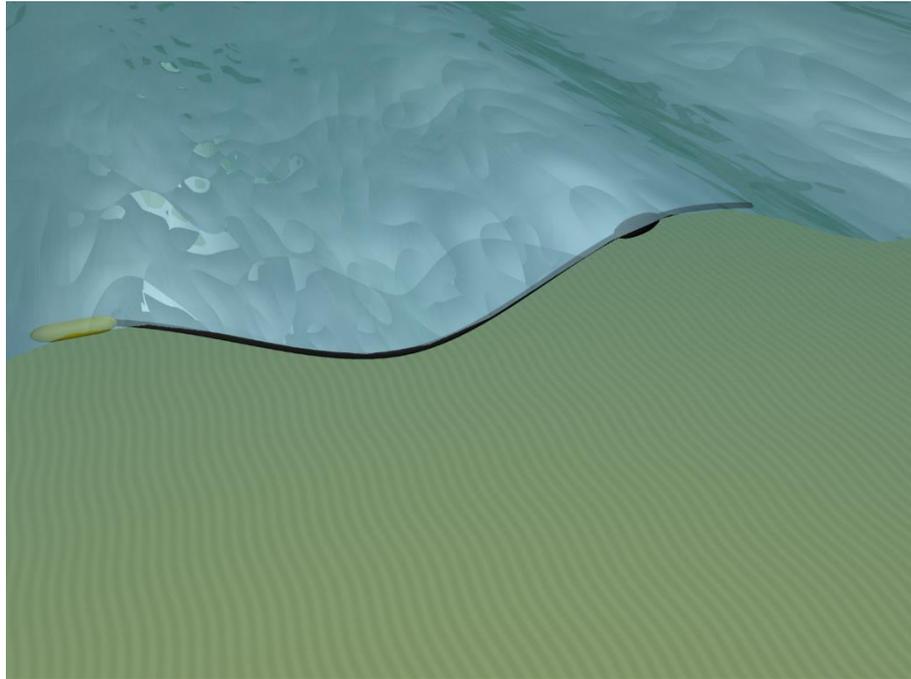
Figura 8 – Atenuador.



Fonte: AQUARET (2012).

Os dispositivos de onda de volume usam a pressão induzida por ondas para gerar uma onda dentro de um tubo flexível, como na Figura 9. À medida que a onda percorre o dispositivo, ela aumenta em tamanho e velocidade, fazendo com que a maior energia cinética acione uma turbina no final do tubo.

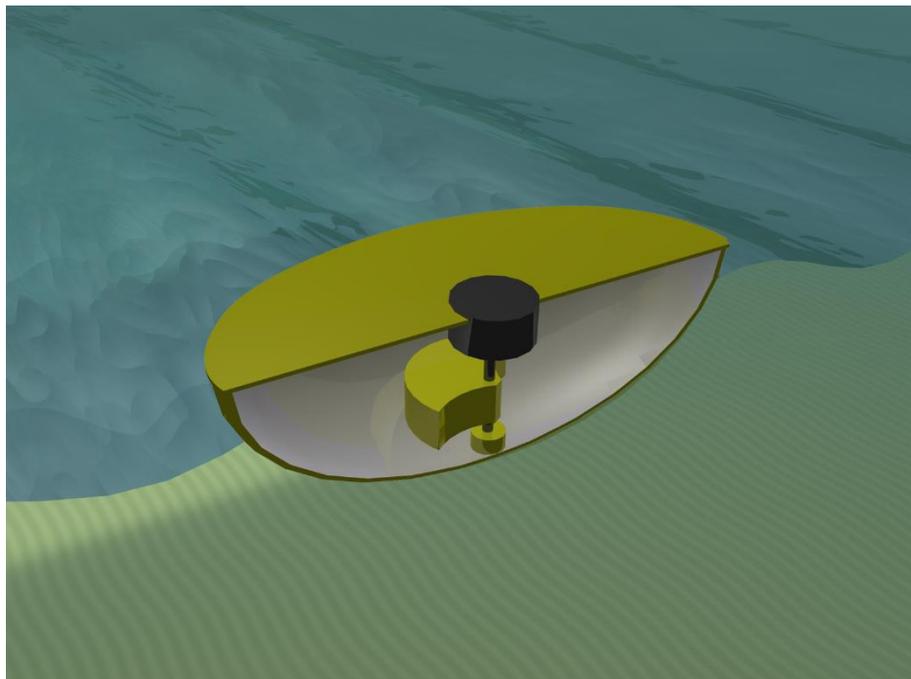
Figura 9 – Dispositivo de Onda de Volume.



Fonte: AQUARET (2012).

Os conversores de massa rotativa usam o movimento relativo das ondas para induzir a inclinação e a rotação em um corpo flutuante. Assim, a massa excêntrica contida no dispositivo rotacional, acionando um gerador elétrico (Figura 10).

Figura 10 – Conversor de Massa Rotativa.



Fonte: AQUARET (2012).

De antemão, vale destacar que o ambiente no qual o *WEC* objeto de estudo deste trabalho operará é o ambiente *offshore*.

2.1.4 *WECs* ao Redor do Mundo

Com o intuito de melhor ilustrar a aplicação dos *WECs* citados acima, foi elaborada a Figura 11, onde é possível visualizar o tipo de *WEC*, o nome comercial, uma imagem, quando se iniciou a operação, as dimensões principais, a potência máxima gerada e a localização aonde eles se encontram.

Figura 11 – Conceitos de *WECs* ao Redor do Mundo e suas Especificações.

Tipo de <i>WEC</i>	Nome	Imagem	Início de Operação	Dimensões Principais	Potência Máxima Gerada	Localização
Coluna de Água Oscilante	Yongsoo OWC		2011	37m comprimento e 31,2m de largura	500kW	Ilha de Jeju, sul da Coréia
Dispositivo de Sobreposição	Sea Slot-cone Generator		2008	Secção de 10m de largura	100kW	Ilha de Kvitøya, Noruega
Conversor de Onda Oscilante	Oyster 1		2009	18m de largura e 11m de altura	315kW	Orkney, lhas no Norte da Escócia
<i>Point Absorber</i>	WaveStar		2010	32m de comprimento, 17m de largura e 6,5m de altura	110kW	Norte da Dinamarca
Dispositivo Diferencial de Pressão Submerso	Archimedes Wave Swing		2004	9,5m de diâmetro e 21m de altura	2MW	Costa Norte de Portugal
Atenuador	Pelamis Wave Power		2010	180m de comprimento e 4m de diâmetro	750kW	Orkney, lhas no Norte da Escócia
Dispositivo de Onda de Volume						
Conversor de Massa Rotativa	Penguin		2011	30m de comprimento e 9m de altura	1MW	Orkney, lhas no Norte da Escócia

Fonte: Autora conforme nota de rodapé (2018).

É possível visualizar na Figura 11 que a maioria dos dispositivos exemplificados encontram-se no Mar do Norte. O Mar do Norte já foi uma fonte de petróleo muito importante, produzindo cerca de 2,9 milhões de petróleo por dia em seu auge em 1999. Porém, a sua

1 FALCÃO; HENRIQUES, 2016, p. 1393.

2 MARGHERITINI; VICINANZA; FRIGAARD, 2009, p. 1372.

3 CAMERON et al., 2010, p. 5.

4 WAVESTAR... 2009, p. 8.

5 DUARTEVALÉRIO; BEIRÃO; COSTA, 2007, p. 2330.

6 THE EUROPEAN MARINE ENERGY CENTRE LTD, 2018.

7 Ibid, 2018.

produção foi declinando devido ao esgotamento dos campos de exploração e pelo aumento do incentivo para utilização de energias renováveis (STANLEY REED, 2017).

Para se ter uma noção da ordem de grandeza dos dispositivos de geração de energia marítima e, assim, conseguir definir as dimensões do *WEC* objeto de estudo desse trabalho, buscou-se as dimensões principais em metros dos mesmos, que se encontram na ordem de grandeza das dezenas.

É importante ressaltar que existem várias outras tecnologias para os tipos de *WECs* citados, porém foram escolhidas as que são mais recentes e que disponibilizavam mais dados.

2.2 GEOMETRIA DA PLATAFORMA SEMISSUBMERSÍVEL

Como mencionado na Introdução, a geometria escolhida para o dispositivo deste trabalho é uma plataforma semissubmersível, juntamente com um gerador integrado, tendo como objetivo investigar a energia gerada para diferentes ângulos de incidência de onda, já que o mesmo influencia no movimento da plataforma e, conseqüentemente, na energia gerada.

Destacar que na indústria de turbinas eólicas *offshore* existem três conceitos principais para o fundeio: *spar-buoy*, semissubmersível e *tension leg*, conforme ilustrado na Figura 12. Também é possível montar múltiplas turbinas em uma única fundação flutuante (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY - IRENA, 2016).

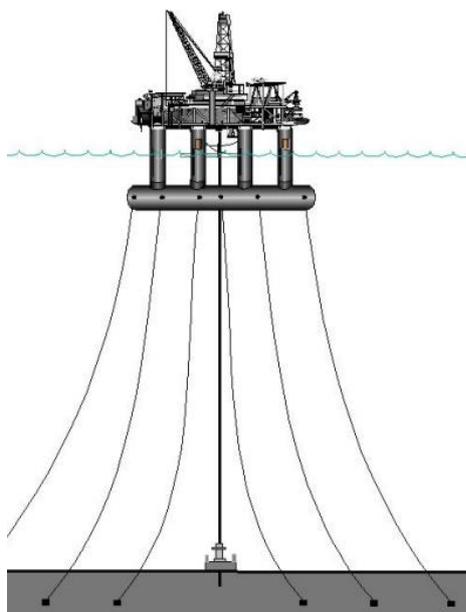
Figura 12 – Conceitos de Fundação para Turbina Eólicas *Offshore*.



Fonte: Carol Laurie ilustrado por Joshua Bauer (2017).

A plataforma semissubmersível é constituída por pontões e colunas, como mostrado na Figura 13. As colunas são responsáveis pela estabilidade hidrostática e os pontões pela flutuabilidade adicional (IRENA, 2016). A posição relativa é mantida por catenárias ou linhas de ancoragem esticadas e âncoras.

Figura 13 – Plataforma Semissubmersível para exploração de petróleo.



Fonte: Minerals Management Service (2000).

Esse tipo de plataforma pode ser transportado usando rebocadores, possui um menor custo de instalação da amarração e, se bem calibrado, tem uma tendência maior a se movimentar devido às ondas (IRENA, 2016).

2.3 HIDRODINÂMICA DAS ONDAS

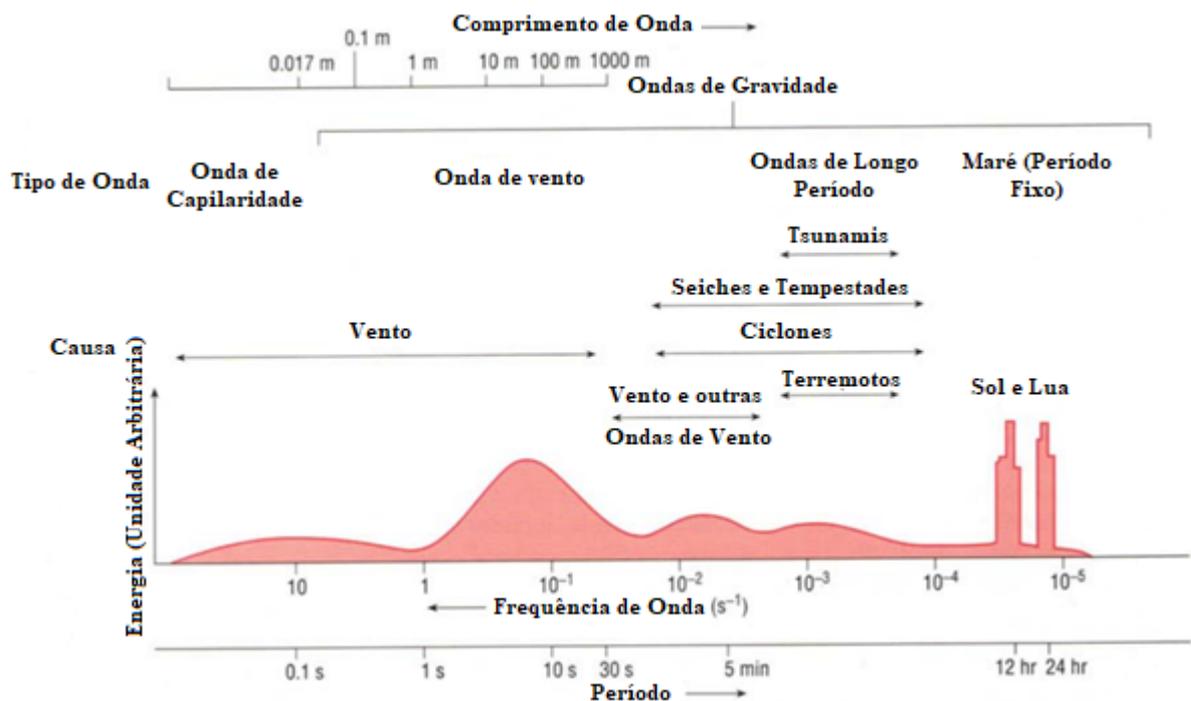
De acordo com a publicação *The Open University* (1999), as ondas mecânicas são sinais que transferem uma perturbação através de um meio, transportando energia, sem efetivamente transportar matéria. Existem dois tipos de ondas: de gravidade e de capilaridade.

As ondas cujo efeito é importante para o estudo desse trabalho são as ondas de gravidade, que se formam a partir dos raios solares. Eles, ao incidirem no solo terrestre, aquecem o ar, fazendo com que essa camada de ar fique mais leve e suba e, a camada de ar mais acima, por ser mais fria e mais densa, desça. Assim, o vento é formado.

O vento ao soprar na superfície do mar, transfere parte da energia eólica para a água, formando ondas que armazenam essa energia como energia potencial (na massa de água deslocada) e energia cinética (no movimento das partículas de água).

O tamanho e período das ondas resultantes dependem da quantidade de energia transferida, que é função da velocidade do vento, do tempo que o vento sopra (em dias ou horas) e do comprimento do oceano sobre o qual o vento sopra (*fetch*) (HUCKERBY et al., 2011). Na Figura 14 abaixo, são mostradas as frequências e períodos das ondas de gravidade e de capilaridade.

Figura 14 – Tipos de Ondas.



Fonte: *The Open University* (1999) adaptado pela Autora.

Segundo publicação da *University Of South Florida* (2005), existem três tipos de ondas principais geradas pelos ventos: ondas locais, *swell* e pequenas ondulações. As ondas geradas localmente viajam em diferentes direções e em diferentes velocidades e possuem períodos T típicos, Equação (1), entre 0,2s e 9s. Já o *swell* é gerado em uma localização remota, sendo mais regular e previsível que o mar local, tendo períodos entre 10s e 30s. As pequenas ondulações são mais irregulares, produzidas pelo vento na superfície do mar e de períodos menores que 0,2s.

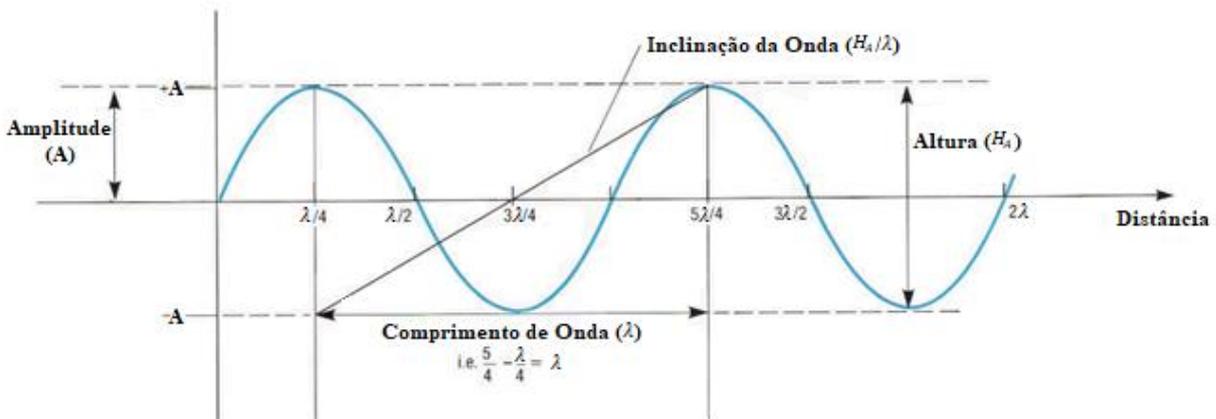
$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (1)$$

Onde ω é a frequência de excitação.

Para a caracterização da onda é necessário, primeiramente, definir algumas hipóteses simplificadoras, como: escoamento invíscido, incompressibilidade e irrotacionalidade do fluido. A primeira se justifica devido à viscosidade só possuir efeitos expressivos junto à superfície livre. Já a segunda, deve-se ao fato de o fluido analisado ser a água, e, portanto, a compressibilidade pode ser desconsiderada, já que seu efeito é pequeno. Por fim, estabelece-se o fluido irrotacional porque a viscosidade foi desconsiderada e as partículas de água são indeformáveis.

Com relação à caracterização geométrica, os parâmetros que definem a onda são: a elevação de onda ζ , a profundidade h , a amplitude A , o número de onda k , o comprimento λ , o período T e a altura H_A . Na abordagem linear, a amplitude pode ser considerada igual a altura dividida por dois, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Onda Marítima Idealizada.



Fonte: *The Open University* (1999) adaptado pela Autora.

O número de onda k surge a partir de uma igualdade da ciclicidade geométrica para a determinação do potencial de onda, onde é necessário que $\cos(k\lambda) = 1$ e $\sin(k\lambda) = 0$ chegando-se à conclusão que para essa igualdade ser verdadeira, o número de onda deve ser igual a Equação (2).

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

A elevação de onda é função do tempo e da distância, e representa o deslocamento vertical da superfície do mar, definida pela Equação (3).

$$\zeta(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (3)$$

A relação de dispersão da onda, Equação (4) “[...] trata-se de uma equação transcendental que relaciona diretamente a ciclicidade no tempo com a ciclicidade geométrica da onda” (FUJARRA, 2016, p. 19).

$$\frac{2\pi}{T^2} = g \frac{1}{\lambda} \left[\tanh \left(\frac{2\pi}{\lambda} h \right) \right] \quad (4)$$

A declividade máxima está associada à Teoria Linear de Airy, que “[...] se baseia na hipótese de que a altura é pequena em relação ao comprimento de onda e à profundidade da lâmina d’água. ” (ALBUQUERQUE, 2008, p. 63) Um valor típico da declividade é mostrado na Equação (5).

$$\frac{H_A}{\lambda} < 0.05 \quad (5)$$

Para o presente trabalho, será considerada a análise em águas profundas, ou seja, quando a profundidade é maior que metade do comprimento de onda. Neste sentido, uma simplificação pode ser feita na relação da dispersão, considerando o limite da profundidade h tendendo ao infinito, como mostra a Equação (6).

$$\omega^2 = gk \quad (6)$$

Como as ondas tendem a reduzir sua velocidade e aumentar a sua amplitude ao se aproximar da costa, fazendo com que as mesmas ‘quebrem’ e, conseqüentemente, percam energia, definiu-se que o WEC estará localizado em uma área de águas profundas.

2.4 ESPECTROS DE MAR PADRONIZADOS

Para se analisar o comportamento no mar da plataforma, bem como sua capacidade de geração de energia, é necessário definir qual o espectro de mar que melhor caracteriza os locais onde esta operará.

Espectros padronizados de mar são representações analíticas da distribuição das densidades espectrais de energia, obtidas de maneira precisa pela monitoração recorrente e continuada das elevações de mar, portanto pela caracterização de processos estocásticos formados por observações de período longo. Como tal, estas representações têm importância prática para projetos de sistemas navais e oceânicos, na medida em que são caracterizados por formulações baseadas em poucos parâmetros do mar, geralmente: a altura significativa; algum período característico (médio, entre zeros ascendentes ou entre picos); e mesmo, fatores de forma que contribuem para distribuição mais precisa das densidades espectrais de energia (FUJARRA, 2016, p.1).

Os espectros usuais nas aplicações navais e oceânicas são Pierson-Moskowitz (PM), Bretschneider, Espectro ISSC – International Ship Structures Congress, Espectro ITTC – International Towing Tank Conference e JONSWAP. O espectro utilizado para a análise do comportamento de mar no presente trabalho é o espectro de JONSWAP. Essa escolha foi feita porque esse espectro é bastante representativo no Mar do Norte e nas Bacias de Campos e Santos, no Brasil. E, também, porque usa fatores de forma e de agudez, não incorporados pelo PM, obtidos a partir do monitoramento do mar, distribuindo, assim, melhor as densidades espectrais, sendo mais próximo da realidade.

O *Joint North Sea Wave Project* foi concebido como um empreendimento cooperativo entre vários cientistas da Inglaterra, Holanda, Estados Unidos e Alemanha para obter dados espectrais de onda de extensão e densidade suficientes para determinar empiricamente a função densidade espectral de energia.

Conforme Hasselmann et al. (1973), um conjunto de sensores operando quase continuamente por um período de várias semanas é o método mais simples de se obter a densidade de amostragem adequada do campo de onda em relação à frequência, propagação direta, espaço e tempo, sob a ampla variedade desejada de condições geofísicas externas. Então, o JONSWAP utilizou treze estações de onda espaçadas ao longo de um perfil de 160 km que se estendia da Ilha de Sylt (norte da Alemanha) para o Mar do Norte. Os sensores ficaram em operação por quatro semanas durante julho de 1969.

Segundo Carter (1982), Pierson e Moskowitz em 1964 usando dados do *Shipborne Wave Recorders*, propuseram um espectro para um mar plenamente desenvolvido para prever ondas até que mais dados e melhores observações de velocidade do vento estivessem disponíveis. Dito isso, então, o Espectro JONSWAP, Equação (7), para mar totalmente desenvolvido foi definido por Hasselmann et al. (1973) ao multiplicar o Espectro de Pierson-Moskowitz por um fator de forma α e por um parâmetro de agudez γ . Tal fator e a frequência de pico foram definidos em termos da velocidade do vento e da pista (fetch) a partir de medições das ondas na Dinamarca.

$$S_{\zeta}(\omega) = \alpha g^2 \omega^{-5} \exp \left\{ -1,25 \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right\} \gamma \exp \left\{ -\frac{(\omega - \omega_p)^2}{2\tau^2 \omega_p^2} \right\} \quad (7)$$

Sendo $\alpha = 0,076X^{-0,22}$, $1 \leq \gamma \leq 7$ e $\tau = 0,07$ para $\omega \leq \omega_p$ e $\tau = 0,09$ para $\omega > \omega_p$.

Vale comentar que o mar plenamente desenvolvido é um estado de mar com ondas que têm uma condição estável em termos dos parâmetros estatísticos característicos do mar, ou seja, altura e período. Então, ao definir uma velocidade de vento, pista e duração, tais parâmetros estatísticos não se alteram, para esse tipo de mar.

A partir do espectro é possível definir os momentos espectrais, Equação (8).

$$m_n = \int_0^{\infty} \omega^n S_{\zeta}(\omega) d\omega \quad (8)$$

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (9)$$

$$H_s = 1,416H_{rms} \quad (10)$$

$$H_{med} = 0,886H_{rms} \quad (11)$$

Em particular a altura média entre o terço das maiores ondas individuais presentes nesse mar é a chamada altura significativa, Equação (9), tradicionalmente utilizada como parâmetro representativo da altura de um certo estado de mar. O momento de ordem zero m_0 , representa a variância total associada a um determinado estado de mar.

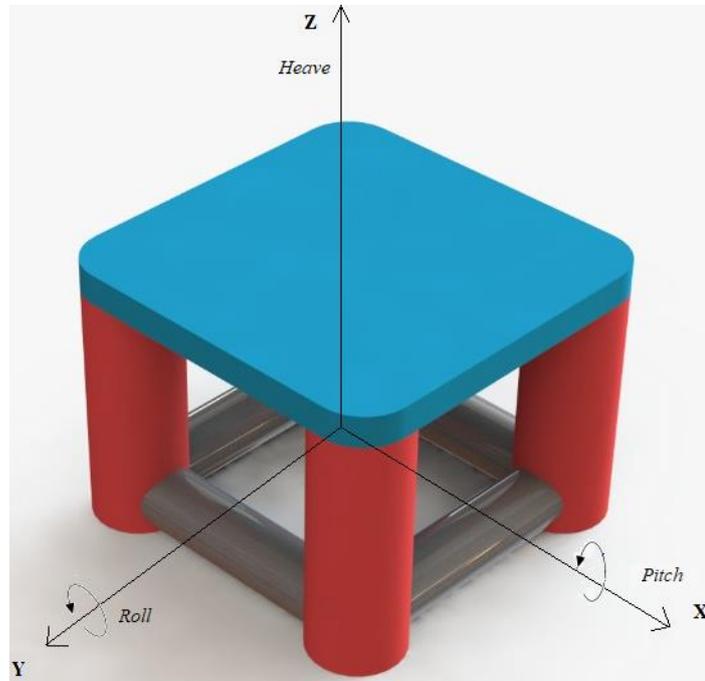
É importante ressaltar que as Equações (9), (10) e (11) só são válidas apenas se as hipóteses de banda estreita e de linearidade da teoria das ondas forem atendidas. A hipótese de banda estreita se justifica pelo mecanismo de geração de onda a partir do vento fazer com que a energia das ondas tenda a se concentrar em torno de uma determinada frequência (LONGUET-HIGGINS, 1952, p.251).

2.5 FORÇAS REATIVAS E DE EXCITAÇÃO AGINDO NA PLATAFORMA

Para definir o movimento da plataforma e do gerador, é preciso, primeiramente, definir as forças que agem na plataforma. Os três graus de liberdade (GLs) relevantes para o estudo do comportamento no mar, ou seja, onde as forças da onda agem, são *roll*, *heave* e *pitch* (Figura

16). Isso se deve ao fato desses GLs serem os únicos que possuem restauração hidrostática, sendo assim, os mesmos são influenciados pelo comportamento do mar, resultando em acelerações verticais na estrutura marítima.

Figura 16 – Graus de Liberdade de Restauração.

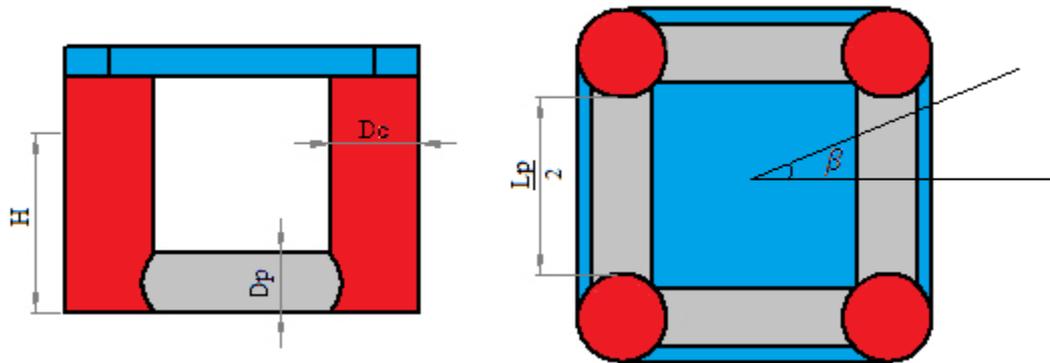


Fonte: Autora (2018).

Para o presente trabalho, o único grau de liberdade estudado será o de *heave*, logo, as contribuições das rotações serão desconsideradas.

Existem duas forças atuantes quando uma onda incide no corpo flutuante: reativa e excitante. A primeira corresponde à restauração hidrostática e ao termo de massa adicional. Já a segunda, atua na parte submersa do corpo e é devido à ação da pressão hidrodinâmica. Para o encaminhamento matemático abaixo, será necessário o conhecimento das características da plataforma, mostradas na Figura 17.

Figura 17 – Plataforma.



Fonte: Autora (2018).

A partir da Figura 17 é possível identificar as dimensões importantes para a análise, sendo elas o diâmetro das colunas D_c , o diâmetro dos pontões D_p , o calado H , o comprimento dos pontões L_p , e o ângulo de incidência de onda β .

Para auxiliar na definição das forças atuantes na plataforma, é necessário, primeiramente, apresentar a Teoria Linear de Airy para ondas de pequenas amplitudes.

2.5.1 Teoria Linear de Airy

A Teoria Linear de Airy tem base na hipótese de que a altura da onda é pequena com relação ao comprimento da onda e à profundidade da lâmina d'água. Logo, é possível linearizar as condições de contorno na superfície livre. “Para o caso de onda de pequena altura, a velocidade da partícula fluida é menor e, em consequência, o termo de inércia convectiva, que depende do quadrado da velocidade, pode ser desprezado relativamente ao termo de inércia local” (ALBUQUERQUE, 2008, p. 62). Desse modo, a parte não-linear é desprezada, sendo possível uma solução analítica.

Para definir as condições de contorno, faz-se uso da hipótese de continuidade do fluido, ou seja, a quantidade de fluido que entra e sai de um volume de controle é igual. Também é considerada a conservação da massa, com dois termos importantes: a taxa líquida de fluxo de massa pela superfície de controle e a massa de fluido no volume de controle. Assim, é possível escrever a conservação da massa na forma diferencial, mostrada na Equação (12).

$$\frac{\partial \rho u}{\partial x} + \frac{\partial \rho v}{\partial y} + \frac{\partial \rho w}{\partial z} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (12)$$

Conforme Fox, Mcdonald e Pritchard (2006), ao considerar o fluido irrotacional, é possível definir uma função potencial ϕ , evidenciada na Equação (13).

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x}, v = \frac{\partial \phi}{\partial y}, w = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (13)$$

A elevação do mar é dada em sua forma mais geral pela Equação (14) não-linear, representando a condição da partícula fluida na superfície livre não se mover para dentro do fluido.

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} + u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y} \quad (14)$$

Por fim, relaciona-se o campo de pressão no fluido e sua cinemática pela Equação (15) de Bernoulli, sendo o primeiro termo a inércia local, o segunda a inércia convectiva e o terceiro o termo de gravidade.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} \left[\left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \phi}{\partial z} \right)^2 \right] + g\zeta = 0 \quad (15)$$

A partir das relações enunciadas acima, é possível fazer algumas considerações para simplifica-las. A velocidade vertical no fundo do mar é zero, já que se considera que tal fundo é horizontal. O movimento é assumido como sendo infinitesimalmente pequeno. Como as componentes da inclinação da superfície livre tem pequenos valores para pequenas amplitudes, é possível desprezar os termos não-lineares. E, considera-se que a função potencial da onda é periódica no tempo. Dito isso, consegue-se chegar nas Equações (16), (17), (18) e (19) que são as condições de contorno de impenetrabilidade, dinâmica, cinemática e pseudo-contorno lateral, respectivamente, e na Equação (20) que é o termo de inércia convectiva.

$$w = \frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad z = -h \quad (16)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + g\zeta = 0 \quad z = 0 \quad (17)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{\partial \zeta}{\partial t} \quad z = 0 \quad (18)$$

$$\text{sen}(\omega t) = \text{sen}[\omega(t + T)] = \text{sen}(\omega t) \cos(\omega T) + \cos(\omega t) \text{sen}(\omega T) \quad (19)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0 \quad (20)$$

Sendo w a velocidade vertical e ϕ o potencial de onda, então, se consegue obter a equação do potencial de onda, Equação (21), e da velocidade vertical, Equação (22), a partir do gradiente do potencial de onda para águas profundas ($w = \partial\phi/\partial z$).

$$\phi(x, z, t) = \frac{gA}{\omega} e^{-kh} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (21)$$

$$w(x, z, t) = \omega A e^{-kh} \text{sen}(kx - \omega t) \quad (22)$$

2.5.2 Força Reativa

Conforme mencionado, a força reativa pode ser decomposta em duas parcelas: restauração hidrostática e inércia adicional. A força de sentido contrário ao peso do corpo é o empuxo, ou seja, é a força de restauração da água num fluido em repouso, também conhecida como restauração hidrostática. Quando um corpo qualquer se movimenta na água, ocorre a alteração do campo de pressão em torno desse corpo, o que resulta em uma mudança na sua aceleração. Desse modo, essa mudança na aceleração pode ser traduzida como uma inércia adicional, isto é, uma parcela de massa responsável por alterar a aceleração do corpo.

A força da restauração hidrostática é função do calado e da área de flutuação, como mostrado na Equação (23).

$$F_h = \rho g A_f H \quad (23)$$

É possível completar a análise, incorporando o efeito da onda ao utilizar a função de Bernoulli, evidenciada na Equação (24).

$$P(x, z, t) = -\rho g h + \rho A g e^{kz} \cos(kx - \omega t), \quad (24)$$

Sendo o primeiro termo a restauração do sistema e o segundo a parcela de excitação da onda, que será tratada com mais detalhes no próximo tópico.

Por outro lado, a inércia depende de outros fatores como a profundidade, a seção transversal do corpo imerso e a frequência de oscilação. Porém, ao considerar águas profundas, o efeito da profundidade pode ser desconsiderado, assim como a frequência, já que se assume fluido sem fronteiras. Também, deve-se considerar que $H/D_p \gg 1$ e $L_p/D_p \gg 1$, para que seja possível ponderar que o movimento das colunas não influencie no movimento dos pontões. A partir de tais considerações, a massa adicional passa a ser função somente da geometria do corpo, como mostra a Equação (25).

$$m_a = \rho C_m S \quad (25)$$

Como a área projetada (S) do pontão é muito maior que a área projetada da coluna, a massa adicional devido à coluna pode ser desprezada. O C_m é o coeficiente de massa adicional seccional, onde o seu valor é definido de acordo com a geometria da secção.

2.5.3 Força Excitante

O efeito da força das ondas é importante tanto nas colunas quanto nos pontões, já que a pressão hidrodinâmica é função da profundidade. Como dito acima, a definição das forças excitantes deriva da equação de Bernoulli, que, por sua vez, é determinada a partir da velocidade do escoamento, mostrado na Equação (22).

Para os pontões, como dito anteriormente, deve-se considerar uma parcela da força de origem reativa e outra de excitação da onda. De modo simplificado, a força nos pontões pode ser expressa como mostrado na Equação (26), sendo a primeira parcela a força devido à inércia adicional, já que a área dos pontões perpendicular à direção vertical é considerável e, a segunda parcela se deve ao movimento do corpo devido à incidência de onda.

$$F_p = m_a \dot{w} + \rho S \dot{w} = (1 + C_m) \rho S \dot{w}, \quad (26)$$

Sendo C_m a massa adicional por comprimento do pontão sobre a área da secção vezes a massa específica da água e F_p a força agindo nos pontões. Então, a partir da Equação (26) e da derivada da velocidade da Equação (22), é possível definir a Equação (27) da força agindo nos pontões, segundo Aranha (1993).

$$F_p = -(1 + C_m)\rho V_p \omega^2 A e^{-k\left(H - \frac{D_p}{2}\right)} \frac{1}{2} \left\{ \frac{\text{sen}(kL_p \cos\beta) \cos(kL_p \text{sen}\beta)}{kL_p \cos\beta} + \frac{\text{sen}(kL_p \text{sen}\beta) \cos(kL_p \cos\beta)}{kL_p \text{sen}\beta} \right\} \cos(\omega t) \quad (27)$$

Para chegar na Equação (27) integrou-se a força ao longo do comprimento, fez-se uso de identidades trigonométricas e da relação de Euler e já foi considerado os quatro pontões, sendo V_p o volume deslocado pelos mesmos.

Com relação às colunas, a parcela significativa de força é a de excitação, mostrada na relação de Bernoulli acima. Logo, a força agindo nas colunas pode ser representada pela Equação (28), conforme Aranha (1993).

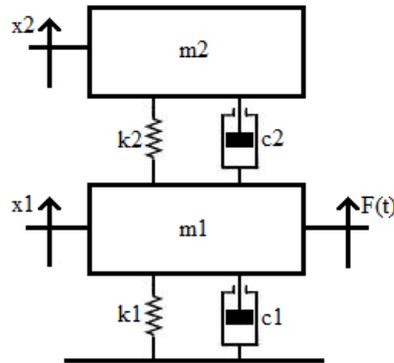
$$F_c = \rho A_f \omega^2 A e^{-kH} \cos(kL_p \text{sen}\beta) \cos(kL_p \cos\beta) \cos(\omega t) \quad (28)$$

Para se chegar na Equação (28) utilizou-se um procedimento semelhante ao da Equação (27), sendo A_f a área de flutuação das quatro colunas.

2.6 EQUAÇÃO DE MOVIMENTO

Para definir a equação do movimento da plataforma acoplada ao gerador, é preciso, primeiro, determinar o sistema massa mola amortecedor dos dois. Como ilustra a Figura 18, as estruturas foco do trabalho podem ser representadas como duas massas, sendo a massa 1 a plataforma e sua massa adicional, e a massa 2 o gerador, acopladas pelos elementos de restauração 2 e amortecimento 2. Sendo a força $F(t)$, função do tempo, definida pelas Equações (27) e (28) referentes às forças que agem na plataforma.

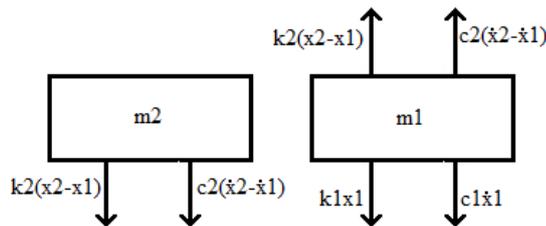
Figura 18 – Sistema Massa Mola Amortecedor.



Fonte: Autora (2018).

Com base no sistema massa-mola-amortecedor, consegue-se fazer os diagramas de corpos livres, mostrados na Figura 19. Tendo tais diagramas, aplica-se a Segunda Lei de Newton, e obtém-se o sistema de Equações do movimento, (29) e (30).

Figura 19 – Diagrama de Corpo Livre.



Fonte: Autora (2018).

$$m_1 \ddot{x}_1 + (c_1 + c_2) \dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2 \dot{x}_2 - k_2 x_2 = F(t) \quad (29)$$

$$m_2 \ddot{x}_2 + c_2 \dot{x}_2 + k_2 x_2 - c_2 \dot{x}_1 - k_2 x_1 = 0 \quad (30)$$

O sistema de equações diferenciais acima é um sistema linear não homogêneo, devido à função $F(t)$. Logo, a solução geral desse sistema de equações será composta por uma parte homogênea e outra particular, sendo essa última em virtude do $F(t)$. Mais à frente serão explicados às especificidades de cada solução.

Como mostrado pela Equação (23), k_1 é a restauração hidrostática da plataforma, sendo definida pela Equação (31).

$$k_1 = \rho g A_f \quad (31)$$

Já o amortecimento c_1 da plataforma pode ser definido pela Equação (32).

$$c_1 = 2\varepsilon_1 m_1 \omega_{nh} \quad (32)$$

Sendo ε_1 o coeficiente de amortecimento e ω_{nh} a frequência natural de *heave* somente da plataforma.

Esse é um modo de assumir um amortecimento viscoso para se evitar regiões ressonantes, já que na teoria potencial as parcelas viscosas são desconsideradas. Segundo Fujarra (2009), o valor do coeficiente de amortecimento para plataformas semissubmersíveis se encontra na faixa entre 1% e 10%, sendo possível obter esse valor de forma aproximada a partir de ensaios de decaimento com modelos em escala reduzida.

Já para a definição do amortecimento e da restauração do gerador, utilizou-se a Equação (32), segundo análise paramétrica mais adiante apresentada.

2.7 SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A geração de energia ocorre quando a energia cinética se transforma em energia elétrica, ou seja, potência útil para ser utilizada. Um modo de se realizar tal transformação é utilizar um gerador. Segundo Eriksson (2007), existem três maneiras de se modelar um gerador: modelagem baseada em campo, teoria do circuito e amortecimento mecânico. A diferença entre elas é a complexidade e a demanda computacional de cada uma. A primeira e a segunda utilizam métodos de elementos finitos. Já a última é um modelo mais simples onde a potência gerada é função do amortecimento mecânico e da velocidade, mostrado na Equação (33).

$$Pot = c \times \dot{x}^2 \quad (33)$$

Com esta abordagem, apenas o sistema mecânico pode ser estudado, não considerando o aspecto elétrico do gerador. Conforme Eriksson (2007), essa modelagem é muito rápida e não depende de uma alta demanda computacional como os outros métodos.

Por não se saber o valor exato do amortecimento do gerador, utilizou-se a Equação (34).

$$c_2 = 2\varepsilon_2 m_2 \omega_{nh2} \quad (34)$$

Sendo ε_2 o coeficiente de amortecimento do gerador e ω_{nh2} a frequência natural somente do gerador.

Como, o presente trabalho se encontra em uma fase inicial de definição de parâmetros, é importante explorar a interferência dos mesmos no valor de geração de energia. Assim, a influência do amortecimento para a geração de energia será investigada, variando-o.

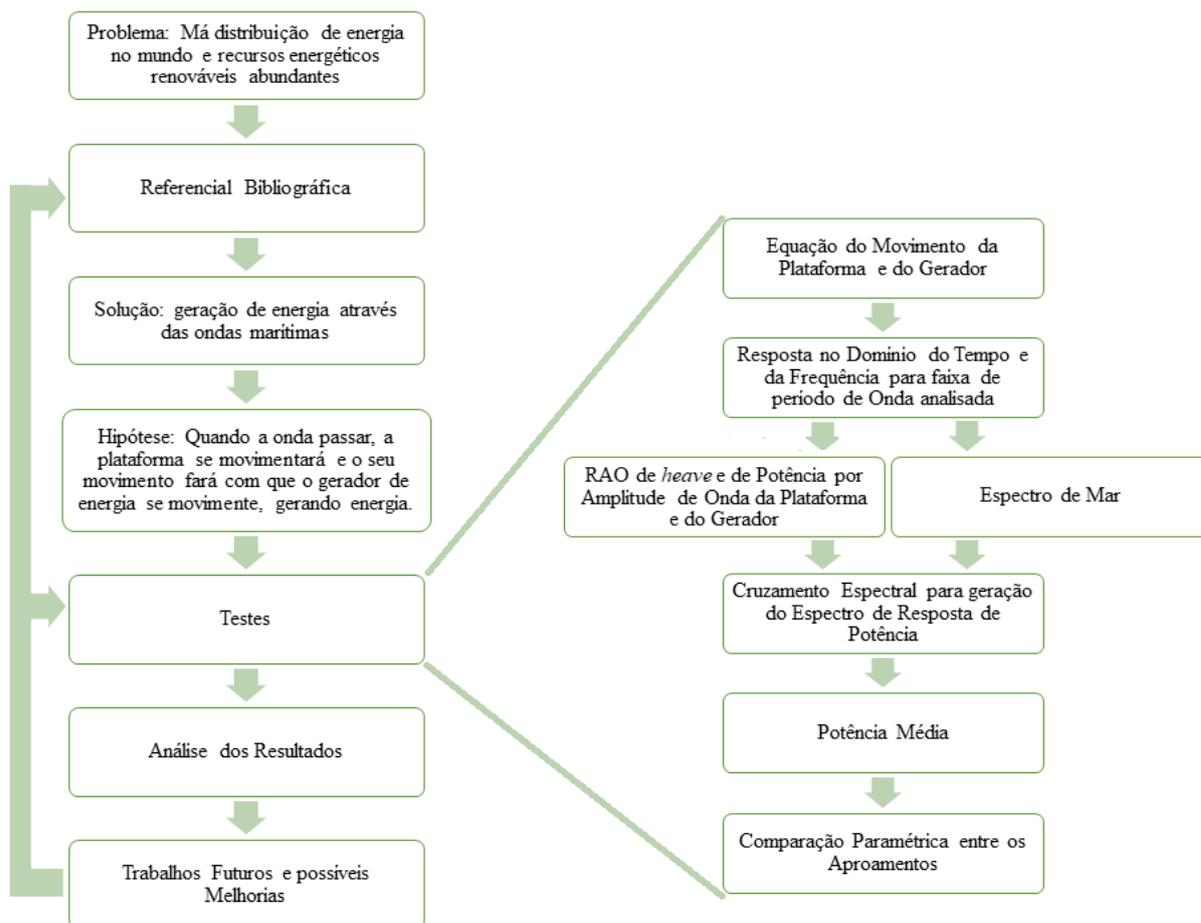
3 MÉTODOS

O presente capítulo tem por intuito detalhar o percurso desenvolvido para chegar ao objetivo final do trabalho, ou seja, o método. “[...] o método é o conjunto das atividades sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo - conhecimentos válidos e verdadeiros -, traçando o caminho a ser seguido, detectando erros e auxiliando as decisões do cientista” (LAKATOS; MARCONI, 2003, p. 79).

O método aplicado ao trabalho é o hipotético-dedutivo. Segundo Popper (1975), conforme citado por Lakatos e Marconi (2003), tal método científico parte de um problema onde se define uma possível solução, tendo como base conhecimentos prévios, e, posteriormente, analisam-se esses resultados e avaliam-se se os mesmos são válidos ou não. A partir deste ponto, decide-se o que fazer com esses resultados.

Então, conforme o estudo desenvolvido, adaptou-se uma abordagem metodológica, visualizada na Figura 20. O intuito desse esquema é mostrar os passos do trabalho, para, assim, melhor entendê-lo e organizá-lo de modo que fique claro o objetivo, a base teórica e os meios.

Figura 20 – Esquema Metodológico.



Fonte: Autora (2018).

Os capítulos de introdução e fundamentação teórica são os responsáveis pelo levantamento do problema, pelo referencial teórico, pela solução e pela hipótese. Os testes serão detalhados no presente capítulo. A análise dos resultados será feita no capítulo 4, dada a importância e a quantidade de informação que deve ser discutida. Por fim, as possíveis melhorias serão detalhadas no capítulo 5. É importante comentar que, propondo uma melhoria para futuros trabalhos, deve-se fazer novas pesquisas afim de complementar a base teórica e, assim, sugerir novos testes, o que indicam as setas ascendentes.

Para a condução dos testes utilizou-se a ferramenta computacional Matlab, já que o trabalho possui um cunho predominantemente analítico. A partir dela, é possível usar funções do programa e plotar gráficos para a melhor visualização dos resultados. Em cada tópico será explicado como utilizou-se tal ferramenta para se chegar aos resultados desejados.

3.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DA PLATAFORMA E DO GERADOR E DOS DADOS DE ENTRADA

As dimensões e o peso da plataforma e do gerador foram definidos de forma que a frequência natural dos sistemas separados ficasse na faixa excitável pelo mar analisado, ou seja, entre 0,415rad/s e 31,416rad/s. Então, variou-se o comprimento dos pontões, o diâmetro das colunas e dos pontões e o calado da plataforma para que os mesmos ficassem em tal faixa e fossem próximos a plataformas para turbinas eólicas *offshore* já existentes, em termos de dimensão. Como base, tem-se o projeto *London Array Offshore Wind Farm*, cujo fundeio em que a turbina eólica se sustenta possui 5,7m de largura, segundo London Array (2010) (Figura 21) e as dimensões dos *WECs* mostradas na Figura 11 no capítulo da Fundamentação Teórica.

Figura 21 – *London Array Offshore Wind Farm*.



Fonte: London Array (2010).

A Tabela 1 mostra os parâmetros definidos para a plataforma e para o gerador, onde foi estimado um valor máximo e mínimo para o calado da plataforma de 7m e 5m, respectivamente.

Tabela 1 – Parâmetros Plataforma e Gerador.

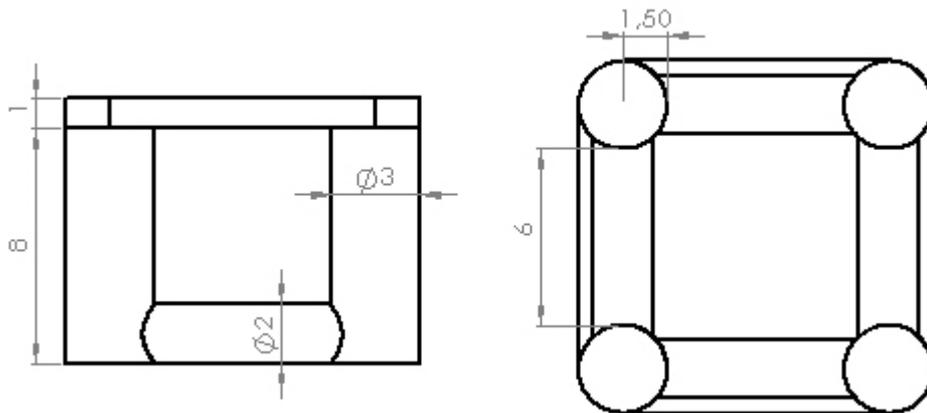
Estrutura	Parâmetro	Valor	Unidade
Plataforma	Comprimento do Pontão	3 m	
	Comprimento da Coluna	9 m	
	Diâmetro do Pontão	2 m	
	Diâmetro da Coluna	3 m	
	Calado	7 e 5 m	
	Frequência Natural	0,892 e 0,974 rad/s	
Gerador	Comprimento Externo	1 m	
	Comprimento Interno	0,9 m	
	Restauração	5.000 N/m	
	Frequência Natural	1,532 rad/s	

Fonte: Autora (2018).

A massa do gerador foi definida tendo como base um cubo de espessura de 5 centímetros. Assim, ela foi calculada considerando que o mesmo é feito de aço e possui densidade de 7860 kg/m^3 . O amortecimento do gerador foi calculado conforme a Equação (34), assim como o amortecimento da plataforma.

Para melhor ilustrar a plataforma com as suas dimensões, foi feita via Solid Works a modelagem dela (Figura 22).

Figura 22 – Modelagem Plataforma.



Fonte: Autora (2018).

O ângulo de incidência de onda β , que foi tratado no tópico 2.5 da Fundamentação Teórica, será variado conforme as direções mostradas na Tabela 2. Os dados da Tabela 2 serão utilizados para a geração dos gráficos de Espectro Padronizado JONSWAP, definido pela Equação (7).

Tabela 2 – Parâmetros JONSWAP conforme direção de incidência de onda.

Parâmetros	Direção						
	Norte	Nordeste	Leste	Sudeste	Sul	Sudoeste	Oés-Noroeste
Período de Pico (s)	8,38	8,54	8,89	10,29	13,26	13,70	8,06
Fator de Forma	0,0106	0,0115	0,0088	0,0081	0,0038	0,0041	0,0087
Parâmetro de Agudez	2,05	2,09	2,06	1,51	1,53	1,55	1,97

Fonte: Dados arbitrados com base em levantamentos feitos pela costa brasileira através do MetOceanView (2018).

Serão analisadas duas situações de aproamento para a plataforma: pontões paralelos e perpendiculares em relação às direções leste, norte, oeste e sul, e pontões paralelos e perpendiculares às direções nordeste, noroeste, sudoeste e sudeste. Assim, poderá ser avaliada qual das duas posições de aproamento é a melhor em termos de geração de energia. Tal questão será melhor abordada nos resultados e discussões.

Um parâmetro que deve ser investigado é o amortecimento do gerador, por não se conseguir determinar analiticamente. Sabe-se que quanto maior o amortecimento, menor é a velocidade, logo, menor é a energia gerada. Porém, na Equação (33) da geração de energia, quanto maior for o amortecimento, maior a potência gerada. Desse modo, o valor de amortecimento foi calculado arbitrariamente pela Equação (32) para a plataforma, considerando um coeficiente de amortecimento de 0,1 e pela Equação (34) para o gerador, variando o coeficiente de amortecimento de 0,1 a 0,9.

Para a resolução do sistema de equações diferenciais é necessário definir condições iniciais para os deslocamentos e velocidades, já que tais equações possuem quatro valores iniciais indefinidos: o deslocamento do gerador e da plataforma e a velocidade do gerador e da plataforma. Considerou-se que a plataforma e o gerador estão em repouso e na sua posição inicial, desse modo, tais valores são zero.

Segundo o Teorema da Amostragem de Shannon-Nyquist, a quantidade de pontos para gerar o gráfico de resposta no tempo deve ser definida conforme a Equação (35). Assim, foi possível determinar uma quantidade de pontos N suficiente para caracterizar tal resposta.

$$N \geq (tf - to)2.5 \times f_{max} \quad (35)$$

Sendo f_{max} a maior frequência de interesse em Hz. O to é o instante inicial, tendo valor nulo e o tf foi definido até 5000s, conforme a elaboração dos gráficos de resposta, por conter valores

suficientes para a análise, já ter atingido o regime permanente e de modo que não demandasse muito computacionalmente.

Conforme a Figura 14 e a Tabela 2, foi definido um intervalo de interesse para a análise de mar com período entre 0,2s e 15s ou frequências entre 0,42rad/s e 31,42rad/s.

Agora, tendo os parâmetros da plataforma e do gerador e os dados de entrada da análise, é possível dar continuidade aos testes.

3.2 EQUAÇÃO DO MOVIMENTO DA PLATAFORMA E DO GERADOR

A partir do diagrama de corpo livre do gerador e da plataforma, é possível definir as forças que agem nas duas estruturas e montar o sistema de equações do movimento. Tais equações são diferenciais ordinárias lineares de segunda ordem, mostradas nas Equações (36) e (37).

$$m_1\ddot{x}_1 + (c_1 + c_2)\dot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - c_2\dot{x}_2 - k_2x_2 = F_{heave}(t) \quad (36)$$

$$m_2\ddot{x}_2 + c_2\dot{x}_2 + k_2x_2 - c_2\dot{x}_1 - k_2x_1 = 0 \quad (37)$$

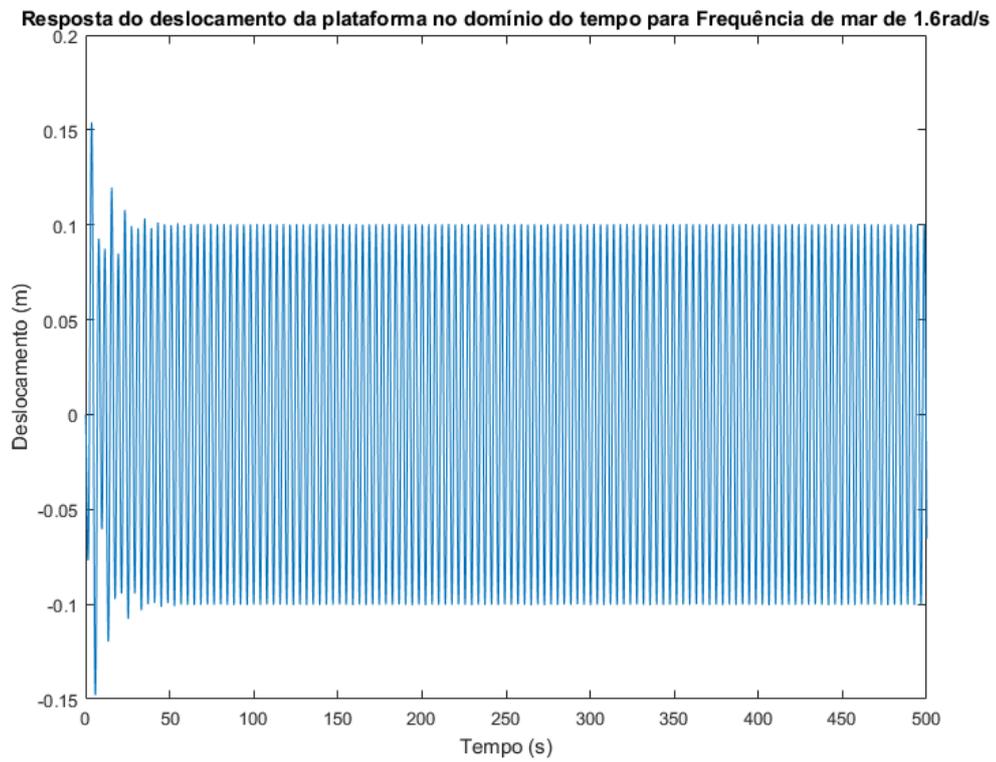
$F_{heave}(t)$ é a soma das Equações (27) e (28) de força agindo na plataforma.

Tendo as equações que agem na plataforma e no gerador, é possível resolvê-las utilizando a função *ode45* do Matlab.

3.3 MÉTODOS DE ANÁLISE DA RESPOSTA NO DOMÍNIO DO TEMPO E DA FREQUÊNCIA

Ao utilizar a função *ode45* do *Matlab*, obtém-se a resposta no domínio do tempo do sistema. A resposta no domínio do tempo abrange tanto o regime transiente (Figura 23) quanto o permanente (Figura 24). Porém, no regime transiente, que desaparece com o tempo devido ao fator de amortecimento, se situa a resposta homogênea livre. Já no regime permanente se encontra a resposta particular, aonde se têm os efeitos da forçante da onda, que é de interesse para o comportamento no mar. Deste modo, para a análise no domínio da frequência, só foi utilizado o regime permanente, ou seja, no intervalo de tempo do mesmo. Assim, ao observar os gráficos gerados, definiu-se um tempo de corte no valor de 4500s de modo que só se analisasse os valores do regime permanente.

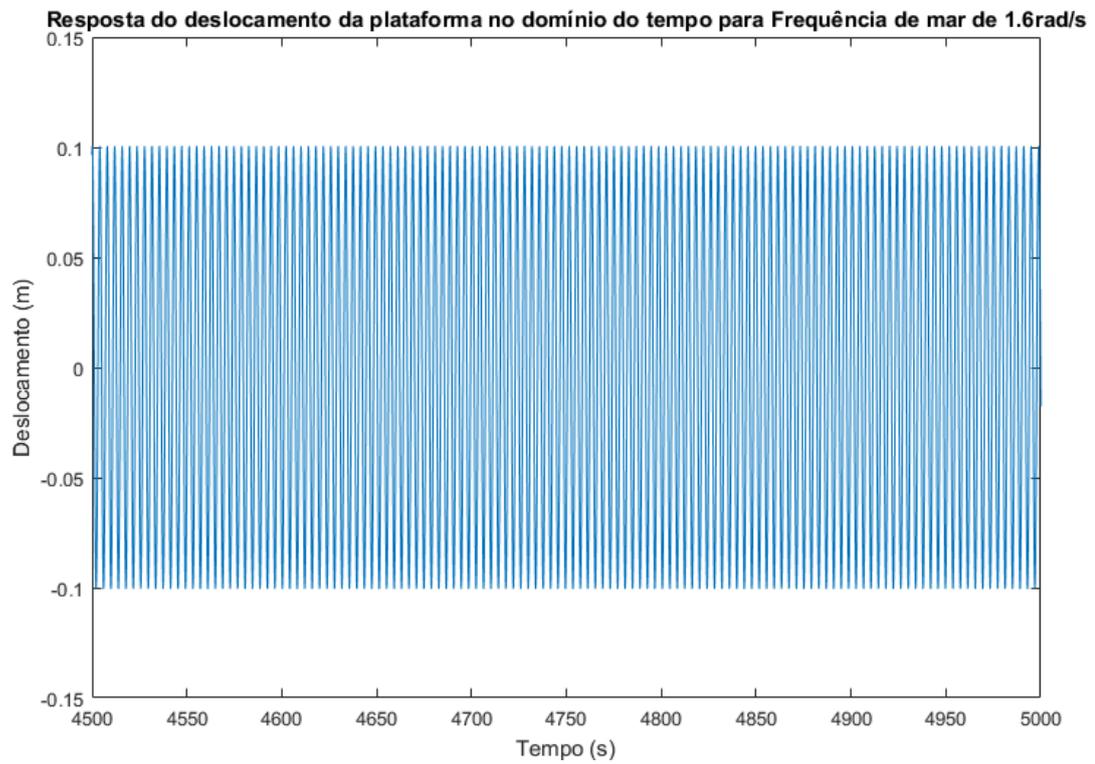
Figura 23 – Resposta no domínio do tempo em regime transiente.



Fonte: Autora (2018).

Como explicado no capítulo anterior, para cada período ou frequência de mar, foi gerado um gráfico de resposta no tempo (Figura 24). Porém, para melhor comparar tais gráficos com relação ao valor da amplitude, é preciso utilizar o domínio da frequência. Assim, faz-se uso da *Discrete Fourier Transform*, ou transformada discreta de Fourier.

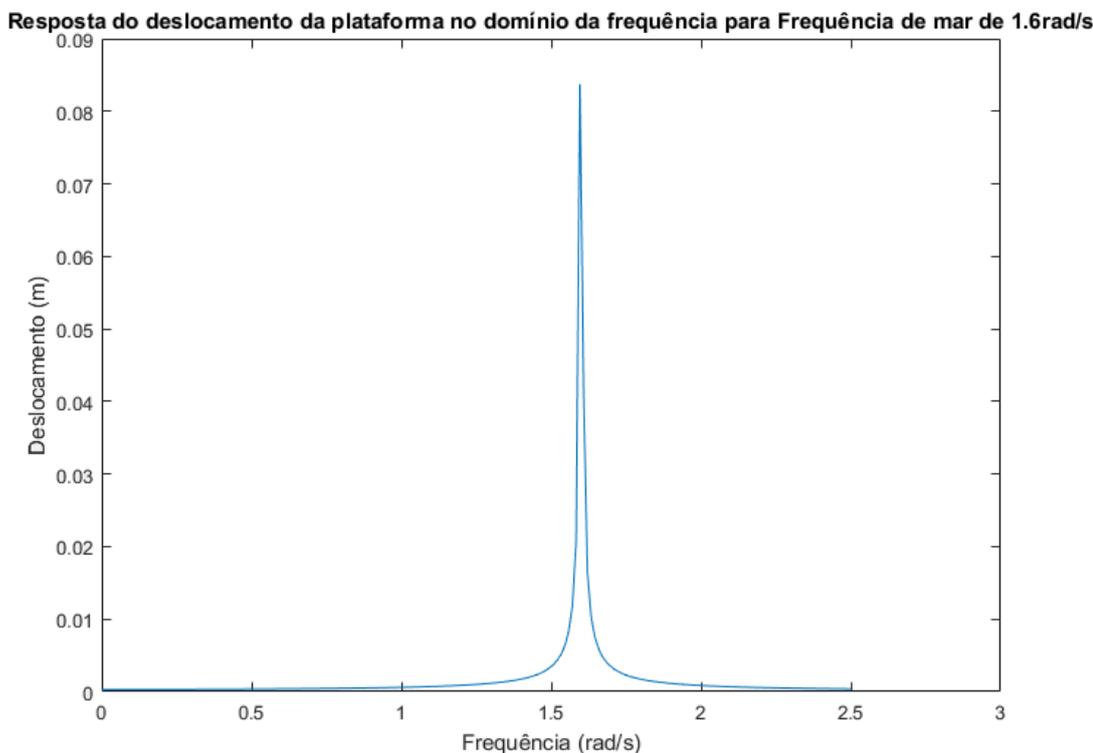
Figura 24 – Resposta no domínio do tempo em regime permanente.



Fonte: Autora (2018).

O Matlab possui a função *fft* que realiza a transformada discreta de Fourier, dada a função no domínio do tempo e o número de pontos de tal função. Então, para cada período de mar, é feito o gráfico de resposta no domínio do tempo, como mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Resposta no domínio da frequência.



Fonte: Autora (2018).

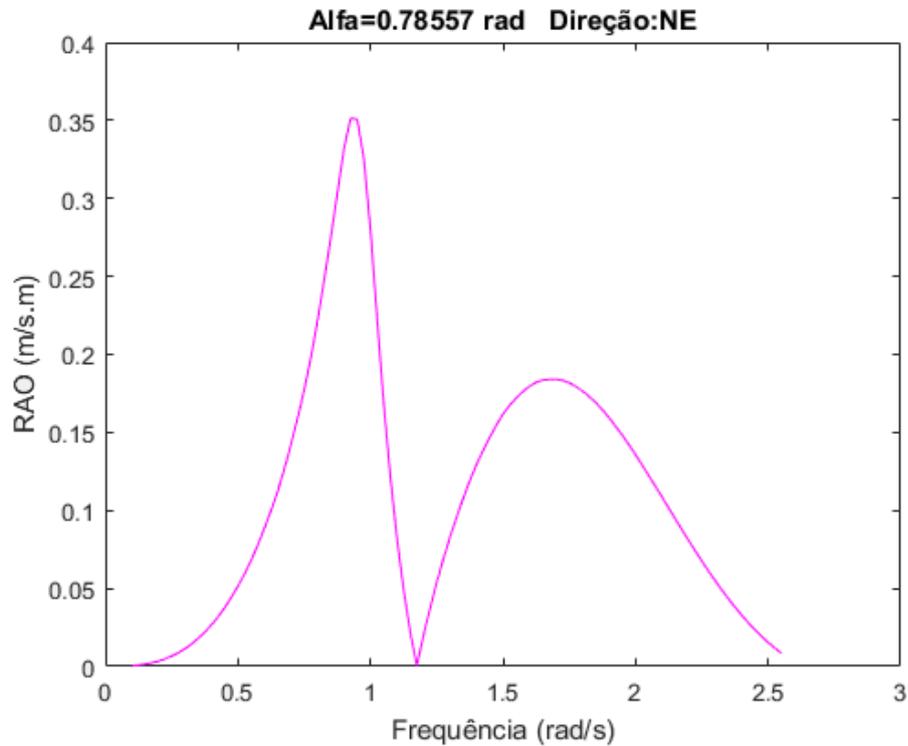
Como pode ser visto na Figura 25, o pico se encontra na frequência do mar, já que o sistema está sendo excitado em tal frequência.

3.4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE *HEAVE* E DE POTÊNCIA POR AMPLITUDE DE ONDA

A função de transferência ou *Response Amplitude Operator (RAO)* é a magnitude da resposta dada uma excitação. Logo, a função de transferência do gerador para o grau de liberdade em *heave* é definido pelo eixo das ordenadas com cada valor de pico das frequências de mar, dividido pela amplitude de onda e pelo eixo das abcissas com os valores de frequência de mar analisado. Vale ressaltar que foi gerado a função de transferência de *heave* para cada direção de mar analisada.

Como o objetivo do trabalho é estimar o valor de potência gerada pelo gerador, é necessário definir, primeiramente, uma função de transferência de potência por amplitude de onda. Sabe-se que a potência por amplitude de onda é o amortecimento vezes a velocidade relativa ao quadrado, como mostra a Equação (33). Então, para se obter a função de transferência de potência por amplitude de onda, deve-se definir a função de transferência de velocidade relativa (Figura 26), quadrá-lo e multiplica-lo pelo amortecimento do gerador.

Figura 26 – Função de Transferência de velocidade relativa por Amplitude de Onda para direção nordeste.



Fonte: Autora (2018).

3.5 ESPECTRO DE MAR

Como dito no capítulo de Fundamentação Teórica, o espectro padronizado do presente trabalho é o JONSWAP. Assim, para cada uma das direções de mar, mostradas na Tabela 2, foi calculado o espectro de mar de acordo com a Equação (7).

3.6 ESPECTRO DE RESPOSTA DE POTÊNCIA

O espectro de resposta de potência é obtido a partir do cruzamento espectral entre a função de transferência de potência por amplitude de onda e o espectro de mar, dado pela Equação (38).

$$S_R^{Pot} = S_\zeta \times RAO_{Pot}^2 \quad (38)$$

Para cada uma das direções é obtido um espectro de resposta de potência. Tais gráficos serão mostrados e discutidos no próximo capítulo.

3.7 POTÊNCIA MÉDIA

Assim como se obtém uma altura média de resposta a partir do momento espectral, Equação (11), foi definido uma potência média de resposta a partir do momento espectral de potência, definido pela Equação (39), abaixo.

$$m_n^{Pot} = \int_0^{\infty} \omega^n S_R^{Pot}(\omega) d\omega \quad (39)$$

A potência média para cada uma das direções pode ser calculada, então, a partir do momento espectral de potência de ordem zero, dada pela Equação (40).

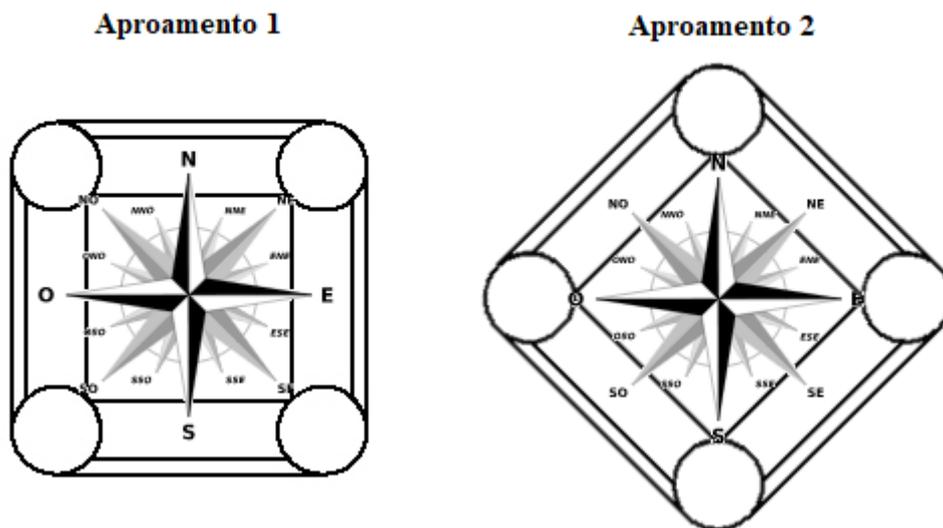
$$A^{Pot} = 1.2514 \times \sqrt{m_0^{Pot}} \quad (40)$$

É importante ressaltar que dois aproamentos foram analisados: pontões paralelos e perpendiculares em relação às direções leste, norte, oeste e sul, e pontões paralelos e perpendiculares às direções nordeste, noroeste, sudoeste e sudeste. Para cada uma dessas análises variou-se tanto o calado quanto o amortecimento do gerador para investigar a influência de tais parâmetros na geração de energia. Os resultados obtidos serão detalhados no próximo capítulo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O presente capítulo é o responsável por detalhar e explicar os resultados obtidos a partir dos métodos descritos no capítulo anterior. Assim, dividiu-se os resultados em duas análises de aproamento: a plataforma fundeada de modo que os pontões estejam paralelos e perpendiculares em relação às direções leste, norte, oeste e sul, e a plataforma fundeada tendo os pontões paralelos e perpendiculares às direções nordeste, noroeste, sudoeste e sudeste, como mostrado na Figura 27, abaixo.

Figura 27 – Aproamentos Analisados.



Fonte: Autora (2018).

Após tal análise, será feito um comparativo entre os dois aproamentos em termos de geração de energia em função do calado da plataforma e do amortecimento do gerador.

4.1 APROAMENTO 1

O modo como a plataforma é fundeada influencia na quantidade de energia gerada devido aos diferentes espectros de mar e das forças agindo na plataforma em função da direção. Logo, esse tópico mostrará os resultados obtidos para o Aproamento 1 com relação à função de transferência de *heave* e de potência por amplitude de onda, o espectro de mar, o cruzamento

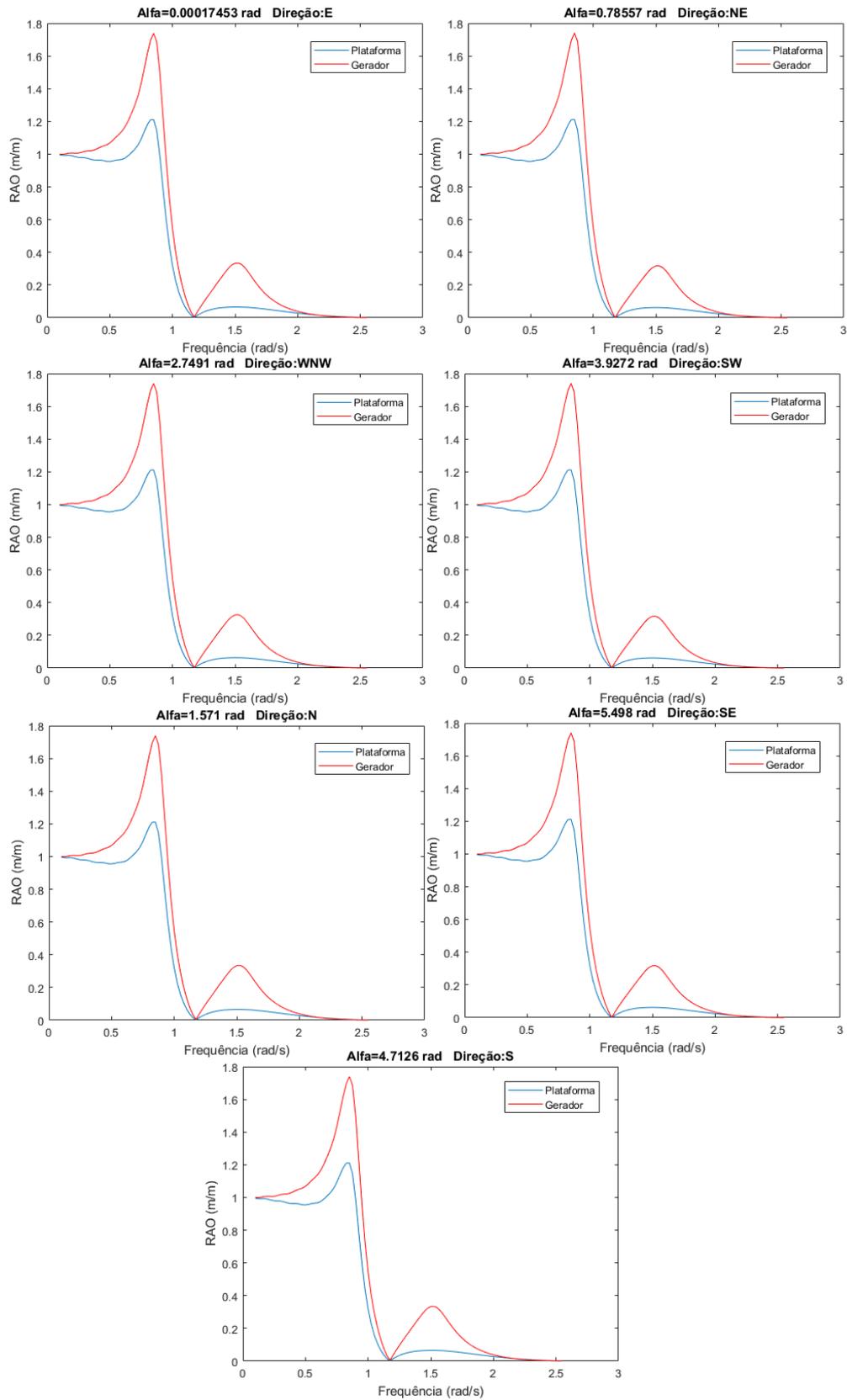
espectral de resposta em potência e a potência média por direção. Vale ressaltar que o valor de calado utilizado para o encaminhamento abaixo foi de 7m e o valor de coeficiente de amortecimento do gerador foi de 0,1. Tais parâmetros serão melhor discutidos mais à frente.

4.1.1 Função de Transferência de *heave*

A função de transferência de *heave* foi calculada para o intervalo de períodos de mar típicos entre 0,2s a 15s. Para cada uma dessas frequências, obteve-se a resposta no tempo e já no regime permanente, posteriormente determinou-se a resposta no domínio da frequência. Selecionando o valor máximo de cada resposta no domínio da frequência, ou seja, o valor em metros na frequência de excitação, sendo tal frequência, a frequência de mar, e dividindo esse valor máximo pela amplitude, foi possível definir a função de transferência de *heave* do gerador e da plataforma.

Como dito anteriormente, foi escolhida a geometria de plataforma semissubmersível para a boia com a finalidade de comparar a diferença da resposta dependendo do ângulo de incidência da onda. Dessa forma, obteve-se as funções de transferência de *heave* para os ângulos: 0°, 45°, 90°, 157.5°, 225°, 270° e 315°, correspondentes, respectivamente, às direções: leste, nordeste, norte, oés-noroeste, sudoeste, sul e sudeste, mostrados na Figura 28.

Figura 28 – Função de Transferência de *heave* para o Aproamento 1.



Fonte: Autora (2018).

A partir da Figura 28 é possível tirar algumas conclusões. Primeiramente, o gerador responde mais que a plataforma, sendo algo positivo, já que quanto maior o movimento do gerador, mais energia será gerada e quanto menor o movimento da plataforma, menor é o esforço mecânico e a probabilidade de falha por fadiga. A outra inferência é que as direções norte, sul e leste, e nordeste, sudeste e sudoeste possuem a mesma resposta. Isso se justifica devido a simetria da plataforma. Já a direção oés-noroeste possui resposta ligeiramente diferente das outras devido ao seu ângulo. Na Tabela 3 é possível visualizar a resposta adimensional em função das frequências de pico da plataforma e do gerador.

Tabela 3 – Função de Transferência de *heave* para o Aproamento 1.

Estrutura	Frequências de Pico (rad/s)	Resposta (m/m)						
		Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
Gerador	0,850	1,739	1,739	1,739	1,740	1,740	1,740	1,740
Plataforma	0,850	1,211	1,211	1,211	1,212	1,212	1,212	1,212
Gerador	1,525	0,335	0,335	0,335	0,326	0,317	0,317	0,317
Plataforma	1,500	0,066	0,066	0,066	0,064	0,062	0,062	0,062

Fonte: Autora (2018).

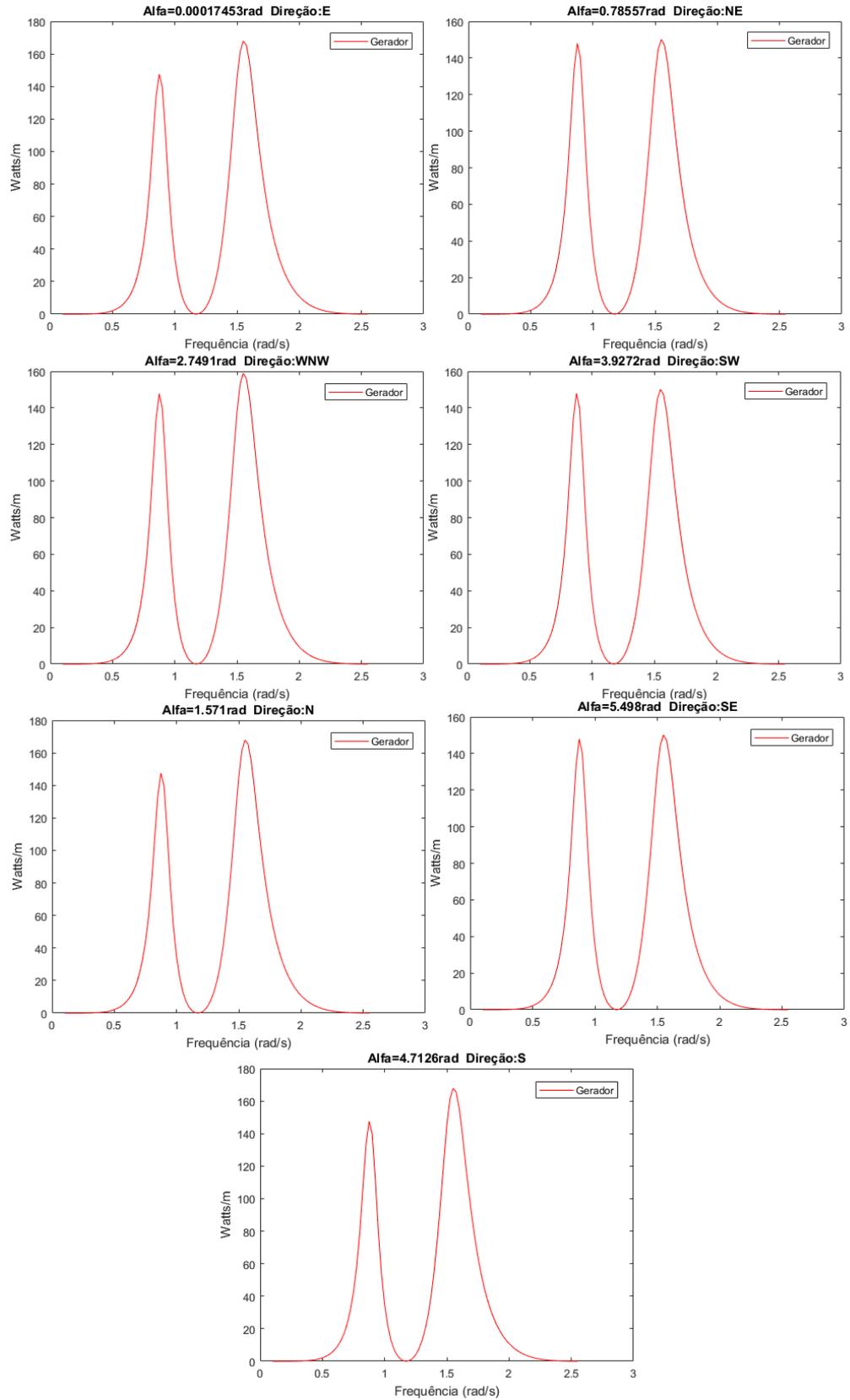
É importante comentar que o ângulo inicial foi assumido em 0,00017453rad devido aos senos da equação das forças que poderiam zerar a equação caso o ângulo fosse zero, não contabilizando partes importantes. Isso vale para os ângulos de 90°, 180° e 360° também.

4.1.2 Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda

O objetivo do trabalho é definir o potencial energético do *WEC*, sendo preciso determinar o modo de calcular esse potencial. Como dito no capítulo anterior, o modo de calcular o potencial foi considerar que a potência por amplitude de onda é função do amortecimento do gerador e da velocidade relativa entre a plataforma e o gerador. Isso se justifica pelo amortecimento ser a energia mecânica extraída do sistema, sendo assim, tal energia estaria sendo responsável pela geração de potência elétrica.

A função de transferência de potência foi obtida de forma similar à função de transferência de *heave*, porém, ao invés de deslocamento do gerador, utiliza-se a velocidade relativa ao quadrado vezes o amortecimento dividido pela amplitude de onda. Assim, foi possível definir a função de transferência de potência por amplitude de onda para cada incidência de onda, mostrado na Figura 29.

Figura 29 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproamento 1.



Fonte: Autora (2018).

Novamente, a potência por amplitude de onda das direções norte, sul e leste, e nordeste, sudeste e sudoeste possuem o mesmo valor, e a oés-noroeste possui um valor diferente das demais, devido a geometria simétrica da plataforma. Para melhor analisar e comparar os resultados de potência, foi feita a Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproximamento 1.

Estrutura	Frequências de		Potência (Watts/m)					
	Pico (rad/s)	Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
Gerador	0,875	147,6	147,6	147,6	147,8	148,0	148,0	148,0
	1,550	167,9	167,9	167,9	158,9	150,1	150,1	150,1

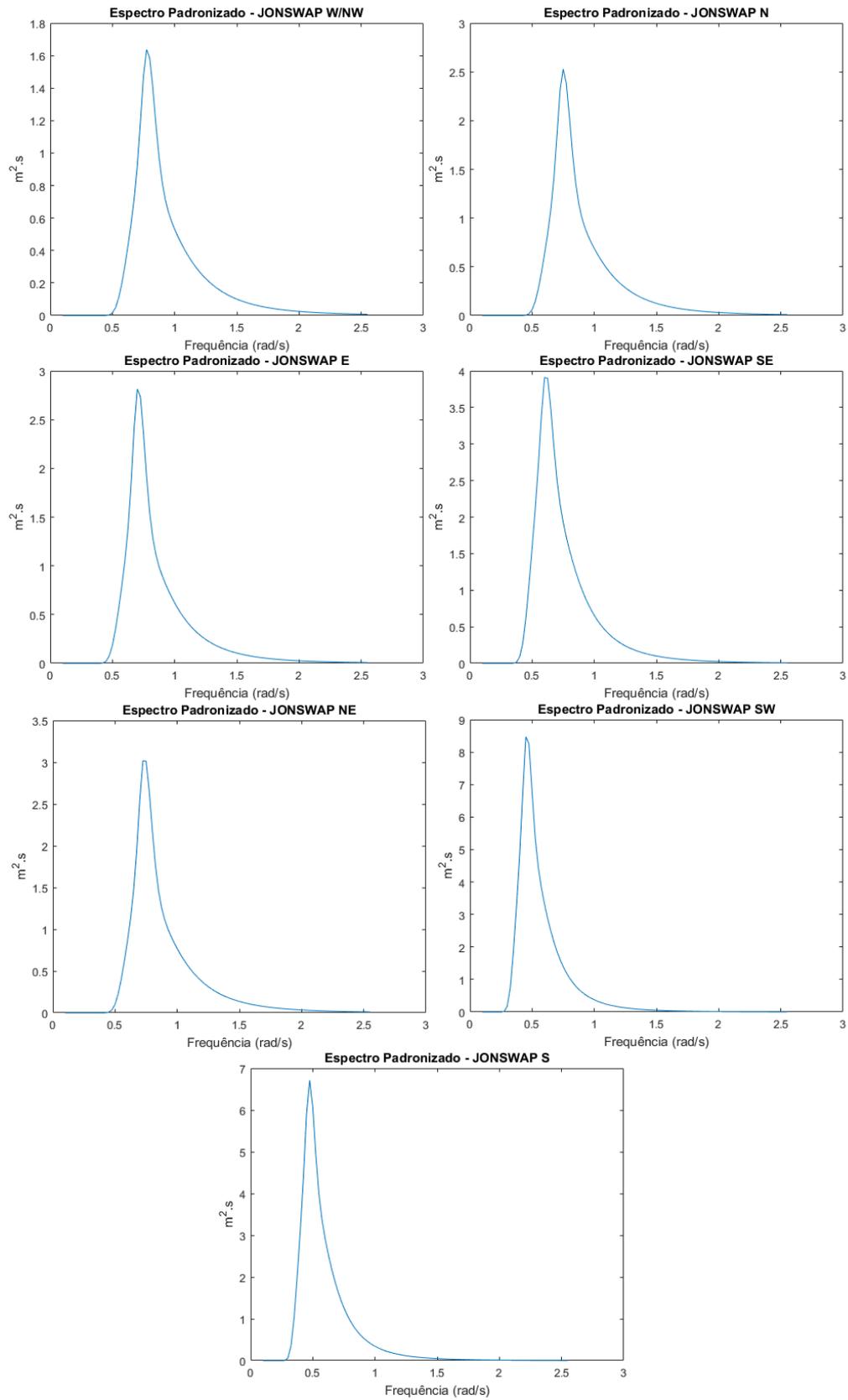
Fonte: Autora (2018).

Pela Tabela 4 é possível perceber que as direções que geram maior valor de potência por amplitude de onda para a frequência de pico de 1.55rad/s são norte, sul e leste. Logo, para melhor ilustrar os resultados, considerando mares de períodos de aproximadamente 4,1s e comprimento de onda de 27,4m, ocorreria uma considerável geração de energia. Agora, para conseguir comparar a potência gerada por cada direção, será necessário utilizar espectros padronizados, abordados no próximo item.

4.1.3 Espectro Padronizado de Mar – JONSWAP

Para a geração dos espectros padronizados de mar, foram utilizados os valores da Tabela 2. A partir do período de pico, do fator de forma e do parâmetro de agudez de cada uma das direções, é possível gerar o gráfico de espectro padronizado a partir da Equação (7). Então, para as direções leste, nordeste, norte, oés-noroeste, sudoeste, sul e sudeste foram gerados os gráficos de espectro de mar mostrados na Figura 30, abaixo.

Figura 30 – Espectros Padronizados.



Fonte: Autora (2018).

Para melhor comparar os valores de espectro de mar, foi gerada a Tabela 5, de acordo com a Figura 30.

Tabela 5 – Espectros Padronizados.

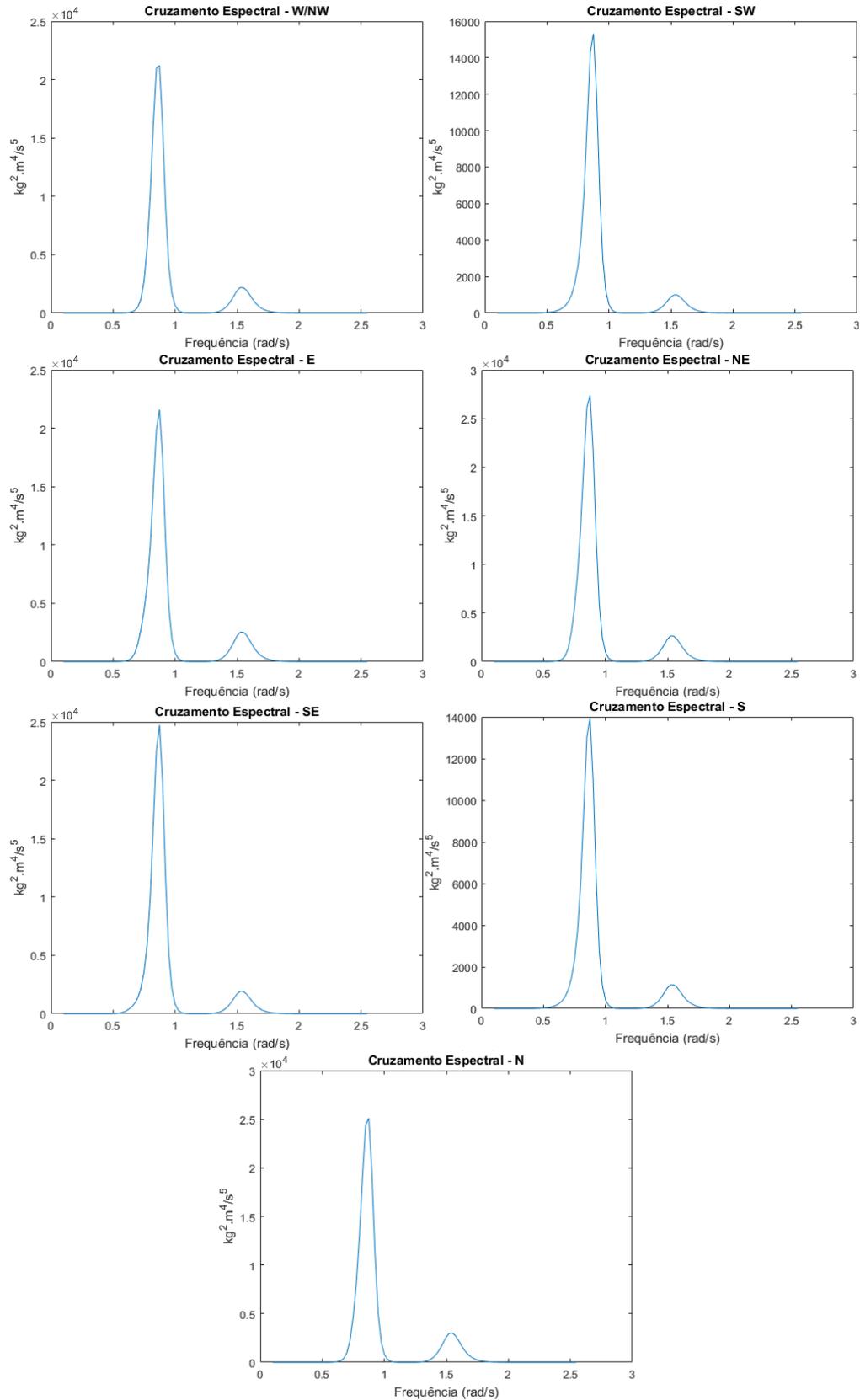
Direção	Espectro (m².s)	Frequências de Pico (rad/s)
Norte	2,528	0,750
Sul	6,709	0,475
Leste	2,813	0,700
Oés-Noroeste	1,637	0,775
Sudeste	3,911	0,600
Sudoeste	8,471	0,450
Nordeste	3,019	0,725

Fonte: Autora (2018).

4.1.4 Cruzamento Espectral – Espectro de Resposta de Potência

Com o objetivo de se definir a resposta do espectro de potência, foi feito o cruzamento espectral entre os espectros padronizados e a função de transferência de potência por amplitude de onda. Desse modo, foi obtido os seguintes resultados mostrados na Figura 31.

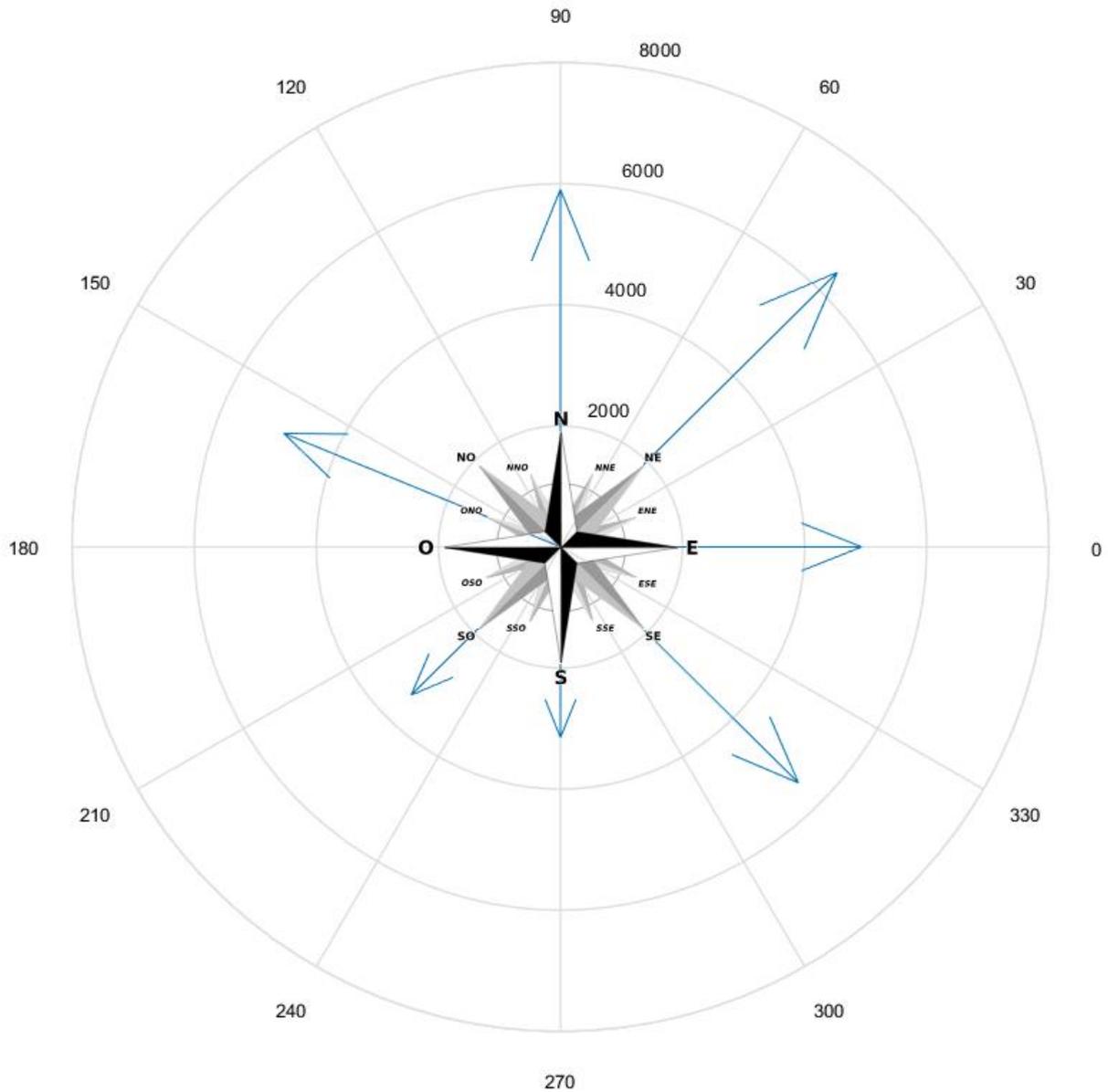
Figura 31 – Espectro de Resposta em Watts ao quadrado por Segundo ao quadrado para o Aproxamento 1.



Fonte: Autora (2018).

A partir de tal resultado, é possível calcular uma potência média, para assim, conseguir definir em qual direção é gerada mais energia. Dessa forma, gerou-se a Figura 32, abaixo.

Figura 32 – Potência Média para o Aproxamento 1.



Fonte: Autora (2018).

Pela Figura 32, é possível visualizar que a direção com maior potencial energético é a direção nordeste. Para uma comparação quantitativa foi gerada a Tabela 6 com os valores de potência média para cada direção.

Tabela 6 – Potência Média para o Aproamento 1.

Potência Média (kW)						
Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
5,903	3,146	4,932	4,906	5,511	3,460	6,413

Fonte: Autora (2018).

A partir dos valores obtidos na Tabela 4, é possível calcular uma potência média das direções, obtendo o valor de 4,896kW.

4.2 APROAMENTO 2

Nesse tópico será feita a mesma análise do tópico anterior, porém, agora, para o Aproamento 2, mostrado na Figura 27, para assim, definir, qual possui maior potencial energético.

4.2.1 Função de Transferência de *heave*

Para o Aproamento 2, apenas somou-se 45° ao ângulo de incidência da onda. Dessa forma, foi possível definir a função de transferência de *heave* do gerador e da plataforma. Como era esperado, devido à simetria da plataforma, as direções norte, sul e leste do Aproamento 2 tiveram resposta igual às direções nordeste, sudeste e sudoeste do Aproamento 1 e, as direções nordeste sudeste e sudoeste do Aproamento 2 tiveram resposta igual às direções norte, sul e leste do Aproamento 1. A direção oés-noroeste do Aproamento 1 respondeu igual a mesma direção do Aproamento 2. Na Tabela 7 é possível visualizar esses resultados.

Tabela 7 – Função de Transferência de *heave* para o Aproamento 2.

Estrutura	Frequências de Pico (rad/s)	Resposta (m/m)						
		Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
Gerador	0,850	1,740	1,740	1,740	1,740	1,739	1,739	1,739
Plataforma	0,850	1,212	1,212	1,212	1,210	1,211	1,211	1,211
Gerador	1,525	0,317	0,317	0,317	0,326	0,335	0,335	0,335
Plataforma	1,500	0,062	0,062	0,062	0,064	0,066	0,066	0,066

Fonte: Autora (2018).

4.2.2 Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda

A potência por amplitude de onda seguiu o mesmo padrão da função de transferência de *heave*, ou seja, inverteu-se as respostas das direções. Esses resultados podem ser vistos na Tabela 8, a seguir.

Tabela 8 – Função de Transferência de Potência por Amplitude de Onda para o Aproamento 2.

Estrutura	Frequências de Pico (rad/s)	Potência (Watts/m)						
		Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
Gerador	0,875	148,0	148,0	148,0	147,8	147,6	147,6	147,6
	1,550	150,1	150,1	150,1	158,9	167,9	167,9	167,9

Fonte: Autora (2018).

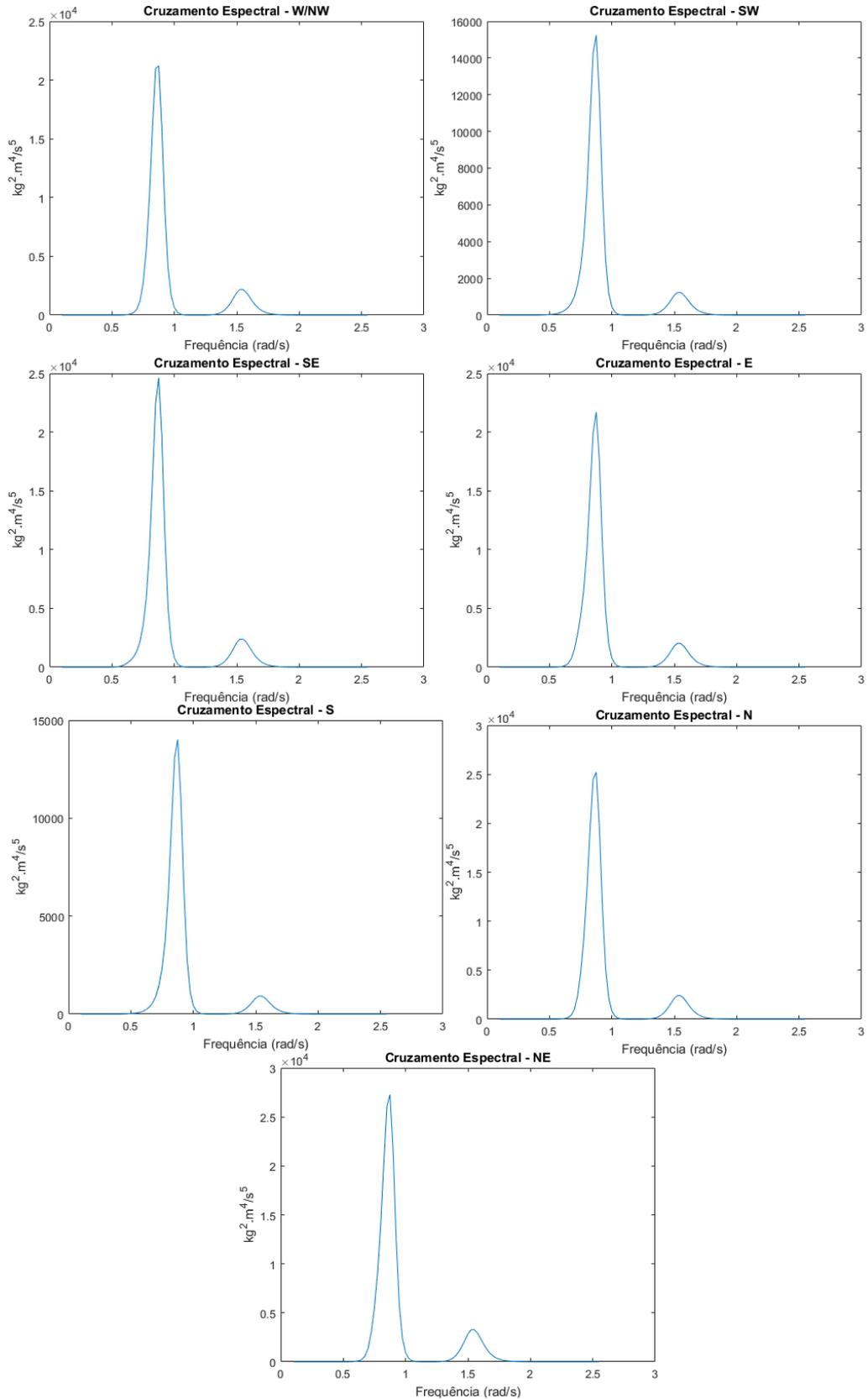
Pela Tabela 8 é possível perceber que as direções que geram maior valor de potência por amplitude de onda para a frequência de pico de 1,55rad/s são sudeste, sudoeste e nordeste. No próximo tópico será feito o cruzamento espectral, com os espectros padronizados de mar que se encontram em 4.1.3.

4.2.3 Cruzamento Espectral – Espectro de Resposta de Potência

Como foi feito para o Aproamento 1, cruzou-se a função de transferência de potência por amplitude de onda do Aproamento 2 com os espectros padronizados e obteve-se a resposta do espectro de potência para o Aproamento 2, mostrados na

Figura 33.

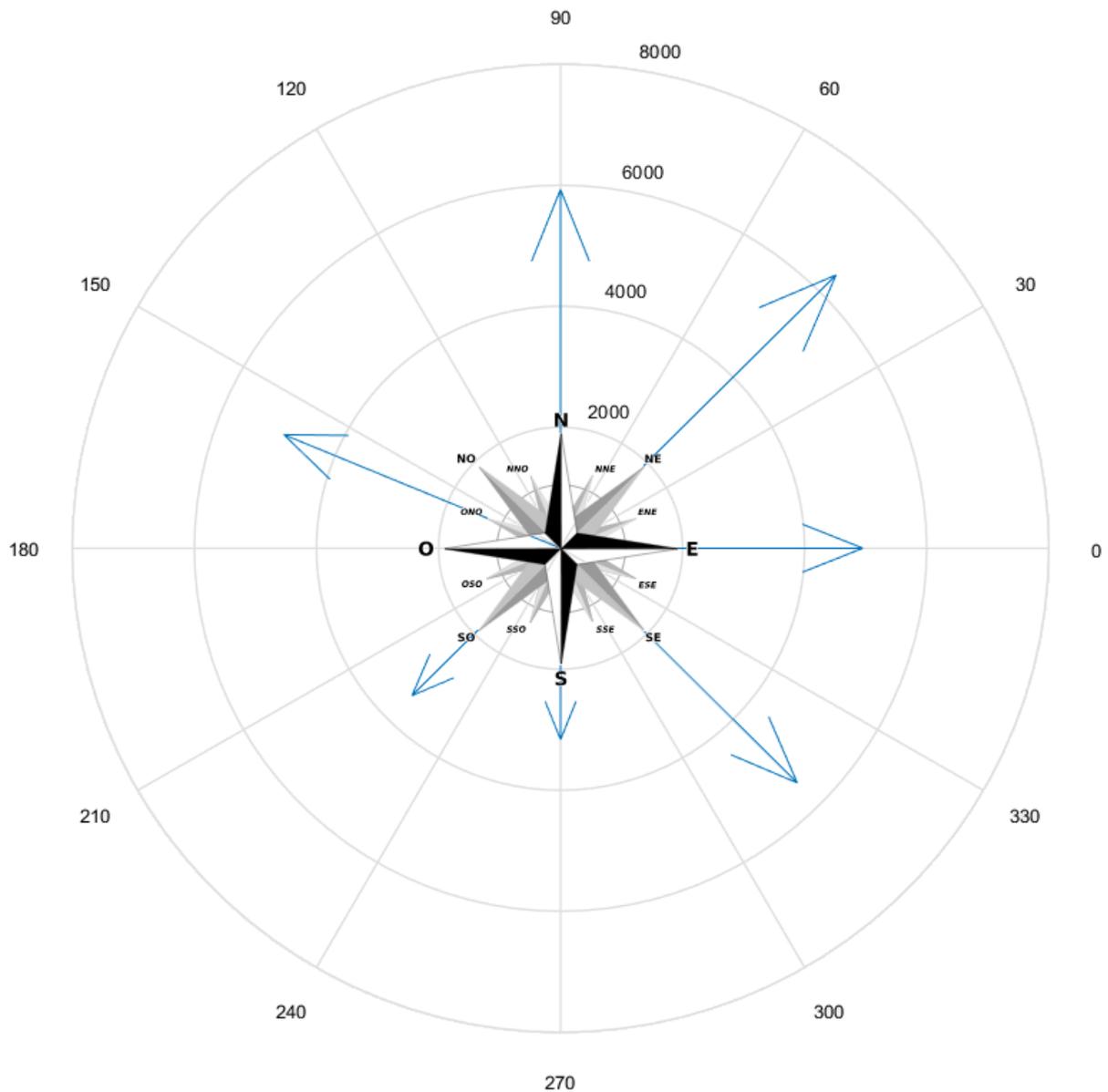
Figura 33 – Espectro de Resposta de Watts ao quadrado por Segundo ao quadrado para o Aproximado 2.



Fonte: Autora (2018).

A partir de tal resultado, calculou-se uma potência média, para assim, conseguir definir em qual direção é gerada mais energia. Dessa forma, gerou-se a Figura 34, abaixo.

Figura 34 – Potência Média para o Aproxamento 2.



Fonte: Autora (2018).

Pela Figura 34, é possível visualizar que a direção com maior potencial energético é, também, a direção nordeste. Para uma comparação quantitativa foi gerada a Tabela 9, com os valores de potência média para cada direção.

Tabela 9 – Potência Média para o Aproamento 2.

Potência Média (kW)						
Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste
5,928	3,162	4,954	4,906	5,484	3,443	6,387

Fonte: Autora (2018).

Conforme os valores da Tabela 9, determinou-se a potência média das direções para o Aproamento 2, resultando em 4,894kW. Os valores para potência média tanto para o Aproamento 1 quanto para o Aproamento 2 foram bem próximos por só considerar movimento em *heave* e desconsiderar a influência do *pitch* e do *roll*.

4.3 COMPARATIVO ENTRE OS DOIS APROAMENTOS

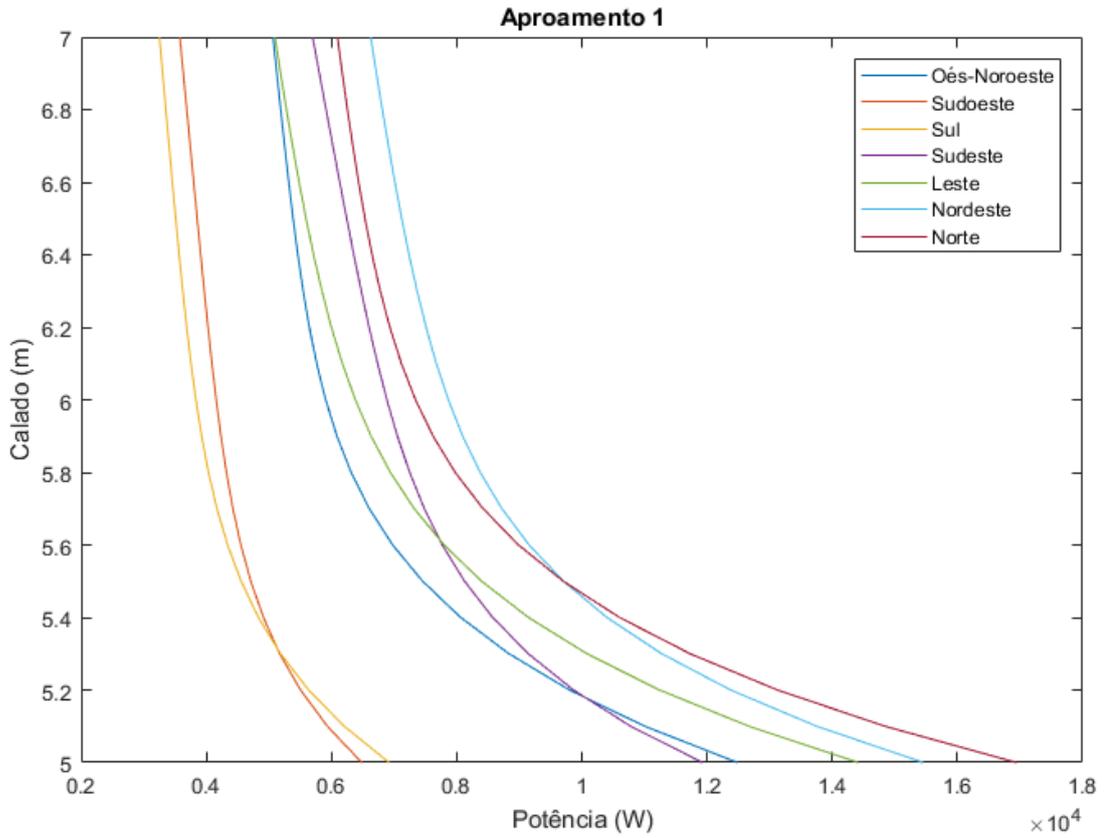
Como dito no início do capítulo, o presente tópico será responsável pela análise comparativa entre os dois aproamentos ao variar o valor do calado da plataforma e o amortecimento do gerador. Isso se justifica pelo fato de que o calado depende do peso do *WEC*, que pode variar e o amortecimento do gerador é um valor definido somente experimentalmente.

4.3.1 Calado

O calado é função do peso estrutural, do maquinário da plataforma e de possíveis valores de lastro. Como o presente trabalho se encontra em estágio inicial, não é possível definir qual o valor exato do calado. Assim, só é possível estimar alguns valores, podendo também investigar a influência do calado na geração de energia.

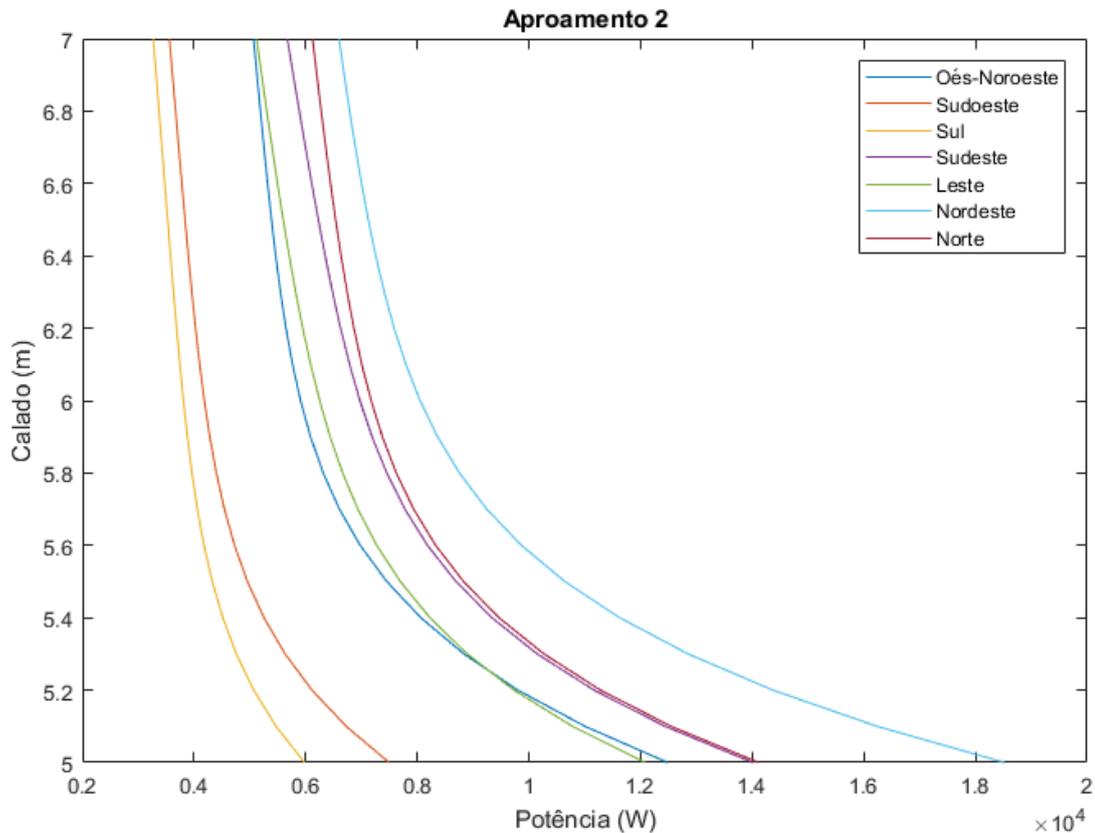
Sabe-se que quanto maior o valor do calado, maior a massa adicional da plataforma e, conseqüentemente, maior a inércia do sistema. Quanto maior a inércia, maior a tendência de se manter no seu estado original e, assim, menor o movimento da plataforma. Deste modo, quanto menor o calado, maior o movimento e, em contrapartida, maior a geração de energia, como mostrado nas Figura 35 e Figura 36 para, respectivamente, o Aproamento 1 e o Aproamento 2. Vale ressaltar que tais figuras foram geradas a partir de um coeficiente de amortecimento do gerador de 0,1.

Figura 35 – Potência gerada para cada uma das direções em função do calado para o Aproxamento 1.



Fonte: Autora (2018).

Figura 36 – Potência gerada para cada uma das direções em função do calado para o Aproxamento 2.



Fonte: Autora (2018).

É possível perceber pelas Figura 35 e Figura 36 que, ao diminuir o valor do calado à partir de 5,6m, ocorre um aumento significativo da geração de energia. Outra constatação é que ao variar o calado, o valor de potência em comparação entre as direções não é proporcional. Para melhor exemplificar, no calado de 7m para o Aproxamento 1, a incidência de onda na direção sudeste gera mais energia que à incidência leste e oés-noroeste. Já para o calado de 5,1m, a incidência na direção oés-noroeste e leste geram mais energia que à sudeste.

Como dito anteriormente, o calado usado para as análises anteriores foi de 7m. Sabendo que o diâmetro do pontão é de 2m, e a altura da coluna de 9m, um calado mínimo aceitável seria de 5m. Assim, calculou-se para o calado de 5m a potência média das direções do Aproxamento 1 e 2, obtendo os valores de 12,61kW e 12,62kW, respectivamente. Com relação ao calado de 7m, os valores de potência média foram de 4,8961kW e 4,8948kW para os Aproxamento 1 e 2, respectivamente. A variação do calado em 2m, resultou num aumento de potência de aproximadamente 158%, para o coeficiente de amortecimento do gerador de 0,1.

4.3.2 Amortecimento

Com o intuito de investigar a influência do valor de amortecimento do gerador na geração da potência para os dois aproamentos, já que só se consegue estimar um valor de amortecimento, variou-se o coeficiente de amortecimento de 0,1 até 0,9 para o calado de 5m, que é o calado que gera mais energia. Para comparar melhor os resultados, optou-se por utilizar a média entre as potências médias das direções. Assim, foi possível obter a Tabela 10 e a Tabela 11, abaixo, para se comparar os resultados dos dois aproamentos.

Tabela 10 – Influência do Coeficiente de Amortecimento do gerador na Potência Gerada para o Aproamento 1.

		Aproamento 1							
Coeficiente de Amortecimento	Amortecimento (Ns/m)	Potência (kW)							
		Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste	Média
0,1	652,7	17,815	7,181	15,128	13,091	12,315	6,645	16,105	12,611
0,2	1.305,4	23,153	12,419	20,689	18,500	22,974	13,688	25,869	19,613
0,3	1.958,1	38,415	20,740	34,272	30,824	38,251	22,877	43,049	32,632
0,4	2.610,8	48,276	26,049	42,921	38,801	47,860	28,709	53,972	40,941
0,5	3.263,5	52,244	28,168	46,295	42,048	51,575	31,030	58,299	44,237
0,6	3.916,2	52,052	28,039	45,987	41,933	51,178	30,879	58,000	44,010
0,7	4.568,9	49,487	26,630	43,608	39,889	48,473	29,323	55,079	41,784
0,8	5.221,6	45,803	24,622	40,276	36,927	44,711	27,110	50,937	38,627
0,9	5.874,3	41,793	22,446	36,687	33,693	40,673	24,712	46,448	35,207

Fonte: Autora (2018).

Tabela 11 – Influência do Coeficiente de Amortecimento do gerador na Potência Gerada para o Aproamento 2.

		Aproamento 2							
Coeficiente de Amortecimento	Amortecimento (Ns/m)	Potência (kW)							
		Norte	Sul	Leste	Oés-Noroeste	Sudeste	Sudoeste	Nordeste	Média
0,1	652,7	14,719	6,131	12,562	13,089	14,624	7,775	19,465	12,624
0,2	1.305,4	23,335	12,552	20,870	18,500	22,747	13,543	25,659	19,601
0,3	1.958,1	38,868	20,973	34,681	30,824	37,813	22,623	42,544	32,618
0,4	2.610,8	48,789	26,314	43,386	38,801	47,361	28,420	53,400	40,924
0,5	3.263,5	52,757	28,435	46,760	42,048	51,072	30,739	57,726	44,220
0,6	3.916,2	52,534	28,291	46,425	41,934	50,703	30,604	57,463	43,993
0,7	4.568,9	49,924	26,860	44,005	39,889	48,040	29,072	54,592	41,769
0,8	5.221,6	46,193	24,829	40,631	36,927	44,323	26,885	50,502	38,613
0,9	5.874,3	42,138	22,629	37,001	33,693	40,329	24,512	46,063	35,195

Fonte: Autora (2018).

Pela Tabela 10 e pela Tabela 11 é possível perceber que para um valor de coeficiente de amortecimento de 0,1, o Aproamento 2 tem um maior potencial energético. Porém, ao aumentar o amortecimento, o Aproamento 1 passa a ter uma maior geração de energia. Consegue-se inferir que o melhor valor de amortecimento, entre a faixa analisada, é de 3.263,5Ns/m. Desse modo, é válido concluir que o Aproamento 1 possui um maior potencial

energético. Também é possível perceber que os valores de potência do Aproxamento 1 e 2 são bem próximos, resultado da consideração exclusiva de *heave*.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

O consumo e produção energético são em sua maioria advindos de energia fóssil, que gera emissões de poluente, gases de efeito estufa e coloca o planeta em risco a longo prazo. Dito isso, o objetivo do presente trabalho foi propor um tipo de geração de energia a partir das ondas, um recurso natural e renovável de grande potencial energético. A partir das equações do movimento do *WEC* das funções de transferência, dos espectros padronizados e da definição do modelo do gerador, foi possível estimar a potência média gerada.

O melhor valor encontrado para a potência (58,3kW), a partir das comparações, foi para o Aproximado 1 no calado de 5m com o coeficiente de amortecimento do gerador de 0,5 e na incidência de onda na direção nordeste. Isso mostra a importância da definição da influência dos parâmetros, podendo citar um aumento de aproximadamente 158% ao se mudar o calado de 7m para 5m e uma diferença percentual de 350% ao variar o coeficiente de amortecimento de 0,1 para 0,9, considerando o valor máximo e mínimo obtido para a potência.

Então, é razoável inferir que os objetivos propostos para o trabalho foram cumpridos, de forma que, a partir dos testes, que foram determinados com embasamento teórico, conseguiu-se estimar a energia produzida pelo *WEC*, sendo função de parâmetros que não são possíveis de se definir exatamente, em um estágio inicial do trabalho.

Como foi comentando no capítulo de Fundamentação Teórica, sabe-se que qualquer estrutura marítima se movimenta, devido à excitação da onda, nos graus de liberdade de *roll*, *heave* e *pitch*. Logo, um implemento que poderia ser feito em trabalhos futuros seria a adoção de tais graus de liberdade, para a caracterização do movimento tanto da plataforma quanto do gerador, sendo necessário fazer o acoplamento entre eles.

Para uma abordagem numérica, seria interessante a modelagem do gerador utilizando Softwares de Elementos Finitos. A plataforma também poderia ser modelada, possibilitando a resposta em todos os graus de liberdade importantes para a análise, buscando um resultado mais próximo da realidade.

Por fim, seria interessante comparar os resultados obtidos numericamente com um experimento em tanque de prova. Assim, seria possível comparar os valores de amortecimento e, conseqüentemente, os valores para potência média gerada.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Gil Rudge Cavalcanti de. **Modelagem e Simulação da Dinâmica de Bóias de Superfície Ancoradas**. 2008. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Puc-rio, Rio de Janeiro, 2008.

AMY YEE (New York). The New York Times. **Catching Waves and Turning Them Into Electricity**. 2015. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2015/04/23/business/energy-environment/catching-waves-and-turning-them-into-electricity.html>>. Acesso em: 22 abr. 2016.

AQUARET: Delivering knowledge and understanding. 2012. Disponível em: <http://aquaret.com/indexea3d.html?option=com_content&view=article&id=203&Itemid=344&lang=en#Animations>. Acesso em: 26 abr. 2018.

ARANHA, J A P. **Comportamento no mar de sistema oceânicos**. São Paulo: Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - Epusp, 1993. 259 p.

CAMERON, L. et al. **Design of the Next Generation of the Oyster Wave Energy Converter**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN ENERGY, 3., 2010, Bilbao: 2010. p. 1 - 12.

CAROL LAURIE. NREL **Market Report Finds U.S. Offshore Wind Industry Poised for Multigigawatt Surge**. 2017. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/news/program/2017/nrel-market-report-finds-us-offshore-wind-industry-poised-multigigawatt-surge.html>>. Acesso em: 20 maio 2018.

CARTER, D. J. T.. **PREDICTION OF WAVE HEIGHT AND PERIOD FOR A CONSTANT WIND VELOCITY USING THE JONSWAP RESULTS**. Ocean Engng, Wormley, Surrey, U.k., v. 9, n. 1, p.17-33, 1982.

DEPARTAMENTO DE INFORMAÇÃO PÚBLICA DAS NAÇÕES UNIDAS. **Fatos sobre energia sustentável**. 2012. Disponível em: <<http://www.onu.org.br/rio20/energia.pdf>>. Acesso em: 7 set. 2016.

DUARTEVALÉRIO; BEIRÃO, Pedro; COSTA, José Sá da. Optimisation of wave energy extraction with the Archimedes Wave Swing. **Ocean Engineering**, [s.l.], v. 34, n. 17-18, p.2330-2344, dez. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oceaneng.2007.05.009>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. (Org.). **Matriz Energética e Elétrica**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 24 maio 2018.

ERIKSSON, Mikael. **Modelling and Experimental Verification of Direct Drive Wave Energy Conversion: Buoy-Generator Dynamics**. 2007. 76 f. Tese (Doutorado) - Science And Technology, Department Of Engineering Sciences, Uppsala Universitet, Uppsala, 2007.

FALCÃO, António F.o.; HENRIQUES, João C.c.. Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 85, p.1391-1424, jan. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>.

FOX, R.W.; MCDONALD, A.T.; PRITCHARD, P.J. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.

FUJARRA, André Luís Condino. **Dinâmica de Sistemas II**: Material de Apoio às aulas. Joinville: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

FUJARRA, André Luís Condino. **Hidrodinâmica das Ondas de Gravidade**: Material de Apoio às aulas. Joinville: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

HASSELMANN, K. et al. 1973. **Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP)**. D. Hydrogr. Z. 12 (8).

HUCKERBY, John et al. **Ocean Energy**. In: LEWIS, Anthony; ESTEFEN, Segen. Cambridge, 2011. p. 497-533.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA) (Org.). **FLOATING FOUNDATIONS: A GAME CHANGER FOR OFFSHORE WIND POWER**. 2016. Disponível em: http://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Offshore_Wind_Floating_Foundations_2016.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2018.

LAKATOS, Eva Maria; MARCONI, Marina de Andrade. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

LONDON ARRAY (England). **Offshore Construction**. Disponível em: <http://www.londonarray.com/the-project-3/offshore-construction/>>. Acesso em: 05 fev. 2018.

LONGUET-HIGGINS, M. S.; **On the statistical distribution of the heights of sea waves**, Journal of Marine Research, v. 11, 245-266, 1952.

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. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2008.09.009>.

MCCORMICK, Michael E.. Analysis of a Wave Energy Conversion Buoy. **Journal Of Hydronautics**, [s.l.], v. 8, n. 3, p.77-82, jul. 1974. American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA). <http://dx.doi.org/10.2514/3.62983>.

METOCEAN VIEW. **No more weather surprises**. Disponível em: <https://metoceanview.com/>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

MINERALS MANAGEMENT SERVICE (New Orleans). **Gulf of Mexico Deepwater Operations and Activities**: Environmental Assessment. New Orleans: U.s. Department Of The Interior, 2000. Disponível em: <https://www.boem.gov/BOEM-Newsroom/Library/Publications/2000/2000-001.aspx>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

MØRK, G.; S. BARSTOW; M.T. PONTES; A. KABUTH (2010). **Assessing the global wave energy potential**. In: Proceedings of OMAE2010 (ASME), 29th International Conference on Ocean, Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Shanghai, China, 6-11 June 2010.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Brasil é um dos dez maiores investidores em energia renovável do mundo, aponta relatório do PNUMA**. 2016. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/brasil-e-um-dos-dez-maiores-investidores-em-energia-renovavel-do-mundo-aponta-relatorio-do-pnuma/>>. Acesso em: 8 set. 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS NO BRASIL. **Investir em energia limpa cria mais oportunidades de emprego, afirma ONU**. 2015. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/investir-em-energia-limpa-cria-mais-oportunidades-de-emprego-afirma-onu/>>. Acesso em: 10 set. 2016.

POPPER, Karl S. **A lógica da pesquisa científica**. 2. ed. São Paulo: Cultrix, 1975a. Parte I, Capítulos 1 e 2, Parte II, Capítulos 3, 4, 5 e 6.

STANLEY REED (New York). The New York Times. **Digging the Graveyard of Oil's Past**. 2017. Disponível em: <<https://www.nytimes.com/2017/06/08/business/energy-environment/oil-north-sea-shell.html>>. Acesso em: 07 jul. 2018.

THE EUROPEAN MARINE ENERGY CENTRE LTD (Org.). **PELAMIS WAVE POWER**. Disponível em: <<http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

THE EUROPEAN MARINE ENERGY CENTRE LTD(Org.). **WELLO OY**. Disponível em: <<http://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/wello-oy/>>. Acesso em: 02 jun. 2018.

THE OPEN UNIVERSITY, 1999. **Waves, Tides and Shallow Water Processes**, second edition. Butterworth-Heinemann, Oxford, 227 pp.

UNIVERSITY OF SOUTH FLORIDA. **Waves in the Ocean**. 2005. Disponível em: <<https://fcit.usf.edu/florida/teacher/science/mod2/waves.html>>. Acesso em: 15 abril 2018.

WAVESTAR prototype at Roshage. Brøndby, 2009. 23 p.

WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Resources Marine Energy**, 2016. Disponível em: <https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2017/03/WEResources_Marine_2016.pdf>. Acesso em: 5 abr. 2018.