THIAGO PETERNELLA ROCHA

**Estudo Numérico de Unidade Flutuante Monocoluna para
Conversão de Energia de Ondas do Mar**

**São Paulo
2017**

THIAGO PETERNELLA ROCHA

**Estudo Numérico de Unidade Flutuante Monocoluna para
Conversão de Energia de Ondas do Mar**

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Ciências.

Área de Concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Rodolfo Trentin Gonçalves

São Paulo
Junho de 2017

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 12. de Dezembro de 2017

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Rocha, Thiago Peternella

Estudo Numérico de Unidade Flutuante Monocoluna para Conversão de Energia de Ondas do Mar / T. P. Rocha -- São Paulo, 2017.
128 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1. Conversor de energia (ondas do mar) 2. Fontes alternativas de energia
3. Geração de energia elétrica 4. Plataforma monocoluna I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II. t.

DEDICATÓRIA

**Dedico este trabalho aos meus pais,
minha família e minha namorada, por
acreditarem em meu potencial e sempre
me apoiarem com carinho e dedicação.**

Nome: ROCHA, Thiago Peternella

Título: Estudo Numérico de Unidade Flutuante Monocoluna para Conversão de Energia de Ondas do Mar

Dissertação apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

AGRADECIMENTOS

Ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e aos profissionais do Tanque de Provas Numérico da Universidade de São Paulo por oferecerem todo o suporte necessário e tornar possível o desenvolvimento deste tema.

À Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela bolsa de mestrado concedida durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Ao Professor Doutor Rodolfo Trentin Gonçalves pela orientação do trabalho e pela dedicação nos momentos mais adversos.

Ao Professor Doutor Pedro Cardozo de Mello pela prestimosidade de sempre, pela dedicação e atenção aplicada, independente dos percalços e sobrecarga de outros projetos.

Ao Doutor Daniel Prata Vieira que emprestou o seu tema de trabalho de formatura e a sua ajuda no que foi preciso durante este longo caminho.

À minha família, meus pais, Nilton e Madalena, que sempre se entregaram ao máximo na minha formação acadêmica e como pessoa, e à minha irmã, Ana Paula, por fazer parte desde ciclo, acompanhando todos os dramas e as alegrias dessa jornada.

À minha namorada, Mariana, por estar sempre presente me dando o apoio necessário em todos os momentos.

Aos meus colegas de curso e amigos Rafael Máximo, Raul Dotta e Rodrigo Schiller pelo companheirismo, parceria de projetos e ajuda neste trabalho. Ao Engenheiro Dênnis Maluf Gambarine, ao Doutor Edgard Malta, ao Doutor Rafael Watai e ao Doutor Felipe Ruggeri pela ajuda no desenvolvimento de ideias e soluções dos problemas do tema.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

(Charles Chaplin)

RESUMO

O uso contínuo de combustíveis fósseis já se mostrou deletério há anos, além de ser um meio energético finito. Por este motivo, a demanda atual e futura por sistemas de energia limpa é grande. Muito embora já existam diversas estruturas dedicadas a extrair energia do mar, o conceito em que se pretende trabalhar é inovador e de tecnologia nacional. Este tema foi desenvolvido inicialmente em uma abordagem teórica pelo então aluno de engenharia naval Daniel Prata Vieira e sua colega Ana Luísa Orsolini, como Trabalho Final do curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, orientados pelo Prof. Dr. André Luis Condino Fugarra. Vieira & Orsolini (2011) [1] abordaram de uma forma diferente o tema de geração de energia por ondas do mar, trazendo à tona o uso da já consagrada plataforma monocolumna - protótipo que rendeu diversos prêmios de inventor do ano da Petrobras, além de patente, ao Tanque de Provas Numérico, laboratório do departamento de engenharia naval da POLI-USP. O trabalho dos alunos Daniel e Ana também foi reconhecido nacionalmente recebendo o Prêmio Petrobras de Tecnologia 2011 no tema de Tecnologia de Energia. A continuação do trabalho consiste em levar a fundo alguns pontos importantes relacionados ao dimensionamento da plataforma para otimizar a geração de energia através do movimento relativo entre ela e um corpo flutuante interno ao seu *moonpool*. O objetivo do trabalho é definir melhores geometrias através da parametrização das dimensões principais e da utilização de métodos numéricos num estudo mais detalhado e aprofundado. O método de desenvolvimento leva em conta todos os fatores que influenciam na dinâmica do sistema como a hidrodinâmica de dois corpos (plataforma e corpo interno flutuante) e a dinâmica do gerador de energia (tipo de gerador e seu impacto no amortecimento do sistema global).

Palavras-chave: Energia das Ondas, Energia Renovável, Fontes Alternativas, Geração de Energia, Energia do Mar, Conversor de Energia de Ondas do mar, Plataforma Monocolumna.

ABSTRACT

The continued use of fossil fuels has proved harmful for years, besides being a means finite energy. For this reason, the current and future demand for clean energy systems are great. Although there are already several structures dedicated to extracting energy from the sea, the concept on which it intends to work is innovative and with local technology. This theme has been already developed in a theoretical approach by the student of naval engineering Daniel Prata Vieira and his classmate Ana Luisa Orsolini, such as Final Paper Course of Naval Architecture and Ocean Engineering from the Escola Politécnica of USP, directed by Prof. Dr. André Luis Condino Fugarra. Vieira & Orsolini (2010) [1] studied in a different way the theme of energy generation from ocean waves, bringing up the use of already established monocolumn platform - prototype that earned several inventor of the year from Petrobras awards, besides patent, to the Numerical Offshore Tank, laboratory of the Naval Engineering Department of Poli - USP. The work of students Daniel and Ana was also recognized nationally getting the Petrobras Technology Award 2011 in the Energy Technology theme. The continuation of this work is to bring the background some important points related to platform design to optimize power generation through the relative motion between it and an internal floating body into moonpool. The objective is to define best geometries through the parameterization of the key dimensions and the use of numerical methods in a more detailed and in-depth study. The development method takes into account all the factors that influence the dynamics of the system such as the hydrodynamics of two bodies (platform and floating internal body) and the dynamics of the generator (type of generator and its impact on the damping of the global system).

Keywords: Wave Energy, Renewable Energy, Alternative Sources, Power Generation, Sea Energy, Sea Wave Energy Converter, Monocolumn Platform, Marine Energy, Wave Energy Devices, Point Absorber, Large Absorber, Oscillating body System, Two-body heaving System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda. Fonte: [17].	20
Figura 2.2 - Diversos tipos de tecnologias de absorção de energia de ondas. Fonte: [4].	23
Figura 2.3 – Esquema ilustrativo do funcionamento de um dispositivo do tipo: Oscilating Water Column. Fonte: [23].	24
Figura 2.4 – Estruturas fixas de OWC. Da esquerda no alto em sentido horário temos: OWC breakwater, Japão (60 kW); Bottom-standing OWC, Índia (125kW); Pico OWC, Portugal (400kW); Guangdong OWC, China (100kW); LIMPET OWC, Reino Unido (500kW); Oceanlinx Mk1, Austrália (500kW); Multi-chamber OWC, Espanha (333kW).	25
Figura 2.5 - Boia Japonesa de navegação. Fonte: [14].	25
Figura 2.6 - Barcaça Japonesa com múltiplos sistemas de conversão de energia – Kamei. Fonte:[24].	26
Figura 2.7 - Backward Bent Duct Buoy (BBDB). Adaptado de [26].	26
Figura 2.8 - Mighty Whale. Adaptado de [27].	27
Figura 2.9 - Boia Spar. Fonte:[30].	28
Figura 2.10 – Oceanlinx Mk3. Fonte:[31].	28
Figura 2.11 - Norwegian buoy. Fonte: [33].	29
Figura 2.12 - Boia L-10. Fonte: [34].	30
Figura 2.13 - Sistema de captação de energia através de boias. Modificado de [35].	31
Figura 2.14 - Protótipo de usina de ondas da Sea Horse Wave Energy em parceria com a COPPE-UFRJ. Modificado [39].	31
Figura 2.15 - IPS buoy. Modificado de [42].	32
Figura 2.16 - SeaBeavl. Fonte: [44].	33
Figura 2.17 - Sistema de captação de energia através do movimento de duas unidades flutuantes. Modificado de [45].	34
Figura 2.18 - PowerBuoy. Modificado de [46].	34
Figura 2.19 - Archimedes Wave Swing. Modificado de [48].	35
Figura 2.20 - CETO. Adaptado de [49].	36
Figura 2.21 - Duck. Fonte: [50].	37
Figura 2.22 - Pelamis - Sistema absorvedor de ondas. Modificado de [51].	38
Figura 2.23 - McCabe Pump. Fonte: [53].	38
Figura 2.24 - SeaRay. Fonte: [54].	39
Figura 2.25 - PS Frog Mk 5. Fonte: [14].	39
Figura 2.26 - Searev. Fonte: [56].	40
Figura 2.27 - Oceantec. Fonte: [14].	40
Figura 2.28 - Mace. Fonte: [58].	41
Figura 2.29 - Oyster. Adaptado de [60].	41
Figura 2.30 - WaveRoller. Adptado de [63].	42
Figura 2.31 - FO3 Buldra. Fonte: [64].	43
Figura 2.32 – Protótipo em escala 1:10 do Wave Star. Adaptado de [65].	43
Figura 2.33 – Protótipo em escala 1:2 do Wave Star. Adaptado de [65].	44

Figura 2.34 – Protótipo de Usina de Ondas: a) Modelo em escala 1:10 testado no LabOceano – Rio de Janeiro, RJ; b) Modelo em escala real em testes no Porto de Pecém, CE. Fonte: [38].	44
Figura 2.35 – Tapchan, em Toftestalen, Noruega. Fonte: [67].	45
Figura 2.36 - Wave Dragon. Adaptado de [69].	46
Figura 2.37 - Quebra-mar fixo com dispositivo gerador de energia SSG. Fonte:[71].	46
Figura 3.1 - Esquema de plataforma monocoluna com cilindro interno ao moopool para geração de energia de ondas. Fonte: [1].	49
Figura 3.2 – Diagrama de corpos livres do sistema monocoluna e cilindro.	52
Figura 3.3 - Sistema massa-mola-amortecedor.	57
Figura 3.4 – Comportamento de sistema dinâmico amortecido parametrizado pelo coeficiente de amortecimento. Adaptado de [75].	59
Figura 3.5 – Sistema massa-mola-amortecedor com excitação forçada.	59
Figura 3.6 - Equação diferencial vetorial do movimento de excitação harmônica para um grau de liberdade. Adaptado de [76].	60
Figura 3.7 – Fator de amplificação do movimento de excitação harmônica para um grau de liberdade. Retirado de [76].	61
Figura 3.8 – Ângulo de fase pela relação de frequências. Extraído de [76].	62
Figura 3.9 - Fluxograma da rotina de análise da dinâmica do sistema sem PTO.	67
Figura 3.10 - Parametrização das geometrias.	68
Figura 3.11 - Gráficos do deslocamento, velocidade e aceleração para um objeto em MSH uni-dimensional. Fonte: [90].	71
Figura 3.12 - Equilíbrios estável, instável e indiferente. Modificado de [79].	74
Figura 3.13 - Posição relativa entre os pontos K, B, G e M.	75
Figura 3.14 - Exemplo de malha utilizada como entrada para o WAMIT.	79
Figura 3.15 - Comparação entre espectros padronizados. Retirado de [81].	83
Figura 3.16 - Espectros de energia dos mares de Santos.	84
Figura 3.17 - Apresentação gráfica do Cruzamento Espectral. Adaptado de [83].	86
Figura 4.1 – Resultados da 1ª iteração.	95
Figura 4.2 – Análise de sensibilidade para o T_c dos resultados de $D_e/D_i = 25/23$.	97
Figura 4.3 – Geometria do melhor caso selecionado.	99
Figura 4.4 – Comportamento do $V_{s_{rel}}$ de heave para cada parâmetro de amortecimento.	100
Figura 4.5 - Comportamento do $H_{s_{rel}}$ de heave para o coeficiente de amortecimento da monocoluna.	100
Figura 4.6 - Comportamento da Potência do PTO em função de cada parâmetro de amortecimento.	101
Figura 4.7 – Potência do PTO em função do $V_{s_{rel}}$.	101
Figura 0.1 – Resultados da 2ª iteração.	115
Figura 0.2 –Resultado da 3ª iteração.	116
Figura 0.3 –Resultado da 4ª iteração.	116
Figura 0.4 - Resultados da 5ª iteração.	117
Figura 0.5 - Resultados da 6ª iteração.	117
Figura 0.6 - Resultados da 7ª iteração.	118
Figura 0.7 - Resultados da 8ª iteração.	118
Figura 0.8 - Resultados da 9ª iteração.	119
Figura 0.9 - Análise de estabilidade inicial para o cilindro interno.	119

Figura 0.10 - RAO de heave da monocoluna.....	120
Figura 0.11 - RAO de heave do cilindro interno.....	120
Figura 0.12 - RAO Relativo de heave.....	121
Figura 0.13 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave da monocoluna.....	121
Figura 0.14 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave do cilindro.....	122
Figura 0.15 - Altura relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.....	122
Figura 0.16 - Velocidade relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.....	123
Figura 0.17 - Aceleração relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.....	123
Figura 0.1 - RAO de heave da monocoluna.....	125
Figura 0.2 - RAO de heave do cilindro interno.....	125
Figura 0.3 - RAO do movimento relativo de heave.....	126
Figura 0.4 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave da monocoluna.....	126
Figura 0.5 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave do cilindro.....	127
Figura 0.6 - Altura relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter..	127
Figura 0.7 - Velocidade relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.....	128
Figura 0.8 - Aceleração relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.....	128

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Resumo das tecnologias de extração da energia das ondas do mar e suas potências.	47
Tabela 2.2 - Sistemas PTO. Modificado de [72].	48
Tabela 3.1 - Arquivos de entrada para o modelo do WAMIT.	79
Tabela 3.2 – Probabilidade de ocorrência de cada mar - trecho do Scatter de Santos. Para visualizar o Scatter completo procure pela Tabela 0.1 no APÊNDICE A.	81
Tabela 4.1 – Dimensões avaliadas no 1º ciclo do programa de otimização da geometria.....	93
Tabela 4.2 – Dimensões finais para o dispositivo de geração de energia de Vieira & Orsolini (2011) [1].	94
Tabela 4.3 – Espaço de busca inicial – 1ª iteração.....	95
Tabela 4.4 - Melhor resultado da 1ª iteração.	97
Tabela 4.5 - Melhor caso do 1º ciclo - Máx. V_s relativo.	98
Tabela 4.6 – Melhor caso do 2º ciclo e resultado final da otimização do dispositivo.	102
Tabela 0.1 - de Scatter do METOCEAN do mar de Santos. Adaptado de [85].	112
Tabela 0.1 – Dados de entrada e resultados de cada iteração executada no 1º ciclo do algoritmo..	113
Tabela 0.1 – Mapa da geração de energia por condição ambiental. Valores em kW.....	124

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	13
1.1. MOTIVAÇÃO	15
1.2. OBJETIVO	17
1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1. PRINCIPAIS REFERÊNCIAS EM EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR.....	21
2.2. DIFICULDADES E DESAFIOS.....	21
2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TECNOLOGIA.....	22
2.3.1. Oscilating Water Column (OWC).....	23
2.3.2. Oscillating Body	28
2.3.3. Overtopping Converters.....	45
2.3.4. Resumo dos tipos de tecnologia e suas potências.....	46
2.4. POWER TAKE-OFF.....	47
3. METODOLOGIA	49
3.1. SISTEMA PROPOSTO.....	49
3.2. MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS	51
3.2.1. Oscilação forçada de sistema de dois graus de liberdade	51
3.2.2. Amortecedor linear	57
3.2.3. Potência gerada no PTO	62
3.3. MODELOS NUMÉRICOS	64
3.3.1. Ferramenta de análise numérica	65
4. RESULTADOS.....	93
4.1. DIMENSIONAMENTO	93
4.1.1. Resultado do 1º ciclo – Busca pela melhor geometria.....	93
4.1.2. Resultado do 2º ciclo – Busca pelo melhor amortecimento	99
5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
APÊNDICE A – METOCEAN do mar de Santos – Tabela de probabilidades de ocorrência.....	112
APÊNDICE B – Resultados do 1º ciclo	113
APÊNDICE C – Mapa da geração de energia por condição ambiental.....	124
APÊNDICE D – Resultados do 2º ciclo.....	125

1. INTRODUÇÃO

O mundo acordou para os problemas futuros eminentes da utilização de combustível fóssil como principal fonte de energia. Muito se discutiu ao longo de décadas para que grandes governantes mundiais se atentassem aos terríveis impactos que o uso desenfreado destes combustíveis poderia acarretar para o nosso planeta. A grande questão era em relação ao custo dessa energia. Os combustíveis fósseis sempre foram mais vantajosos do que as demais opções que se tinham em vista.

A crise do petróleo de 1973 induziu uma grande mudança no cenário de energias renováveis e fez crescer o interesse em produção de energia através de ondas. Um *paper* publicado por Stephen Salter [2], em 1974, num jornal de prestígio da época, se tornou um marco e despertou a atenção da comunidade científica internacional para o tema.

Em 1975, o governo Britânico iniciou um importante programa de P&D em energias do mar [3], logo seguido pelo governo da Noruega. Porém, Inglaterra e Noruega eram os únicos países publicamente engajados no tema.

A situação da Europa mudou drasticamente pela decisão tomada em 1991, pela Comissão Europeia que incluía geração de energia no seu programa de desenvolvimento de energia sustentável [4]. O primeiro projeto começou em 1992. Desde então, mais de trinta projetos foram executados somente na Europa.

Em 2001, a Agência Internacional de Energia (IEA) estabeleceu um acordo entre 17 países – *Ocean Energy Systems* (IEA-OES) – onde a sua missão era facilitar e coordenar pesquisas, desenvolvimentos e demonstrações em energia dos oceanos, através de cooperação internacional e comum troca de informações [5].

Nos últimos anos, vem crescendo o interesse por parte do Canadá e Estados Unidos na exploração de energia do mar. Estes países estão se envolvendo em frequentes reuniões e conferências sobre o tema [6] e [7].

Outro ponto importante no despertar do interesse pela extração da energia dos oceanos ocorreu, em 1997, na cidade de Kyoto. A questão das emissões de gases poluentes e as suas consequências entrou em pauta entre governantes de diversos países, sendo assinado o protocolo alguns anos depois, em 2005.

Com o protocolo assinado, a corrida pela redução da emissão de gases foi grande e muitos países abriram amplas fontes de financiamento à formação de linhas de pesquisas na geração de energia limpa.

Nesse novo cenário, a saída mais direta para a geração de energia renovável era extrair energia de fenômenos ambientais, como ventos, sol, e oceanos.

Os mares e oceanos possuem uma quantidade praticamente inesgotável de energia. Essa energia está disponível na forma de ventos, correnteza, marés e ondas. O Brasil possui cerca de 3,5 milhões de metros quadrados de mar territorial [8], ou seja, uma área vasta para exploração desse tipo de energia.

Desta forma, o presente trabalho propõe o projeto de uma unidade flutuante que capta essa energia disponível nos oceanos, transformando-a em eletricidade.

A geração de energia desta unidade se dá pelo acionamento de um mecanismo de conversão de energia, através dos movimentos relativos entre seus dois componentes principais: uma plataforma do tipo monocoluna e um corpo flutuante que se encontra no interior de seu *moonpool*.

Tais estudos compreendem a pesquisa de referências bibliográficas sobre o assunto, o esboço inicial do sistema a ser projetado, a modelagem física do problema, a geração de rotinas numéricas para a sua solução, a avaliação da coerência do modelo, a fabricação de um modelo em escala reduzida para a realização de ensaio em calibrador hidrodinâmico, o pós-processamento dos dados,

a verificação e validação do modelo numérico a partir do confronto com o resultado experimental, além da avaliação da capacidade de geração de energia desta unidade e, consequentemente, da sua viabilidade.

1.1. MOTIVAÇÃO

O TPN dispõe de grande conhecimento adquirido ao longo de muitos anos de pesquisa e desenvolvimento em tecnologias na área naval. A ideia da pesquisa, aqui proposta, é aproveitar o *knowhow* do Laboratório para adentrar em um novo nicho de pesquisa onde se faz tão necessário esse conhecimento.

Além disso, utilizar-se da grande quantidade de recursos como ondas, correntes, marés e ventos, disponível no mar em abundância, de forma consciente e sustentável, sem impactar de maneira negativa na qualidade de vida das pessoas (por se tratar de energia limpa) e adequando o planeta para um futuro sustentável, é sem dúvida uma motivação a mais.

O Brasil é um país onde a matriz energética está concentrada na geração de hidroeletricidade. Mais de 60% da energia produzida advêm de recursos hídricos [9]. No entanto, a falta de chuvas em determinadas regiões, em certos períodos do ano, põe em risco a operação dessas usinas. A solução atual para este problema é a compensação de energia gerada pelas termoeletricas, as quais, por produzirem energia a partir de combustíveis fósseis, liberam grande quantidade de gases e partículas poluentes na atmosfera. A solução imediata, menos agressiva ao meio ambiente, escalável, mais barata e mais sustentável seria a compensação pela geração de energia eólica, recurso este que se mantém numa melhor constante em relação às variações sazonais. Contudo, por problemas de planejamento e execução de obras de infraestrutura, as usinas eólicas – principalmente espalhadas pelo nordeste brasileiro – não estão operando, pois apesar de estarem prontas, não possuem as linhas de transmissão para a distribuição de energia para a rede elétrica nacional [10].

Tendo em vista todo este cenário, e sabendo que o Brasil está entre os 20 países com a maior extensão litorânea do mundo [11], a alternativa para extração de energia do mar é uma saída racional.

Estima-se que com os mais de 7 mil quilômetros de extensão litorânea, o Brasil pode receber usinas de ondas suficientes para gerar 87 gigawatts [12] . Desse total, 20% seriam convertidos em energia elétrica, o que equivale a aproximadamente 17% da capacidade total instalada no País.

Com vistas a incentivar a busca constante por inovações e fazer frente aos desafios tecnológicos do setor elétrico, a ANEEL criou o programa de Pesquisa e Desenvolvimento do segmento. Aprovado pela Resolução Normativa nº 316, de 13 de maio de 2008, os investimentos em P&D deverão ser orientados para temas estratégicos, buscando estimular o desenvolvimento de invenções e inovações tecnológicas relevantes para o Setor Elétrico Brasileiro. Os temas para investimento devem ser de interesse nacional e de grande relevância para o setor elétrico, envolvendo elevada complexidade em termos científicos e/ou tecnológicos e baixa atratividade para investimento como estratégia empresarial isolada ou individual. [13].

Neste contexto, as empresas concessionárias, permissionárias ou autorizadas de distribuição, transmissão e geração de energia elétrica devem aplicar anualmente um percentual mínimo de sua receita operacional líquida no Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Energia Elétrica.

Aproveitando essa oportunidade, os pesquisadores da COPPE da UFRJ conseguiram financiamento para o seu protótipo de usina de ondas, implantando o projeto no porto de Pecém – Ceará, sendo o primeiro deste tipo na América Latina.

Para se adequar a essa atual demanda, o Laboratório TPN pretende introduzir pesquisas na área, possibilitando futuros ensaios para verificação e validação dos sistemas desenvolvidos em softwares, e testados numericamente. A modelagem e simulação computacional irão desempenhar um papel importante na concepção,

análise e melhoria dos sistemas atuais e futuros de conversão de energia no mar, mas a verificação experimental é fundamental para validar todo o trabalho realizado.

Em quase todos os sistemas conversores de energia, a absorção ótima de energia das ondas envolve algum tipo de ressonância, o que implica que a geometria e o tamanho da estrutura estão diretamente ligados com o comprimento de onda. Por essas razões, se protótipos pilotos forem construídos para serem testados em mar aberto, eles devem ser de grandes dimensões [14], o que significa um alto custo de construção, implantação e manutenção. Deste modo, é muito mais vantajoso avaliar o comportamento do sistema projetado primeiramente com modelos físicos reduzidos, testados em ambiente controlado - como é o caso dos tanques de prova - e, numa última etapa do projeto, testar o sistema em mar aberto. Isto parece óbvio, mas não foi a forma como muitas das tecnologias existentes foram desenvolvidas.

1.2. OBJETIVO

O principal objetivo dessa dissertação é projetar uma plataforma monocoluna com corpo flutuante interno geradora de energia elétrica através das ondas do mar.

A proposta consiste em dimensionar os parâmetros que influenciam na geração de energia, sendo eles: as dimensões da monocoluna (diâmetro interno, externo e calado); as dimensões do corpo flutuante interno ao *moonpool* (diâmetro e calado); e a escolha do PTO (sistema de recuperação e transformação da energia cinética gerada pelas ondas para outra forma de energia).

Este dimensionamento será baseado em aprofundados estudos em códigos numéricos de comportamento no mar, até se estabelecerem os parâmetros que se julgarem coerentes, levando em consideração as dimensões que maximizam a geração de energia e que ao mesmo tempo atendam aos critérios básicos de estabilidade.

Definidos todos os parâmetros, um estudo de caso para o mar de Santos será realizado com o intuito de mostrar a possibilidade de adaptação do modelo para

qualquer cenário de mar, sempre buscando se encontrar as melhores dimensões, para cada região, e mostrando a máxima potência possível a ser gerada.

1.3. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

O esquema de organização do texto, como já visto até agora, constitui-se da introdução com motivações e objetivos, seguindo com:

Capítulo 2 onde é apresentada uma revisão bibliográfica, iniciando com uma rápida visão das principais fontes de pesquisa da área, mostrando também as dificuldades e os desafios que o desenvolvimento de sistemas geradores de energia de ondas percorre. Numa segunda etapa são classificados os principais sistemas de geração, e na sequência, o texto faz um amplo apontamento dos principais dispositivos existentes mundo afora, mostrando os seus fundamentos físicos de funcionamento e as suas capacidades. Encerrando o capítulo, o texto lista os tipos mais conhecidos de mecanismos PTO e as suas características.

Capítulo 3 que descreve a metodologia desenvolvida para o estudo, começando com o sistema proposto, apresentando os seus modelos físicos e matemáticos. Na sequência trata da abordagem empregada na análise do PTO, seguindo para a construção da ferramenta de cálculo numérica, com a exposição de cada uma das etapas desse algoritmo, o que finaliza o procedimento para a obtenção do modelo de resposta.

Capítulo 4 onde são expostos os resultados e feitas as discussões pertinentes ao tema.

Capítulo 5 que apresenta as conclusões do trabalho desenvolvido, ressaltando alguns pontos onde a abordagem pode ser melhorada, e finaliza com os possíveis novos enfoques para o assunto.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As ondas do mar são a forma mais notável de energia dos oceanos, possivelmente pelo seu excepcional efeito destrutivo. A energia acumulada nesse fenômeno é proveniente dos ventos e, portanto, uma forma indireta da energia solar. O aquecimento diferenciado da atmosfera gera diferenças de pressão, dando origem ao vento, e este, a partir de uma complexa interação com a superfície do mar, dá origem às ondas.

A quantidade de energia transferida pelo vento ao mar é dependente da velocidade do vento, do tempo que este sopra e do comprimento desta “pista” sobre a superfície do mar. Uma onda, quando formada, pode viajar milhares de quilômetros com ínfimas perdas energéticas.

Na região de águas profundas, a energia por unidade de frente de onda é descrita pela equação (2.1).

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \quad (2.1)$$

Onde:

ρ é a massa específica do fluido;

g é a aceleração da gravidade;

H é a altura de onda; e

T é o período da onda.

Dessa forma, a máxima potência que pode ser extraída das ondas, de acordo com [15], é dado por (2.2).

$$P = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} l \quad (2.2)$$

em que l é o comprimento da frente de onda.

Com o objetivo de ilustrar a quantidade de energia presente numa onda regular típica, considere uma altura de onda $H = 1m$ e um período $T = 10s$. Substituindo esses valores na equação (2.1), tem-se que a energia da onda por metro de frente de onda é da ordem de 10kW.

Apesar da energia das ondas ser considerada praticamente infinita, não é tão simples extrair essa energia elétrica delas. Tomando como exemplo, o dispositivo de conversão de energia das ondas que promete a maior potência geradora instalada em um único equipamento, tem capacidade de geração de 7kW. Isso porque esse sistema recolhe diversas ondas subsequentes para acumular a sua água e gerar energia. Ou seja, a taxa de conversão da energia das ondas é muito pequena.

Por outro lado, segundo [16], a energia transportada pelas ondas em alto mar rondam os 20 a 70 kW por metro de frente de onda. Globalmente, admite-se que ronda os 2000 e 4000 TWh anuais, sendo equiparável à energia eléctrica média anual consumida mundialmente.

A Figura 2.1 ilustra a distribuição da potência mundial das ondas em kW/m de frente de onda.

Figura 2.1 - Potencial mundial das ondas em kW/m de frente de onda. Fonte: [17].

A região em vermelho no mapa da Figura 2.1 representa as áreas de maior concentração de ondas. O litoral sul do Brasil é bem provido da incidência de ondas com bastante energia, e mesmo no restante do país é possível se aproveitar bastante dessa fonte.

2.1. PRINCIPAIS REFERÊNCIAS EM EXTRAÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS DO MAR

Muitos são os trabalhos e pesquisas realizados para extrair essa energia tão exorbitante. Segundo [18], mais de mil patentes foram registradas até o ano de 1980. De lá pra cá, este número pode até ter dobrado. A primeira patente que se tem registro foi assinada em 1799 [19].

Os primeiros livros publicados sobre como extrair energia dos oceanos datam da década de 80, sendo o pioneiro escrito por McCormick, em 1981 [18], seguido do livro do Shaw [20], de 1982. Os demais trabalhos mais significativos para a academia podem ser encontrados em dois amplos *overviews* feitos por [4] , [21] e [22]

2.2. DIFICULDADES E DESAFIOS

A absorção da energia do mar é um processo hidrodinâmico de considerável dificuldade teórica, em que envolve relativamente complexos fenômenos de difração e radiação de ondas. Isso explica porque grande parte dos trabalhos publicados a respeito da extração dessa energia, que data dos anos 70, foi sobre teorias hidrodinâmicas, em que distintos matemáticos tiveram papéis principais.

A utilização da energia das ondas envolve uma cadeia de processos de conversão de energia, onde cada uma delas é caracterizada pela sua eficiência e pelas suas restrições particulares, que devem ser conhecidas e controladas. [23] faz uma boa abordagem dessas cadeias, classificando-as. Além do processo de conversão de energia, o processo hidrodinâmico de absorção de energia das ondas é particularmente relevante. Os estudos mais antigos de corpos flutuantes e de conversores OWC revelam que, se o aparato desenvolvido pretende ser um

absorvedor eficiente, a sua frequência natural de oscilação deve casar com a frequência das ondas incidentes, ou operar pelo menos perto da condição de ressonância [14]. A ignorância em relação a esses simples conceitos resultou em uma grande quantidade de falhas de inventores que acabaram projetando sistemas quase estáticos em relação às ondas incidentes. Na prática, acoplar a frequência do sistema com a da onda possui uma série de dificuldades:

- a) Na maioria dos casos, exceto se o corpo for grande demais (isso se refere a corpos de dimensões da mesma ordem de grandeza do comprimento da onda, que certamente acompanhariam o seu movimento), a sua frequência natural é muita alta quando comparado com a frequência típica das ondas do mar;
- b) As ondas reais (ondas do mar) não possuem uma única frequência, sendo uma mistura de inúmeras ondas regulares de diversas frequências associadas.

Uma dificuldade adicional está relacionada com a concepção do mecanismo *Power Take-Off* (PTO), que permite aproveitar a energia cinética em outra forma de energia utilizável. O problema aqui está na variação do fluxo de energia absorvido do mar, que pode ser de diversas escalas de tempo como: poucos segundos (onda após onda), horas ou dias (estado de mar) e variações sazonais. Por fim, a capacidade de sobrevivência destes sistemas em condições extremas é outra importante preocupação.

2.3. CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE TECNOLOGIA

As tecnologias para extração de energia das ondas do mar são inúmeras, resultante das diferentes formas em que a energia pode ser absorvida a partir das ondas, e também dependendo da profundidade da água e da localização como: na linha da costa (*shoreline*), perto da costa (*near-shore*) e em alto mar (*offshore*).

[4] classificou os tipos de projeto de acordo com o princípio de funcionamento, como pode ser visto na Figura 2.2.

Figura 2.2 - Diversos tipos de tecnologias de absorção de energia de ondas. Fonte: [4].

As formas de captação de energia são basicamente: oscilação de uma coluna d'água (captação através de turbinas), oscilação de corpos (captação através de câmaras de pressão, turbinas ou magnético) ou aprisionamento de águas empurradas pelas cristas das ondas para depois utilizar-se de seu potencial como uma hidrelétrica.

2.3.1. *Oscilating Water Column (OWC)*

Estruturas Fixas

A maioria destes sistemas foram projetos para operar próximo à costa. Os protótipos em tamanho real que foram construídos normalmente repousam no fundo do mar ou estão fixos em paredes rochosas. As vantagens desse tipo de conversor de energia é a facilidade de instalação e manutenção, e a dispensa do uso de amarrações profundas e de longos cabos submersos de energia.

A típica primeira geração de dispositivos é o OWC que é um sistema composto por uma parcela submersa da estrutura, feita em concreto ou em aço, aberta abaixo da superfície da água, dentro do qual o ar está preso acima da superfície livre da água (Figura 2.3).

Figura 2.3 – Esquema ilustrativo do funcionamento de um dispositivo do tipo: *Oscilating Water Column*.
Fonte: [24].

As ondas incidentes no sistema fazem com que a superfície livre da água interna oscile, empurrando o ar confinado através da turbina geradora de energia. Esse tipo de processo foi primeiramente desenvolvido por Alan A. Wells (1924-2005) em 1976, e tem a vantagem de ser automaticamente retificável, gerando energia quando a coluna de ar é comprimida ou expandida.

Alguns protótipos em escala real construídos pelo mundo foram (Figura 2.4): na Noruega (Toftestallen, em 1985), no Japão (Sakata, em 1990), na Índia (Vizhinjam, em 1990), em Portugal (Pico, Azores, 1999), no Reino Unido (LIMPET plant em Islay island, Escócia, em 2000), na China (Guangdong Province, 2001), na Austrália (Oceanlinx Mk1, Port Kembla, 2005), e na Espanha (Muulti-chamber OWC plant, Mutrik harbour, País Basco, 2008-2010).

Figura 2.4 – Estruturas fixas de OWC. Da esquerda no alto em sentido horário temos: OWC breakwater, Japão (60 kW); Bottom-standing OWC, Índia (125kW); Pico OWC, Portugal (400kW); Guangdong OWC, China (100kW); LIMPET OWC, Reino Unido (500kW); Oceanlinx Mk1, Austrália (500kW); Multi-chamber OWC, Espanha (333kW).

Estruturas Flutuantes

Yoshio Masuda (1925-2009) pode ser considerado como o pai da tecnologia moderna da extração de energia das ondas. Com estudos desde a década de 40, ele desenvolveu uma boia equipada com uma turbina a ar (Figura 2.5), a qual mais a frente foi nomeada como *Oscillating Water Column* (OWC).

Figura 2.5 - Boia Japonesa de navegação. Fonte: [14].

Mais tarde, Masuda promoveu a construção de uma grande embarcação (80mx12m) – Kaimei (Figura 2.6) - com o único objetivo de testar diversas variações de OWC. Infelizmente os testes mostraram que a capacidade de extração de energia pelos sistemas projetados pelo Masuda foi ínfima, provavelmente por ser muito incipiente a tecnologia de extração de energia das ondas à época.

Figura 2.6 - Barcaça Japonesa com múltiplos sistemas de conversão de energia – Kamei. Fonte: [25].

Masuda concluiu que o processo de conversão de energia que estava sendo utilizado na Kaimei não era satisfatório. Desta forma ele elaborou uma geometria diferente para um OWC flutuante – o novo conceito se chamava Backward Bent Duct Buoy (BBDB). No BBDB o duto de entrada das ondas do mar era dobrado para trás em relação às ondas incidentes (Figura 2.7), que era mais vantajoso em comparação com a versão anterior do duto, voltada para frente [26]. Nos últimos anos, os esforços foram concentrados na Irlanda para o desenvolvimento de uma grande BBDB, para instalação *offshore*. Um modelo de escala 1:4 com 12 metros de comprimento, e equipado com uma turbina Wells de eixo horizontal, tem sido testada em águas rasas no mar da Baía de Galway (oeste da Irlanda), desde 2006 [27].

Figura 2.7 - Backward Bent Duct Buoy (BBDB). Adaptado de [27].

Outro conversor flutuante de OWC é o Mighty Whale (Figura 2.8). Este sistema foi desenvolvido pela Ciência Marinha e Centro de Tecnologia do Japão [28], e testado em tanques de provas com modelo em escala reduzida e com protótipo em escala

real. O protótipo construído em escala real possui 3 câmaras de ar localizados na frente do dispositivo, cada uma equipada com uma turbina Wells. A potência total de projeto é de 110kW. O sistema foi testado pela primeira vez em 1998, sendo instalado na Baía de Gokasho, no Japão.

Figura 2.8 - Mighty Whale. Adaptado de [28].

A boia Spar é mais um tipo de OWC flutuante. Com um dos mais simples sistemas, a boia consiste de um comprido cilindro com as suas duas extremidades abertas (no fundo e na superfície), acoplado a um flutuador que se move essencialmente em *heave*. O comprimento do cilindro determina a frequência de ressonância da coluna d'água interna ao sistema. O ar deslocado pela oscilação dessa coluna aciona uma turbina localizada no flutuador. A boia Spar foi possivelmente o primeiro conversor de energia desse tipo a ser vastamente estudado de forma teórica, sendo inclusive considerado para a produção de energia em larga escala ([29] e [30]). Uma versão da boia Spar foi desenvolvida pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa, numa escala de 1:10, sendo testada no ano de 2012, em NAREC, norte da Inglaterra (Figura 2.9).

A companhia australiana Oceanlinx instalou, em 2010, um dispositivo OWC de escala 1:3, no porto de Kembla (Australia), que era basicamente uma plataforma flutuante, com várias câmaras de ar (8 no total), todas elas com turbinas de diferentes tipos (Figura 2.10).

Figura 2.9 - Boia Spar. Fonte: [31].

Figura 2.10 – Oceanlinx Mk3. Fonte: [32].

2.3.2. *Oscillating Body*

Classificados algumas vezes como sistemas da terceira geração dos conversores de energia das ondas, os sistemas com corpos oscilantes, de acordo com [14], podem ser divididos basicamente em dois grandes tipos: flutuantes ou submersos. Esses sistemas costumam ser projetados para atuar em áreas *offshore*, com profundidades de mais de 40 metros. Estes sistemas se aproveitam da reação das boias à passagem das ondas, convertendo o movimento da boia (normalmente se utilizando apenas de um grau de liberdade para a conversão), em energia elétrica através de um PTO. As boias podem ser fixas no fundo do mar através de amarração, ou podem ser conectadas à quebra-mares, paredes rochosas ou qualquer outra estrutura fixa adjacente ao mar. A geração de energia se dá pelo simples movimento dela própria ou pelo movimento relativo, entre dois corpos flutuantes.

Sistemas de geração de energia *offshore* são naturalmente mais complexos quando comparados com os sistemas *near-shore* ou *shoreline*. A diferença está não só no ambiente mais hostil, na maior dificuldade de instalação e manutenção, e na

transmissão, como também no desenvolvimento do conceito, por se tratar do estudo de novos componentes como a reação hidrodinâmica da boia ao mar local e a contribuição da amarração na dinâmica do sistema. Todos esses fatores são novos em relação aos sistemas de primeira geração de conversores de energia, onde só havia a preocupação teórica com o dimensionamento da coluna d'água que impulsionaria o ar contra as turbinas geradoras.

Dispositivo de *heave* de corpo único

Single-body heaving buoys são boias projetadas para gerar grandes movimentos de *heave* quando da passagem das ondas. A boia que está fixa em alguma estrutura, ou amarrada no fundo do mar, reage à passagem das ondas exercendo uma força no sistema PTO, que transforma essa força de reação em energia. Muitas destas boias são concebidas em dimensões pequenas (muito menor que o comprimento da onda) sendo chamadas de absorvedores pontuais (*“point absorbers”*).

Um exemplo de absorvedor pontual é a Norwegian buoy, uma boia esférica que oscila em *heave*, guiada por um duto metálico ancorado no fundo do mar (Figura 2.11). A boia tem diâmetro de 1 metro e possui turbina a ar. Ela foi testada em Trondheim Fjord no ano de 1983 [33].

Figura 2.11 - Norwegian buoy. Fonte: [34].

Outro exemplo de equipamento para absorção de energia a partir do movimento de *heave* é a boia L-10, desenvolvida pela Universidade do Estado de Oregon (EUA). O sistema é composto por uma Spar de grande calado e uma boia em forma de anel

que fica em seu entorno (Figura 2.12). A Spar possui uma amarração do tipo *taut* para evitar o movimento de *heave* deste corpo. Assim a boia anelar é a única que está livre para oscilar. Este movimento entre os corpos gera uma velocidade relativa que associada à força imposta pela boia oscilante resulta na potência gerada pelo gerador elétrico linear (PTO magnético). Um protótipo de 7 metros de diâmetro, com capacidade nominal de geração de 10kW, foi instalado em Newport (Oregon) em 2008. Os resultados dos testes podem ser encontrados em [35].

Figura 2.12 - Boia L-10. Fonte: [35].

Existem também sistemas de boias ligadas por um cabo a um PTO magnético, no fundo do oceano, que produz energia pelo movimento oscilatório de um ímã dentro do PTO. Um exemplo desse sistema é a boia de *heave* Sueca, apresentado em [36]. Nesse artigo é descrito o funcionamento do equipamento além de toda a modelagem matemática dos fenômenos envolvidos. A Figura 2.13 ilustra o dispositivo com os seus componentes.

No artigo [37] é apresentado um dimensionamento de um sistema de várias boias para a produção de quantidades significativas de eletricidade. A modelagem da hidrodinâmica do sistema é apresentada em [38]. No Brasil, uma iniciativa de parceria entre a empresa Furnas, estatal responsável por 10% da geração de energia elétrica do Brasil [39], Coppe/UFRJ e a Seahorse Wave Energy, empresa nascida na incubadora da Coppe, dará início aos testes de um protótipo para águas rasas em 2015 de um sistema de geração de energia de ondas. O conceito é

baseado em uma coluna estrutural fixa ao solo marinho, que serve de guia para um flutuador. A energia do movimento vertical do flutuador devido à incidência de ondas é então convertida em energia elétrica e transmitida via cabo submarino direto para a rede elétrica em terra. A Figura 2.14 esquematiza o conceito do protótipo.

Figura 2.13 - Sistema de captação de energia através de boias. Modificado de [36].

Figura 2.14 - Protótipo de usina de ondas da Sea Horse Wave Energy em parceria com a COPPE-UFRJ. Modificado [40].

Dispositivo de *heave* de dois corpos

A utilização de sistemas de conversão com dois corpos oscilantes pode ser justificada com intuito de minimizar a grande distância entre a boia e o fundo do mar, que é um complicador para dispositivos de um só corpo. O movimento relativo do sistema de uma boia oscilante gera energia a partir dos movimentos da boia em

relação ao seu referencial fixo, que é o fundo mar (base de apoio). Essa distância pode mudar bruscamente com a variação de maré diária e lunar, podendo atrapalhar no *offset* padrão do sistema e na pretensão da amarração, por exemplo. Isto significa que o projeto pode ser inviável para determinados períodos.

Basicamente, os dispositivos de duas boias flutuantes usam o movimento relativo entre elas para gerar energia. Falnes faz uma análise teórica com detalhes da hidrodinâmica de dois corpos flutuantes em [41].

Em 1978, Sven A. Noren criou a boia IPS – inicialmente desenvolvida pela companhia sueca Interproject Service (IPS). Este sistema é formado por uma boia rígida conectada a um tubo completamente submerso, aberto nas suas extremidades (Figura 2.15). O movimento relativo entre a boia e o tubo, livres para oscilar em *heave*¹, aciona um mecanismo PTO [42].

Figura 2.15 - IPS buoy. Modificado de [43].

Um sistema muito parecido com o dispositivo que está sendo proposto neste trabalho é o SeaBeavl, desenvolvido na Universidade do Estado de Oregon. O sistema começou a ser projetado em 2006 e uma no depois já estava sendo testado em mar aberto. [44] apresenta os aspectos construtivos e os resultados obtidos nos testes. O aparato é composto por uma estrutura interna em forma de Spar envolto por uma boia em forma de “camisa” que oscila em *heave* guiado pela Spar (Figura

¹ Entende-se como livres para oscilar em *heave* o sistema que foi projetado para que as suas partes pudessem se deslocar neste grau de liberdade, mas por rigor teórico, o corpo não se apresenta livre por completo. Há outros fatores que interferem na oscilação do corpo, como é o caso do amortecimento gerado pelo PTO, contrapondo qualquer movimento imposto aos corpos nesta direção.

2.16). A amarração do sistema era do tipo tight, presa na spar. O protótipo testado possuía diâmetro máximo externo de 5 m e calado de 8 m. Além do conceito semelhante com sistema proposto neste trabalho, o PTO usado pelo SeaBevl é um gerador linear magnético [45], que se mostrou muito simples e robusto para o uso em dispositivos desse tipo.

Figura 2.16 - SeaBevl. Fonte: [45].

Outro sistema que chama a atenção pela semelhança com o trabalho proposto é o Wavebob, apresentado em [46]. Este sistema é formado por duas unidades flutuantes interligadas por um PTO, que no caso é um pressurizador hidráulico (Figura 2.17). O movimento relativo das unidades aciona o PTO acumulando energia. Um protótipo de escala 1:4 foi testado em águas rasas na Baía de Galway, na Irlanda.

Outro sistema de dois corpos flutuantes axissimétricos é o PowerBuoy, desenvolvido pela companhia americana Ocean Power Technologies. Um flutuador em forma de anel exerce uma força de reação, sob incidência de ondas, sobre um corpo cilíndrico submerso que possui uma placa horizontal na extremidade inferior. Esta placa serve para aumentar a inércia através do aumento da massa adicional. O movimento relativo entre os corpos aciona um mecanismo PTO hidráulico, que converte o movimento em energia. O protótipo instalado em 2008 na costa de Santoña, na Espanha, gera 40 kW de potência (Figura 2.18).

Figura 2.17 - Sistema de captação de energia através do movimento de duas unidades flutuantes. Modificado de [46].

Figura 2.18 - PowerBuoy. Modificado de [47].

Dispositivos de *heave* completamente submersos

O Archimedes Wave Swing (AWS)², é um conversor composto por duas unidades conectadas, estando ambas completamente submersas [48]. A unidade inferior (base) possui um sistema linear de geração de energia (PTO magnético) e a unidade superior (flutuador) oscila com a passagem das ondas. Quando a onda passa sobre o dispositivo com a sua crista, o flutuador é empurrado para baixo, e quando a onda passa com a sua cava, o flutuador se move para cima. Existe ar aprisionado entre o flutuador e a base. Este ar funciona como uma mola para o sistema, ajudando na restauração. Um protótipo do AWS foi construído em 2004. Projetado para uma potência de 2 MW, o protótipo foi instalado e testado na costa nordeste de Portugal (Figura 2.19). Os resultados obtidos podem ser vistos em [49].

Figura 2.19 - Archimedes Wave Swing. Modificado de [49].

Outro conversor completamente submerso é o CETO, desenvolvido na Austrália pela empresa Carnegie. Este dispositivo possui uma boia amarrada a uma base que possui um pistão/bomba de água de alta pressão. O restante do mecanismo PTO fica localizado em terra. Um protótipo de 7 metros de diâmetro e 80 kW foi testado em 2011, na Austrália (Figura 2.20).

² O Archimedes Wave Swing foi o primeiro dispositivo a usar um gerador elétrico linear [46].

Figura 2.20 - CETO. Adaptado de [50].

Dispositivos de *pitch*

Além dos dispositivos que geram energia através do movimento de translação, como é o caso das boias de *heave*, existe mais uma série de sistemas que foram pensados para se aproveitar o movimento rotacional que a onda pode exercer sobre eles. O mais famoso desses dispositivos é o Duck, criado pelo Stephen H. Salter na década de 70 [2]. A partir dele, uma série de outros sistemas foi criada com o mesmo princípio. O projeto pioneiro de Salter consistia de um flutuador com um giroscópio interno que reagia à passagem das ondas. O sistema completo era composto por vários desses flutuadores interligados, lado a lado, formando uma fileira, com o bico do Duck voltado para a direção das ondas incidentes (Figura 2.21).

Figura 2.21 - Duck. Fonte: [51].

Embora o Duck tenha sido amplamente estudado e testado em diferentes escalas, ele nunca foi construído em escala real, pois os resultados dos modelos não satisfizeram a expectativa que havia sido criada quando Salter surgiu com o conceito. Apesar disso, foi num dos testes em tanque com modelos em escala reduzida que a equipe de Salter percebeu que o sistema alinhado dos Ducks oscilava mais entre si do que individualmente. Ou seja, eles perceberam que a fileira de Ducks, ao receber ondas irregulares, se comportava de uma forma muito parecida com uma cobra. Isto atraiu a atenção da equipe para aproveitar esse potencial movimento também para gerar energia. Daí surgiu o conceito Pelamis.

O Pelamis é um sistema interessante de captação de energia das ondas [52]. Mostrado na Figura 2.22, consiste de uma unidade flutuante multi-articulada que capta energia pelo movimento relativo de suas partes. Cada junção apresenta um PTO e, de acordo com a fonte, cada unidade com três PTO possui uma potência instalada de 750kW.

Figura 2.22 - Pelamis - Sistema absorvedor de ondas. Modificado de [52].

Outro dispositivo parecido com o Pelamis é o McCabe Pump (Figura 2.23). O sistema é formado por 3 *pontoons* de aço retangulares unidos entre si. O *pontoon* central possui uma grande placa plana para amortecer o movimento de *heave* desta unidade. Dois PTOs hidráulicos convertem o movimento rotacional relativo entre eles em energia. Um protótipo de 40 metros foi testado no ano de 1996, na costa de Kilbaha, Irlanda [53].

Figura 2.23 - McCabe Pump. Fonte: [54].

Um sistema muito similar ao McCabe Pump é o SeaRay, desenvolvido nos EUA pela Universidade do Estado de Oregon e pela empresa Columbia Power. Este dispositivo foi testado em Seattle, no ano de 2011 (Figura 2.24).

Figura 2.24 - SeaRay. Fonte: [55].

Mais um conceito de dispositivo de *pitch* é o PS Frog Mk 5, desenvolvido pela Universidade Lancaster, no Reino Unido (Figura 2.25). Este aparato é composto por uma grande coluna que é ligada em suas extremidades a um caixote de lastro (no fundo) e a um caixote com uma massa deslizante (na superfície, fora d'água). A caixa superior é o PTO do sistema. Quando a onda passa pelo dispositivo, o sistema reage gerando um movimento de *pitch*. A massa da caixa desliza então para um dos cantos, acionando o PTO.

Figura 2.25 - PS Frog Mk 5. Fonte: [14].

Outro dispositivo que se utiliza do conceito de pêndulo é o Searev [56]. Ele foi desenvolvido na Ecole Centrale de Nantes, na França em 2003. O sistema se utiliza de uma roda/volante de inércia com o centro de gravidade deslocado (Figura 2.26).

Dessa forma, com o passar das ondas, o corpo sofre um movimento de *pitch* que é restaurado pela inércia do volante – este, que é acoplado a dois PTOs hidráulicos.

Figura 2.26 - Searev. Fonte: [57].

A versão espanhola de um sistema que recupera energia das ondas através do movimento de *pitch* é o Oceantec, criado pela empresa de mesmo nome. O aparelho é uma boia alongada com a seção transversal elíptica (Figura 2.27). Dentro, o dispositivo carrega um sistema giroscópio que restaura o movimento de *pitch* da boia, causada pela onda incidente. Essa restauração aciona um sistema PTO magnético [58].

Figura 2.27 - Oceantec. Fonte: [14].

Sistemas articulados de *pitch*

Stephen Salter ainda inventou outro dispositivo na década de 90, chamado de Mace [59]. Este equipamento é uma espécie de pêndulo invertido, fixo no fundo do mar

(Figura 2.28).O sistema é constituído por uma boia unida a um cilindro engastado por uma articulação no solo. Pela boia passa um cabo que serve de guia para o movimento do conjunto, além de estar ligado a um PTO hidráulico.

Figura 2.28 - Mace. Fonte: [59].

Um exemplo de conversor de energia articulado é o Oyster, desenvolvido no Reino Unido [60]. Trata-se de um flap articulado no fundo do mar que, com a oscilação em *pitch*, ativa o PTO hidráulico. A Figura 2.29 mostra a construção do protótipo que foi fabricado em 2009, e ele em operação, no mar da Escócia, em 2010.

Figura 2.29 - Oyster. Adaptado de [61].

O WaveRoller é um dispositivo muito parecido com o Oyster. O seu princípio de funcionamento é amplamente detalhado em [62]. A diferença se encontra, basicamente, no fluido que é utilizado no PTO (o Oyster usa água do mar e o WaveRoller usa óleo) e na posição em que estes dispositivos operam dentro d'água (o Oyster foi concebido para ficar desde o fundo do mar até a superfície livre da água enquanto que o WaveRoller fica totalmente submerso) [63]. Um protótipo com 3 flaps com capacidade de geração de 100kW cada, foi instalado a 15 metros de profundidade em Peniche, Lisboa-Portugal, em 2012 (Figura 2.30).

Figura 2.30 - WaveRoller. Adptado de [64].

Sistemas multi-corpos

Os sistemas com múltiplos corpos, na maioria das vezes, são plataformas com uma série de absorvedores pontuais instalados, muitas vezes compartilhando um mesmo PTO.

Um exemplo é o FO3, projetado e testado na Noruega [65]. Este sistema é composto por 21 boias, dispostas simetricamente, na qual oscilam em *heave* acionando um PTO hidráulico que é compartilhado por todos os absorvedores pontuais. A Figura 2.31 mostra um protótipo de 12mx12m, instalado na costa da Noruega, no ano de 2004.

Figura 2.31 - FO3 Buldra. Fonte: [65].

Outro exemplo é o Wave Star, desenvolvido na Dinamarca. O sistema é uma plataforma com duas fileiras de flutuadores, alinhadas com as ondas incidentes. Os flutuadores, ao serem excitados, bombeiam óleo em um circuito integrado fechado que contém um PTO para a conversão de energia. Dois protótipos já foram construídos e testados. O mais antigo, testado em 2006, tinha escala de 1:10 com 24 m de comprimento, gerando 5,5kW com 10 boias (Figura 2.32). O mais recente, testado em 2009, com escala de 1:2 e duas boias de 5 metros de diâmetro, tinha capacidade de 25kW por boia (Figura 2.33). O resultado destes testes pode ser conferido na íntegra em [66].

Figura 2.32 – Protótipo em escala 1:10 do Wave Star. Adaptado de [66].

Figura 2.33 – Protótipo em escala 1:2 do Wave Star. Adaptado de [66].

Mais uma vez sob parceria da COPPE/UFRJ, uma dissertação de mestrado do engenheiro Paulo Roberto do curso de Engenharia Oceânica, virou protótipo em 2004. A primeira fase do projeto foi financiada por uma empresa multinacional, que já opera no Brasil. A usina foi instalada no porto de Pecém, no Ceará, a 60 km de Fortaleza e obteve também o apoio do governo do estado. O sistema de geração consiste de um flutuador, um braço mecânico de 22 m de comprimento preso em terra firme e uma bomba conectada a um circuito fechado de água doce. (Figura 2.34).

Figura 2.34 – Protótipo de Usina de Ondas: a) Modelo em escala 1:10 testado no LabOceano – Rio de Janeiro, RJ; b) Modelo em escala real em testes no Porto de Pecém, CE. Fonte: [39].

Com o sobe e desce causados pelas ondas do mar, o flutuador movimenta o braço mecânico, que por sua vez aciona a bomba. A água é pressurizada e lançada em jatos, fazendo girar a turbina geradora de energia elétrica. A geração atinge 100 kW - o suficiente para abastecer 60 famílias [39].

2.3.3. Overtopping Converters

Os dispositivos *overtopping* funcionam como um acumulador de água, concentrando a água proveniente das cristas das ondas incidentes, dentro de um grande reservatório. O sistema se aproveita da energia potencial da água atulhada para acionar uma turbina geradora de energia.

O primeiro dispositivo desse tipo foi o Tapered Channel Wave Power Device (Tapchan), construído em 1985 pela empresa norueguesa, Norwave [67]. O protótipo foi instalado em um paredão de rochas ao lado do mar (Figura 2.35). A sua entrada possuía 60 metros de largura e o nível interno do reservatório era de 3 metros acima do nível do mar. A máxima potência alcançada foi de 350kW.

Figura 2.35 – Tapchan, em Toftestalen, Noruega. Fonte: [68].

O Wave Dragon, Figura 2.36, talvez seja o dispositivo mais conhecido desta categoria. Construído em 2003, o protótipo de escala 1:4,5, instalado em Nissum Bredning (Dinamarca), gerou 20kW de potencia. Segundo a companhia fabricante, de mesmo nome, o Wave Dragon está pronto para testes em escala real, podendo alcançar a capacidade de geração de 7MW com apenas um equipamento. O conceito de geração de energia deste dispositivo é similar ao Tapchan, porém o Wave Dragon opera em alto mar, sendo um sistema flutuante amarrado por cabos pouco tensionados, apenas para evitar um grande *offset*. O trabalho publicado por [69] contém todos os detalhes do projeto do sistema.

Figura 2.36 - Wave Dragon. Adaptado de [70].

Por fim, o Seawave Slot-Cone Generator (SSG) é um quebra mar fixo de caixote de concreto, que aproveita a incidência de ondas de um dos lados para acumular água por três aberturas em três níveis diferentes (Figura 2.37). Cada um dos níveis possui uma turbina que serve de ralo para a passagem da água daquele nível para o nível inferior, gerando energia ([71] e [72]).

Figura 2.37 - Quebra-mar fixo com dispositivo gerador de energia SSG. Fonte: [72].

2.3.4. Resumo dos tipos de tecnologia e suas potências

Depois desta vasta revisão bibliográfica percorrendo boa parte do que já foi feito, ou ainda está em estudo, em relação à extração da energia das ondas do mar, pode-se apresentar um resumo contendo a potência gerada de cada dispositivo. Não foram encontradas todas as potências de cada um dos trabalhos citados, mas os que divulgaram as suas capacidades, estão destacados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Resumo das tecnologias de extração da energia das ondas do mar e suas potências.

<i>Oscillating Water Column (OWC)</i>			<i>Oscillating Body</i>			<i>Overtopping Converters</i>		
	Nome/País	Potência [kW]			Nome/País	Potência [kW]		Potência [kW]
Estruturas Fixas	OWC breakwater Japão	60	Flutuantes de <i>heave</i>	Corpo único	Boia L-10 EUA	10	Fixos na costa	Tapchan Noruega 350
	Bottom standing Índia	125		Dois corpos	PowerBuoy Espanha	40	Flutuantes	Wave Dragon Dinamarca 7000
	Pico Portugal	400	Submersos de <i>heave</i>		AWS Portugal	2000		
	Guangdong China	100			CETO Austrália	80		
	LIMPET Reino Unido	500	Flutuantes de <i>Pitch</i>		Pelamis Portugal	750		
	Ocenalinx Mk1 Austrália	500	Submersos de <i>Pitch</i>		WaveRoller Portugal	100		
	Multi-chamber Espanha	333	Sistemas multi-corpos		Wave Star Dinamarca	25		
Estruturas Flutuantes	Mighty Whale Japão	110			Usina de Ondas Pecém Brasil	100		

2.4. POWER TAKE-OFF

Um sistema *Power Take-Off* (PTO) é um mecanismo que absorve energia cinética ou potencial gravitacional de um sistema, para os casos aplicados em conversores de energia de ondas, e a transforma em um outro tipo de energia, geralmente pressão, eletricidade ou outro movimento. Um panorama geral dos sistemas PTO utilizados atualmente é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Sistemas PTO. Modificado de [73].

Tipo	Descrição
Acionamento Direto	O gerador elétrico é acionado diretamente pela energia que se quer transformar
Hidro-Turbinas	Fluxo de água movimenta uma hidro-turbina que por sua vez aciona um gerador elétrico
Turbinas Pneumáticas	Uma coluna fechada de água empurra ar por uma turbina que aciona um gerador elétrico
Sistemas Hidráulicos	Um pistão hidráulico pressuriza um fluido que ao ser liberado aciona um gerador elétrico

Em [23] é feita uma grande abordagem em relação às cadeias de conversão de energia, considerando e classificando os sistemas em relação a todas as etapas dessa conversão que pode ser feita de diversas maneiras.

O maior desafio do projeto de [1] foi na escolha e adaptação do sistema PTO para o modelo numérico abordado. O sistema escolhido era hidráulico e não linear, o que complicava bastante o desenvolvimento da dinâmica do sistema justamente por apresentar esse comportamento.

Como pode ser visto em [45] e [74], um gerador linear por ímã (PTO magnético) foi testado em conversores de energia de onda e onde obtiveram bons resultados. Este PTO se mostrou vantajoso aos demais por ter um comportamento linear, que pode ser facilmente incorporado a qualquer modelagem dinâmica do sistema global.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia que foi empregada na abordagem do problema numérico.

3.1. SISTEMA PROPOSTO

Para a absorção da energia advinda das ondas, foi proposto um sistema que consiste de uma plataforma do tipo monocoluna com um cilindro localizado em seu *moonpool*. A incidência de ondas no conjunto faz com que cada unidade responda com movimentos diferentes. Esta diferença é responsável por criar um movimento relativo entre as unidades, que é aproveitado com o intuito de gerar energia através da atuação de um mecanismo conectado a ambas as partes - um gerador de eletricidade (*Power Take-Off* - PTO).

Figura 3.1 - Esquema de plataforma monocoluna com cilindro interno ao *moonpool* para geração de energia de ondas. Fonte: [1].

Em relação ao sistema proposto por [1], mostrado na Figura 3.1, o PTO retira a energia do movimento relativo entre as unidades flutuantes e a transforma em energia elétrica através de um sistema hidráulico. O PTO retira água do mar quando o cilindro interno à monocoluna está subindo em relação à unidade externa (armazenando-a em um reservatório interno) e comprime esta água, no sentido oposto. A água pressurizada é liberada constantemente após passar por um acumulador de alta pressão, acionando uma turbina geradora.

A grande questão do tema desenvolvido por [1] foi, justamente, a escolha do PTO hidráulico. Nas conclusões do trabalho fica claro que o uso do sistema hidráulico dificultou a incorporação precisa do amortecimento gerado pelo PTO na dinâmica do sistema de dois corpos, além do que, gerava grande incerteza nos resultados alcançados por não se ter feito ensaios com modelos em escala reduzida para validação. Com relação aos os ensaios, para realizá-los de maneira correta, seria preciso fabricar sistemas hidráulicos menores (que não possuem comportamento linear) que reproduzissem o mesmo comportamento do sistema original, mas em escala reduzida.

Com todos esses pontos levantados pelos autores do trabalho inicial, foi avaliado que seria melhor se utilizar de geradores elétricos lineares, compostos por um ímã e uma bobina elétrica. O ímã seria solidário ao cilindro interno ao *moonpool* e a bobina ficaria fixa a um suporte preso na monocoluna, de forma que com a movimentação relativa entre os corpos, o ímã iria se movimentar no interior da bobina, que de acordo com a Lei de Faraday-Lenz da Indução Eletromagnética, a diferença de potencial elétrico gerada pela passagem de um ímã pelo interior de uma bobina resultaria na geração de corrente elétrica.

Vale lembrar também que a potência gerada (P_{ot}) pelo indutor magnético depende da força relativa resultante (F_{Rel}) entre as duas unidades do sistema (monocoluna e cilindro interno), que é aplicado no mecanismo PTO para realizar trabalho e gerar energia, e da velocidade relativa (V_r) entre as duas unidades, sendo $P_{ot} = F_{Rel}V_r$.

A dinâmica entre o cilindro e a monocoluna resultará numa força e numa velocidade relativa entre os corpos. Esses parâmetros são inversamente proporcionais, de forma que quanto maior for a força relativa entre os corpos, menor será a velocidade relativa entre eles, e vice-versa. Sendo assim, deve-se descobrir o ponto ótimo de operação onde a força e a velocidade relativa seja tal que a potência gerada seja máxima para o sistema.

Para entender melhor o método de cálculo da dinâmica do sistema e da potência gerada, está apresentado, no próximo capítulo, o seu diagrama de corpo livre e as suas equações de movimento.

3.2. MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS

3.2.1. Oscilação forçada de sistema de dois graus de liberdade

A modelagem do problema hidrodinâmico foi realizada considerando a dinâmica de dois corpos, mais um PTO associado, como um problema de oscilação forçada de um sistema com dois graus de liberdade. Os corpos considerados são a monocoluna e o cilindro interno. O PTO é representado na modelagem como o amortecedor conectado a ambos os corpos, que retira energia do sistema dinâmico. Algumas hipóteses simplificadoras foram feitas, e outras, tomadas como premissa:

- a) foi considerado apenas o movimento de *heave* das unidades:
 - Os corpos possuem trilhos, internos à monocoluna e externos ao cilindro, que servem como guias do movimento relativo entre eles. Dessa forma, é razoável que a análise da dinâmica dos corpos seja baseada, principalmente, em torno dos movimentos de *heave* das unidades do sistema, tendo em vista que os corpos são simétricos em relação aos seus eixos verticais que passam pelos seus centros.
- b) não é considerado choque entre os dois corpos, pois como já dito, existirá um trilho guia entre eles;
- c) os corpos são excitados apenas pelas ondas;
- d) é considerado apenas forças de onda de primeira ordem;
- e) inicialmente, os corpos estão em equilíbrio;
- f) na análise do problema, foi considerado que os corpos realizam pequenos movimentos, o que permite a linearização da solução;
- g) os corpos estão amarrados apenas para evitar o passeio, sendo considerada uma amarração que não interfira nos movimentos de primeira ordem do sistema;

- h) o amortecimento relativo ao PTO insere apenas um termo de amortecimento linear na equação do movimento;
- i) a energia a ser gerada pelo sistema PTO depende diretamente da oscilação relativa entre os corpos na direção vertical;
- j) não é avaliada a viabilidade construtiva nem mesmo a viabilidade estrutural dos corpos.

Diagrama de corpo livre

A seguir está descrito a modelagem matemática do sistema.

Figura 3.2 – Diagrama de corpos livres do sistema monocoluna e cilindro.

Onde x_i é a posição em *heave* de cada corpo em relação à sua posição de equilíbrio, $\dot{x}_i$ é a velocidade, B_{pot_i} é a parcela de amortecimento potencial, B_{visc_i} é a parcela de amortecimento viscosa, B é o amortecimento linear inserido pelo PTO, K_i é a restauração hidrostática, F_{w_i} é a força de onda de primeira ordem e o índice i faz referência ao corpo, apresentando valor unitário para a monocoluna, e dois para o cilindro interno.

Da Figura 3.2, temos pela 2ª Lei de Newton:

$$(M_1 + M_{a_1}) \ddot{x}_1 = F_{w_1} - K_1 x_1 - (B_{pot_1} + B_{visc_1}) \dot{x}_1 - B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3.1)$$

$$(M_2 + M_{a_2}) \ddot{x}_2 = Fw_2 - K_2 x_2 - (B_{pot_2} + B_{visc_2}) \dot{x}_2 - B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2)$$

Onde M_i é a massa do corpo i e M_{a_i} é a sua massa adicional de *heave*. Modificando o sistema (3.1) chega-se a:

$$\begin{aligned} (M_1 + M_{a_1}) \ddot{x}_1 + K_1 x_1 + (B_{pot_1} + B_{visc_1}) \dot{x}_1 + B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= Fw_1 \\ (M_2 + M_{a_2}) \ddot{x}_2 + K_2 x_2 + (B_{pot_2} + B_{visc_2}) \dot{x}_2 - B(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) &= Fw_2 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Por fim, rearranjando os termos e passando para a forma matricial, tem-se:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} M_1 + M_{a_1} & 0 \\ 0 & M_2 + M_{a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{pot_1} & 0 \\ 0 & B_{pot_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \\ \begin{bmatrix} B_{visc_1} + B & -B \\ -B & B_{visc_2} + B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} Fw_1 \\ Fw_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.3)$$

Sabe-se que a solução geral desta equação é dada pela composição de sua solução homogênea (responsável pela resposta transiente) com uma solução particular (responsável pela resposta estacionária) semelhante à excitação harmônica para todas as situações de $\omega \neq \omega_n$ (onde ω_n é a frequência natural), ou seja:

$$x_i(t) = x_{h_i}(t) + x_{p_i}(t), \text{ e} \quad (3.4)$$

$$x_{p_i}(t) = X_i \sin(\omega t - \phi) \quad (3.5)$$

Onde x_{h_i} é a solução homogênea, x_{p_i} é a solução particular, X_i é a amplitude da oscilação e ϕ é a fase do deslocamento com relação à força de excitação.

Algumas questões importantes devem ser consideradas aqui:

- a) Neste tipo de sistema amortecido, após algum tempo, somente a resposta permanente se mantém, ou seja, o efeito das condições iniciais, que em sua

maior parte é garantido pela solução homogênea, vai diminuindo com o passar do tempo;

- b) Quando o sistema não for amortecido ($B = 0$) ambas as soluções coexistem todo o tempo (homogênea e particular).

Resolvendo a equação no domínio dos números complexos, define-se F_w como a força de onda de primeira ordem, que varia em função do tempo t , e que também pode ser representada como $F_{w_i}(t) = F_{0_i} \text{sen}(\omega t)$, em que F_{0_i} representa o módulo da força de excitação da onda e ω , a sua frequência. A forma representada define que a magnitude das forças que compõe a equação diferencial da dinâmica do sistema seja a sua parte imaginária dessas forças. Se, por outro lado, $F_{w_i}(t)$ fosse escrito em função de cosseno ($F_{w_i} = F_{0_i} \cos(\omega t)$), então a magnitude das forças estaria relacionada com a parte real. Portanto, para se fazer uma resolução de forma mais geral, a força de excitação harmônica será representada como:

$$F_{w_i}(t) = F_{0_i} [\cos(\omega t) + i \text{sen}(\omega t)] = F_{0_i} e^{i\omega t} \quad (3.6)$$

O mesmo pode ser feito para a solução particular do sistema:

$$x_{p_i}(t) = X_i e^{i(\omega t - \phi)} = \bar{X}_i e^{i\omega t} \quad (3.7)$$

Onde $\bar{X}_i = X_i e^{-i\phi}$.

Voltando para a eq. (3.3), assumindo soluções harmônicas e permanentes do tipo:

$$\begin{cases} x_1(t) = \bar{X}_1 e^{i\omega t} \\ x_2(t) = \bar{X}_2 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (3.8)$$

e suas derivadas:

$$\begin{cases} \frac{d(x_1(t))}{dt} = i\omega \bar{X}_1 e^{i\omega t} \\ \frac{d(x_2(t))}{dt} = i\omega \bar{X}_2 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (3.9)$$

e

$$\begin{cases} \frac{d^2(x_1(t))}{dt^2} = -\omega^2 \bar{X}_1 e^{i\omega t} \\ \frac{d^2(x_2(t))}{dt^2} = -\omega^2 \bar{X}_2 e^{i\omega t} \end{cases} \quad (3.10)$$

Tem-se, na substituição de (3.6) a (3.10) em (3.3):

$$\begin{bmatrix} M_1 + M_{a_1} & 0 \\ 0 & M_2 + M_{a_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\omega^2 \bar{X}_1 \\ -\omega^2 \bar{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{corpo_1} & -B_{PTO} \\ -B_{PTO} & B_{corpo_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i\omega \bar{X}_1 \\ i\omega \bar{X}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{0_1} \\ F_{0_2} \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Onde: $B_{corpo_i} = B_{visc_i} + B_{pot_i}$.

Rearranjando os termos

$$\begin{bmatrix} -(M_1 + M_{a_1}) \omega^2 + B_{corpo_1} i \omega + K_1 & -B_{PTO} i \omega \\ -B_{PTO} i \omega & -(M_2 + M_{a_2}) \omega^2 + B_{corpo_2} i \omega + K_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{0_1} \\ F_{0_2} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

De acordo com a definição de Impedância mecânica $Z_{rs}(i\omega)$ dada em RAO [75]

$$Z_{rs}(i\omega) = -\omega^2 M_{rs} + i \omega B_{rs} + K_{rs} \quad r, s = 1, 2 \quad (3.13)$$

pode-se escrever a eq. (3.12) na forma

$$[Z(i\omega)] \vec{X} = \vec{F}_0 \quad (3.14)$$

onde

$$[Z(i\omega)] = \begin{bmatrix} Z_{11}(i\omega) & Z_{12}(i\omega) \\ Z_{12}(i\omega) & Z_{22}(i\omega) \end{bmatrix} = \text{Matriz de Impedância} \quad (3.15)$$

$$\vec{X} = \begin{Bmatrix} \bar{X}_1 \\ \bar{X}_2 \end{Bmatrix} \quad e \quad \vec{F}_0 = \begin{Bmatrix} F_{0_1} \\ F_{0_2} \end{Bmatrix}$$

A eq.(3.14) pode ser resolvida pelo método de Cramer, para se obter

$$\vec{X} = [Z(i\omega)]^{-1} \vec{F}_0 \quad (3.16)$$

Basta agora determinar $[Z(i\omega)]^{-1}$ que é dada por $[Z(i\omega)]^{-1} = \frac{1}{|Z(i\omega)|} \text{adj}[Z(i\omega)]$.

Sabe-se, no entanto, que a matriz adjunta da matriz $[Z(i\omega)]$, quadrada, é a transposta da matriz de cofatores de $[Z(i\omega)]$. Resolvendo dessa forma, obtêm-se a inversa da matriz de impedância, que é dada por

$$[Z(i\omega)]^{-1} = \frac{1}{Z_{11}(i\omega).Z_{22}(i\omega) - Z_{12}^2(i\omega)} \begin{bmatrix} Z_{22}(i\omega) & -Z_{12}(i\omega) \\ -Z_{12}(i\omega) & Z_{11}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

As eqs. (3.15) e (3.16) levam à seguinte solução

$$\bar{X}_1(i\omega) = \frac{Z_{22}(i\omega).F_{0_1} - Z_{12}(i\omega).F_{0_2}}{Z_{11}(i\omega).Z_{22}(i\omega) - Z_{12}^2(i\omega)} \quad (3.18)$$

$$\bar{X}_2(i\omega) = \frac{-Z_{12}(i\omega).F_{0_1} + Z_{11}(i\omega).F_{0_2}}{Z_{11}(i\omega).Z_{22}(i\omega) - Z_{12}^2(i\omega)}$$

Por substituição da eq. (3.18) na eq. (3.7) é obtida a solução completa $x_1(t)$ e $x_2(t)$.

A equação (3.18) representa a resposta ao modelo matemático da dinâmica do sistema de dois corpos oscilando em *heave*. A resolução do sistema acima é

bastante complexa, principalmente em se tratando de se obter o valor de seus coeficientes. Ainda de acordo com RAO [75], o uso de ferramentas computacionais facilita muito a obtenção da resposta para este tipo de sistema. Sendo assim, uma rotina em ambiente MATLAB®³, foi desenvolvida para simular o desempenho do sistema.

Na seção 3.3 são detalhadas as formas de se abordar o sistema utilizando esse equacionamento.

3.2.2. Amortecedor linear

O amortecedor linear é um aparato que em sistemas dinâmicos responde com uma força proporcional à velocidade relativa associada à interação entre dois corpos, definida segundo a seguinte relação:

$$F_B = B \frac{dx}{dt} \quad (3.19)$$

Onde B é conhecido como constante de amortecimento linear.

Considere agora um sistema massa-mola-amortecedor de um grau de liberdade, como o mostrado na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Sistema massa-mola-amortecedor.

³ MATLAB – marca registrada da The Math Works, Inc.- Ambiente de programação de códigos numéricos de linguagem própria.

Seja a equação desse sistema definida por (3.32).

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + Kx = 0 \quad (3.20)$$

Algumas definições importantes devem ser feitas:

- a) $\omega_n = \sqrt{\frac{K}{M}}$ é a frequência natural do sistema não amortecido;
- b) $B_{cr} = 2 M\omega_n$ é o amortecimento crítico;
- c) $\zeta = \frac{B}{B_{cr}}$ é o coeficiente de amortecimento ou fração do amortecimento crítico.

Utilizando os conceitos introduzidos, a dinâmica do sistema pode ser reescrita na forma de (3.21).

$$\ddot{x} + 2\zeta\omega_n\dot{x} + \omega_n^2x = 0 \quad (3.21)$$

Desta forma, 4 tipos de movimentos podem ser distintos a partir da variação do coeficiente de amortecimento. São eles:

- a) Movimento não amortecido ($\zeta = 0$);
- b) Movimento sub-amortecido ($\zeta < 1$);
 - Aqui cabe outra definição, a da frequência natural amortecida ω_d :

$$\omega_d = \omega_n\sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.22)$$

- c) Movimento criticamente amortecido ($\zeta = 1$):
 - Este movimento não é periódico, ou seja, já não há oscilação.

d) Movimento super-amortecido ($\zeta > 1$):

- Também não há oscilação.

Graficamente, o comportamento do deslocamento $x(t)$ para cada um dos tipos descritos acima estão apresentados na Figura 3.4.

Figura 3.4 – Comportamento de sistema dinâmico amortecido parametrizado pelo coeficiente de amortecimento. Adaptado de [76].

Considere ainda um corpo com um grau de liberdade, mas dessa vez com uma força excitante, como mostrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 – Sistema massa-mola-amortecedor com excitação forçada.

De modo geral, as fases da velocidade e aceleração encontram-se adiantadas em relação ao deslocamento, respectivamente de 90° e 180° .

Apresentando a equação diferencial do movimento, em termos vetoriais, segue que:

Figura 3.6 - Equação diferencial vetorial do movimento de excitação harmônica para um grau de liberdade. Adaptado de [77].

De onde se pode concluir as seguintes relações para X e ϕ :

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(K - M\omega^2)^2 + (B\omega)^2}} \quad (3.23)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{B\omega}{K - M\omega^2} \quad (3.24)$$

De tal forma que $\frac{B\omega}{K} = \frac{B}{B_{cr}} \frac{B_{cr} \omega}{K} = 2\zeta \frac{\omega}{\omega_n}$ e as equações da amplitude e fase podem ser reescritas na forma adimensional, como apresentada na equação (3.25).

$$\frac{XK}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left[2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)\right]^2}} \quad (3.25)$$

Onde $\frac{XK}{F_0}$ é conhecido como fator de amplificação, função de transferência ou ainda, RAO – *Response Amplitude Operator*.

Figura 3.7 – Fator de amplificação do movimento de excitação harmônica para um grau de liberdade. Retirado de [77].

E ϕ é a fase entre a força de excitação e o deslocamento.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2\zeta \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2} \quad (3.26)$$

Observando as equações (3.25) e (3.26) nota-se que a amplitude e a fase são funções somente do coeficiente de amortecimento ζ e da relação entre frequências $\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)$. O coeficiente de amortecimento tem grande influência, principalmente próximo da região de ressonância do sistema, como pode ser observado na Figura 3.7. Já em relação às frequências, podem ser identificadas três condições principais:

- a) $\left(\frac{\omega}{\omega_n} \right) \ll 1$ - as forças de inércia e de amortecimento são pequenas e isso resulta num pequeno ângulo de fase. A magnitude da força excitante é muito próxima da magnitude da força de restauração, o que acarreta numa tendência de deslocamento quase-estático;

- b) $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) = 1$ - o ângulo de fase é de 90° e a força de inércia, agora maior, é balanceada pela restauração, considerando-se que a força excitante supere a força de amortecimento. Nessa situação, a amplitude na ressonância é de $X = \frac{F_0}{2\zeta K}$;
- c) $\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right) \gg 1$ - o ângulo de fase está próximo de 180° . A força de excitação é praticamente toda dispensada em superar a força de inércia.

Figura 3.8 – Ângulo de fase pela relação de frequências. Extraído de [77].

3.2.3. Potência gerada no PTO

O equipamento de conversão de energia, conectado aos dois corpos flutuantes, exerce grande influência na dinâmica do sistema. Quanto mais rígido for o PTO, ou seja, quanto mais resistência ao movimento impuser ao sistema, maior será o seu amortecimento, e vice-versa. Dessa forma, na abordagem da dinâmica do sistema, o PTO pode ser considerado como um simples amortecedor ligado entre os corpos. Para questões de avaliação de potência gerada, o PTO será considerado como um amortecedor linear (B_{PTO}), como exposto e discutido na seção 3.1.

Em física, potência é a grandeza que determina a quantidade de energia concedida por uma fonte a cada unidade de tempo [78]. Em outros termos, potência é a rapidez com a qual certa quantidade de energia é transformada ou é a rapidez com que o trabalho é realizado. Dessa forma, a potência pode ser escrita como:

$$Pot = \frac{dW}{dt} \quad (3.27)$$

Onde W é o trabalho realizado e t é o tempo em que o trabalho foi realizado.

Trabalho é a energia dispensada ao longo de um percurso, ou seja, uma força (F) utilizada durante uma distância (x).

$$W = F \cdot x \quad (3.28)$$

Considerando-se instante a instante, pode-se supor que essa força aplicada seja constante, o que resulta em:

$$Pot = \frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\partial (F \cdot x)}{\partial t} = F \frac{\partial x}{\partial t} = F \cdot \dot{x} \quad (3.29)$$

A potência também pode ser entendida como sendo a força multiplicada pela velocidade.

Lembrando que a força imposta pelo amortecimento (F_{PTO}) é diretamente proporcional à velocidade:

$$F_{PTO} = B_{PTO} \cdot \dot{x} \quad (3.30)$$

E associando as equações (3.29) e (3.30), chega-se na definição de potência gerada pelo PTO, sendo esta dada pela equação (3.31).

$$Pot = F_{PTO} \cdot \dot{x} = B_{PTO} \cdot \dot{x}^2 \quad (3.31)$$

Pensando em um valor de B_{PTO} constante, e ainda, de acordo com a equação (3.29), quanto maior for a velocidade relativa dos corpos para o movimento vertical de *heave*, maior será a potência gerada. Porém, segundo a equação (3.30), quanto maior for a velocidade relativa, menor será a força entre os corpos (F_{PTO}) e, conseqüentemente, menor será a potência gerada. Esse raciocínio mostra que a definição da potência máxima não será obtida de uma forma direta, o que induz a acreditar que a curva de potência terá um ponto de máximo, numa combinação ideal entre o amortecimento do PTO e a velocidade relativa de oscilação dos corpos em *heave*.

3.3. MODELOS NUMÉRICOS

Equacionado o movimento do sistema de acordo com as hipóteses levantadas, o próximo passo é detalhar como foram construídos os modelos numéricos que serão utilizados na investigação da dinâmica dos corpos.

Devido à dificuldade da resolução do modelo matemático, e a complexidade em se obter os coeficientes da equação (3.11) de forma analítica, tornou-se fundamental a resolução do problema com algoritmos que reproduzissem o modelo dinâmico do sistema. Dessa forma, foi construída uma ferramenta de cálculo numérico que resolvesse o problema de forma automatizada. Essa ferramenta, nada mais é que um script de programação feito em MATLAB. Isso não só facilitou a resolução e o entendimento do problema, mas também viabilizou uma busca ampla entre diversas soluções (geometrias), a fim de se encontrar uma combinação de parâmetros ótimos, que maximizassem a capacidade de produção de energia do dispositivo proposto nesse trabalho.

A abordagem numérica foi feita sob a análise no domínio da frequência, – que dadas as premissas e hipóteses adotadas em 3.2., gera resultados bastante satisfatórios. Para desenvolver essa análise foi utilizado o WAMIT⁴, por ser de domínio do autor da dissertação, e também por ser reconhecido e validado pela academia naval.

⁴ WAMIT – Wave Analysis MIT é um programa que utiliza a teoria potencial de ondas e o BEM (Boundary Element Method - Métodos dos elementos de contorno, em tradução livre) para resolver o problema de

O tema desenvolvido por [1] foi abordado sob a ótica da análise no domínio do tempo, pois já se imaginava o uso de conversores de energia que introduzissem amortecimentos não lineares no sistema. Com razão, a resolução de problemas não lineares escapa do escopo de análise do WAMIT. Porém, o conversor de energia proposto, nesta dissertação, é do tipo gerador linear por imã (PTO magnético). O amortecimento sendo linear torna não só viável, mas também mais prática e rápida, a resolução do problema pela análise no domínio da frequência.

Alguns pontos críticos do WAMIT devam ser destacados. Esse programa considera a oscilação dos corpos como sendo pequenos movimentos em torno da posição inicial. Isso permite a linearização do problema. O *software* não considera efeitos viscosos de forma direta (no item 3.3.1.2 será mostrado como contornar essa questão) além de não considerar efeitos de quebra de ondas⁵. Mesmo com todas essas simplificações, o programa possui eficácia comprovada para a maioria das aplicações em engenharia naval e oceânica.

3.3.1. Ferramenta de análise numérica

O passo-a-passo da ferramenta de análise numérica elaborada neste trabalho está esquematizado pelo fluxograma da Figura 3.9. Como pode ser observado, a abordagem do programa está dividida em três etapas.

A primeira etapa é a preparação dos modelos a serem avaliados. O usuário deve entrar com os dados solicitados pelo programa e o algoritmo constrói o vetor de casos de acordo com esses dados (os dados solicitados e a construção desses casos estão detalhados nos itens 3.3.1.1 e 3.3.1.2).

A segunda etapa, chamada de primeiro ciclo, consiste de uma análise no domínio da frequência, onde serão avaliados e procurados os máximos movimentos relativos

radiação e difração em painéis, fundamentado em uma análise linear, da interação de ondas de superfície com vários tipos de estruturas flutuantes e submersas [81].

⁵ A quebra de onda ocorre quando a onda excede o seu limite de declividade máxima. A declividade da onda é um parâmetro que relaciona a sua altura com o seu comprimento. De modo empírico [93], foi determinado que para ondas em profundidade infinita (onde a profundidade do local é pelo menos a metade do comprimento da onda incidente) é esperado que sua declividade máxima seja de 14%. Ao quebrar, a onda dissipa rapidamente a sua energia e tem seus efeitos muito reduzidos, podendo ser desconsiderados.

verticais entre as geometrias, bem como as maiores respostas de movimentos na incidência de um mar, que será estabelecido como estudo de caso. A função objetivo, neste primeiro ciclo, é maximizar a velocidade significativa relativa obtida pelo espectro de resposta do cruzamento dos mares com o RAO relativo do movimento de *heave* dos modelos. As restrições impostas são apenas geométricas e de estabilidade, que serão discutidas com a apresentação da rotina criada.

A terceira etapa, ou segundo ciclo, será a avaliação da máxima potência gerada com o dispositivo selecionado na primeira etapa. Para tanto, será acrescentado um vetor de amortecimento entre os corpos, de modo a se buscar a combinação ideal entre amortecimento e velocidade relativa que resulte na maior potência gerada. A função objetivo para a segunda etapa é maximizar a potência produzida no PTO, onde a única restrição é o amortecimento ser sempre positivo.

Figura 3.9 - Fluxograma da rotina de análise da dinâmica do sistema sem PTO.

3.3.1.1. Preparação do modelo

O algoritmo recebe como dados de entrada alguns parâmetros que estão definidos em parâmetros variantes e invariantes.

Os parâmetros invariantes são aqueles que não variam no decorrer da simulação, sendo eles: a densidade da água do mar, o vetor de período das ondas - que será analisado no WAMIT - e a quantidade de painéis de cada corpo a ser considerada para as geometrias (definida a partir do perímetro da circunferência externa de cada corpo).

Os parâmetros variantes são aqueles que variam de alguma forma durante a execução da rotina, são eles: diâmetro interno (D_{i_mono}), diâmetro externo (D_{e_mono}) e calado da monocolumna (T_{mono}); diâmetro (D_{cil}) e calado do cilindro do *moonpool* (T_{cil}); e amortecimento linear inserido pelo PTO aos dois corpos (B_{PTO}) – o amortecimento só será considerado no segundo ciclo do programa.

O esquema de parametrização da geometria dos modelos está representado na Figura 3.10.

Figura 3.10 - Parametrização das geometrias.

O código considera os corpos como cilindros perfeitos, sem apêndices associados às suas superfícies ou ao seu interior. O estudo de geometrias com saias, praias, placas de inércia, ou restrições de *moonpool* não foram contemplados nesse trabalho.

O programa inicia solicitando ao usuário os parâmetros de entrada invariantes. Na sequência, é necessário informar os parâmetros variantes. Com as dimensões principais das geometrias dos dois corpos declaradas, o programa faz a permutação de todos os parâmetros, formando todos os casos a serem analisados.

3.3.1.2. Geração de casos

Seja m a quantidade de valores de entrada de $D_{i_{mono}}$, n a quantidade de valores de $D_{e_{mono}}$, o a quantidade de valores de T_{mono} , p a quantidade de valores de D_{cil} e q a quantidade de valores declarados de T_{cil} , a quantidade de casos iniciais ($N_{iniciais}$) a serem testados será de:

$$N_{iniciais} = m * n * o * p * q \quad (3.32)$$

Os $N_{iniciais}$ casos, são armazenados em um vetor. Chama-se de casos iniciais, pois neste momento, não será considerado o amortecimento do PTO, supondo-se para esta análise, apenas os dois corpos livres, um em relação ao outro, sem que haja nada os conectando que possa gerar algum tipo de perda de energia cinética, seja por atrito, ou por qualquer outra interação. A única consideração a respeito de amortecimento, que será levada em conta nesta análise, é a inclusão do coeficiente de amortecimento $\zeta = 0,02$, ou seja, será considerado um amortecimento potencial de 2% do amortecimento crítico de cada corpo. Esse valor, de acordo com [79], é uma aproximação razoável para se incluir os efeitos viscosos da água do mar no movimento de *heave* de corpos cilíndricos.

O objetivo dessa abordagem, sem o amortecimento externo do PTO, é uma tentativa de economizar tempo computacional. Como é visto na equação (3.32), a quantidade de casos a serem avaliados pode se tornar enorme, mesmo sem testar grandes variações de cada parâmetro. Por isso, foi pensado em uma metodologia que buscasse o sistema com a maior amplitude e velocidade relativa entre os corpos, após a análise integrada com o mar, exclusivamente na direção vertical, a rigor, considerando-se apenas o movimento de *heave*. Essa pode ser uma boa aproximação da solução ótima em termos de geração de energia, se lembrado que a

potência do PTO é diretamente proporcional ao amortecimento do PTO e ao quadrado da velocidade relativa do movimento vertical dos corpos - eq. (3.31).

Vale lembrar que quanto maior a amplitude relativa, maior será a velocidade relativa entre os corpos. Para esclarecer este entendimento, será brevemente retomada a teoria do Movimento Harmônico Simples (MHS).

A dinâmica em *heave* da monocoluna e do cilindro interno pode ser representado pelo MHS. Simplificando um pouco mais, se desconsiderado o amortecimento do PTO, os corpos podem ser analisados de forma independentes, já que não possuem vínculo entre os seus graus de liberdade. Dessa forma, o sistema possui as seguintes equações de movimento, para cada corpo, começando pela equação do deslocamento $x(t)$, dado por (3.33).

$$x(t) = A \cos(\omega t + \phi) \quad (3.33)$$

Derivando a equação do espaço, chega-se na equação da velocidade v_x , dada por (3.34).

$$v_x(t) = \frac{dx}{dt}(t) = -A\omega \sin(\omega t + \phi) \quad (3.34)$$

que, se derivada novamente, obtém-se a aceleração a_x .

$$a_x(t) = \frac{dv_x}{dt}(t) = \frac{d^2x}{dt^2} = -A\omega^2 \cos(\omega t + \phi) \quad (3.35)$$

A Figura 3.11 mostra a representação quantitativa dos resultados para o caso de fase $\phi = 0$. Note na Figura 3.11 que:

- a) A velocidade é máxima quando o deslocamento é zero, e zero quando o deslocamento é máximo – ambos os gráficos são sinusoidais, mas seus respectivos máximos e mínimos são deslocados por um período fixo de tempo

$(0.5\pi/\omega)$, ou um quarto do período. Isso acontece porque um é descrito pela função seno e o outro é descrito pela função cosseno do mesmo ângulo;

- b) A aceleração e o deslocamento alcançam os seus pontos de inflexão no mesmo tempo, mas um é o de máximo enquanto o outro é o de mínimo. Isso porque ambos são descritos pela função cosseno, mas eles têm sinais opostos;

- c) O valor de pico do deslocamento é a amplitude do movimento A , enquanto o valor de pico da velocidade é ωA e da aceleração é $\omega^2 A$ ($x_{max} = A$, $(v_x)_{max} = A\omega$, $(a_x)_{max} = A\omega^2$). Isso implica que o valor de pico da velocidade e da aceleração pode ser incrementado para um maior valor da amplitude de movimento A , considerando ω constante.

Figura 3.11 - Gráficos do deslocamento, velocidade e aceleração para um objeto em MSH uni-dimensional. Fonte: [90].

Como as ondas a serem consideradas para a análise das diversas geometrias serão as mesmas, as suas frequências ω serão constantes de caso para caso. Com isso, é razoável definir a geometria com a maior amplitude relativa, como sendo a geometria que também apresentará a maior velocidade relativa. Porém, voltando a equação (3.31), pode-se questionar que a potência do PTO também depende do amortecimento, sendo diretamente proporcional a ele, e que se for deixado de lado, a potência resultante será nula. Absolutamente que sim! Entretanto, a potência depende do quadrado da velocidade relativa, enquanto que depende diretamente do amortecimento. Isso faz com que a potência cresça de forma mais rápida a cada incremento da velocidade relativa, do que cresce a cada incremento do

amortecimento. Portanto, será adotado o caso de maior velocidade relativa, após a análise conjunta com o mar, como o caso apto a gerar a maior potência elétrica.

3.3.1.3. Verificação da consistência geométrica

Voltando ao fluxograma da Figura 3.9, após ser gerado o vetor de casos com todas as combinações de parâmetros declarados pelo usuário, o programa seleciona o primeiro caso desse vetor e verifica se ele é viável geometricamente. Isso porque o programa combina de forma completa todas as variações dos parâmetros, sem levar em consideração, num primeiro momento, se existem geometrias inconsistentes, que são as ocorrências abaixo:

- $D_{e_{mono}} \leq D_{i_{mono}}$; e
- $D_{e_{mono}} \leq D_{cil}$.

Se ocorrer uma das duas situações descritas, o algoritmo anota o caso como “geometria inconsistente” e seleciona o próximo.

3.3.1.4. Cálculos dos parâmetros não declarados da monocoluna

Passado pelo crivo inicial, o programa calcula os parâmetros condicionados aos parâmetros variantes da monocoluna. São eles:

$$M_{mono} = \rho_{\acute{a}gua_{mar}} \frac{\pi}{4} (D_{e_{mono}}^2 - D_{i_{mono}}^2) T_{mono} \quad (3.36)$$

$$R_{xx_{mono}} = \frac{1}{2} D_{i_{mono}} + \frac{1}{6} (D_{e_{mono}} - D_{i_{mono}}) \quad (3.37)$$

$$I_{xx_{mono}} = M_{mono} R_{xx_{mono}}^2 \quad (3.38)$$

$$I_{yy_{mono}} = I_{xx_{mono}} \quad (3.39)$$

$$R_{zz_{mono}} = 2 R_{xx_{mono}} \quad (3.40)$$

$$I_{zz_{mono}} = M_{mono} R_{zz_{mono}}^2 \quad (3.41)$$

$$CG_{mono} = \left[0, 0, \frac{1}{3} T_{mono} \right] \quad (3.42)$$

Onde M_{mono} é a massa do corpo; $R_{xx_{mono}}$ e $R_{zz_{mono}}$ são os raios de giração em relação aos eixos x (*roll*) e z (*yaw*), respectivamente; $I_{xx_{mono}}$, $I_{yy_{mono}}$ e $I_{zz_{mono}}$ são os momentos de inércia em relação aos eixos x, y e z, respectivamente; e CG_{mono} é o centro de gravidade da monocoluna.

Os parâmetros das equações (3.36) a (3.42) foram aproveitados do trabalho de Vieira & Orsolini (2011) [1].

Neste ponto é interessante atentar para o fato de que a simulação será apenas para o movimento de *heave*. No entanto, é importante fornecer dados, mesmo que aproximados, de inércia ao WAMIT, para que não apareçam comportamentos inexistentes devido ao acoplamento dos movimentos nos diversos graus de liberdade.

Calculadas as propriedades gerais da monocoluna, o próximo passo é verificar a sua estabilidade estática.

3.3.1.5. Estabilidade estática

A estabilidade estática é definida em três tipos: estável, instável e indiferente. A estabilidade estática estável é a situação onde um corpo em seu ponto de equilíbrio, após ser excitado por qualquer força externa, retorna à posição original (volta ao ponto de equilíbrio). No caso de o corpo não retornar à sua posição original, esta estabilidade estática é dita instável ou indiferente. A Figura 3.12 ilustra os tipos de estabilidade citados.

Figura 3.12 - Equilíbrios estável, instável e indiferente. Modificado de [80].

Na análise de estabilidade inicial, o objetivo é determinar o valor da altura metacêntrica GM inicial ou do braço de endireitamento GZ , que é o parâmetro que permite julgar a adequação de um corpo flutuante do ponto de vista da estabilidade. Simplificadamente, GM positivo significa que o corpo é estável inicialmente. Este parâmetro depende do equilíbrio entre as posições do CG e da movimentação do centro de carena B .

Conforme apresentado na Figura 3.13, o valor de GM inicial ($\theta = 0$) pode ser determinado por:

$$GM = KB + BM - KG \quad (3.43)$$

Onde K (do termo em inglês *keel*) é o ponto da linha da base; KB é a altura do centro de carena, isto é, ponto onde se aplica a força resultante do campo de pressão hidrostática - força de empuxo -; KG é a altura do centro de gravidade CG e BM é a distância relativa entre os pontos B e M , conhecido como raio metacêntrico e é definido por:

$$BM = \frac{I_{WL}}{\nabla} \quad (3.44)$$

Onde I_{WL} é o momento de inércia do plano de flutuação em relação ao eixo de rotação longitudinal do corpo e ∇ é o volume deslocamento do corpo flutuante, em metros cúbicos.

Figura 3.13 - Posição relativa entre os pontos K, B, G e M.

O valor de KB pode ser obtido facilmente pelo momento estático de áreas das seções transversais da geometria submersa e o valor de KG , pela distribuição de massa ao longo do corpo.

Vale destacar que o GM é calculado em relação a um plano vertical que corta o corpo em seu centro. Em navios, por exemplo, o GM é calculado para duas direções, majoritariamente, a direção transversal e a direção longitudinal. Como os corpos do dispositivo desse trabalho são radialmente simétricos, apenas o cálculo do GM em uma direção já é suficiente.

3.3.1.6. Cálculo da estabilidade estática da monocoluna

Na sequência do programa, a estabilidade inicial da monocoluna é avaliada com a chamada de uma subfunção que executa os seguintes cálculos:

$$KB_{mono} = \frac{T_{mono}}{2} \quad (3.45)$$

$$I_{WL_{mono}} = \frac{\pi}{64} (D_{e_{mono}}^4 - D_{i_{mono}}^4) \quad (3.46)$$

$$\nabla_{mono} = \frac{\pi}{4} (D_{e_{mono}}^2 - D_{i_{mono}}^2) T_{mono} \quad (3.47)$$

$$BM_{mono} = \frac{I_{WL_{mono}}}{\nabla_{mono}} \quad (3.48)$$

$$GM_{mono} = KB_{mono} + BM_{mono} - KG_{mono} \quad (3.49)$$

O centro de carena da monocoluna KB_{mono} é definido como sendo metade do seu calado, pois sendo a geometria desse corpo um cilindro oco, ela possui a mesma seção transversal da quilha ao pontal. O $I_{WL_{mono}}$ é o momento de inércia estático da seção da linha d'água da monocoluna, o ∇_{mono} é o seu volume submerso, BM_{mono} é o centro de carena e o GM_{mono} é a altura metacêntrica, que se for positiva, a monocoluna é considerada estável inicialmente e o programa segue com o caso.

3.3.1.7. Cálculos dos parâmetros não declarados do cilindro

O mesmo procedimento feito à monocoluna é realizado para o cilindro interno. Dessa vez, o algoritmo calcula as propriedades gerais do cilindro com algumas modificações em relação à monocoluna, por se tratar de um corpo maciço. Os parâmetros são descritos a seguir:

$$M_{cil} = \rho_{\text{água}_{mar}} \frac{\pi}{4} D_{cil}^2 T_{cil} \quad (3.50)$$

$$R_{xx_{cil}} = \frac{1}{6} D_{cil} \quad (3.51)$$

$$I_{xx_{cil}} = M_{cil} R_{xx_{cil}}^2 \quad (3.52)$$

$$I_{yy_{cil}} = I_{xx_{cil}} \quad (3.53)$$

$$R_{zz_{cil}} = 2 R_{xx_{cil}} \quad (3.54)$$

$$I_{zz_{cil}} = M_{cil} R_{zz_{cil}}^2 \quad (3.55)$$

$$CG_{cil} = \left[0, 0, \frac{1}{2} T_{cil} \right] \quad (3.56)$$

Onde M_{cil} é a massa do corpo; $R_{xx_{cil}}$ e $R_{zz_{cil}}$ são os raios de giração em relação aos eixos x e z, respectivamente; $I_{xx_{cil}}$, $I_{yy_{cil}}$ e $I_{zz_{cil}}$ são os momentos de inércia em relação aos eixos x, y e z, respectivamente; e CG_{cil} é o centro de gravidade do cilindro.

Os parâmetros das equações (3.50) a (3.56) também foram retirados do trabalho de Vieira & Orsolini (2011) [1].

3.3.1.8. Cálculo da estabilidade estática do cilindro

Novamente, a rotina executa os cálculos de estabilidade inicial, porém dessa vez com algumas modificações por conta da diferença da geometria dos corpos. As equações de estabilidade executadas para o cilindro são:

$$KB_{cil} = \frac{T_{cil}}{2} \quad (3.57)$$

$$I_{WL_{cil}} = \frac{\pi}{64} D_{cil}^4 \quad (3.58)$$

$$\nabla_{cil} = \frac{\pi}{4} D_{cil}^2 T_{cil} \quad (3.59)$$

$$BM_{cil} = \frac{I_{WL_{cil}}}{\nabla_{cil}} \quad (3.60)$$

$$GM_{cil} = KB_{cil} + BM_{cil} - KG_{cil} \quad (3.61)$$

Sendo o GM_{cil} positivo, o programa segue para a preparação do modelo do WAMIT.

3.3.1.9. Geração de modelo do WAMIT

O modelo do WAMIT consiste em uma série de arquivos que contém as informações necessárias para que o programa resolva o problema de radiação e difração de corpos flutuantes. Basicamente, é necessário fornecer as seguintes informações ao programa:

- a) A malha da superfície molhada de cada corpo na situação de equilíbrio hidrostático;
- b) A matriz de massa-inércia do sistema;
- c) A lista de períodos de ondas regulares que se deseja analisar;
- d) A lista de incidências de ondas que se deseja avaliar;
- e) Os parâmetros de configuração, que dependem do tipo de simulação que se deseja executar.

3.3.1.9.1. Malha das superfícies molhadas das geometrias

O algoritmo gera as malhas das superfícies molhadas das geometrias em formato “*.gdf”, que é a extensão reconhecida pelo WAMIT. A malha da monocolumna apresenta quatro superfícies e a do cilindro interno três, sendo que ambas possuem simetria nos eixos Ox e Oy como podem ser visualizadas na Figura 3.14. Os modelos gerados pelo algoritmo utilizam o método *high-order* de resolução, para mais detalhes consultar [81].

Figura 3.14 - Exemplo de malha utilizada como entrada para o WAMIT.

3.3.1.9.2. Construção dos demais arquivos de entrada

O algoritmo gera cada um dos demais arquivos de entrada necessários para fazer a simulação do modelo no WAMIT. Esses documentos são arquivos de texto que carregam todas as informações relevantes do sistema a ser analisado e das configurações desejadas para a simulação. A Tabela 3.1 apresenta de forma resumida cada um desses arquivos.

Tabela 3.1 - Arquivos de entrada para o modelo do WAMIT.

Tipo de informação	Arquivo de entrada	Descrição
Geometria	Mono.gdf inner.gdf	O arquivo <i>.gdf</i> contém as informações sobre a malha da superfície molhada do sistema.
Matriz de Massa-Inércia	force.frc	Arquivo que contém as informações de massa, inércia e forças externas do sistema.
Parâmetros de Simulação	poten.pot	Arquivo que contém os períodos e incidências que serão executados. Neste arquivo também estão as posições relativas de cada corpo.
Configuração	config.wam	Parâmetros de configuração da execução do WAMIT. Entre outros está a discretização dos painéis que será utilizada.
	fnames.wam	Arquivo guarda o nome de arquivos da execução.

Como os corpos são axisimétricos, não é necessário executar mais de uma direção de incidência de ondas.

A rotina salva todos os arquivos numa pasta nomeada de acordo com as dimensões fornecidas para as geometrias.

3.3.1.10. Execução do WAMIT

Após a geração do modelo é necessário executar o WAMIT. A rotina acessa a pasta do caso atual e executa um comando externo que chama uma versão do WAMIT executável em Windows. Terminada a execução, os arquivos de saída ficam salvos na mesma pasta do caso rodado.

Essa é a etapa que demanda maior tempo computacional.

3.3.1.11. Carregamento dos dados de mar

Os mares são caracterizados por dados estatísticos de onda, vento e corrente medidos durante anos por boias em uma determinada região. Esses dados são encontrados compilados em documentos chamados de METOCEAN. Neles são apresentadas as alturas significativas de ondas H_s , os períodos de pico T_p e as frequências de ocorrência de cada onda característica desse mar.

Para demonstrar a real aplicação do dispositivo de geração de energia, é necessário se fazer um estudo de caso, tomando alguma região marítima como local de aplicação do sistema. Pela disponibilidade dos dados da região, foi definido como cenário base, para o estudo de caso, a Baía de Santos.

A partir do METOCEAN é construído o espectro de energia do mar, que confrontado com os RAOs obtidos, chega-se na resposta dinâmica do sistema. Essa operação é definida como cruzamento espectral, e será uma das etapas do pós-processamento dos resultados do WAMIT.

Os dados do Scatter do mar de Santos foram transcritos para uma planilha Excel e adaptados para se criar uma tabela com todas as probabilidades de ocorrência de cada mar. Um trecho dessa tabela está apresentado na Tabela 3.2. O algoritmo do MATLAB busca essa planilha e importa os dados para o programa.

Tabela 3.2 – Probabilidade de ocorrência de cada mar - trecho do Scatter de Santos. Para visualizar o Scatter completo procure pela Tabela 0.1 no APÊNDICE A.

Hs(m)	Tp(s)									
	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5
0.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
0.75	0.14%	0.15%	0.27%	0.34%	0.36%	0.21%	0.15%	0.10%	0.09%	0.07%
1.25	0.02%	1.24%	1.47%	2.37%	4.77%	3.31%	0.91%	0.49%	0.37%	0.34%
1.75	0.00%	0.46%	4.86%	4.65%	6.08%	7.96%	3.89%	2.15%	1.31%	0.71%
2.25	0.00%	0.02%	1.67%	6.60%	3.21%	3.64%	2.70%	2.47%	2.39%	1.30%
2.75	0.00%	0.01%	0.14%	2.79%	3.18%	1.37%	1.13%	1.05%	1.16%	1.35%
3.25	0.00%	0.00%	0.01%	0.53%	1.64%	1.13%	0.37%	0.39%	0.39%	0.56%
3.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.35%	0.73%	0.25%	0.12%	0.18%	0.19%
4.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.27%	0.21%	0.06%	0.06%	0.08%

A Tabela 3.2 pode ser interpretada como uma matriz de probabilidade de ocorrência dos mares, onde pode ser definida como:

$$P_{mar\,ij} \quad (3.62)$$

onde, $i, j \in N$, tal que $1 \leq i \leq \text{quantidade de } H_s$ e $1 \leq j \leq \text{quantidade de } T_p$.

3.3.1.12. Pós-processamento dos dados

Na etapa de pós-processamento dos resultados do WAMIT, o algoritmo deve acessar a pasta do caso rodado e extrair os RAOs do arquivo texto de extensão .4. Esse arquivo contém os RAOs de todos os seis graus de liberdade de ambos os corpos. Porém, para essa análise só interessa o RAO3 de cada corpo – do movimento de *heave*. A rotina faz esse procedimento de forma automática, salvando os resultados internamente.

Uma vez conhecidas as funções de transferência dos movimentos para amplitude de onda unitária (RAOs), espectros de energia dos movimentos (também chamados de

espectros de resposta) podem ser calculados para qualquer espectro de mar $S_{\zeta}(\omega)$. Basta, agora, desenvolver os espectros de mar a partir dos dados do METOCEAN.

3.3.1.12.1. Espectros de mar

O WAMIT resolve o problema de radiação e difração de ondas em corpos flutuantes para cada período de onda inserida no modelo. Além disso, o WAMIT adimensionaliza pela altura de onda incidente, todas as respostas dos movimentos dos corpos para os seis graus de liberdade de cada corpo. Para extrapolar os resultados do programa para uma aplicação real do sistema em uma região específica, é necessário realizar o cruzamento espectral entre o espectro de energia do mar da região com o RAO obtido pelo WAMIT. É o espectro de resposta, obtido do cruzamento espectral, que define o real comportamento dinâmico do sistema para o mar desejado. Entretanto, o METOCEAN não fornece o espectro do mar local, somente os parâmetros principais que caracterizam esse mar, que são a altura significativa e o seu período de pico.

Para construir o espectro de energia do mar, deve-se valer dos espectros de mar padronizados, que são usualmente aplicados em projetos navais e oceânicos.

Existem diversos espectros de mar padronizados. Os mais conhecidos são: Pierson-Moskowitz, Bretschneider, ITTC e JONSWAP. Cada um deles melhor representa determinada região do globo, visto que cada um foi elaborado em cima de dados medidos de determinado local. Para a região do mar de Santos, o espectro que melhor se afina é o de JONSWAP - sendo o escolhido para o estudo de caso e para a sequência de análises. Todos os quatro outros espectros aqui destacados também estão implementados no algoritmo, caso se desejasse estudar alguma outra região que não a de Santos.

Uma comparação entre a distribuição de energia dos espectros padronizados pode ser observada na Figura 3.15.

Figura 3.15 - Comparação entre espectros padronizados. Retirado de [82].

A proposição matemática para o espectro de mar JONSWAP está demonstrada na equação (3.63). Esta e as demais formulações para os espectros padronizados podem ser encontradas em [83].

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

$$\gamma = 3,30 \quad (3.63)$$

$$\tau = \tau_a = 0,07 \text{ para } \omega \leq \omega_p \text{ e } \tau = \tau_b \text{ para } \omega > \omega_p$$

$$\alpha = 0,0081$$

Onde ω_p é a frequência de pico, em radianos, γ diz respeito ao parâmetro de agudez e τ ao parâmetro de forma do espectro.

Para cada período de pico T_p do mar de Santos, retirado de seu METOCEAN, foi criado um espectro de mar correspondente. Esses espectros estão apresentados na Figura 3.16.

Figura 3.16 - Espectros de energia dos mares de Santos.

Pode ser observado que os espectros foram construídos com altura significativa de onda unitária. Foi procedido dessa forma para facilitar as análises que se seguirão com a ferramenta de cálculo. Porém, é bom destacar que a energia desses espectros é diretamente proporcional à altura significativa de onda, da mesma forma que o espectro de resposta também o é.

3.3.1.12.2. RAO relativo de heave

Uma vez criados os espectros de mar, para se concluir o cruzamento espectral, deve-se calcular o RAO relativo.

A partir dos RAOs de *heave* de cada corpo, faz-se a sobreposição desses movimentos para gerar o RAO relativo de *heave* ($RAO3_{rel}$) – apresentado na eq.(3.64). O movimento relativo é calculado subtraindo-se os RAOs dos dois corpos nas suas formas complexas. Procedendo dessa forma é possível considerar as fases dos movimentos na análise. Para finalizar, tira-se o módulo do resultado.

$$RAO3_{rel} = |RAO3_{mono} - RAO3_{cil}| \quad (3.64)$$

O índice 3 dos RAOs refere-se ao terceiro grau de liberdade, que representa o movimento de *heave*. Os seis graus de liberdade vão de 1 a 6 seguindo esta ordem: *surge*, *sway*, *heave*, *roll*, *pitch* e *yaw*.

3.3.1.12.3. Cruzamento espectral

Uma vez criados os espectros de energia do mar de Santos e calculados os RAOs relativos, pode-se finalmente realizar o cruzamento espectral. Para tanto, basta seguir o enunciado da equação (3.65).

$$S_{R_j}(\omega) = S_{\zeta}(\omega) \cdot |H_j(\omega)|^2 \quad (3.65)$$

$$|H_j(\omega)| = |R_j/\zeta|$$

Onde $S_{R_j}(\omega)$ é o espectro de resposta do cruzamento espectral do grau j de liberdade ($j = 1, 2, 3, 4, 5$ ou 6) e $|R_j/\zeta|$ é o RAO por amplitude de onda incidente ζ , também chamado de função de transferência.

A Figura 3.17 é uma figura clássica da engenharia naval e oceânica que traz uma interpretação gráfica para o cruzamento espectral a partir de uma excitação aleatória caracterizada no domínio da frequência. Note que à esquerda temos a transcrição do registro temporal de elevações de mar para o domínio da frequência, via Transformada de Fourier; ao centro, apresenta-se a função de transferência para um dado grau de liberdade e, à direita, a resposta do sistema à sobreposição de efeitos harmônicos regulares, caracterizada pelo espectro de resposta $S_R(\omega)$.

Figura 3.17 - Apresentação gráfica do Cruzamento Espectral. Adaptado de [84].

Os espectros de resposta também são espectros de energia e determinam para cada frequência de onda, qual será a energia cinética do corpo, como resposta sob a influência de determinado mar. A unidade do espectro de resposta em SI é dada em $m^2.s$.

3.3.1.12.4. Momentos espectrais

Como em todo espectro de energia, pode-se extrair alguns parâmetros estatísticos do movimento que ele representa. Esses parâmetros são calculados a partir dos chamados “momentos espectrais”. Para o caso do movimento de *heave*, o momento spectral de k-ésima ordem é então dado por:

$$m_{3,k} = \int_0^{\infty} \omega^k S_3(\omega) d\omega \quad (3.66)$$

A altura significativa H_s^3 do movimento de *heave*, segundo [85], será:

$$H_s^3 = 4 \sqrt{m_{3,0}} \quad (3.67)$$

A velocidade significativa V_s^3 de *heave*, por sua vez:

$$V_s^3 = 4 \sqrt{m_{3,1}} \quad (3.68)$$

e a aceleração significativa a_s^3 :

$$a_s^3 = 4 \sqrt{m_{3,2}} \quad (3.69)$$

O período médio T_1^3 de movimento pode ser estimado como o período central do espectro de resposta:

$$T_1^3 = 2\pi \frac{m_{3,0}}{m_{3,1}} \quad (3.70)$$

e o período entre zeros T_2^3 do movimento de *heave* é dado por:

$$T_2^3 = 2\pi \sqrt{\frac{m_{3,0}}{m_{3,2}}} \quad (3.71)$$

Como a dinâmica do sistema foi suposta linear, a função distribuição da resposta será Gaussiana, da mesma forma que a distribuição de onda.

Procedimentos análogos podem ser realizados para os outros graus de liberdade.

3.3.1.12.5. Velocidade relativa significativa média de *heave*

A energia dos espectros de mar é diretamente proporcional à altura significativa de onda. O espectro de resposta também se comporta da mesma forma. Sendo assim, uma vez feito o cruzamento espectral, e o cálculo da velocidade significativa desse espectro, a resposta obtida deverá ser multiplicada pela altura significativa de onda do mar referente, e ainda, multiplicada pela probabilidade de ocorrência $P_{mar\,ij}$ deste mesmo mar.

Com isso, será gerada uma nova tabela, como a da Tabela 3.2, onde no lugar das probabilidades de ocorrência de cada mar, haverá o valor da velocidade relativa significativa do sistema para aquele mar, ponderado pela sua probabilidade de ocorrência. Para finalizar, somam-se todos os resultados obtidos nessa nova tabela. O resultado final será a velocidade relativa significativa média de *heave* $V_{srel\,média}^3$, de todos os mares de Santos, para o sistema que está sendo avaliado. A equação (3.72) esclarece como se obter este parâmetro.

$$V_{srel\,média}^3 = \sum_i \sum_j V_{srel\,ij}^3 \cdot H_{s\,mar\,i} \cdot P_{mar\,ij} \quad (3.72)$$

onde, $i, j \in N$, tal que $1 \leq i \leq \text{quantidade de } H_{s\,mar}$ e $1 \leq j \leq \text{quantidade de } T_p$.

Esta é a última etapa dentro do *loop* do primeiro ciclo do algoritmo. Encontrado o parâmetro $V_{srel\,média}^3$, o programa procura pela existência de outro caso ainda não analisado dentro do vetor de casos. Se houver, a rotina começa o *loop* novamente, até que todos os casos sejam esgotados. Finalizado, o algoritmo exibe o caso de maior $V_{srel\,média}^3$, mostrando as dimensões principais do sistema.

3.3.1.13. Introdução do vetor de amortecimento do PTO

A rotina até aqui buscou um caso de possível máxima geração de energia, baseada nos princípios discutidos na seção 3.3.1.2. A próxima etapa consiste na

determinação do amortecimento ideal de *heave* para que resulte na maior potência gerada no PTO.

O programa daqui pra frente não varia mais as dimensões principais do modelo. O único parâmetro que é inserido é o amortecimento.

O amortecimento a ser inserido pelo usuário nessa etapa deve ser apresentado na forma de coeficiente de amortecimento de *heave* (ou fração de amortecimento) ζ_{mono}^3 em relação ao amortecimento crítico de *heave* da Monocoluna $B_{cr_{mono}}^3$. O entendimento e a posterior análise do comportamento do sistema se torna mais simples dessa forma. Entretanto, o programa também apresenta o valor absoluto do amortecimento nos resultados.

Para se fazer a otimização do melhor amortecimento a ser utilizado e não apenas obter o resultado da potência gerada para um valor específico de ζ_{mono}^3 , é aconselhável que o usuário não inclua valores neste segundo ciclo. Desta forma, a rotina segue com a otimização introduzindo um vetor de coeficientes de amortecimento próprio com cento e onze valores, indo de zero a um, com espaçamento fixo de 1%, e de um a três com espaçamento de 20%, de modo a concentrar a maior quantidade de pontos nas frações do coeficiente, e testar pontos mais distantes a partir de valores maiores que a unidade.

O vetor padrão de coeficiente de amortecimento do algoritmo é estabelecido como mostra a eq.(3.73).

$$\zeta_{mono}^3 = [0,01 \ 0,02 \ 0,03 \ \dots \ 0,98 \ 0,99 \ 1,00 \ 1,20 \ 1,40 \ \dots \ 3,00] \quad (3.73)$$

Nesta etapa não é executado o WAMIT novamente. Os valores já calculados de amortecimento crítico, massa adicional e restauração dos corpos são recuperados para o novo cálculo dos movimentos verticais, dessa vez considerando um fator adicional no amortecimento de *heave*. Para tanto, o programa calcula o amortecimento de forma absoluta, a partir do ζ_{mono}^3 inserido pelo usuário, ou

estabelecido pelo programa. A equação que define o novo valor de amortecimento a ser adicionado é:

$$B_{PTO} = \zeta_{mono}^3 B_{cr_{mono}}^3 \quad (3.74)$$

e que por sua vez:

$$B_{cr_{mono}}^3 = 2 (M_{mono} + M_{a_{mono}}^3) \omega_{n_{mono}}^3 \quad (3.75)$$

ou ainda

$$B_{cr_{mono}}^3 = 2 \sqrt{(M_{mono} + M_{a_{mono}}^3) K_{mono}^3} \quad (3.76)$$

Substituindo (3.76) em (3.74), chega-se finalmente na equação completa para o amortecimento do PTO em valores absolutos.

$$B_{PTO} = \zeta_{mono}^3 \cdot 2 \sqrt{(M_{mono} + M_{a_{mono}}^3) K_{mono}^3} \quad (3.77)$$

O resultado da equação (3.77) é o novo valor a ser adicionado ao amortecimento viscoso, considerado no primeiro ciclo como 2% do amortecimento crítico. Portanto, o amortecimento total a ser considerado na nova dinâmica de *heave* da monocoluna será:

$$B_{total_{mono}}^3 = (\zeta_{mono}^3 + 0,02) \cdot 2 \sqrt{(M_{mono} + M_{a_{mono}}^3) K_{mono}^3} \quad (3.78)$$

Como o amortecimento crítico da monocoluna e o do cilindro são diferentes, foi feita a mesma análise do amortecimento total a ser considerado no cilindro. Sabendo-se que o B_{PTO} a ser considerado será o mesmo para os dois corpos, uma simples relação entre os coeficientes de amortecimento pode ser feita:

$$\zeta_{cil}^3 = \frac{B_{PTO}}{B_{cr\ cil}^3} \quad (3.79)$$

ou ainda

$$\zeta_{cil}^3 = \zeta_{mono}^3 \frac{B_{cr\ mono}^3}{B_{cr\ cil}^3} \quad (3.80)$$

Com isso, chega-se ao amortecimento total a ser considerado para a dinâmica de *heave* do cilindro, dado por (3.81).

$$B_{total\ cil}^3 = B_{PTO} + 0,02 \cdot 2 \sqrt{(M_{cil} + M_{a\ cil}^3) K_{cil}^3} \quad (3.81)$$

Com todos os coeficientes alcançados, pode-se agora calcular o novo RAO de *heave* $RAO3$ de cada corpo. A equação (3.82) apresenta esse cálculo de forma geral.

$$RAO3_k = \frac{F_k^3}{-\left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot (M_k + M_{a\ k}^3) + i \cdot \left(\frac{2\pi}{T}\right) \cdot B_{total\ k}^3 + K_k^3} \quad (3.82)$$

Onde $k = 1$, representa o cálculo para a monocoluna e $k = 2$, para o cilindro. F_k^3 é a força externa de onda, também retirado do WAMIT, e T são os períodos de onda adicionados ainda na preparação para o primeiro ciclo da rotina.

Calculados os novos $RAO3$ de cada corpo, deve-se proceder os cálculos do $RAO3_{rel}$ novamente (apresentado na seção 3.3.1.12.2), e na sequencia, realizar o cruzamento espectral (mostrado em 3.3.1.12.3). Continuando, calcula-se as novas estatísticas para o espectro de resposta obtido (demonstrado em 3.3.1.12.4) e a nova velocidade relativa significativa média (como em 3.3.1.12.5). Finalmente,

realiza-se o cálculo da potência obtida no PTO, com os dados alcançados. Retomando (3.31), a potência no PTO será dada por:

$$Pot_{PTO} = B_{PTO} \cdot V_{srel\acute{m}edia}^3 \quad (3.83)$$

Procede-se dessa forma, armazenando os resultados, até que se tenham esgotados todos os valores do vetor do coeficiente de amortecimento de *heave*.

Uma vez completado o *loop* do segundo ciclo, o programa exhibe o amortecimento que resultou na maior potência gerada, juntamente com a potência calculada e a $V_{srel\acute{m}edia}^3$. Além disso, o programa plota as curvas com todos os valores de B_{PTO} x $V_{srel\acute{m}edia}^3$ e Pot_{PTO} x $V_{srel\acute{m}edia}^3$.

Essa etapa finaliza o programa e a otimização na busca da melhor solução para um dispositivo monocolumna com cilindro interno gerador de energia elétrica através das ondas do mar.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a otimização da geometria na busca da maior geração de energia para uma unidade flutuante do tipo monocoluna, com a aplicação para o mar de Santos.

O dimensionamento do sistema pode ser dividido em dois ciclos: primeiramente foi realizado o dimensionamento das unidades flutuantes com base nos valores de velocidade relativa significativa média. Na sequência, com a geometria definida, foi dimensionado o amortecimento ideal a ser empregado que gerasse a maior potência no PTO.

4.1. DIMENSIONAMENTO

4.1.1. Resultado do 1º ciclo – Busca pela melhor geometria

Para o dimensionamento das unidades flutuantes, foram realizadas análises de sensibilidade sobre os parâmetros de configuração do sistema. Os parâmetros avaliados estão destacados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dimensões avaliadas no 1º ciclo do programa de otimização da geometria.

Unidade flutuante	Monocoluna	Cilindro interno
Parâmetro	Diâmetro Externo (D_e)	Diâmetro (D_c)
	Diâmetro Interno (D_i)	Calado (T_c)
	Calado (T_m)	

Para cada um dos parâmetros foi testado uma série de valores. Num primeiro momento, esses dados foram variados de maneira conjunta e aleatória (variando-se

todos ao mesmo tempo) com o objetivo de tentar achar alguma tendência que se evidenciasse nessa ampla abordagem. A partir daí, foi-se estabelecendo um critério mais objetivo, alterando-se os parâmetros de maneira ordenada, num teste de sensibilidade de cada um, onde se fixava alguns e variavam-se outros. Desta forma, foi se definindo mais claramente as tendências do sistema que resultavam num comportamento mais desejado.

Para se entender melhor, serão apresentadas todas as iterações realizadas com o algoritmo, até se chegar ao caso de maior Velocidade significativa relativa ($V_{s\ rel}^3$ média) para o movimento de *heave* aplicado a todas as frequências do *scatter* do mar de Santos.

O ponto inicial de busca foi gerado a partir do resultado obtido do trabalho de Vieira & Orsolini (2011) [1]. Eles obtiveram as seguintes dimensões para o sistema:

Tabela 4.2 – Dimensões finais para o dispositivo de geração de energia de Vieira & Orsolini (2011) [1].

Unidade flutuante	Parâmetro	Valor [m]
Monocoluna	Diâmetro Externo (D_e)	25
	Diâmetro Interno (D_i)	10
	Calado (T_M)	10
Cilindro Interno	Diâmetro (D_C)	8
	Calado (T_C)	10

Partindo-se desses resultados, foram criados vetores, para cada parâmetro da geometria, que cercassem essa solução, acolhendo valores relativamente próximos e alguns mais distantes do resultado obtido por Vieira. Cada vetor criado possuía 4 valores, igualmente espaçados entre si. A Tabela 4.3 apresenta esses vetores.

Tabela 4.3 – Espaço de busca inicial – 1ª iteração.

Unidade flutuante	Parâmetro	Valor [m]
Monocoluna	Diâmetro Externo (D_e)	[10 15 20 25]
	Diâmetro Interno (D_i)	[8 13 18 23]
	Calado (T_M)	[10 15 20 25]
Cilindro Interno	Diâmetro (D_C)	[8 14 20 26]
	Calado (T_C)	[15 20 25 30]

Pode-se lembrar, como discutido na seção 3.3.1.2, que a quantidade de casos a ser verificados é a permutação da quantidade de valores de cada parâmetro. Só para esta primeira iteração foram 1024 casos.

Figura 4.1 – Resultados da 1ª iteração.

A Figura 4.1 contém todos os resultados obtidos com a primeira iteração, trazendo destaque para o par de parâmetros que se mostra de maior relevância até o momento: o diâmetro externo e o diâmetro interno da monocoluna. Tendo em vista os resultados, alguns outros pontos importantes podem ser notados:

- a) Os resultados formam regiões bem definidas por valores constantes do par (D_e, D_i) ;
- b) Há uma tendência de maior $V_{s\ rel}^3$ quanto menor for a diferença entre o diâmetro externo e interno da monocoluna ($D_e - D_i$ pequeno), ou seja, melhores resultados quando a monocoluna possuir pequena espessura;
- c) Considerando-se apenas o diâmetro externo da monocoluna, é possível perceber que quanto maior for esta dimensão, menor será o $V_{s\ rel}^3$. Isso é notado tomando-se os resultados com as mesmas dimensões constantes, mas que apresentam apenas variações no seu D_e ;
- d) Se separado um trecho fixo de valores de (D_e, D_i) , como por exemplo, o trecho dos casos de número 135 a 160, e dado que cada sequência de pontos da mesma cor, apresentados no gráfico da Figura 4.2, representa uma região de variação do calado do cilindro interno (variando no vetor de [15 20 25 30], sempre nessa ordem), pode-se perceber que, de modo geral, quanto maior for o T_C , maior também será o $V_{s\ rel}^3$;
- e) Além disso, ainda na Figura 4.2, pode-se notar que quanto menor o diâmetro do cilindro interno, melhor é a resposta do problema.

Figura 4.2 – Análise de sensibilidade para o T_c dos resultados de $D_e/D_i = 25/23$.

O melhor resultado encontrado para essa primeira iteração está apresentado na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Melhor resultado da 1ª iteração.

Unidade flutuante	Parâmetro	Melhor valor [m]	Max. V_s relativa Média [m/s]
Monocoluna	Diâmetro Externo (D_e)	15	4,4717
	Diâmetro Interno (D_i)	14	
	Calado (T_M)	10	
Cilindro Interno	Diâmetro (D_c)	13	
	Calado (T_c)	20	

Alguns casos não estão representados entre as soluções apresentadas, pois foram rejeitados pelo algoritmo em algum momento, seja por falta de estabilidade ou pela simples inconsistência geométrica.

Levantados todos esses pontos em relação ao possível comportamento do sistema, seguiu-se com as iterações procurando-se avaliar cada uma das questões destacadas. No total foram realizadas 9 iterações até se chegar na melhor resposta para $V_{s\ rel}^3$. Todos os detalhes de cada iteração, assim como algumas discussões acerca dos seus resultados, estão apresentados no APÊNDICE B.

Finalmente, a melhor solução encontrada para o sistema que resultasse no maior $V_{s\ rel}^3$, é mostrada pela Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Melhor caso do 1º ciclo - Máx. V_s relativo.

Unidade flutuante	Parâmetro	Melhor valor [m]	Max. V_s relativa Média [m/s]
Monocoluna	Diâmetro Externo (D_e)	11	5.4332
	Diâmetro Interno (D_i)	10	
	Calado (T_M)	12	Max. H_s relativa Média [m]
Cilindro Interno	Diâmetro (D_c)	9	
	Calado (T_c)	20	

O programa desenvolvido neste trabalho gera apenas as superfícies molhadas dos corpos para serem avaliadas pelo WAMIT. Porém, para se ter uma ideia de dimensão do resultado obtido, a geometria submersa foi extrudada para fora da linha d'água. A Figura 4.3 ilustra o caso alcançado.

O caso encontrado como solução ótima do primeiro ciclo do algoritmo, apresentou um elevado valor de $V_{s\ rel}^3$ e de $H_{s\ rel}^3$. Isso aconteceu, pois os corpos só tiveram um pequeno acréscimo de amortecimento, referente à parcela do amortecimento viscoso. No próximo ciclo, o amortecimento será testado de maneira efetiva.

Figura 4.3 – Geometria do melhor caso selecionado.

4.1.2. Resultado do 2º ciclo – Busca pelo melhor amortecimento

No dimensionamento do amortecimento ideal, foi inserido no sistema um vetor de coeficiente de amortecimento ζ_{mono}^3 que possuía valores de 1 a 3%. A cada iteração, o algoritmo recalculava a nova dinâmica do sistema e apresentava as respostas de potência e $V_{s\ rel}^3$ alcançados. Com todos os resultados referentes a cada amortecimento inserido, algumas correlações podem ser apresentadas. Começando pelo comportamento do $V_{s\ rel}^3$ em função de cada um dos parâmetros de amortecimento (ζ_{mono}^3 , ζ_{cil}^3 e B_{PTO}^3), mostrado na Figura 4.4. O comportamento, claramente seria semelhante, mas esse resultado mostra a magnitude de variação dos parâmetros de amortecimento de cada corpo (ζ_{mono}^3 e ζ_{cil}^3) e do sistema global (B_{PTO}^3), individualmente.

Como não poderia ser diferente, a altura relativa significativa de *heave* $H_{s\ rel}^3$ possui o mesmo comportamento em relação ao amortecimento imposto (Figura 4.5).

Para movimento relativo do sistema, como foi bastante discutido em todo o texto, esperava-se alcançar esse padrão de resposta, em função do amortecimento imposto. Isso é intuitivo pelo fato de o amortecimento do PTO ser um amortecimento externo, que retira energia do sistema, o que faz com que o sistema perca em energia cinética e diminua as amplitudes dos seus movimentos.

Figura 4.4 – Comportamento do $V_{s_{rel}}$ de *heave* para cada parâmetro de amortecimento.

Figura 4.5 - Comportamento do $H_{s_{rel}}$ de *heave* para o coeficiente de amortecimento da monocoluna.

Finalmente, pode-se apresentar a maior potência obtida com o algoritmo, ao final dos dois ciclos do programa. A Figura 4.6 mostra o comportamento da curva de potência do PTO em função de cada um dos parâmetros de amortecimento (ζ_{mono}^3 , ζ_{cil}^3 e B_{PTO}^3). A maior potência obtida foi de aproximadamente 196 kW. Essa é a potência otimizada para a aplicação do dispositivo no mar de Santos, desde que implantado um PTO que forneça um fator de amortecimento de 7%, do

amortecimento crítico da monocolumna, no sistema. Em valores absolutos, o PTO deve fornecer um amortecimento constante de 26,49 toneladas por segundo ao movimento de *heave* do sistema. O valor equivalente de ζ_{mono}^3 para ζ_{cil}^3 é de 4%.

Figura 4.6 - Comportamento da Potência do PTO em função de cada parâmetro de amortecimento.

Retomando o que foi discutido na seção sobre a potência gerada no PTO (seção 3.2.3), a equação da potência no PTO foi suposta da forma $Pot = B_{PTO} \cdot \dot{x}^2$, onde $\dot{x}$ era a velocidade relativa dos corpos em movimento de *heave*. Naquela seção, foi conjecturado que existiria um par de (B_{PTO}, V_{rel}) que resultaria numa potência máxima para o gerador elétrico. Com os resultados obtidos, essa correlação foi conferida e verificada, conforme resultado mostrado no gráfico da Figura 4.7

Figura 4.7 – Potência do PTO em função do $V_{s_{rel}}$.

O resultado final completo para o dispositivo monocoluna com cilindro interno, gerador de energia elétrica, através das ondas do mar, com aplicação para o mar de Santos, pode ser visto na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 – Melhor caso do 2º ciclo e resultado final da otimização do dispositivo.

Unidade flutuante	Parâmetro	Melhor valor [m]	Máx. Pot_{PTO} [kW]	Max. V_s relativa Média [m/s]
Monocoluna	Diâmetro Externo (D_e)	11	196	5.4
	Diâmetro Interno (D_i)	10		
	Calado (T_M)	12	Melhor Amortecimento do PTO [t/s]	Max. H_s relativa Média [m]
Cilindro Interno	Diâmetro (D_C)	9		
	Calado (T_C)	20		

É importante destacar que a máxima potência obtida no resultado do 2º ciclo, não é a potência máxima que o dispositivo é capaz de gerar. Essa potência é um valor médio de potência gerada, quando aplicado o dispositivo no mar de Santos, considerando a probabilidade de ocorrência de cada um dos mares desse local. A potência real do dispositivo eleito, para cada mar dos mares do *scatter* de Santos, pode ser encontrada na tabela do APÊNDICE C. Analisando os valores desta tabela, pode-se verificar regiões de operação que o dispositivo alcança incríveis potências de 8 MW. Porém, esses mares são pouquíssimos frequentes à região de Santos, o que acaba minorando o resultado da potência média obtida.

Os resultados dos da hidrodinâmica do sistema com o amortecimento ótimo está apresentado na tabela do APÊNDICE D.

5. CONCLUSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos realizados neste trabalho buscaram a obtenção de um sistema capaz de gerar energia limpa, se aproveitando do conceito da monocoluna, através desta abundante fonte de energia, podendo-se dizer até inesgotável, que é o mar.

O trabalho foi realizado com a busca constante de uma geometria de monocoluna, que combinada com um cilindro em seu interior, *moonpool*, produzisse grandes oscilações relativas entre si, quando da passagem das ondas. Essas oscilações seriam a fonte da produção de energia, através do uso de equipamentos que transformassem energia cinética em energia elétrica. Porém, a inclusão desses equipamentos poderia interferir no movimento desejado, suprimindo-o. Deveria existir, portanto, uma geometria de monocoluna adequada que quando relacionada com a dimensão ideal desse cilindro, produzisse o máximo de energia possível que esse conceito poderia gerar. No mais, outro fator fundamental que modificaria essa resposta, seria o local de sua aplicação. Como você pode perceber, são inúmeras as variáveis desse problema.

Quando se depara com um problema de tamanha quantidade de variáveis, modificações se tornam mais do que uma facilidade, elas se definem essenciais. Por isso, uma série de hipóteses e simplificações foi adotada neste trabalho, com o objetivo de viabilizar a busca pela melhor solução, sem se perder o foco, ou se concentrar em problemas menores.

Com isso em mente, a abordagem do problema foi toda realizada no domínio da frequência, onde se conseguiu agilizar a obtenção de cada resposta, tornando possível uma busca num espaço muito maior de soluções.

Mesmo sabendo que a resolução do problema se tornava mais rápida com a abordagem escolhida, ainda assim, foi preciso separar a análise do PTO, para que não se tornasse inviável, computacionalmente, a busca pela solução ótima.

Portanto, o algoritmo elaborado se dividiu em duas partes: a primeira buscava as dimensões ideais das unidades flutuantes, de modo que elas reproduzissem o maior movimento relativo entre si, com a incidência das condições do mar de Santos; e a segunda, inseria uma série de valores de amortecimento no sistema, e testava a sua nova dinâmica, calculando ainda a sua potência gerada.

Essa metodologia estabeleceu o valor ideal de amortecimento no PTO, que inserido no sistema, produzia a maior potência elétrica. Isso é uma premissa importante, pois o valor do amortecimento, na maioria dos casos levantados nas referências, é pré-estabelecido de acordo com o conversor que se deseja aplicar. A ideia desta dissertação foi deixar em aberto a possibilidade de construção de um PTO que fornecesse o melhor amortecimento para o sistema, de acordo com o local de aplicação. Trabalhando dessa forma chega-se ao melhor resultado possível em termos de geração de energia com o dispositivo, o que não quer dizer que seja um sistema viável, pois a solução alcançada pode ser impraticável, onde pode existir uma condição de amortecimento que não seja possível de se reproduzir, por ser um valor muito elevado ou o oposto.

Entretanto, o programa desenvolvido não restringe as diversas possibilidades de otimização do sistema. Isso permite uma flexibilidade enorme no projeto do dispositivo como um todo, pois possibilita ao usuário, escolher a fixação de um determinado parâmetro, caso alguma variação seja impeditiva, ou caso seja premissa de projeto.

Outro ponto importante do estudo foi que a potência obtida foi calculada como uma média ponderada pela ocorrência de cada mar. Isto traz uma ideia muito mais sólida em relação à real capacidade de geração de energia do sistema. No mais, o dispositivo final, possui níveis de geração de energia muito bons quando comparados com os demais dispositivos apresentados pela revisão bibliográfica (ver Tabela 2.1). Além disso, a geometria alcançada possui dimensões factíveis de serem aplicadas, ainda mais se comparada às demais existentes. E para finalizar, o resultado do amortecimento do PTO se estabeleceu numa região favorável, possível de se reproduzir por um equipamento de conversão de energia, sendo de apenas 7% do amortecimento crítico da monocoluna.

Algumas simplificações são importantes de serem comentadas. Uma delas é a não consideração da amarração na dinâmica do sistema. Apesar de se saber que existem amarras capazes de não gerar grandes influências no movimento de primeira ordem do sistema, impedindo apenas o seu *offset*, alguma variação no seu comportamento dinâmico ela causará, e isto não foi levado em conta. O objetivo do trabalho não era utilizar um dos corpos fixos por amarras de modo que algum deles ficasse quase-estáticos em relação a um observador fixo na costa. Esse *approach* pode ser considerado para um estudo futuro.

Outra consideração, que pode ser verificada numa continuação dos estudos, é o comportamento da superfície livre da água no GAP entre a monocoluna e o cilindro interno. Esse comportamento é de difícil entendimento, e não é considerado pelo WAMIT, o que pode gerar distorções da real resposta obtida com o modelo numérico. Uma forma de se verificar esses resultados seria a execução de ensaios de modelo em escala reduzida em um tanque de provas, que poderia vir a ser uma próxima etapa deste estudo.

Existe também a possibilidade de considerar a viabilidade construtiva e estrutural no código numérico desenvolvido, o que não foi abordado por este trabalho.

E para finalizar, caso haja aplicações para outras regiões que resultem em definições de amortecimento do PTO muito elevados, pode-se pensar na aplicação de apêndices aos corpos, como saias, praias, placas de inércia ou restrições de *moonpool* para ajudar a alcançar o valor do amortecimento desejado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. P. Vieira and A. L. Orsolini, "Projeto de uma Unidade Flutuante para Produção de Energia Limpa," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [2] S. H. Salter, "Wave Power," *Nature*, vol. 4, p. 249:720, 1974.
- [3] C. Grove-Palmer, "Wave energy in the United Kingdom: a review of the programme," June 1975 to March 1982.
- [4] A. d. Falcao, "Wave Energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews," vol. 14, pp. 899-918, 2010.
- [5] Annual Report 2008. International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy System, 2009.
- [6] R. Bedard, M. Previsic, G. Hagerman, B. Polagye, W. Musial and J. Klure, "North American Ocean Energy Status - March 2007," in *Proceedings of 7th European Wave Tidal Energy Conference*, 2007.
- [7] M. Previsic, A. Moreno, R. Bedard, B. Polagye, C. Collar and D. Lockard, "Hydrokinetic energy in the United States - resources, challenges and opportunities," in *Proceedings of 8th European Wave Tidal Energy Conference*, 2009.
- [8] J. Souza, "Mar territorial, zona econômica exclusiva ou plataforma continental?," *Revista Brasileira de Geofísica*, vol. 17, pp. 79-82, 1999.
- [9] P. Uczai, "Energia Renováveis: riqueza sustentável ao alcance da sociedade," Centro de Documentação e Informações, Brasília, 2012.
- [10] Globo, "Dos 167 parques eólicos do Brasil, 36 estão sem linhas de transmissão," G1, São Paulo, 2014.
- [11] CIA World Factbook, "Coastline".
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Atlas de energia elétrica do Brasil," ANEEL, Brasília, 2002.
- [13] Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL, Brasília, 2008.
- [14] A. F. O. Falcão, *Modelling of Wave Energy Conversion*, Lisboa: Instituto Superior Técnico,

Universidade Técnica de Lisboa, 2014.

- [15] G. F. Rosetti, R. A. Watai, R. S. Lavieri, F. Ruggeri, T. P. Rocha and A. N. Simos, "Renewable Energies and Energy Transition," in *RenovEnergia'14*, Maceió, 2014.
- [16] B. N. Machado, M. das Neves Gomes, J. A. Souza, P. R. de Freitas Teixeira, L. A. Isoldi, L. A. O. Rocha and E. D. dos Santos, "GEOMETRIC OPTIMIZATION OF AN OVERTOPPING WAVE ENERGY CONVERTER FOR DEEP WATER FLOW.," in *14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, 2012.
- [17] CENTER FOR RENEWABLE ENERGY SOURCES, "Wave Energy Utilization in Europe," 2002. [Online]. Available: http://wave-energy.net/Library/WaveEnergy_Brochure.pdf. [Accessed 2015].
- [18] M. McCormick, *Ocean wave energy conversion*, New York: Wiley, 1981.
- [19] D. Ross, *Power from sea waves*, Oxford: Oxford University Press, 1995.
- [20] R. Shaw, *Wave energy: a design challenge*, Chichester: Ellis Horwood, 1982.
- [21] J. Falnes, "A review of wave-energy extraction," *Marine Structures*, vol. 20, pp. 185-201, 3 September 2007.
- [22] J. Falnes, *Ocean Waves and Oscillating Systems*.
- [23] R. So, A. Simmons, T. Brekken, K. Ruehl and C. Michelen, "DEVELOPMENT OF PTO-SIM: A POWER PERFORMANCE MODULE FOR THE OPEN-SOURCE WAVE ENERGY CONVERTER CODE WEC-SIM," in *OMAE*, St. John's, Canada., 2015.
- [24] Pico OWC, [Online]. Available: <http://www.pico-owc.net/>.
- [25] Waveplam, [Online]. Available: <http://www.waveplam.eu>.
- [26] M. M. Masuda Y, "Experiences in pneumatic wave energy conversion in Japan," in *Utilization of ocean waves – wave to energy conversion*, New York, 1987.
- [27] Ocean Energy, [Online]. Available: <http://www.oceanenergy.ie/>.
- [28] Y. Washio, H. Osawa, Y. Nagata, F. Fujii, H. Furuyama and T. Fujita, "The offshore floating type wave power device "Mighty Whale": open sea tests," in *Proc 10th Int Offshore Polar Eng Conf*, Seattle, 2000.
- [29] M. ME, "Analysis of a wave-energy conversion buoy," *AIAA J Hydronautics*, vol. 8, pp. 77-82, 1974.
- [30] M. ME, "A modified linear analysis of a wave-energy conversion buoy," *Ocean Eng*, vol. 3, pp.

133-44, 1976.

- [31] Marinet, [Online]. Available: <http://www.fp7-marinet.eu/>.
- [32] Oceanlinx, [Online]. Available: www.oceanlinx.com.
- [33] K. Budal, J. Falnes, L. Iversen, P. Lillebekke, G. Olstedal, H. al and et, "The Norwegian wave-power buoy project," in *Proc 2nd Int Symp Wave Energy Utilization*, Trondheim, Norway, 1982.
- [34] Folk, [Online]. Available: http://folk.ntnu.no/falnes/w_e/.
- [35] D. Elwood, A. Schacher, K. Rhinefrank, J. Prudell, S. Yim, E. Amon and e. al, "Numerical modelling and ocean testing of a direct-drive wave energy device utilizing a permanent magnet linear generator for power take-off," in *Proc 28th Int Conf Ocean Offshore Arctic Eng*, Honolulu, Hawaii, 2009.
- [36] M. Leijon, "An electrical approach to wave energy conversion," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 1309-1319, 2006.
- [37] K. Thorburn and M. Leijon, "Farm size comparison with analytical model of linear generator wave energy converters," *Ocean Engineering*, vol. 34, p. 908, 2007.
- [38] M. Eriksson, J. Isberg and M. Leijon, "Hydrodynamic modelling of a direct drive wave energy converter," *International Journal of Engineering Science*, vol. 43, pp. 1377-1387, 2005.
- [39] Globo, "Energia elétrica que é vinda do mar," G1, 2014.
- [40] Folha de São Paulo, "Brasil quer Gerar Energia Elétrica a Partir das Ondas do Mar," 2013.
- [41] J. Falnes, "Wave-energy conversion through relative motion between two single-mode oscillating bodies," *J Offshore Mech Arctic Eng*, pp. 121:32-8, 1999.
- [42] S. Noren, "Plant for utilizing kinetic energy". USA Patent US Patent No. 4277690, 1981.
- [43] IPS AB, [Online]. Available: <http://www.ips-ab.com/>.
- [44] D. Elwood, S. C. Yim, J. Prudell, C. Stillinger, A. v. Jouanne, T. Brekken, A. Brown and R. Paasch, "Design, construction, and ocean testing of a taut-moored dual-body wave energy converter with a linear generator power take-off," *Renewable Energy*, no. 35, pp. 348-354, 2010.
- [45] J. Prudell, M. Stoddard, T. K. Brekken and A. v. Jouanne, "A novel Permanent Magnet Tubular Linear Generator for Ocean Wave Energy," in *2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2009.
- [46] S. J. Beatty, P. Wild and B. J. Buckham, "Integration of a energy converter into the electricity supply of a remote alaskan island," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 2103-1213, 2010.

- [47] Oceanpower Technologies, [Online]. Available: www.oceanpowertechnologies.com.
- [48] M. Prado, "Archimedes wave swing (AWS)," in *Ocean wave energy*, Berlin, 2008.
- [49] F. Gardner, "Learning experience of AWS pilot plant test offshore Portugal," in *Proc 6th European Wave Energy Conf, Glasgow*, 2005.
- [50] Carnegie, [Online]. Available: <http://carnegiewave.com/>.
- [51] Artemisip, [Online]. Available: <http://www.artemisip.com/>.
- [52] R. Hendeson, "Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the pelamis wave energy converter," *Renewable Energy*, vol. 31, pp. 271-283, 2006.
- [53] M. McCormick, J. Murthagh and P. McCabe, "Large-scale experimental study of a hinged-barge wave energy conversion system," in *3rd European Wave Energy Conf, Patras, Greece*, 1998.
- [54] Calameo, [Online]. Available: <http://pt.calameo.com>.
- [55] Columbia Power, [Online]. Available: <http://columbiapwr.com>.
- [56] A. Babarit, A. Clement and J. Gilloteaux, "Optimization and time-domain simulation of the SEAREV wave energy converter," in *Proc 24th Int Conf Offshore Mechanics Arctic Eng, Halkidiki, Greece*, 2005.
- [57] Universidade do Estado de Oregon, [Online]. Available: <http://nnmrec.oregonstate.edu/>.
- [58] F. Salcedo, P. Ruiz-Minguela, R. Rodriguez, P. Ricci and M. Santos, "Oceantec: sea trials of a quarter scale prototype," in *Proc 8th European Wave Tidal Energy Conf, Uppsala, Sweden*, 2009.
- [59] S. Salter, "The swinging mace," in *Proc Workshop Wave Energy R&D, Cork, Ireland*, 1992.
- [60] T. Whittaker, D. Collier, M. Folley, M. Osterried, A. Henry and M. Crowley, "The development of Oyster – a shallow water surging wave energy converter," in *Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal*, 2007.
- [61] Aquamarine Power, [Online]. Available: <http://www.aquamarinepower.com/>.
- [62] WaveRoller, 2015. [Online]. Available: <http://www.aw-energy.com/index.php/waveroller.html>.
- [63] M. Folley, T. Whittaker and J. van't Hoff, "The design of small seabed-mounted bottom-hinged wave energy converters," in *Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal*, 2007.
- [64] Waveroller, [Online]. Available: <http://aw-energy.com/>.
- [65] H. Lendenmann, K.-C. Strømsem, M. Dai Pre, W. Arshad, A. Leirbukt, G. Tjensvoll and T. Gulli, "Direct generation wave energy converters for optimized electrical power production," in *Proc*

7th European Wave Tidal Energy Conf, Porto, Portugal, 2007.

- [66] Wave Star Energy, [Online]. Available: <http://www.wavestarenergy.com/>.
- [67] E. Mehlum, "Tapchan," *Hydrodynamics of ocean wave energy utilization*, pp. 51-5, 1986.
- [68] Energie Leben, [Online]. Available: <http://www.energieleben.at>.
- [69] J. Kofoed, P. Frigaard, E. Friis-Madsen and H. Sørensen, "Prototype testing of the wave energy converter Wave Dragon," *Renewable Energy*, pp. 31:181-9, 2006.
- [70] Wavedragon, [Online]. Available: <http://www.wavedragon.net/>.
- [71] L. Margheritini, D. Vicinanza and P. Frigaard, "Hydraulic characteristics of seawave slot-cone generator pilot plant at Kvitsøy (Norway)," in *Proc 7th European Wave Tidal Energy Conf*, Porto, Portugal, 2007.
- [72] D. Vicinanza and P. Frigaard, "Wave pressure acting on a seawave slot-cone generator," in *Coastal Eng*, 2008.
- [73] Katofsky, "Ocean energy: technology basics," *Renewable Energy Focus*, pp. 34-36, 2008.
- [74] J. Prudell, M. Stoddard, E. Amon, T. K. Brekken and A. Von Jouanne, *A permanent-magnet tubular linear generator for ocean wave energy conversion*, Industry Applications, IEEE Transactions on, 46(6), 2392-2400, 2010.
- [75] S. S. RAO, YAP, Fook Fah. *Mechanical vibrations*, vol. 5, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2011.
- [76] D. Tweed, "Stack Exchange," Stack Exchange Inc, 31 10 2016. [Online]. Available: <https://electronics.stackexchange.com/questions/135963/why-dont-over-damped-and-critically-damped-circuits-oscillate>. [Accessed 28 03 2017].
- [77] A. L. C. FUJARRA, *Dinâmica de Sistemas I - Material de Apoio*, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2010.
- [78] M. ALONSO, *Física - Um curso universitário*, São Paulo: Edgard Blucher, 1972.
- [79] R. T. Gonçalves, F. T. Matsumoto and F. H. Medeiros, "Projeto conceitual de unidade flutuante de produção e armazenamento com completação seca," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [80] E. V. LEWIS, *Principles of naval architecture second revision*, Jersey: SNAME, 1988.
- [81] Wamit Inc., "Wamit user Manual. Versions 6.4,6.4PC, 6.3S, 6.3S-PC.," Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2006.

- [82] A. L. C. FUJARRA, *Dinâmica de Sistemas II - Material de apoio*, São Paulo: Universidade de São Paulo, 2009.
- [83] S. Chakrabarti, *Hydrodynamics of offshore structures*, WTI Press, 1987.
- [84] J. M. Journée, *Offshore Hydrodynamics*, Delft: Delft University of Technology, 2001.
- [85] A. N. Simos, "Especialização em Engenharia Naval - Módulo 3: Hidrodinâmica," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- [86] V. e. al, "Metocean Measurements at Northern Santos Basin - Brazil," in *Offshore Technology Conference D*, 2010.
- [87] C. Boake, T. Whittaker, M. Folley and H. Ellen, "Overview and initial operational experience of the LIMPET wave energy plant," in *Proceedings of the 12th International Conference on Ocean and Polar Engineering*, Kyushu, Japan, 2002.
- [88] A. Brito-Melo, F. Neuman and A. Sarmento, "Full-scale data assesment in OWC Pico plant," *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, vol. 18, pp. 27-34, 2008.
- [89] B. Stappenbelt, M. Fiorentini, P. Cooper, S. P. Zhu and J. R. Nader, "System identification of floating oscillating water column wave energy converter," *Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic engineering*, 2011.
- [90] Y. Masuda, A. Thakker, T. Lewis and X. Liang, "IMPROVEMENT OF WAVE POWER ECONOMY BY TERMINATOR BACKWARD BENT DUCT BUOY WITH CYLINDER DUCT".
- [91] The Open University, *Flexible Learning Aproach to physics*, 1994.
- [92] M. R. MARTINS, *Hidrostática e Estabilidade; Apostila da disciplina PNV2341*, São Paulo: USP, 2010.
- [93] O. Faltinsen, *Sea Loads on Ships and Offshore Structures*, Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
- [94] S. K. Chakrabarti, *Hydrodynamics of Offshore Structures*, WIT Press, 2003.

APÊNDICE A – METOCEAN do mar de Santos – Tabela de probabilidades de ocorrência

Tabela 0.1 - de Scatter do METOCEAN do mar de Santos. Adaptado de [86].

Hs(m)			Tp(s)																		Freq	Mean Tp
			3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20		
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21		
			3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5	10.5	11.5	12.5	13.5	14.5	15.5	16.5	17.5	18.5	19.5	20.5		
0.0	0.5	0.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	8.24
0.5	1.0	0.75	0.14%	0.15%	0.27%	0.34%	0.36%	0.21%	0.15%	0.10%	0.09%	0.07%	0.05%	0.05%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	2.00%	7.73
1.0	1.5	1.25	0.02%	1.24%	1.47%	2.37%	4.77%	3.31%	0.91%	0.49%	0.37%	0.34%	0.14%	0.14%	0.04%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	15.64%	7.7
1.5	2.0	1.75	0.00%	0.46%	4.86%	4.65%	6.08%	7.96%	3.89%	2.15%	1.31%	0.71%	0.33%	0.23%	0.09%	0.03%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	32.80%	8.12
2.0	2.5	2.25	0.00%	0.02%	1.67%	6.60%	3.21%	3.64%	2.70%	2.47%	2.39%	1.30%	0.69%	0.38%	0.14%	0.04%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	25.25%	8.74
2.5	3.0	2.75	0.00%	0.01%	0.14%	2.79%	3.18%	1.37%	1.13%	1.05%	1.16%	1.35%	0.68%	0.38%	0.14%	0.03%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	13.44%	9.27
3.0	3.5	3.25	0.00%	0.00%	0.01%	0.53%	1.64%	1.13%	0.37%	0.39%	0.39%	0.56%	0.57%	0.37%	0.10%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	6.09%	9.82
3.5	4.0	3.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.06%	0.35%	0.73%	0.25%	0.12%	0.18%	0.19%	0.18%	0.28%	0.10%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	2.47%	10.45
4.0	4.5	4.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	0.27%	0.21%	0.06%	0.06%	0.08%	0.09%	0.12%	0.10%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	1.07%	11.16
4.5	5.0	4.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.06%	0.15%	0.06%	0.02%	0.03%	0.05%	0.08%	0.05%	0.03%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.54%	11.75
5.0	5.5	5.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.06%	0.08%	0.03%	0.02%	0.02%	0.03%	0.03%	0.01%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.30%	11.88
5.5	6.0	5.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.03%	0.06%	0.03%	0.01%	0.01%	0.02%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.16%	11.5
6.0	6.5	6.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.02%	0.03%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.09%	11.55
6.5	7.0	6.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.02%	0.02%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.05%	11.99
7.0	7.5	7.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.01%	0.02%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.04%	11.99
7.5	8.0	7.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	12.51
8.0	8.5	8.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	12.47
8.5	9.0	8.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	10.82
9.0	9.5	9.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.01%	12.88
9.5	10.0	9.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	16.95
10.0	10.5	10.25	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0
10.5	11.0	10.75	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0
Freq			0.16%	1.88%	8.43%	17.34%	19.63%	18.71%	9.88%	7.09%	6.10%	4.66%	2.83%	2.09%	0.83%	0.23%	0.09%	0.03%	0.01%	0.01%	100.00%	
Mean Hs			0.81	1.35	1.75	2.07	2.02	2.04	2.19	2.31	2.37	2.49	2.68	2.89	3.14	3.10	3.01	2.43	2.11	1.89		

APÊNDICE B – Resultados do 1º ciclo

Tabela 0.1 – Dados de entrada e resultados de cada iteração executada no 1º ciclo do algoritmo.

# Rodada	Melhor					Melhor					Max. H ₅		Max. V _S		Qtd. Casos
	D _e [m]	D _e	D _i [m]	D _i	T _M [m]	T _M	D _C [m]	D _C	T _C [m]	T _C	relativa Média [m]	relativa Média [m/s]			
1	[10 15 20 25]	15	[8 13 18 23]	13	[10 15 20 25]	10	[7 12 17 22]	12	[15 20 25 30]	20	5.0487	4.4717	1024		
2	[16 17 18]	16	[15 16 17]	15	[10 11 12 13 14 15]	14	14	-	20	-	5.546	4.7248	54		
3	16	-	15	-	14	-	14	-	[20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30]	23	5.555	4.7746	11		
4	16	-	15	-	14	-	[10 11 12 13 14]	14	23	-	5.555	4.7746	5		
5	16	-	15	-	[10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20]	12	14	-	23	-	5.4541	4.7752	11		
6	[16 17 18 19 20]	16	[15 16 17 18 19]	15	12	-	14	-	23	-	5.4541	4.7752	25		
7	[15 16 17]	15	[14 15 16]	14	[11 12 13]	12	[13 14 15]	13	[22 23 24]	22	5.5485	4.8706	243		
8	[10 11 12 13 14 15]	12	[9 10 11 12 13 14]	11	12	-	[8 9 10 11 12 13]	10	22	-	5.9777	5.2627	216		
9	[9 10 11 12]	11	[8 9 10 11]	10	[7 12 17]	12	[7 8 9 10]	9	[10 15 20 22]	20	6.1317	5.4332	768		
Total de casos													2357		

No total, foram 2357 casos avaliados. Cada rodada teve o seu intuito específico, como será apresentado a seguir:

- 1ª O primeiro caso, como já explicado na seção 4.1.1, foi uma busca ampla no entorno do resultado obtido por [1]. Nessa busca, variou-se todos os parâmetros de uma única vez, com o intuito de definir padrões de comportamento do sistema, de acordo com cada parâmetro;
- 2ª A segunda rodada serviu como teste de sensibilidade da variação conjunta dos parâmetros da monocoluna;
- 3ª Serviu como teste de sensibilidade para o calado do cilindro;
- 4ª Teste de sensibilidade do diâmetro do cilindro. Mostrou que quanto mais próximo este valor estiver do diâmetro da monocoluna, melhor o movimento relativo entre os corpos;
- 5ª Análise de sensibilidade do calado da monocoluna. Apesar de apontar um novo resultado para o calado, os valores de V_{srel} apresentaram diferença na terceira casa decimal, ou seja, numericamente iguais;
- 6ª O parâmetro que mais influencia na dinâmica do sistema é a razão entre D_e e D_i da monocoluna, ou seja, a sua espessura. Já foi observada que a diferença entre essas dimensões sendo de um metro é a melhor combinação. Portanto, mais uma vez foi feita uma análise de sensibilidade dessa variação de espessura da monocoluna, sem mexer no seu calado;
- 7ª Foi testada uma variação no entorno do resultado obtido com a 6ª iteração, para verificar se existia algum melhor caso próximo a região;
- 8ª Mais uma vez, o sistema apresentou variação de resultado. Mostrou-se dessa vez que quanto menor fosse o diâmetro da monocoluna, melhor seria a resposta do problema. Buscou-se então, uma menor dimensão para o diâmetro externo, mas para isso, os demais diâmetros também deveriam

diminuir, pois esses já se encontravam próximos um do outro de um metro de distância. Também foi observado que os casos com diâmetro do cilindro menor que 10m não passaram no teste de estabilidade. Foi notado que existe um ótimo local próximo, mas é preciso testar a variação do diâmetro do cilindro junto com o calado do cilindro;

9ª Ultima iteração, apresentou resultados consolidados, não sendo possível diminuir os valores dos diâmetros dos cilindros porque os corpos não passam no teste de estabilidade inicial, com $GM > 0$.

A seguir, estão apresentados os resultados de cada iteração.

Figura 0.1 – Resultados da 2ª iteração.

Figura 0.2 –Resultado da 3ª iteração.

Figura 0.3 –Resultado da 4ª iteração.

Figura 0.4 - Resultados da 5ª iteração.

Figura 0.5 - Resultados da 6ª iteração.

Figura 0.6 - Resultados da 7ª iteração.

Figura 0.7 - Resultados da 8ª iteração.

Figura 0.8 - Resultados da 9ª iteração.

Figura 0.9 - Análise de estabilidade inicial para o cilindro interno.

Resultados do melhor caso do 1º ciclo – D_e-11-D_i-10-T_m-12-D_c-9-T_c-20.

Figura 0.10 - RAO de heave da monocoluna.

Figura 0.11 - RAO de heave do cilindro interno.

Figura 0.12 - RAO Relativo de heave.

Figura 0.13 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave da monocoluna.

Figura 0.14 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave do cilindro.

Figura 0.15 - Altura relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.

Figura 0.16 - Velocidade relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.

Figura 0.17 - Aceleração relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.

APÊNDICE C – Mapa da geração de energia por condição ambiental

Tabela 0.1 – Mapa da geração de energia por condição ambiental. Valores em kW.

Hs(m)		Tp(s)																	
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
		4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
0.0	0.5	0	0	0	2	4	4	4	3	2	2	2	1	1	1	1	1	0	0
0.5	1.0	0	0	3	15	38	39	39	30	22	17	14	11	9	7	6	5	4	3
1.0	1.5	0	0	9	42	105	110	107	82	61	48	39	31	25	21	17	14	12	10
1.5	2.0	0	1	17	83	206	215	210	161	120	95	76	62	50	41	33	27	23	19
2.0	2.5	0	1	28	137	340	355	347	266	198	157	126	102	82	67	55	45	37	31
2.5	3.0	0	2	42	205	509	531	519	397	296	234	189	152	123	100	82	67	56	47
3.0	3.5	0	3	59	286	710	741	725	554	413	327	264	213	172	140	114	94	78	65
3.5	4.0	0	4	78	380	946	987	965	738	550	436	351	283	229	186	152	125	104	86
4.0	4.5	0	5	100	488	1215	1267	1240	948	706	560	451	364	294	239	195	161	133	111
4.5	5.0	0	6	125	610	1517	1583	1548	1184	882	699	563	455	368	299	244	201	166	139
5.0	5.5	0	7	153	745	1853	1934	1892	1446	1078	854	688	555	449	365	298	245	203	170
5.5	6.0	0	8	183	894	2223	2320	2269	1734	1293	1025	826	666	539	438	358	294	244	203
6.0	6.5	0	10	217	1056	2627	2741	2681	2049	1528	1211	975	787	636	517	423	348	288	240
6.5	7.0	0	12	253	1232	3064	3197	3127	2390	1782	1412	1138	918	742	603	493	405	336	280
7.0	7.5	0	14	291	1421	3535	3688	3607	2757	2056	1629	1312	1059	856	696	569	468	388	323
7.5	8.0	0	15	333	1624	4039	4215	4122	3151	2349	1862	1500	1210	978	795	650	535	443	369
8.0	8.5	0	17	377	1841	4577	4776	4671	3571	2662	2110	1700	1371	1109	901	736	606	502	419
8.5	9.0	0	20	424	2070	5149	5372	5254	4016	2995	2373	1912	1542	1247	1013	828	681	564	471
9.0	9.5	0	22	474	2314	5754	6004	5872	4489	3347	2652	2136	1724	1394	1132	925	761	631	526
9.5	10.0	1	24	527	2571	6393	6671	6524	4987	3718	2947	2374	1915	1549	1258	1028	846	701	585
10.0	10.5	1	27	582	2841	7065	7372	7210	5512	4109	3257	2623	2116	1712	1390	1136	935	775	646
10.5	11.0	1	30	641	3125	7771	8109	7931	6062	4520	3582	2886	2328	1883	1529	1250	1028	852	711

APÊNDICE D – Resultados do 2º ciclo

Melhor caso do 2º ciclo - $D_e-11-D_i-10-T_m-12-D_c-9-T_c-20 - \zeta_{mono}-0.07$

Figura 0.1 - RAO de heave da monocoluna.

Figura 0.2 - RAO de heave do cilindro interno.

Figura 0.3 - RAO do movimento relativo de heave.

Figura 0.4 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave da monocoluna.

Figura 0.5 - Massa adicional, amortecimento potencial e forças do movimento de heave do cilindro.

Figura 0.6 - Altura relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter..

Figura 0.7 - Velocidade relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.

Figura 0.8 - Aceleração relativa significativa do movimento relativo de heave para cada mar do scatter.