



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL**

NATHALIA MELO LIMA

ABSORVEDOR VERTICAL DA ENERGIA DAS ONDAS

**RECIFE
2018**

NATHALIA MELO LIMA

Absorvedor Vertical da Energia das Ondas

Trabalho de Conclusão do Curso submetido à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Naval da Universidade Federal de Pernambuco como dos requisitos necessários para obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Naval.

Orientador: Miguel Angel Celis Carbajal.

**RECIFE
2018**

NATHALIA MELO LIMA

Absorvedor Vertical da Energia das Ondas

Trabalho de Conclusão do Curso submetido à
Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia
Naval da Universidade Federal de Pernambuco como
dos requisitos necessários para obtenção do Grau de
Bacharel em Engenharia Naval.

RECIFE, 17 DE JULHO DE 2018

Banca Examinadora

Prof. Miguel Angel Celis Carbajal
Doutor/ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Orientador

Prof. Cesar Augusto Salhua Moreno
Doutor/ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Examinador

Profa. Paula Suemy Arruda Michima
Doutora/ Universidade Federal de Pernambuco – UFPE
Examinadora

“Dedico este trabalho, de forma especial, ao meu pai, minha mãe e ao meu irmão, que sempre estiveram presentes durante toda minha trajetória e nas conquistas realizadas”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por permitir alcançar esta etapa tão importante da minha vida, por ter me iluminado e fortalecido ao ponto de superar as todas as dificuldades, e por toda saúde e discernimento que me concedeu.

A esta universidade e a todos que dela fazem parte, contribuindo pelo seu funcionamento, organização, limpeza, manutenção e segurança, fazendo com que o ambiente seja inspirador e realizador do sonho de conclusão curso.

Aos professores que fizeram parte dessa minha trajetória, em que repassaram tanto lições técnicas da área, como lições de vida e profissional de cada um. Agradeço o empenho, paciência, confiança e orientação de todos os professores do departamento de naval, em especial professor Miguel Celis, que ajudaram a tornar possível este momento tão especial.

A meu pai, que apesar de não poder contemplar essa conquista em vida, ele estará muito orgulhoso e feliz, onde quer que esteja. À minha mãe, que sempre acreditou em mim, me apoiou e incentivou. Ao meu irmão que me ajudou e me inspirou em muitos momentos.

À minha família e amigos que sempre me ofereceram carinho e estiveram ao meu lado, em especial a minha madrinha Elizabeth, que me concedeu oportunidades incríveis e que acredita no meu potencial.

A todas as pessoas que de alguma forma fizeram parte do meu percurso e me apoiaram, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho trata da avaliação de um sistema de absorção de energia a partir das ondas do mar, situadas na costa de Pernambuco. Sua geometria consiste em dois corpos concêntricos, compostos basicamente por cilindros, que já foi objeto de estudo por vários autores, denominado como *Point Absorber*. O estudo é realizado a partir da teoria potencial, apresentando as características dos operadores de amplitude de resposta e das forças atuantes nas estruturas. Duas análises são feitas: com os corpos separados e interagindo entre si. Os resultados são obtidos a partir dos softwares WAMIT e ANSYS-AQWA, amplamente utilizados em análises de escoamentos potenciais, estabelecendo uma comparação dos dados de saída de ambos. Estes fornecem as amplitudes de respostas dos corpos perante a excitação de ondas regulares. Permite-se, assim, avaliar sua ressonância, com o intuito de obter a máxima absorção de energia do dispositivo. Também é avaliada a influência dos modos de oscilação da água, conhecido como *Sloshing*, durante a movimentação do absorvedor.

Palavras-chave: Absorvedor de energia; Teoria potencial; Ressonância; WAMIT; ANSYS-AQWA; *Sloshing*.

ABSTRACT

This undergraduate thesis presents the evaluation of an energy absorption system from the sea waves, located on the coast of Pernambuco. Its geometry consists of two concentric bodies, composed basically of cylinders, that has already been object of study by several authors, denominated Point Absorber. The study is carried out in the potential theory, presenting the characteristics of the response amplitude operators of bodies and the excitation forces on the structures. Two analyses are performed: with the bodies separated and interacting mutually. The results are obtained from the software WAMIT and ANSYS-AQWA, widely used in analysis of potential theory. A comparison of the output data of both is presented the response amplitude operators of the bodies to excitation of regular waves allow to evaluate their resonance, to achieve the maximum energy absorption the device. The influence of the modes of water oscillation, known as Sloshing, by on the movement of the absorber is also presented.

Keywords: Energy absorber; Potential theory; Resonance; WAMIT; ANSYS-AQWA; Sloshing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica de 2017	16
Figura 2 - Níveis dos reservatórios.....	18
Figura 3 - Potencial de energia das ondas	20
Figura 4 - Absorvedor de energia de ondas do tipo atenuador.....	22
Figura 5 - Absorvedor de energia de ondas do tipo pontual.....	23
Figura 6 - Absorvedor de energia de ondas do tipo terminadores.....	23
Figura 7 - Transporte de energia das ondas	25
Figura 8 - Movimentos de um corpo rígido.....	29
Figura 9 - Dinâmica do corpo rígido.	30
Figura 10 - Áreas de frequência em relação ao movimento em Heave.....	33
Figura 11 - Efeito de Sloshing.....	33
Figura 12 - Efeito de Sloshing no furo central de uma boia.....	34
Figura 13 - Localização do ponto de estudo.....	36
Figura 14 - Gráfico do comportamento das ondas e do vento na região de estudo.....	37
Figura 15 - Gráfico da direção das ondas e do vento na região de estudo	37
Figura 16 - Geometria em 2D com dimensões em metros.	38
Figura 17 - Base do absorvedor.....	38
Figura 18 - Corpo flutuante do absorvedor.	38
Figura 19 – Vista isométrica, lateral, de topo e de fundo, respectivamente, da geometria.	39
Figura 20 - Modelo do absorvedor em operação.....	39
Figura 21 - Sólido genérico para cálculo do centroide.....	45
Figura 22 - Momento de inércia do cilindro oco.....	47
Figura 23 - Momento de inércia do cilindro oco.....	47
Figura 24 - Momento de inércia do cilindro no eixo x.....	48

Figura 25 - Momento de inércia do cilindro no eixo x.....	49
Figura 26 - Processos realizados no software ANSYS-AQWA.....	54
Figura 27 - Geometria no software ANSYS-AQWA.....	55
Figura 28 - Corpo flutuante no software WAMIT.	55
Figura 29 - Base no software WAMIT.....	56
Figura 30 - Malha gerada no programa ANSYS-AQWA.	57
Figura 31 - Malha gerada no programa WAMIT.	58
Figura 32 - Força de excitação no corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.....	60
Figura 33 - Fase de excitação no corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.....	61
Figura 34 - Massa adicional do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.....	61
Figura 35 - Amortecimento do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.....	62
Figura 36 - Força de excitação no corpo flutuante em Heave, com a presença da base.	64
Figura 37 - Fase de excitação no corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.....	64
Figura 38 - Massa adicional do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.....	65
Figura 39 - Amortecimento do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.	65
Figura 40 - RAO do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.	66
Figura 41 – Fase do RAO do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.	67
Figura 42 - RAO do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.	68
Figura 43 - Fase do RAO do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.....	68
Figura 44 - Espectro de onda da região em estudo.....	69
Figura 45 - Consumo de energia elétrica (Mwh).....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Movimentos de um corpo rígido	29
Tabela 2 - Características das ondas locais.	36
Tabela 3 - Volume deslocado dos corpos.....	41
Tabela 4 - Força de Empuxo.....	42
Tabela 5 - Volume de aço dos corpos.	43
Tabela 6 - Massa.....	44
Tabela 7 - Centróide em relação ao eixo x.	46
Tabela 8 - Centróide em relação ao eixo y.	46
Tabela 9 - Centróide em relação ao eixo z.	46
Tabela 10 - Momento de inércia em relação ao eixo x.....	50
Tabela 11 - Momento de inércia em relação ao eixo y.....	50
Tabela 12 - Momento de inércia em relação ao eixo z.....	50
Tabela 13 - Raio de giração em relação ao eixo x.....	51
Tabela 14 - Raio de giração em relação ao eixo y.....	51
Tabela 15 - Raio de giração em relação ao eixo z.....	51
Tabela 16 - Características da malha gerada no ANSYS-AQWA.	57
Tabela 17 - Características da malha gerada no WAMIT.	58
Tabela 18 - Frequências analisadas nos softwares.	59
Tabela 19 - Frequência natural devido ao efeito de Sloshing.....	63

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
1.1 CONTEXTO HISTÓRICO.....	16
1.2 POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS.....	18
1.3 DISPOSITIVOS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS.....	21
1.3.1 Localização	21
1.3.2 Tipo	22
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1 TEORIA LINEAR DE ONDAS	24
2.2 TRANSPORTE DE ENERGIA DAS ONDAS	25
2.3 ESPECTRO DE ONDA.....	27
2.4 MOVIMENTOS DO DISPOSITIVO	29
2.5 DINÂMICA DO CORPO RÍGIDO	30
2.6 FORÇAS NA ESTRUTURA.....	30
2.7 OPERADOR DE AMPLITUDE DE RESPOSTA (RAO)	32
2.8 SLOSHING.....	33
CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO	35
3.1 REGIÃO DE OPERAÇÃO	35
3.2 GEOMETRIA	37
3.3 PROPRIEDADES	40
3.3.1 Massa	40
3.3.2 Centroide.....	45
3.3.3 Momento de inércia	46
3.3.4 Raio de giração.....	51
3.4 SOFTWARES PARA ANÁLISES HIDRODINÂMICAS	52

3.4.1	Geometria.....	53
3.4.2	Malha	56
3.4.3	Frequência das ondas	58
3.4.4	Direção das ondas	59
3.4.5	Análise no domínio da frequência	59
3.4.6	Análise das forças de excitação	60
3.4.7	Operadores de amplitude de resposta.....	66
3.5	APLICAÇÃO.....	69
CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES.....		71
4.1	CONSIDERAÇÕES FINAIS	72
4.2	TRABALHOS FUTUROS	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		74

INTRODUÇÃO

A conscientização da importância da preservação ambiental e a busca por fontes alternativas de energia têm tomado proporções cada vez maiores no cenário atual. Desta forma, a sociedade contemporânea motiva um crescente número de pesquisas, voltadas a apresentar alternativas para a sustentabilidade, por meio da utilização de recursos renováveis naturais na geração de energia.

As fontes de energias são recursos da natureza, que podem ser classificados como renováveis ou não-renováveis. As fontes renováveis se caracterizam por serem recursos ilimitado, enquanto as fontes não-renováveis são caracterizadas por serem fontes limitadas, que se esgotam ao longo do tempo. Quando se trata de sua exploração, as mais procuradas são aquelas que apresentam maior facilidade de obtenção, a baixo custo.

Deste modo, isto acarreta riscos às reservas dessas fontes, uma vez que não se leva em consideração o grau de geração de poluição ou o tipo de recurso. No mundo, as energias renováveis já estão incorporadas aos planejamentos energéticos e são opções maduras do ponto de vista tecnológico e econômico (GREENPEACE BRASIL, 2008).

Como a geração de energia desempenha um papel fundamental no âmbito econômico, social e ambiental, se faz necessária a aplicação da sustentabilidade sobre a matriz de geração de energia. Ou seja, buscar fontes de geração de energia a partir de recursos renováveis que contemplem as exigências do desenvolvimento econômico e social, e que visam a redução das agressões ambientais.

De acordo com Ronchi & Schaeffer (2010), a questão energética está sempre entre os assuntos de pauta no mundo, seja por questões ambientais, pela queima de combustíveis fósseis, pelas crises de suprimento ou preços elevados. Segundo os mesmos autores, a produção de energia tende a crescer juntamente com o crescimento e desenvolvimento social; e é ela que move a indústria, o comércio e os demais setores econômicos do país.

Atualmente, a energia se tornou um produto indispensável no dia-a-dia da população mundial, que varia desde a comunicação até no funcionamento de grandes indústrias, tendo um papel importante na sobrevivência e evolução da humanidade. Segundo Rodrigues (2013), nas últimas duas décadas, o consumo de energia elétrica apresentou índices de crescimento

superiores ao do PIB brasileiro, resultado do crescimento da concentração da população em áreas urbanas e o desenvolvimento de uma indústria intensiva em eletricidade.

As inconstantes condições meteorológicas, com ênfase nas águas pluviais, afetam diretamente a produção de energia gerada pelas hidroelétricas. Por isso, se faz necessário recorrer ao uso da energia gerada pelas termoelétricas, tendo como consequências a variações de forma elevada nas tarifas empregadas pelas concessionárias de energia elétrica.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2005), o homem, por sua vez, procura sempre descobrir novas maneiras de adaptação ao ambiente em que vive. Desta forma, quando um recurso se torna escasso, ele tende a ser compensado pelo surgimento de outro.

Juntamente com a necessidade de evitar os impactos ambientais ocasionados pela conversão de energia pelas fontes elétricas, se tornou cada vez mais atrativo ao mercado a desenvolver e a utilizar tecnologias que utilizam fontes renováveis. Diante desse quadro, e levando em consideração o vasto litoral brasileiro, uma alternativa promissora para a geração de energia seria através das ondas do mar, que têm como princípio a conversão da energia mecânica produzida pelas ondas em energia elétrica.

Os oceanos contêm o maior de todos os recursos naturais e que podem contribuir de forma significativa para as necessidades crescentes de energia a nível global, devido ao seu grande potencial energético (GOMES *et al.*, 2010). Por ser um recurso natural, renovável e abundante, e pelo grande potencial energético contido nos oceanos, a energia provinda das ondas oceânicas vem ganhando cada vez mais espaço e importância nas últimas décadas. Diante disso, este recurso tem acumulado consideráveis progressos na investigação e desenvolvimento tecnológico na Europa, resultando na comercialização de algumas destas soluções.

Segundo Cruz & Sarmiento (2004), o apoio para a investigação e desenvolvimento destas tecnologias tem surgido através de programas nacionais de pesquisa e desenvolvimento tecnológico da comissão europeia, que tem estimulado e contribuído significativamente para o progresso da utilização da energia das ondas na Europa.

Já no Brasil, de acordo com Gonçalves *et al.* (2008), o estudo sobre aproveitamento da energia das ondas se encontra em fase bastante incipiente, uma vez que possuem alguns obstáculos para o seu desenvolvimento. Isso se deve pela ausência de dados sobre o potencial

energético do mar brasileiro, dificuldade em investimentos e ausência de mecanismos institucionais para o incentivo ao desenvolvimento nessa área.

A implementação de mecanismos voltados à extração de energia do mar, deve-se ter como meta principal capturar a sua energia máxima. Para uma maior eficiência e absorção de energia a partir das ondas do mar, segundo Falnes (1997), é necessário ter a melhor oscilação do conversor de energia da onda. Desta forma, a fase ideal e a amplitude ótima da oscilação podem ser otimizadas para maximizar a potência de absorção pelo dispositivo.

Diante disso, o presente trabalho apresenta o estudo de um modelo de absorvedor de energia, desenvolvido por Shadman (2017), implementado no litoral Pernambucano, a fim de obter a energia máxima das ondas. Durante a movimentação do dispositivo de conversão de energia, há um efeito denominado *Sloshing*, que também foi analisado e discutido.

CAPÍTULO 1 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1 CONTEXTO HISTÓRICO

A energia gerada pelas hidroelétricas é responsável pela maior parte do fornecimento de energia no Brasil. A grande problemática desse fato se deve pela vulnerabilidade do sistema de fornecimento em períodos de grandes e atípicas estiagens, podendo gerar faltas de energia e medidas públicas de economia, como a adição de tarifas nas contas de luz e o racionamento de energia. Na figura 1 ilustra o fluxo de energia elétrica, segundo a Empresa de Pesquisa de Energética, no ano base de 2016.

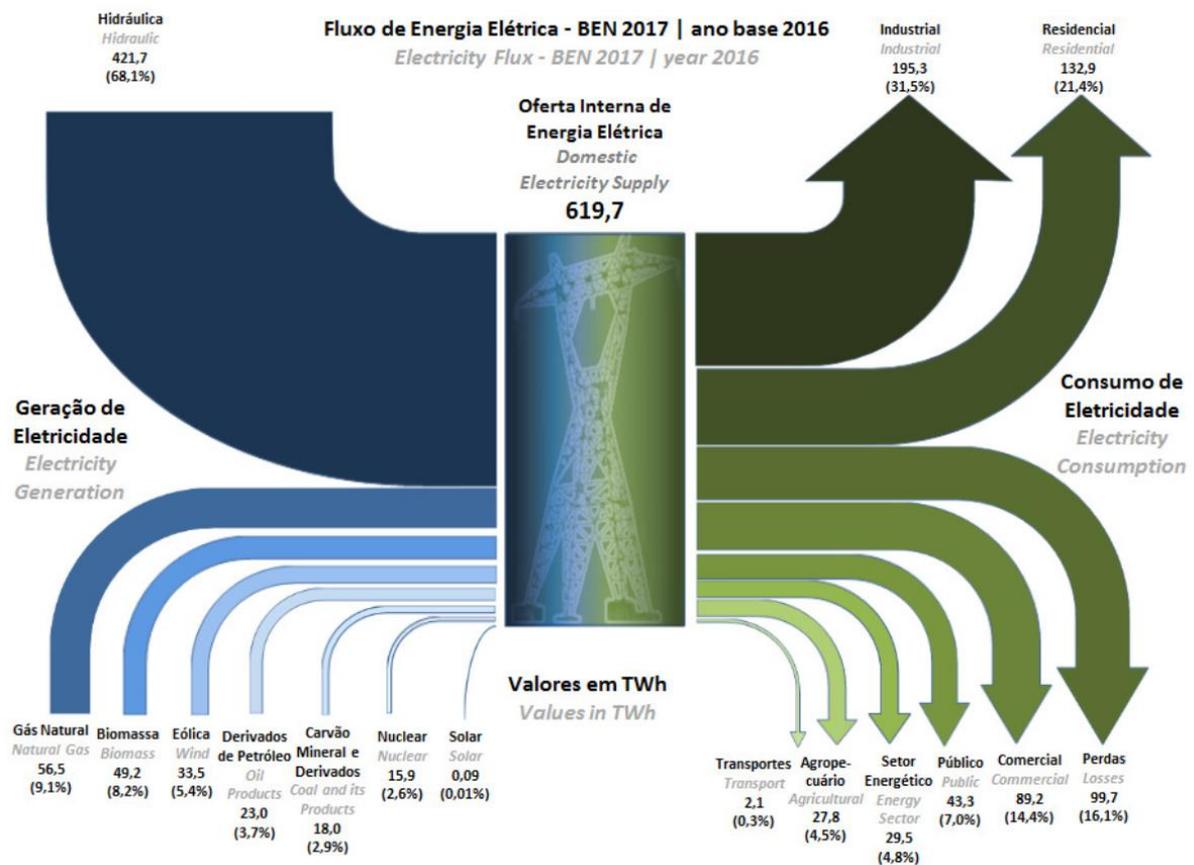


Figura 1 - Oferta Interna de Energia Elétrica de 2017. Fonte EPE.

Segundo Pena (2014), em 2001, o país viveu a maior crise da história nesse setor. Naquele ano, o risco de apagão foi combatido através de um intenso racionamento de energia, através da redução em 20% os gastos domiciliares. Após essa crítica situação, houve planos de ampliação da rede de eletricidade, permitindo o avanço nesse setor. Contudo, os avanços não

foram suficientes a ponto de evitar novas deficiências em relação ao fornecimento de energia elétrica no país.

Em 2012, a falta de chuvas e a má gestão do setor energético nacional, segundo a revista *Veja* (2012), fizeram o país chegar a uma situação limite, o de racionamento ou mesmo de desabastecimento de energia elétrica e de gás. As hidroelétricas brasileiras nesse período estavam gerando menos energia do que eram capazes, pela pouca água disponível. Para evitar apagões, todas as termoelétricas do país foram ligadas e estavam operando a plena capacidade.

Em 2014, a estiagem atípica no início do ano deixou a população em alerta aos riscos de apagões e eventuais necessidade de racionamento de água e energia em várias regiões brasileiras. Isso foi devido ao fato de os reservatórios operarem muito abaixo de suas capacidades máximas, onde foi possível notar decréscimo considerável no volume total de água.

A falta de chuvas em 2015 levou à criação de tarifas adicionais na conta de luz dos brasileiros, intituladas de bandeiras tarifárias, representadas pelas bandeiras verde, amarela e vermelha. Na verde, não há custo adicional e, portanto, os consumidores não pagam nada a mais. A amarela significa que houve algum aumento no custo para gerar energia e, a vermelha, que esse custo de produção está muito alto.

O custo incrementado na geração de energia está ligado à necessidade da utilização dos planos emergenciais, com a ativação de usinas termoelétricas, que são acionadas apenas em extrema necessidade, em que proporcionam a geração de energia de forma mais cara e um índice de poluição maior.

Segundo *O Globo* (2017), entre os anos 2015 e 2016, a população brasileira pagou cerca de R\$ 18 bilhões em sobretaxa na conta de luz, com a adoção do sistema de bandeiras tarifárias, de acordo com levantamento da *Compass Energia*. O valor equivale a aproximadamente ao investimento da construção da usina de Jirau, em Rondônia, uma das maiores hidroelétricas do país.

A figura 2 revela o decréscimo dos níveis dos reservatórios nas regiões Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Sul do Brasil, no período de janeiro a março dos anos 2016 e 2017.

Nível dos reservatórios

○ 2016 ● 2017

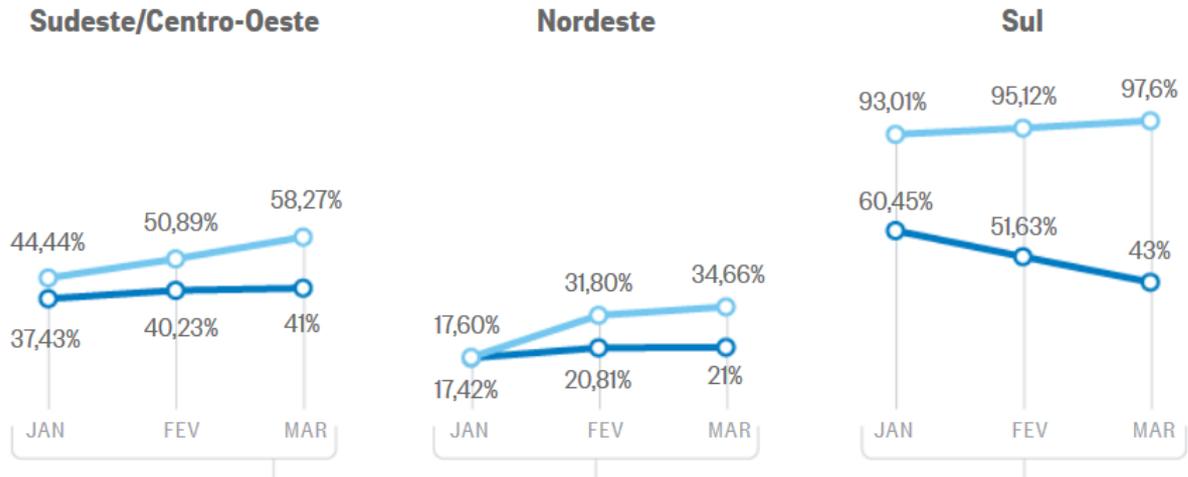


Figura 2 - Níveis dos reservatórios. Fonte: O Globo.

Diante desse cenário, o reordenamento da produção de energia se faz necessário no Brasil, a fim de investir e executar projetos no setor. Desta forma, aumenta-se a oferta de produção, seja na amplificação de usinas hidroelétricas ou no investimento de fontes alternativas de energia, como a geração de energia a partir das ondas do mar.

1.2 POTENCIAL DE ENERGIA DAS ONDAS

Mensurar a energia das ondas é uma tarefa difícil, pois existem alguns fatores externos que são variáveis ao longo do tempo que influenciam diretamente no comportamento das ondas, como a ação dos ventos e tempestades. Para a implementação de um dispositivo na região marítima, alguns fatores são considerados, como incrustações, corrosão e conexões para instalação.

A energia das ondas também é um tipo disperso de energia. Para conseguir uma energia de alto rendimento, deve-se implantar vários dispositivos em uma grande área marítima. Segundo a Waveco (2018), a maneira mais fácil de coletar energia das ondas é transferir a energia de movimento das ondas para uma boia flutuante.

A boia não absorve toda a energia da onda, devido ao seu próprio peso, que induz um movimento atrasado em relação à onda, adquirindo um movimento próprio em relação à superfície do mar. Seu movimento também cria ondas, havendo perda de energia, reduzindo o

rendimento. Segundo a Waveco (2018), na prática, é difícil converter mais de 25% da energia de uma onda em energia elétrica.

Os potenciais de energia das ondas do mar são apresentados como efeito médio anual (kW) por metro de onda, kW/m. Segundo Energy Career (2013), as ondas são uma enorme fonte potencial de energia, cerca de 29.500 terawatts-hora por ano, de acordo com cálculos das Nações Unidas. Isto equivalente à potência elétrica média anual consumida mundialmente.

O mapa, da figura 3, mostra que os recursos globais de energia das ondas estão concentrados em duas zonas, aproximadamente limitadas pela 40ª e 60ª latitude dos hemisférios norte e sul. Estes são os cinturões de vento a oeste, onde o ar quente das baixas latitudes encontra o ar frio das áreas polares e, por causa da rotação da Terra, o vento vem principalmente das direções ocidentais.

Apesar do Brasil não se localizar nessas duas regiões de maior potencial energético, dispositivos podem ser adaptados para uma maior absorção de energia das ondas, como a implementação do sistema de *Latching Control*. Esse sistema visa a maximização da energia das ondas, que consiste no controle do dispositivo a partir de travas. A boia absorvedora é travada quando atinge uma altura equivalente a crista da onda incidente e é liberado quando esta onda atinge o cavado, obtendo uma energia potencial maior. Para isso, se faz necessário a utilização de sensores ao longo do absorvedor de energia das ondas.

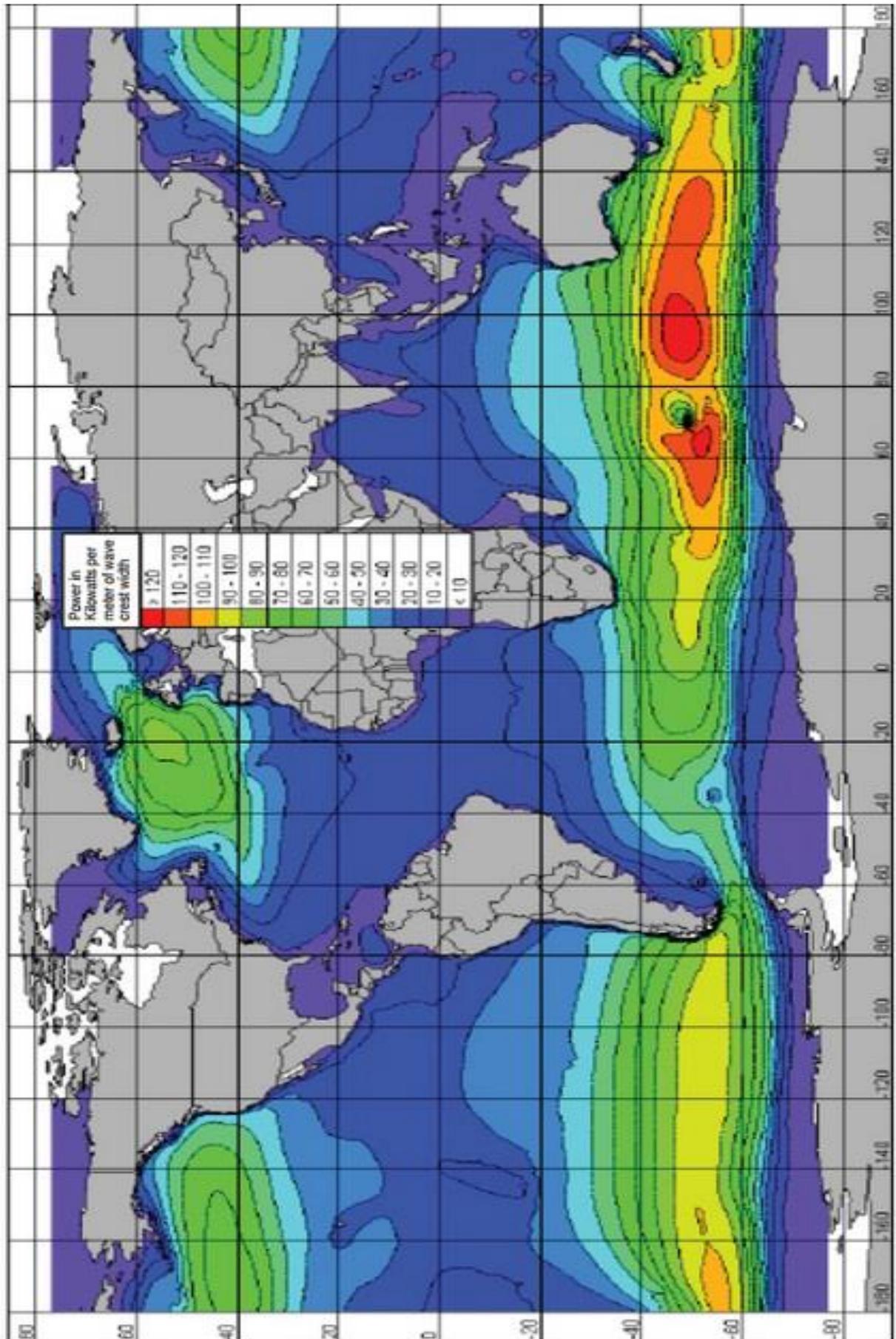


Figura 3 - Potencial de energia das ondas. Fonte: WAVECO.

1.3 DISPOSITIVOS DE ABSORÇÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

Existe uma grande variedade de dispositivos fabricados com a finalidade de converter as ondas do mar em energia elétrica. São mais de 1000 conversores, patenteadas no Japão, na América do Norte e na Europa (CLÉMENT *et al.*, 2002). Esses protótipos são geralmente categorizados por localização e tipo.

1.3.1 Localização

Quanto à localização, os absorvedores de energia podem ser classificados como costeiros, próximos à costa ou distantes da costa.

1.3.1.1 Dispositivos costeiros

Os dispositivos costeiros possuem a vantagem de se localizar próximos da rede concessionária de energia, possuem fácil manutenção e, como as ondas atenuam à medida que chegam à costa, têm uma probabilidade reduzida de sofrerem danos em condições extremas de mar. A desvantagem é que, na maioria dos casos, uma vez em águas rasas, a energia das ondas se torna menor. Além disso, dependendo de sua localização, o dispositivo deverá ter geometria que atenda a geologia da costa, mantendo a preservação das paisagens costeiras.

1.3.1.2 Dispositivos próximos da costa

Os dispositivos próximos da costa estão situados em águas relativamente rasas, com profundidade com menos de cerca de um quarto do comprimento de onda, segundo Duckers (2004). Dispositivos neste local são frequentemente ligados ao fundo do mar, oferecendo ao sistema uma base estacionária adequada, de forma que a boia flutuante possa oscilar adequadamente. Como nos dispositivos costeiros, a desvantagem desses dispositivos é que as águas rasas apresentam ondas com potência energética reduzida.

1.3.1.3 Dispositivos distantes da costa

Os dispositivos distantes da costa geralmente estão situados em águas profundas, onde, segundo Falnes (2007), a profundidade é maior que mais de cerca de um terço do comprimento de onda. A vantagem é a maior quantidade de energia que pode ser extraída das ondas, devido

à maior potência energética em águas profundas. No entanto, estes dispositivos possuem uma complexidade maior de construção e dificuldade na manutenção. Também devido à sua localização, estes dispositivos devem ser planejados para suportar as condições mais extremas de mar, adicionando um maior custo de fabricação.

1.3.2 Tipo

Apesar da grande variação de projetos e conceitos, os absorvedores de energia, podem ser classificados em três tipos predominantes: atenuadores, pontuais e terminadores.

1.3.2.1 Atenuadores

Os absorvedores do tipo atenuadores ficam paralelos à direção predominante das ondas, flutuando sob a superfície do mar. A figura 4 mostra um exemplo de absorvedor de energia de ondas do tipo atenuador, denominado *Pelamis*, desenvolvido pela *Pelamis Wave Power*.



Figura 4 - Absorvedor de energia de ondas do tipo atenuador. Fonte: Pelamis.

1.3.2.2 Pontuais

Os absorvedores pontuais possuem pequenas dimensões em relação ao comprimento de onda incidente. Podem ser estruturas flutuantes que ficam na superfície do mar, subindo e descendo de acordo com a configuração da onda, ou completamente submersas, dependendo do diferencial de pressão. Por causa do pequeno tamanho, a direção da onda não é considerada um fator de importância para dispositivos desse tipo. (DREW *et al.*, 2009).

Existem inúmeros dispositivos desse tipo, um dos quais o *Powerbuoy*, desenvolvido pela *Ocean Power Technology*, por exemplo, é ilustrado na figura 5.



Figura 5 - Absorvedor de energia de ondas do tipo pontual. Fonte: Powerbuoy.

1.3.2.3 Terminadores

Os absorvedores do tipo terminadores geram energia a partir do bloqueio da passagem das ondas, ou seja, têm seu eixo principal perpendicular à direção da propagação da onda incidente predominante, fazendo com que a incidência da crista revolva a estrutura presa a ele. Um exemplo desse dispositivo é o *Salter's Duck*, desenvolvido na *University of Edinburgh*, mostrado na figura 6.

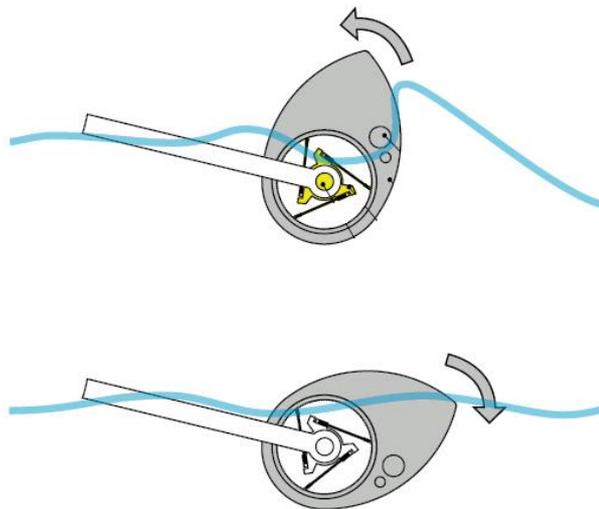


Figura 6 - Absorvedor de energia de ondas do tipo terminadores. Fonte: WavePower (Adaptado)

CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Durante o estudo do projeto de um dispositivo de absorção de energia das ondas genérico, se faz necessário seguir uma metodologia padrão para a modelagem inicial. Assumindo que já se possui um projeto físico bruto do absorvedor de energia, o primeiro passo é fazer a análise no domínio da frequência nas condições operacionais marítimas.

Esta análise fornece uma visão geral do comportamento em ondas de um projeto preliminar e do desempenho do dispositivo na operação de conversão de energia. Com isso, é possível aperfeiçoar a geometria inicial e identificar as frequências de ressonância, as cargas na estrutura devido às pressões de onda, as características gerais das respostas com a variação da frequência e as características da potência de saída.

O projeto físico deste absorvedor tem como princípio determinar uma geometria simples, que forneça o máximo de rendimento, podendo predeterminar valores aproximados da potência absorvida e características do desempenho do modelo.

Logo, uma modelagem iterativa entre o modelo do corpo, a caracterização do sistema de fixação e a região onde se pretende fazer a aplicação, propiciam determinar uma geometria capaz de proporcionar maior absorção de energia. Durante o processo de desenvolvimento de um modelo de absorvedor de energia de ondas, muitos resultados, no domínio da frequência, são relevantes. Dentre eles:

- Os operadores de amplitude de resposta (RAO);
- As forças na estrutura;
- A massa e inércia adicional e
- O amortecimento.

2.1 TEORIA LINEAR DE ONDAS

Para facilitar o estudo, optou-se por utilizar a teoria linear de ondas, um modelo simples que assume que o escoamento é irrotacional, incompressível, invíscido e sem efeitos de tensão superficial, podendo ser aplicada a ele a teoria potencial.

O modelo linear também assume que a profundidade média da água é uniforme e que a inclinação da onda é pequena. Logo, dentro da teoria linear, os deslocamentos, as velocidades e as acelerações das partículas de água, e as pressões harmônicas, terão uma relação linear com

a elevação da superfície da onda. O perfil de uma onda simples, com uma pequena inclinação, se comporta de forma harmônica, similar a uma função seno ou cosseno, e o movimento de uma partícula de água em uma onda depende da profundidade da lâmina d'água.

Quando a onda se move na direção positiva de x , o perfil de onda pode ser expresso como uma função da direção (x) e do tempo (t), que, segundo Journeé (2001), pode ser definida como:

$$\tau = \tau_a \cos(kx - \omega t) \quad (1)$$

Em que τ é a elevação da superfície da água, ω é a frequência e k é o número de onda. Como se pode observar na equação acima, sua modelagem descreve ondas lineares harmônicas. Na teoria potencial, a equação (1) permite o estabelecimento de condições de contorno do escoamento, que são utilizados para definir o potencial de velocidade. Desse potencial, são extraídas informações de velocidade e pressão que serão usadas adiante.

2.2 TRANSPORTE DE ENERGIA DAS ONDAS

No modelo linear, uma onda transporta energia ao longo de um meio, sem transportar matéria. A quantidade de energia transportada por uma onda está diretamente relacionada à amplitude da onda, que por sua vez, é o deslocamento máximo de uma partícula com relação à sua posição de repouso. Logo, uma onda de grande quantidade de energia é caracterizada por uma grande amplitude; já uma onda de baixa energia é caracterizada por uma baixa amplitude.

Segundo Journeé (2001), a velocidade na qual a energia das ondas será transportada pode ser determinada usando a figura 7, onde se calcula o trabalho realizado por uma quantidade de fluido que atravessa a superfície de controle de largura unitária e altura dz , contida no plano virtual AA' ortogonal à direção de propagação da onda.

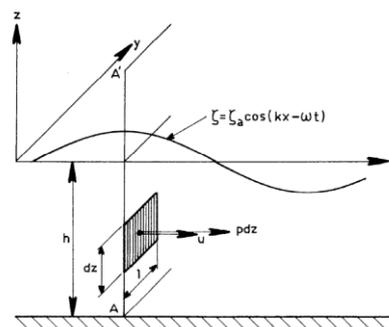


Figura 7 - Transporte de energia das ondas. Fonte: Journeé.

Quando o fluido passa através do elemento, uma certa quantidade de trabalho dW será realizada, que pode ser expressa pela equação (2), em função da pressão (p) e da velocidade do fluido (u).

$$dW = \{p * 1 * dz\} * \{u * dt\} \quad (2)$$

Utilizando a linearização do sistema, o trabalho médio, ou potência, durante um período (T), pode-se ser definida pela equação abaixo, a uma certa profundidade h .

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^0 p * u * dz * dt \quad (3)$$

A equação (3) pode ser resolvida e simplificada, a partir da utilização da equação de Bernoulli e pela teoria potencial. Desta forma, a potência pode ser definida pela seguinte expressão, em termos da amplitude da onda (τ_a):

$$\bar{W} = \frac{1}{2} \rho g \tau_a^2 \frac{c}{2} * \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (4)$$

Em que c é a velocidade de fase da onda, g é a aceleração da gravidade, ρ é a massa específica da água do mar. O número de onda é definido pela seguinte razão:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (5)$$

Em que λ é o comprimento da onda, que através da relação de dispersão, é definida pelo período de onda (T), em duas situações, para águas profundas e águas rasas, respectivamente:

$$\lambda = \frac{g}{2\pi} T^2 \quad (6)$$

$$\lambda = T \sqrt{gh} \quad (7)$$

O trabalho médio realizado por período de onda, definido na equação (4), também pode ser escrito como o produto da energia da onda pela sua velocidade de transporte.

$$\bar{W} = E * c_g \quad (8)$$

Em que:

$$E = \frac{1}{2} \rho g \tau_a^2 \quad (9)$$

$$c_g = \frac{c}{2} * \left(1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \quad (10)$$

A velocidade de grupo pode ser relacionada com a velocidade da crista da onda, chamada velocidade de fase da onda (c), em duas situações, para águas profundas e águas rasas, pelas relações a seguir, respectivamente:

$$c_g = \frac{c}{2} \quad (11)$$

$$c_g = c \quad (12)$$

2.3 ESPECTRO DE ONDA

Um espectro de onda demonstra o estado do mar no domínio da frequência e pode descrever a energia transmitida pelas ondas em uma determinada frequência. Para ondas irregulares, os espectros mais comumente usados são: *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP), Bretschneider, Pierson-Moskowitz, Neumann e *International Ship Structure Congress* (ISSC).

Um extenso programa de medição de ondas, durante 1968 e 1969, conhecido como JONSWAP, foi realizado ao longo de uma linha que se estendia por mais de 100 milhas até o Mar do Norte, a partir da Ilha Sylt, na Alemanha. A análise dos dados, com a colaboração da Universidade Técnica de Delft, produziu uma formulação espectral para mares gerados pelos ventos limitados, ou seja, costeiros.

Segundo Journée (2001), a definição do espectro médio de onda pelo espectro de JONSWAP, e aconselhada pelo 17º ITTC em 1984, é definida pela equação abaixo:

$$S_{\tau}(\omega) = \frac{320H_s^2}{T_p^4} \omega^{-5} \exp \left\{ -\frac{1950}{T_p^4} \omega^{-4} \right\} \gamma^A \quad (13)$$

Em que H_s é a altura significativa das ondas, definida como a média de 1/3 das ondas mais altas registradas; T_p é o período de pico, definido como o período de onda com maior energia; γ é o fator de pico, que é considerado igual 3.3; σ é a função da frequência, em que para $\omega < \omega_p$ e $\omega > \omega_p$ é igual a 0.07 e 0.09 respectivamente; e ω_p é a frequência angular no pico espectral. Já o fator A é definido pela seguinte equação:

$$A = \exp \left\{ - \left(\frac{\frac{\omega}{\omega_p} - 1}{\sigma \sqrt{2}} \right)^2 \right\} \quad (14)$$

Os dados estatísticos relacionados à ocorrência de incidência no dispositivo podem ser encontrados computando os momentos da área sob o espectro em relação ao eixo vertical, em $\omega = 0$. Se m denota um momento, então $m_{n\tau}$ denota o n ésimo momento de ordem, que pode ser expresso por:

$$m_{n\tau} = \int_0^\alpha \omega_w^n S_\tau(\omega_w) d\omega_w \quad (15)$$

Em que m_0 resulta na área sob a curva do espectro de energia, que também é indicado como a variância ao quadrado da elevação da superfície da água, m_1 é o momento de primeira ordem, ou momento estático, e m_2 é o momento de segunda ordem, ou momento de inércia. Existe uma relação entre m_0 e a altura significativa (H_s), como mostra a equação abaixo:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (16)$$

De acordo com Falnes (2007), a energia total armazenada em uma onda por unidade de área da superfície do mar, em termos do espectro de ondas no domínio da frequência, pode ser expressa pela fórmula abaixo.

$$E = \rho g \int_0^\infty S(\omega) d\omega \quad (17)$$

Em que ρ é a massa específica da água do mar e g é a aceleração da gravidade. Fazendo a relação entre as equações (14), (15) e a (16), obtém-se a relação da energia em função da altura significativa, como mostra a equação a seguir:

$$E = \frac{\rho g H_s^2}{16} \quad (18)$$

2.4 MOVIMENTOS DO DISPOSITIVO

Existem seis graus de liberdade de movimento quando um corpo rígido flutua livremente sob as águas, sendo três de translação e três de rotação, como mostram a figura 8 e a tabela 1, com as denominações dos movimentos em inglês e suas respectivas traduções.

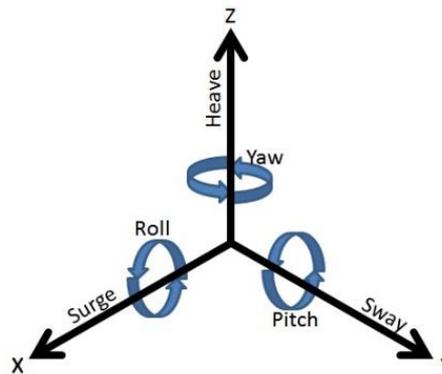


Figura 8 - Movimentos de um corpo rígido. Fonte: POLYU.

Tabela 1 - Movimentos de um corpo rígido

EIXO	LINEARES		ANGULARES	
	PORTUGUÊS	INGLÊS	PORTUGUÊS	INGLÊS
x	Avanço	<i>Surge</i>	Jogo	<i>Roll</i>
y	Deriva	<i>Sway</i>	Arfagem	<i>Pitch</i>
z	Afundamento	<i>Heave</i>	Guinada	<i>Yaw</i>

Durante a análise de algumas estruturas flutuantes, alguns movimentos podem ser desconsiderados, seja por sua baixa relevância ou para simplificações durante o estudo. Por este motivo, o movimento do absorvedor de energia será restrito apenas ao movimento translacional no eixo z, ou seja, o movimento de afundamento ou *Heave*.

A movimentação do dispositivo será estudada de tal forma que o corpo responsável pela absorção de energia, que será denominado corpo flutuante, estará livre para movimentar-se, enquanto o apoio, denominado base, estará sob a influência de meios de fixação, como a utilização de cabos.

2.5 DINÂMICA DO CORPO RÍGIDO

A dinâmica dos corpos rígidos e dos movimentos fluidos é governada pelas ações combinadas de diferentes forças e momentos externos, bem como pela inércia dos próprios corpos (JOURNEÉ, 2001).

A partir da teoria linear, o movimento resultante pode ser considerado como uma superposição do movimento do dispositivo em águas calmas e quando submetido ao movimento das ondas, como exemplificado na figura 9.

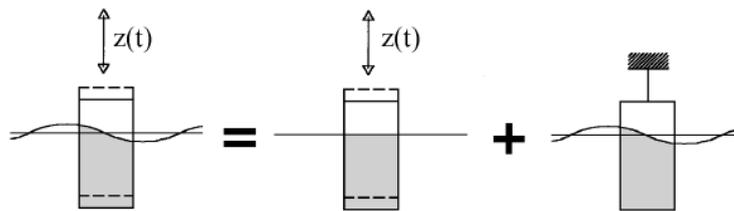


Figura 9 - Dinâmica do corpo rígido. Fonte: Journeé.

Logo, no primeiro caso, as forças e os momentos hidromecânicos são induzidos pelas oscilações harmônicas do corpo rígido, movendo-se na superfície não perturbada do fluido. Já no segundo caso, as forças e os momentos excitantes das ondas são produzidas pelas ondas que passam pelo corpo fixo.

O movimento vertical do dispositivo segue da segunda lei de Newton, expressa pela equação abaixo:

$$\frac{d}{dt}(\rho \nabla \dot{z}) = \rho \nabla \ddot{z} = F_r + F_w + F_s \quad (19)$$

Em que ρ é a massa específica da água do mar, ∇ é o volume deslocado do corpo, z é o movimento do deslocamento vertical, F_r é a força hidromecânica na direção do eixo z , F_w é a força de excitação da onda na direção do eixo z e F_s é a força de restauração hidrostática devido à variação do calado com a oscilação vertical no tempo.

2.6 FORÇAS NA ESTRUTURA

As forças de ondas em um corpo possuem uma parcela devida aos efeitos viscosos e uma parcela devida aos efeitos não viscosos. As forças viscosas são decorrentes do aparecimento da camada limite, com cisalhamento entre as partículas fluidas e dependem

diretamente da forma do corpo. No entanto, essas forças são geralmente pequenas em relação à magnitude, podendo ser desconsideradas. (BOSMA, 2013)

As forças hidrodinâmicas exercidas no corpo, sob a teoria linear e a teoria de fluxo potencial da onda, podem ser expressas pela superposição das forças de radiação e de excitação. As forças de radiação são geradas pelo movimento do corpo e as forças de excitação são exercidas em um corpo que não se movimenta, exemplificados pelo primeiro e segundo caso do tópico anterior, respectivamente.

Dentre as forças devidas a efeitos não viscosos, conforme a figura 9, força de radiação é induzida pela oscilação da estrutura, gerando alteração da distribuição de pressões ao longo do dispositivo, e assim, gera ondas. Esta força pode ser decomposta em uma componente chamada massa adicional, devido à inércia das partículas empurradas na direção normal à superfície do dispositivo durante a oscilação, e que é proporcional à aceleração do corpo; e em uma componente de amortecimento, devido à geração de ondas que levam energia ao infinito, e que é proporcional a velocidade do corpo.

A equação abaixo expressa a força de radiação (F_r), em função do potencial de radiação (ϕ_{rad}) na superfície molhada do dispositivo (S_w).

$$F_r = -\rho \iint_{S_w} \left(\frac{\partial \phi_{rad}}{\partial t} \right) n dS \quad (20)$$

Em que n é o versor normal à superfície molhada.

A força de excitação da onda no absorvedor é composta pela parcela das forças de Froude-Krylov e de difração. A força de Froude-Krylov é uma força induzida pelo campo de pressões geradas pelas ondas não perturbadas pelo corpo. Já a força de difração ocorre devido à variação de pressão que ocorre quando as ondas incidentes contornam o dispositivo, se seu comprimento fora da mesma ordem de grandeza do tamanho do absorvedor.

As equações abaixo expressam as forças que compõem a força de excitação das ondas (F_w), de Froude-Krylov (F_{FK}) e de difração (F_D), respectivamente:

$$\vec{F}_w = \vec{F}_{FK} + \vec{F}_D \quad (21)$$

$$\vec{F}_{FK} = - \iint_{S_w} p \vec{n} dS \quad (22)$$

$$\vec{F}_D = - \iint_{S_w} p_D \vec{n} dS \quad (23)$$

Em que p é a pressão da onda não perturbada, p_D é a pressão devido à difração das ondas e \vec{n} é o versor normal à superfície molhada (S_w) dos corpos.

Outra relação importante no estudo das forças na estrutura é a relação de Haskind. Segundo Santos & Rodrigues (2006), a relação de Haskind permite determinar as forças de excitação em um dispositivo, a partir dos potenciais dos problemas de radiação e do potencial da onda incidente. Este pode ser determinado pela equação abaixo.

$$F_k^D = -i\rho\omega \int_S \left(\varphi_o \frac{\partial \varphi_k}{\partial n} - \varphi_k \frac{\partial \varphi_o}{\partial n} \right) dS e^{-i\omega t} \quad (24)$$

Em que i representa o número complexo, φ_o é o potencial da onda incidente em um ponto da superfície molhada do corpo e φ_k são os potenciais associados às ondas radiadas para aos mesmos pontos.

2.7 OPERADOR DE AMPLITUDE DE RESPOSTA (RAO)

Os operadores de amplitude de resposta (RAO's), ou *Response Amplitude Operators*, em inglês, são a razão entre o movimento em resposta de um dispositivo e a amplitude da onda excitante, em uma faixa de frequências. Em outras palavras, este determina a resposta de um corpo em um estado de mar, no domínio da frequência. Por meio do estudo do RAO, pode-se obter dados relevantes, como a determinação da faixa de frequências em que a resposta é máxima, geralmente situado na região de ressonância, onde a quantidade máxima de energia pode, teoricamente, ser extraída.

Cada RAO consiste em um par de números que definem a resposta do dispositivo para um determinado grau de liberdade, direção e período de onda. Esse par consiste em uma amplitude, que relaciona a amplitude do movimento do dispositivo com a amplitude da onda, e uma fase, que define a temporização do movimento do dispositivo em relação à onda. A escolha

do tipo de movimentação que o dispositivo exerce, seja ela de forma livre, fixa ou ancorada, afeta diretamente os resultados da análise de difração hidrodinâmica, impactando os operadores de amplitude de resposta da estrutura.

Na figura 10 mostra que, segundo Journée (2001), com relação à resposta do movimento de um cilindro, três áreas de frequência podem ser definidas, de acordo com a influência da restauração, massa adicional e amortecimento.

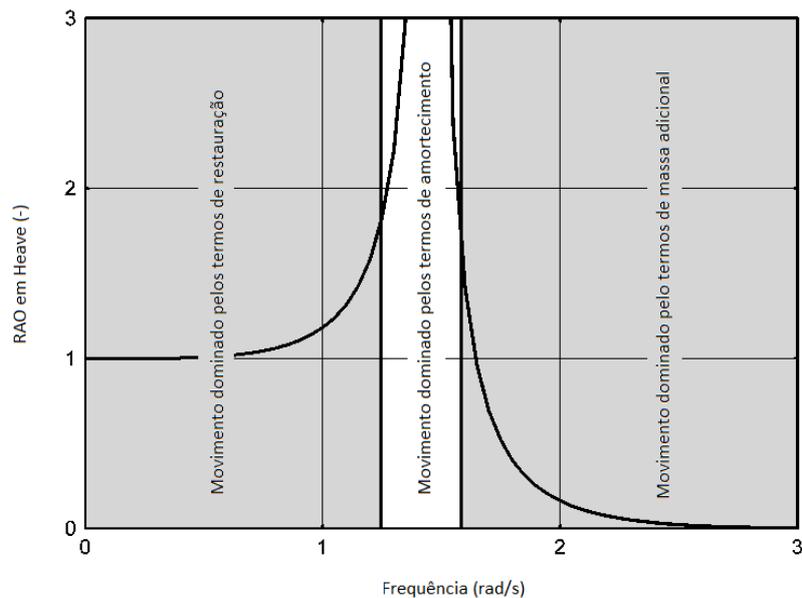


Figura 10 - Áreas de frequência em relação ao movimento em Heave. Fonte: Journée. (Adaptado)

2.8 SLOSHING

A movimentação da superfície livre da água pode ser denominada de *Sloshing*, podendo ser causado por qualquer perturbação em um recipiente líquido parcialmente preenchido, como ilustra a figura 11. Segundo Kumar (2013), a dinâmica do fluido altera o sistema dinâmico ou a estabilidade de forma significativa, quando o líquido interage com o recipiente.



Figura 11 - Efeito de Sloshing. Fonte: Omron. (Adaptado)

Absorvedores de energia que possuem uma geometria cilíndrica oca apresentam uma variação da força e do momento devido ao efeito de *Sloshing*, quando o dispositivo é submetido à movimentação vertical, no furo central do corpo, como mostra a figura 12.

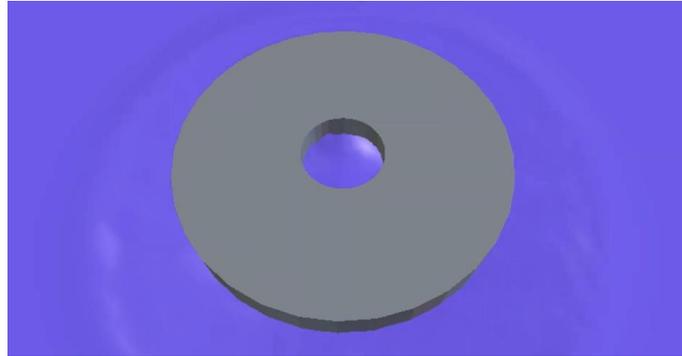


Figura 12 - Efeito de *Sloshing* no furo central de uma boia.

Para determinar o período natural desse efeito, segundo Gaillarde & Cotteleer (2004), são necessários o calado (d), o diâmetro do cilindro (b), a altura do cilindro (l) e a aceleração da gravidade (g), como mostra a equação abaixo.

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{d + 0,4l\sqrt{bl}}{g}} \quad (25)$$

Esta relação foi desenvolvida para a determinação do período natural em *moonpools*. Já para Jaiswal *et al.* (2008), a frequência natural do efeito de *Sloshing* em tanques cilíndricos pode ser determinada pela equação abaixo.

$$\omega_n = 2\pi \sqrt{\frac{D}{3,68g \tanh\left(3,68 \frac{h}{D}\right)}} \quad (26)$$

Em que D é o diâmetro do cilindro, h é a altura do cilindro e g é a aceleração da gravidade.

CAPÍTULO 3 - DESENVOLVIMENTO

O estudo do absorvedor de energia objetiva a instalação na região costeira do estado de Pernambuco, Brasil. Sua geometria consiste em uma boia, representada por um cilindro de furo central, e uma base, composta por dois cilindros acoplados.

A determinação da geometria foi feita através do estudo realizado por Shadman (2017), em que o autor realiza a otimização da geometria a partir de um modelo iterativo, determinando o melhor desempenho dentro de um intervalo de dimensões de um corpo predefinido, através do estudo das ondas predominantes no local.

Uma vez que os corpos foram definidos, as propriedades do dispositivo podem ser calculadas, como a massa, a matriz de inércia e o centro de gravidade. Essas propriedades são utilizadas como dados de entrada em softwares específicos em análises hidrodinâmicas.

A geometria pode ser desenvolvida em softwares apropriados para modelagem de sólidos e, posteriormente, ser importada, ou desenvolvida no próprio software de análises hidrodinâmicas. A partir disto, as propriedades supracitadas são inseridas e o eixo de referência é determinado, em que o plano XY localiza-se na superfície da água estática, e o eixo Z está orientado para cima.

A modelagem da malha deve ser determinada de tal forma que seu refinamento respeite as limitações dos softwares e que o sistema operacional do computador suporte as análises durante a simulação.

Os softwares utilizados, para o estudo do absorvedor de energia de ondas, foram o WAMIT e o ANSYS-AQWA, que fazem análises hidrodinâmicas lineares no domínio da frequência. Embora retornem informações para movimentos e forças em seis graus de liberdade, foi analisado somente o movimento em *Heave*, como citado anteriormente.

3.1 REGIÃO DE OPERAÇÃO

O estudo da energia de ondas depende diretamente da escolha da região de implementação do sistema de geração de energia elétrica por ondas oceânicas. A região de aplicação do absorvedor de energia foi escolhida de tal forma atender as necessidades da população pernambucana. Os dados do local foram obtidos através do Sistema de Previsão e

Monitoramento Costeiro (SIMCOS), ao longo da costa brasileira. Este possui vários modelos numéricos de última geração, que são utilizados no monitoramento e previsão das variáveis que possam afetar as atividades costeiras e *offshore*, e que fornecem informações e gráficos detalhados das características do vento e das ondas de cada ponto.

O ponto de monitoramento fornecido pelo SIMCOS (2018), na costa pernambucana, se localiza nas coordenadas $8^{\circ}01'20.6''S$ e $32^{\circ}31'06.6W$, localizado a cerca de 255 quilômetros da costa, como mostra a figura 13.

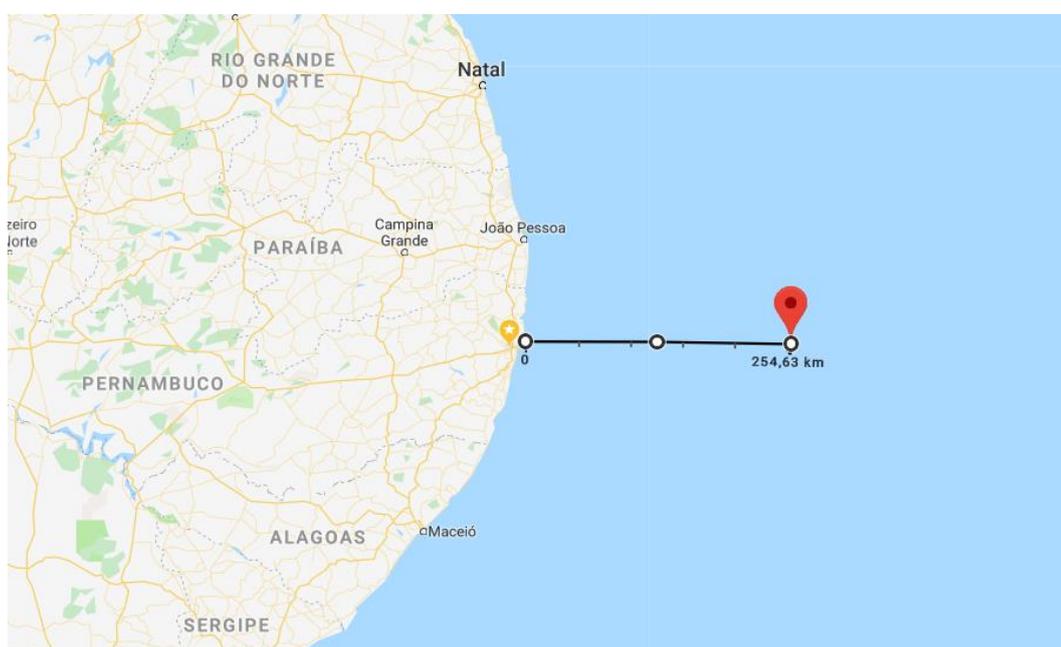


Figura 13 - Localização do ponto de estudo. Fonte: Google Maps.

A figura 14 mostra as características das ondas da região, como o período de pico em segundos e a altura significativa em metros, e do vento, como a velocidade em metros por segundo. O período registrado foi entre 26 de março até 04 de abril de 2018. Já a figura 15 mostra o gráfico das direções das ondas e do vento durante o mesmo intervalo de dias.

A partir da figura 14, foi possível obter os dados de altura e período significativo da região, que se trata da média de 1/3 dos maiores valores obtidos no intervalo em estudo, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Características das ondas locais.

CARACTERÍSTICAS DAS ONDAS LOCAIS	
Altura Significativa	1,48 metros
Período Significativo	6,33 segundos

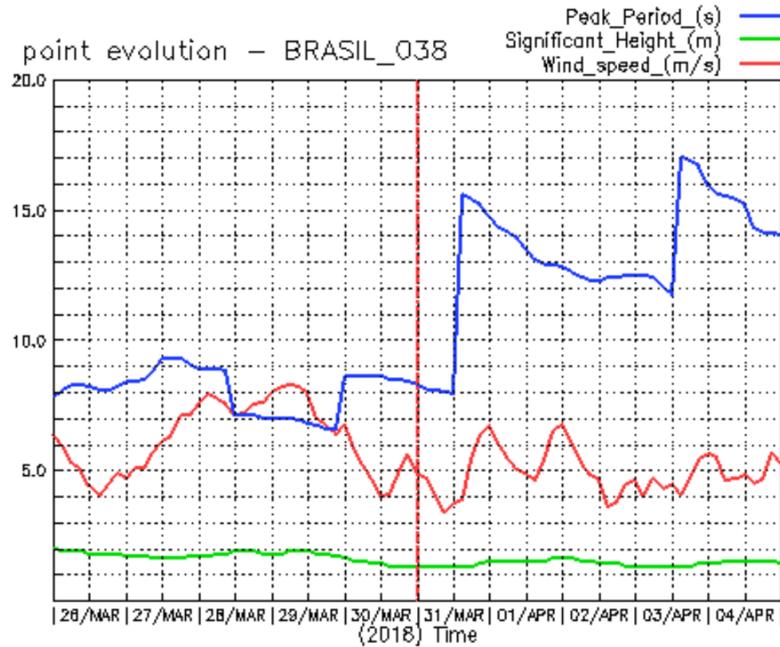


Figura 14 - Gráfico do comportamento das ondas e do vento na região de estudo. Fonte: SIMCOS.

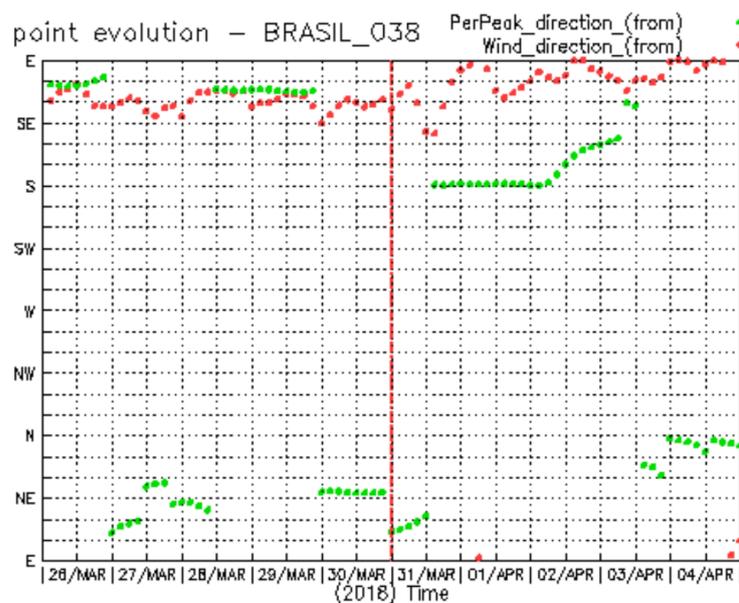


Figura 15 - Gráfico da direção das ondas e do vento na região de estudo. Fonte: SIMCOS.

3.2 GEOMETRIA

A geometria do absorvedor de energia a partir de ondas do mar é composta por dois corpos: uma base fixa cilíndrica em forma de T e um cilindro flutuante, tendo entre eles uma folga de 0,1 metros. O calado será considerado equivalente a 33 metros. O eixo de referência será fixado no plano de flutuação que contém o calado e no eixo de simetria axial do absorvedor.

Como citado anteriormente, foi utilizada a geometria idealizada por Shadman (2017), ilustrada na figura 16, em que as cotas representam as dimensões (m).

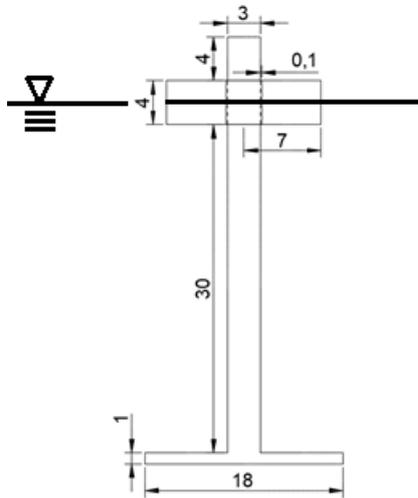


Figura 16 - Geometria em 2D com dimensões em metros.

A geração da geometria tridimensional foi feita no software AUTOCAD, na escala de 1:1. A base foi subdividida em duas partes, em um cilindro de raio de 9 m e altura de 1 m, e em outro cilindro de raio de 1,5 m e altura de 38 m. Feito isso, foi possível fazer a união dos sólidos para a confecção da base, como mostrado na figura 17.

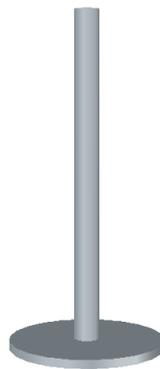


Figura 17 - Base do absorvedor.

Por fim, foi criado o corpo flutuante, que consiste em um cilindro com raio externo de 7 m, raio interno de 1,6 m e altura de 4 m, como ilustrado na figura 18.



Figura 18 - Corpo flutuante do absorvedor.

A figura 19 a seguir mostra a geometria final, com a junção da base e do corpo flutuante, obtida pelo AUTOCAD, nas vistas isométrica, longitudinal, de topo e de fundo do absorvedor de energia cilíndrico.

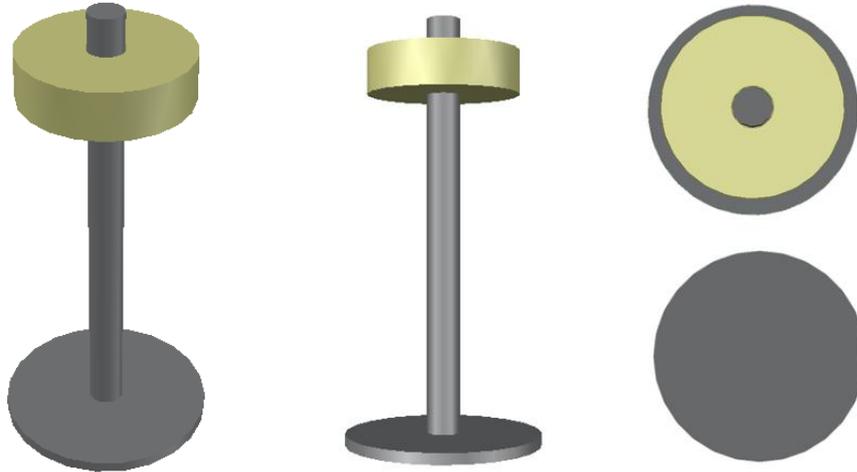


Figura 19 – Vista isométrica, lateral, de topo e de fundo, respectivamente, da geometria.

O corpo flutuante exerce uma movimentação na direção axial em relação à base, como mostra a figura 20. Como citado anteriormente, a base estará sob a influência de meios de fixação, através de um cabo de amarração ou tendão.

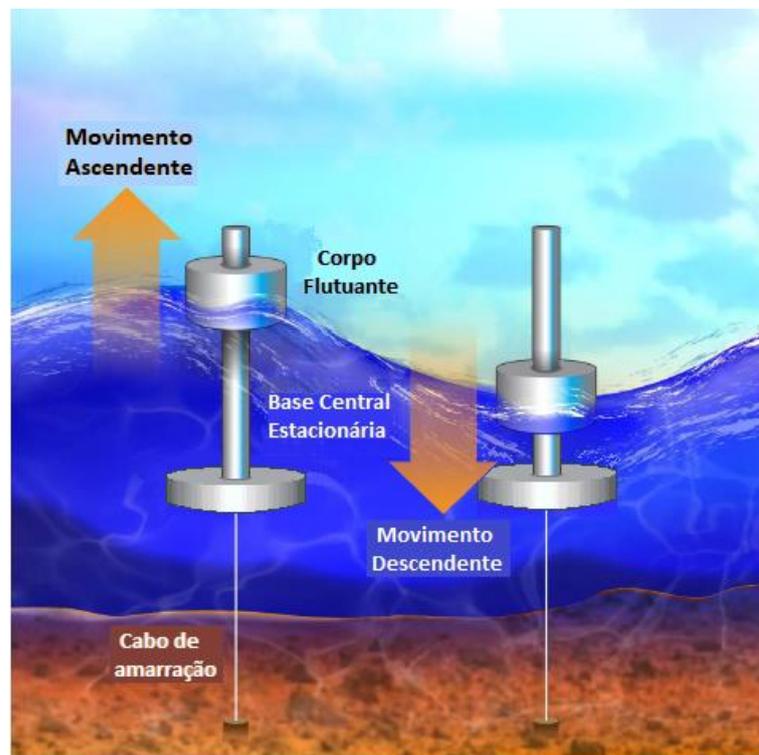


Figura 20 - Modelo do absorvedor em operação.

3.3 PROPRIEDADES

Como citado anteriormente, o conhecimento de algumas propriedades do dispositivo é de grande interesse como dados de entrada em softwares que têm finalidade realizar o cálculo do comportamento hidrodinâmico do absorvedor de energia no meio fluido. Estas propriedades são: massa, momento de inércia ou raio de giração e o centro de gravidade do dispositivo, que são demonstradas nos tópicos a seguir.

3.3.1 Massa

Para o cálculo da massa do dispositivo, deve ser feito o cálculo das espessuras, em que pode ser obtida através da relação entre força de empuxo e a força peso, como demonstra a equação a seguir:

$$EMPUXO = PESO \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{água}} V_D g = \rho_{\text{aço}} V_C g \quad \rightarrow \quad \rho_{\text{água}} V_D = \rho_{\text{aço}} V_C \quad (27)$$

Em que $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água do mar (kg/m^3), V_D é o volume deslocado (m^3), $\rho_{\text{aço}}$ é a massa específica do aço (kg/m^3), V_C é o volume estrutural do corpo (m^3), g é a aceleração da gravidade (m/s^2).

3.3.1.1 Empuxo

O empuxo depende apenas das dimensões externas do corpo, que estão submersas na água do mar. Então, o cálculo do volume deslocado foi calculado até o calado de projeto, considerando apenas as condições externas do corpo.

A parte 1 do corpo será representada pelo cilindro de menor altura da base e a parte 2 como o cilindro central de maior altura da base. Estes cilindros são calculados pelas áreas das bases circulares (πR^2) multiplicados pelas respectivas alturas (h):

$$V_{D_n} = \pi R_n^2 h_n \quad (28)$$

Já a parte 3 do corpo, que representa o corpo flutuante, o volume deslocado é calculado de maneira semelhante, porém descontando-se o volume não preenchido devido ao orifício interno de raio r , resultando na seguinte equação:

$$V_{Dn} = \pi R_n^2 h_n - \pi r_n^2 h_n \quad (29)$$

Em que n é o índice referente aos corpos analisados.

O volume deslocado total (V_D) é o somatório do volume deslocado das partes, logo:

$$V_D = V_{D1} + V_{D2} + V_{D3} \quad (30)$$

Na tabela 3 é ilustrado as partes em estudo, seguido das formulações e resultados obtidos para cada uma, seguido do resultado total do absorvedor.

Tabela 3 - Volume deslocado dos corpos.

	CORPO	VOLUME	RESULTADO
PARTE 1		$\pi R_1^2 h_1$	254,47 m ³
PARTE 2		$\pi R_2^2 h_2$	268,61 m ³
PARTE 3		$\pi(R_3^2 - r_3^2)h_3$	583,58 m ³
TOTAL	$V_D = V_{D1} + V_{D2} + V_{D3} = \pi R_1^2 h_1 + \pi R_2^2 h_2 + \pi(R_3^2 - r_3^2)h_3$		1.106,66 m ³

Em que V_{D_1} é o volume deslocado (m^3), R_1 é o raio externo do cilindro (m) e h_1 é a altura do cilindro (m), referentes ao corpo 1; V_{D_2} é o volume deslocado (m^3), R_2 é o raio externo do cilindro (m) e h_2 é a altura do cilindro (m), referentes ao corpo 2; e V_{D_3} é o volume deslocado (m^3), R_3 é o raio externo do cilindro (m), r_3 é o raio interno do cilindro (m) e h_3 é a altura do cilindro (m), referentes ao corpo 3.

E por fim, com o volume deslocado de cada parte, foi calculado a força de empuxo em cada um, admitindo que a aceleração da gravidade é igual a $9,81 \text{ m/s}^2$ e que os corpos se encontram em água do mar à uma massa específica igual a 1025 kg/m^3 . A partir do somatório das partes, pode-se obter o primeiro membro da equação (27), como mostra os resultados da tabela 4.

Tabela 4 - Força de Empuxo.

EMPUXO DO CORPO 1	2.558,75 kN
EMPUXO DO CORPO 2	2.700,90 kN
EMPUXO DO CORPO 3	5.868,06 kN
FORÇA DE EMPUXO TOTAL	11.127,71 kN

3.3.1.2 Volume

Como citado anteriormente, o volume deslocado depende das dimensões externas dos corpos. Já o volume do aço depende da espessura requerida pelo corpo, e pode ser definido como um somatório de partes do corpo.

As três partes foram decompostas, conforme a tabela 5, em que o volume de aço será o somatório das subdivisões feitas em cada uma, em função de suas respectivas espessuras. O volume total do corpo (V_c) é o somatório do volume dos corpos 1, 2 e 3, como mostra a equação abaixo.

$$V_c = V_{c_1} + V_{c_2} + V_{c_3} \quad (31)$$

Utilizando planilha eletrônica de cálculo, foi possível variar a espessura de cada corpo até que a diferença entre a força peso e a força de empuxo fosse igual a zero. Desta forma, foram obtidos que a espessura da chapa do corpo 1, 2 e 3 são aproximadamente 0,06, 0,10 e 0,16 metros, respectivamente. São chapas não encontradas com facilidade no mercado, sendo valores idealizados.

Tabela 5 - Volume de aço dos corpos.

CORPO	VOLUME	RESULTADO
PARTE 1 	$V_{ti1} = \pi R_1^2 e_1$ $V_{l1} = \pi R_1^2 (h_1 - 2e_1) - \pi (R_1 - e_1)^2 (h_1 - 2e_1)$ $V_{ts1} = \pi R_1^2 e_1 - \pi (R_1 - e_1)^2 e_1$ $V_{c1} = V_{ti1} + V_{l1} + V_{ts1}$	33,23 m ³
PARTE 2 	$V_{l2} = \pi R_2^2 (h_2 - e_2 + e_1) - \pi (R_2 - e_2)^2 (h_2 - e_2 + e_1)$ $V_{ts2} = \pi R_2^2 e_2$ $V_{c2} = V_{l2} + V_{ts2}$	35,07 m ³
PARTE 3 	$V_{ti3} = \pi R_3^2 e_3 - \pi (R_3 - r_3)^2 e_3$ $V_{li3} = \pi R_3^2 (h_3 - 2e_3) - \pi (R_3 - e_3)^2 (h_3 - 2e_3)$ $V_{le3} = \pi R_3^2 (h_3 - 2e_3) - \pi (R_3 - e_3)^2 (h_3 - 2e_3)$ $V_{ts3} = \pi R_3^2 e_3 - \pi (R_3 - r_3)^2 e_3$ $V_{c3} = V_{ti3} + V_{li3} + V_{le3} + V_{ts3}$	76,20 m ³
TOTAL	$V_c = V_{c1} + V_{c2} + V_{c3}$	144,50 m ³

Em que V_{ti_1} é o volume da tampa inferior (m^3), V_{l_1} é o volume lateral (m^3), V_{ts_1} é o volume da tampa superior (m^3), R_1 é o raio externo do cilindro (m), e_1 é a espessura da chapa (m), h_1 é a altura do cilindro (m), todos referentes ao corpo 1; V_{l_2} é o volume lateral (m^3), V_{ts_2} é o volume da tampa superior (m^3), R_2 é o raio externo do cilindro (m), e_2 é a espessura da chapa (m), h_2 é a altura do cilindro (m), todos referentes ao corpo 2; V_{ti_3} é o volume da tampa inferior (m^3), V_{li_3} é o volume lateral interno (m^3), V_{le_3} é o volume lateral externo (m^3), V_{ts_3} é o volume da tampa superior (m^3); R_3 é o raio externo do cilindro (m), r_3 é o raio interno do cilindro (m), e_3 é a espessura da chapa (m), h_3 é a altura do cilindro (m), todos referentes ao corpo 3.

3.3.1.3 Massa

Segundo Croxon (2015), o aço A36 é um aço leve e com baixo teor de carbono utilizado primariamente como um material estrutural, e utilizado em barras. Ele é relativamente simples quimicamente, o que mantém seu custo baixo, facilmente soldável e amplamente disponível. Possui massa específica igual a aproximadamente 7850 kg/m^3 .

Com o volume estrutural total do corpo, pode-se multiplicar pela massa específica do corpo, em que o material será considerado aço A36. Logo, a massa total do corpo, M_T , é dada por:

$$M_T = \rho_{\text{açoA36}} V_c = 7850 V_c \quad (32)$$

Com o volume de aço calculado, foi possível calcular a massa dos corpos e total do absorvedor, como mostra a tabela 6.

Tabela 6 - Massa.

MASSA DO CORPO 1	260,83 ton
MASSA DO CORPO 2	275,32 ton
MASSA DO CORPO 3	598,17 ton
MASSA TOTAL	1.134,32 ton

Então, a massa total referente a base equivale à 536,15 toneladas, enquanto o corpo flutuante equivale à 598,17 toneladas.

3.3.2 Centroide

Centroide pode ser definido como o centro geométrico de um corpo, de uma superfície ou de uma linha. Para formas conhecidas e simples, a determinação do centroide se torna fácil e objetiva. O cálculo do centroide de um corpo genérico, ilustrado na figura 21, pode ser determinado pela equação (33).

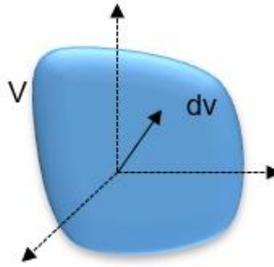


Figura 21 - Sólido genérico para cálculo do centroide.

$$\bar{x} = \frac{\int_V x dV}{\int_V dV} \quad \bar{y} = \frac{\int_V y dV}{\int_V dV} \quad \bar{z} = \frac{\int_V z dV}{\int_V dV} \quad (33)$$

A localização do centroide pode ser especificada parcial ou completamente pelas condições de simetria. Nos casos em que o volume tem um eixo de simetria, o centroide estará localizado ao longo dele.

Em caso de sólidos compostos, pode-se fazer a sua divisão para figuras conhecidas e simples, substituindo integrais por sinais de somatório finito, demonstrados nas fórmulas seguintes.

$$\bar{x} = \frac{\sum \bar{x}V}{\sum V} \quad \bar{y} = \frac{\sum \bar{y}V}{\sum V} \quad \bar{z} = \frac{\sum \bar{z}V}{\sum V} \quad (34)$$

Como o corpo em estudo possui simetria no eixo x e no eixo y, o centroide está localizado na origem destas duas coordenadas. Já no eixo z, foram calculados o centroide dos três corpos separadamente e, posteriormente, calculado o centroide do volume total.

Como foi definido anteriormente, o eixo de referência situa-se no plano de flutuação, contendo o calado de projeto. Os resultados em relação ao eixo x, ao eixo y e ao eixo z, estão representados, respectivamente, nas tabelas 13, 14 e 15.

Tabela 7 - Centroide em relação ao eixo x.

C_x do corpo 1	0 m
C_x do corpo 2	0 m
C_x do corpo 3	0 m
C_x	0 m

Tabela 8 - Centroide em relação ao eixo y.

C_y do corpo 1	0 m
C_y do corpo 2	0 m
C_y do corpo 3	0 m
C_y	0 m

Tabela 9 - Centroide em relação ao eixo z.

C_z do corpo 1	-32,51 m
C_z do corpo 2	-12,70 m
C_z do corpo 3	0 m
C_z	-10,56 m

Portanto, utilizando as relações da equação (34), o corpo flutuante terá as coordenadas (0,0,0) e a base as coordenadas (0,0,-22) como centroide em relação ao eixo de referência.

3.3.3 Momento de inércia

Momento de Inércia, também chamado de inércia rotacional, possui uma ação física análoga a massa para um movimento linear. Esta grandeza aparece numa dinâmica para corpos em movimento rotacional, que deve ser especificado com relação aos eixos de rotação. (BENTO, 2016)

Este pode ser definido pela equação (35), em que relaciona massa e a distância perpendicular ao eixo de rotação, para um centro de massa, em quilogramas e metros, respectivamente.

$$I = mr^2 \quad (35)$$

3.3.3.1 Momento de inércia do cilindro no eixo z

Na figura 22, mostra um cilindro oco de comprimento l , raio interno R_1 e externo R_2 .

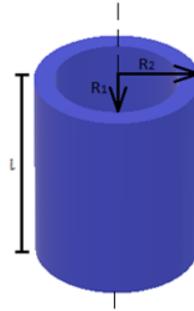


Figura 22 - Momento de inércia do cilindro oco.

Para o cálculo do momento de inércia, escolhe-se o elemento de volume mais conveniente de uma fina camada cilíndrica de raio r , espessura dr e de comprimento l , como mostra a figura 23.

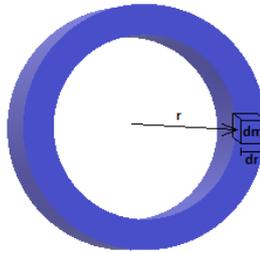


Figura 23 - Momento de inércia do cilindro oco.

Sendo ρ a massa específica do material, são estabelecidas as relações a seguir:

$$dm = \rho dV = \rho(2\pi r dr)l \quad (36)$$

$$I = \int r^2 dm = 2\pi l \int_{R_1}^{R_2} \rho r^3 dr \quad (37)$$

Para um sólido homogêneo, tem-se que:

$$I = 2\pi l \rho \int_{R_1}^{R_2} r^3 dr = \frac{\pi l \rho}{2} (R_2^4 - R_1^4) = \frac{\pi l \rho}{2} (R_2^2 - R_1^2)(R_2^2 + R_1^2) \quad (38)$$

Sabendo que a massa m do cilindro inteiro é igual ao produto de sua massa específica pelo seu volume, logo:

$$V = \pi l (R_2^2 - R_1^2) \quad e \quad V = \frac{m}{\rho} \quad \therefore \quad m = \pi l \rho (R_2^2 - R_1^2) \quad (39)$$

Então, o momento de inércia de um cilindro oco será igual a:

$$I = \frac{1}{2}m(R_2^2 + R_1^2) \quad (40)$$

Para cilindros sólidos, ou seja, $R_1 = 0$, e representando o raio externo por R , tem-se que:

$$I = \frac{1}{2}mR^2 \quad (41)$$

Já para cilindros com parede muito fina, ou seja, $R_1 = R_2$, e representando-se R o valor comum aos dois raios, tem-se que:

$$I = mR^2 \quad (42)$$

3.3.3.2 Momento de inércia do cilindro nos eixos x e y

O desenvolvimento da expressão para o momento de inércia de um cilindro para o eixo x e o eixo y se torna análoga pelo fato de o cilindro ser isométrico, quando o eixo é posicionado em seu centro. Para isso, usa-se o teorema do eixo paralelo e o teorema do eixo perpendicular. A abordagem envolve encontrar uma expressão para um disco fino em uma distância z do eixo, como mostra a figura 24, e somar sobre todos esses discos.

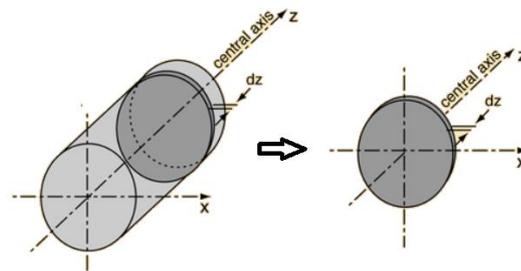


Figura 24 - Momento de inércia do cilindro no eixo x. Fonte: NAVE.

Para um disco infinitesimalmente fino, de espessura dz , o momento de inércia sobre o eixo central é expresso por:

$$dI_z = \frac{1}{2}dmR^2 \quad (43)$$

Em que dm é o diferencial de massa e R é o raio do cilindro. Pelo teorema do eixo perpendicular, tem-se que:

$$dI_z = dI_x + dI_y \quad (44)$$

Uma vez que os momentos de inércia X e Y devem ser iguais, por simetria, a equação acima pode ser expressa como:

$$dI_x = \frac{1}{2} dI_z = \frac{1}{4} dmR^2 \quad (45)$$

Obter o momento de inércia do cilindro completo envolve o somatório de um número infinito de discos finos a diferentes distâncias desse eixo. Logo, pode ser admitida uma integral variando de $z = 0$ a $z = L$. Para qualquer disco em uma distância z do eixo x , como ilustra a figura 25, usa-se o teorema do eixo paralelo para calcular o momento de inércia sobre o eixo x .

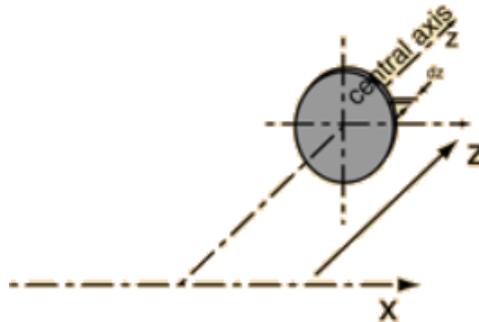


Figura 25 - Momento de inércia do cilindro no eixo x. Fonte: NAVE.

$$dI_x = \frac{1}{4} dmR^2 + dmz^2 \quad (46)$$

Expressando o elemento de massa dm em termos de z , pode-se integrar ao longo do comprimento do cilindro.

$$I_x = \int_0^L dI_x = \frac{R^2 M}{4 L} \int_0^L dz + \frac{M}{L} \int_0^L z^2 dz = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{3} ML^2 \quad (47)$$

Onde M é a massa total do cilindro em quilogramas, R é o raio do cilindro em metros, L é a altura do cilindro em metros.

Se considerar $R = 0$, obtém-se a expressão da haste fina e se considerar $L = 0$, obtém-se a expressão do disco fino. Por simetria:

$$I_y = I_x = \int_0^L dI_y = \frac{R^2 M}{4 L} \int_0^L dz + \frac{M}{L} \int_0^L z^2 dz = \frac{1}{4} MR^2 + \frac{1}{3} ML^2 \quad (48)$$

Os resultados dos momentos de inércia foram obtidos através do software AUTOCAD, que se baseia na teoria apresentada acima. Como foi definido anteriormente, o eixo de referência situa-se no plano de flutuação, contendo o calado de projeto.

Os momentos de inércia em relação ao eixo x, ao eixo y e ao eixo z, estão representados respectivamente nas tabelas abaixo, levando ainda em consideração a divisão do corpo em três partes, apresentadas anteriormente.

Tabela 10 - Momento de inércia em relação ao eixo x.

I_x DO CORPO 1	$35.856,64 \text{ m}^4$	$281.474,65 \text{ t. m}^2$
I_x DO CORPO 2	$10.069,00 \text{ m}^4$	$79.041,65 \text{ t. m}^2$
I_x DO CORPO 3	$1.391,13 \text{ m}^4$	$10.920,39 \text{ t. m}^2$
I_x	$47.316,78 \text{ m}^4$	$371.436,69 \text{ t. m}^2$

Tabela 11 - Momento de inércia em relação ao eixo y.

I_y DO CORPO 1	$35.856,64 \text{ m}^4$	$281.474,65 \text{ t. m}^2$
I_y DO CORPO 2	$10.069,00 \text{ m}^4$	$79.041,65 \text{ t. m}^2$
I_y DO CORPO 3	$1.391,13 \text{ m}^4$	$10.920,39 \text{ t. m}^2$
I_y	$47.316,78 \text{ m}^4$	$371.436,69 \text{ t. m}^2$

Tabela 12 - Momento de inércia em relação ao eixo z.

I_z DO CORPO 1	$1.481,80 \text{ m}^4$	$11.632,16 \text{ t. m}^2$
I_z DO CORPO 2	$73,17 \text{ m}^4$	$574,39 \text{ t. m}^2$
I_z DO CORPO 3	$2.377,30 \text{ m}^4$	$18.661,77 \text{ t. m}^2$
I_z	$3.932,27 \text{ m}^4$	$30.868,33 \text{ t. m}^2$

Portanto, o corpo flutuante terá as inércias no eixo x e y equivalentes a $10.920,39 \text{ t.m}^2$ e no eixo z equivalente a $18.661,77 \text{ t.m}^2$. A base terá as inércias no eixo x e y equivalentes a $360.516,3 \text{ t.m}^2$ e no eixo z equivalente a $12.206,55 \text{ t.m}^2$.

3.3.4 Raio de giração

O raio de giração, definido abaixo, representa a distância ao eixo ou ponto correspondente na qual se pode concentrar toda a área da superfície, de modo que se tenha o mesmo momento de inércia. (LAGES, 2018)

$$k = \sqrt{\frac{I}{m}} \quad (49)$$

Em que k é o raio de giração, I é o momento de inércia e m é a massa do corpo.

Os resultados do raio de giração em relação ao eixo x, ao eixo y e ao eixo z, estão representados respectivamente nas tabelas abaixo, levando ainda em consideração a divisão do corpo em três partes, apresentadas anteriormente.

Tabela 13 - Raio de giração em relação ao eixo x.

K_x DO CORPO 1	32,85 m
K_x DO CORPO 2	16,94 m
K_x DO CORPO 3	4,27 m
K_x	18,10 m

Tabela 14 - Raio de giração em relação ao eixo y.

K_y DO CORPO 1	32,85 m
K_y DO CORPO 2	16,94 m
K_y DO CORPO 3	4,27 m
K_y	18,10 m

Tabela 15 - Raio de giração em relação ao eixo z.

K_z DO CORPO 1	6,68 m
K_z DO CORPO 2	1,44 m
K_z DO CORPO 3	5,59 m
K_z	5,22 m

Portanto, utilizando as relações da equação (49), o corpo flutuante terá os raios de giração no eixo x e y equivalentes a 4,27 m e no eixo z equivalente a 5,59 m. A base terá as inércias no eixo x e y equivalentes a 25,93 m e no eixo z equivalente a 4,77 m.

3.4 SOFTWARES PARA ANÁLISES HIDRODINÂMICAS

Existem vários programas computacionais disponíveis comercialmente, que tem como objetivo fazer análises hidrodinâmicas, como o WAMIT e o ANSYS-AQWA, que são utilizadas ao longo do trabalho. Ambos resolvem o problema de valor de contorno da onda a partir da teoria linear, em que as condições de superfície livre e os valores de contorno são linearizadas, e o fluxo é assumido como potencial, livre de separação ou efeitos de elevação.

Segundo Bosma (2013), o WAMIT e o ANSYS-AQWA usam o método dos elementos de contorno, que se trata de um método computacional para a solução de sistemas de equações diferenciais, formuladas em forma integral, para encontrar potenciais de velocidade de difração e radiação. De acordo com MEI (1978), em geral, o método dos elementos de contorno aplica as funções de fonte ou dipolo nas superfícies dos corpos submersos, e resolve sua força de modo que todas as condições de contorno sejam atendidas.

Com os cálculos dos potenciais de velocidade de difração e radiação, podem-se obter, a partir dos programas, as forças de excitação, a matriz de massa e inércia adicional, a matriz de amortecimento, o campo de pressões da onda e a elevação da superfície da água no domínio da frequência.

O pré-processamento e pós-processamento dos dados, a interface do software e cálculos complementares são algumas diferenças entre o WAMIT e o ANSYS-AQWA. Apesar de ambos fornecerem uma interface gráfica limitada, os dados de saída podem ser obtidos através de arquivos de textos, que fornece a possibilidade de serem processados em outros programas, com finalidade de realizar cálculos externos de interesse do usuário.

O WAMIT fornece alto nível de controle sobre a configuração e acesso a uma ampla gama de saídas de dados, admitindo um amplo intervalo e pequenas variações entre as frequências fornecidas como dados de entrada. Os cálculos de estabilidade não são fornecidos, mas podem ser obtidos através do software SSTAB.

Já o ANSYS-AQWA, possui mais ferramentas computacionais de pós-processamento, onde realizam-se as análises no domínio da frequência, análise no domínio do tempo e cálculos de estabilidade. Ele, porém, não admite um amplo intervalo e nem pequenas variações entre as frequências de *input*.

Os códigos atuais destinados aos absorvedores de energia do mar são adaptações de códigos utilizados para o estudo da dinâmica das embarcações. Em geral, essas embarcações são estruturas muito maiores e de corpo único. Desta forma, a aplicação desses códigos, em corpos de pequenas dimensões e de múltiplos corpos interagindo entre si, pode levar a problemas de convergência e precisão. Isso pode ser parcialmente atribuído aos efeitos não-lineares que influenciam mais o desempenho do sistema em menor escala. (BOSMA, 2013, p.22)

Os sistemas hidrodinâmicos assumem que a superfície da água, quando estática, está situado no plano xy e z é positivo para cima. Ao cortar o plano xy , tanto no ANSYS-AQWA quanto no WAMIT, o nível do mar coincide com o plano em que a geometria do corpo é dividida para formar seções acima da água, em que não há difração, e abaixo da água, em que há difração. Todas as estruturas estão localizadas em um espaço de análise global.

Em ambos os softwares, a massa estrutural total e os momentos de inércia (I_{xx} , I_{yy} e I_{zz}) são definidas manualmente, em que a massa será igual à massa de água deslocada e a posição horizontal do centro de flutuabilidade. Também deve ser definida a posição do centro de massa, que, devido à simetria do corpo, se encontra no eixo central do corpo, e torna-se relevante apenas a posição no eixo z .

O ANSYS-AQWA fornece opções para configurar a profundidade e o tamanho do volume de controle em relação à água do mar. É importante que a profundidade de água seja especificada corretamente, especialmente em condição de águas rasas, uma vez que o leito do mar atua como uma condição de limite para a análise de difração.

Como não foram encontradas fontes que pudessem fornecer a profundidade aproximada da região em estudo, admitiu-se uma profundidade igual a 200 metros, a fim de obter resultados sem a influência do leito do mar. Ou seja, foi considerado que o absorvedor de energia se situa em águas profundas. No WAMIT, foi utilizado a profundidade padrão, de águas profundas.

3.4.1 Geometria

3.4.1.1 Geometria no ANSYS-AQWA

O software ANSYS-AQWA apenas processa os corpos compostos por linhas ou superfícies, não reconhecendo, desta forma, sólidos ou qualquer outro tipo de corpo diferente destes. A geometria foi importada do software AUTOCAD para o ANSYS, em que foi reconhecida como um sólido pela extensão do AQWA. Desta forma, foram feitas algumas

modificações para posterior reconhecimento e viabilização da geração de resultados necessários pelo programa.

A primeira medida para a transformação do sólido em superfícies foi o uso da ferramenta *Freeze*, que tem como objetivo não realizar alterações nas partes congeladas. Posteriormente, foi utilizado a ferramenta *Unfreeze*, que tem como objetivo realizar alterações nas partes não congeladas, para descongelar apenas a parte submersa do absorvedor de energia. Desta forma, pode-se fazer quaisquer alterações na parte submersa sem influenciar na parte imersa.

Finalmente, foi utilizada a ferramenta *Thin/Surface* para transformar o sólido que compreende a parte submersa do absorvedor em superfícies. Feito isso, mais uma vez foi utilizada a ferramenta *Freeze* para congelar o absorvedor de energia e repetir o processo para a parte emersa. Com as partes submersa e emersa transformadas em superfícies, foi utilizada pela terceira vez a ferramenta *Freeze* para que não fossem mais realizadas alterações no absorvedor. Ainda, para fazer o estudo do modelo na extensão ANSYS-AQWA, as quatro partes do absorvedor (base emersa, base submersa, corpo flutuante emerso e corpo flutuante submerso) devem ser transformadas em apenas uma parte.

Portanto, foi utilizada a ferramenta *Form New Part* para agrupar os quatro corpos em uma única parte. Porém, apesar de transformada em apenas uma parte, ela está subdividida nos quatro corpos citadas anteriormente, não havendo união entre elas. Esta divisão da base e do corpo flutuante existe pelo fato que o modelo está dividido na linha de água.

A figura 26 mostra essas ferramentas sendo utilizadas no ANSYS-AQWA, para a transformação dos corpos em superfícies. Na figura 27 há o resultado obtido da geometria, após realizar as devidas modificações.

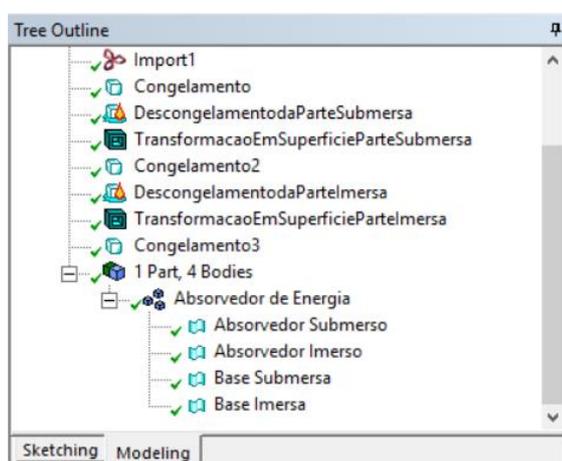


Figura 26 - Processos realizados no software ANSYS-AQWA.

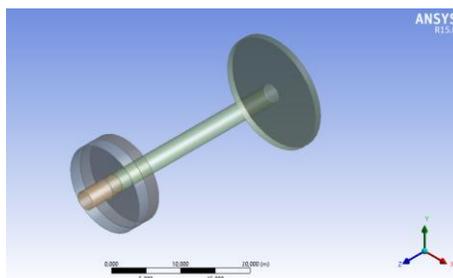


Figura 27 - Geometria no software ANSYS-AQWA.

No ANSYS-AQWA não é possível empregar a simetria no corpo, para reduzir a malha a apenas uma porção replicável do corpo, como no WAMIT. O dispositivo deve ser modelado por completo para o estudo. Ao abrir um sistema de análise hidrodinâmica, o editor do ANSYS-AQWA anexa automaticamente a geometria, reconhecendo as parcelas submersas e emersas na água, contendo os elementos difratáveis e os não difratáveis, respectivamente.

3.4.1.2 Geometria no WAMIT

O modelo pôde ser desenvolvido no software Mesh Generator, posteriormente, foi exportado para o WAMIT. Este programa possui modelos pré-produzidos, como cilindros, em que suas dimensões podem ser variadas de acordo com o interesse do usuário. Porém, o dispositivo deve ser feito de forma separada, gerando dois arquivos referentes à geometria, um referente ao corpo flutuante e o outro referente à base.

Logo, para a confecção do corpo flutuante, foram utilizados o modelo pré-produzido nas dimensões desejada, que nesse caso foram dois cilindros concêntricos. Da mesma forma foi feito para a base, em que foram gerados dois cilindros, acoplados entre si. Desta forma, a confecção da geometria no WAMIT foi mais rápida e prática, em comparação com a confecção do modelo para no ANSYS-AQWA.

Outra vantagem é que no WAMIT não é necessário separar o corpo em parte emersa e submersa, devendo-se apenas situar o eixo no plano diametral, na altura do calado desejado. O corpo flutuante e a base confeccionadas no Mesh Generator são ilustradas, respectivamente, nas figuras 28 e 29.

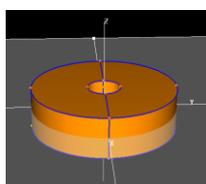


Figura 28 - Corpo flutuante no software WAMIT.

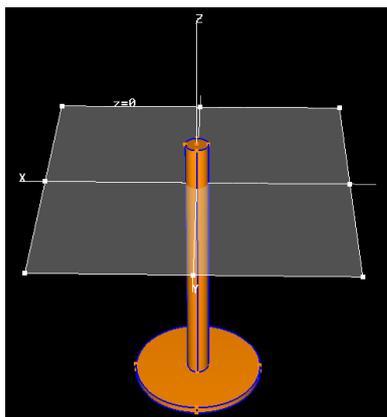


Figura 29 - Base no software WAMIT.

3.4.2 Malha

Uma grande parte do processo de modelagem inclui a geração de uma malha, em que os softwares e que define o tempo de simulação e a precisão dos resultados.

Quanto maior o tamanho máximo do elemento, conseqüentemente, menor a quantidade total de elementos no dispositivo, menor será o tempo de simulação e menor será a precisão dos resultados. Desta forma, uma malha com elementos pequenos é mais coerente, visto que fornecerá resultados mais precisos. Porém, devido à capacidade computacional e ao elevado tempo de simulação, o tamanho do elemento da malha deve ser cuidadosamente escolhido, para que se tenha resultados satisfatórios.

3.4.2.1 Malha no ANSYS-AQWA

A solução depende do sistema operacional do computador utilizado. No ANSYS-AQWA, na versão de 32 bits, o solucionador é limitado a 18.000 elementos, dos quais 12.000 podem estar sendo difratados, e na versão de 64 bits, o solucionador é limitado a 40.000 elementos, dos quais 30.000 podem estar sendo difratados. Além disso, o tamanho máximo do elemento está explicitamente relacionado à frequência de onda máxima que pode ser utilizada na análise de difração. (ANSYS, 2018)

A geração da malha se dá no corpo inteiro, tanto na parte submersa quanto na parte emersa, como mostra na figura 30. Desta forma, haverá elementos difratáveis e não difratáveis, respectivamente. A tabela 16 se refere as características da malha gerada no ANSYS-AQWA.

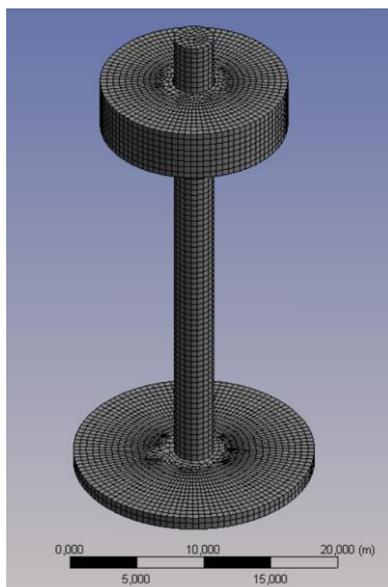


Figura 30 - Malha gerada no programa ANSYS-AQWA.

Tabela 16 - Características da malha gerada no ANSYS-AQWA.

Tolerância dos elementos (m)	0,25
Tamanho do elemento máximo (m)	0,80
Frequência máxima permitida (Hz)	0,665
Número total de nós	8.615
Número total de elementos	8.622
Número total de nós difratáveis	6.846
Número total de elementos difratáveis	6.785
Número de nós no corpo flutuante	3.059
Número de elementos no corpo flutuante	3.062
Número de nós difratáveis no corpo flutuante	1.590
Número de elementos difratáveis no corpo flutuante	1.535
Número de nós na base	5.556
Número de elementos na base	5.560
Número de nós difratáveis na base	5.256
Número de elementos difratáveis na base	5.250

3.4.2.2 Malha no WAMIT

No WAMIT, não foram encontradas limitações quanto ao sistema operacional do computador utilizado. Desta forma, foi utilizado o bom senso em relação a geração da malha, levando em consideração a capacidade computacional do computador, bem como o tempo de simulação e a ânsia de obter resultados coerentes e satisfatórios.

A geração da malha se dá apenas na parte submersa, como mostra na figura 31, permitindo gerar uma malha estruturada com possibilidade de utilização de simetria, para

simplificar cálculos computacionais. Desta forma, haverá apenas elementos difratáveis. A tabela 17 se refere as características da malha gerada no WAMIT.

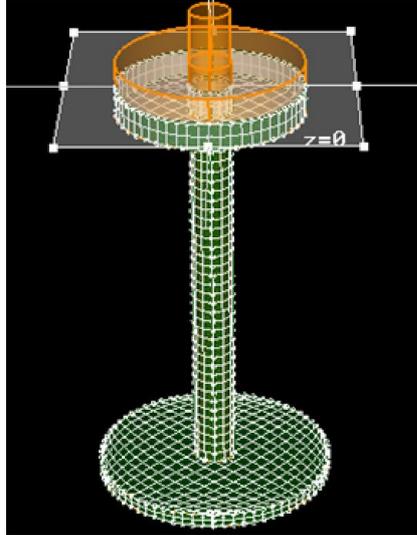


Figura 31 - Malha gerada no programa WAMIT.

Tabela 17 - Características da malha gerada no WAMIT.

Tolerância dos elementos (m)	0,05
Tamanho do elemento máximo (m)	0,80
Número total de nós	2.015
Número total de elementos	1.880
Número de nós no corpo flutuante	730
Número de elementos no corpo flutuante	608
Número de nós na base	1.285
Número de elementos na base	1.272

3.4.3 Frequência das ondas

Na análise no domínio da frequência, um intervalo e um número de frequências ou períodos são especificados para a simulação.

O intervalo de frequências pode ser definido através do padrão do software, ou definido manualmente, a fim de obter resultados mais detalhados. Desta forma, foi escolhido inserir manualmente o intervalo de frequência mais conveniente.

O ANSYS-AQWA é limitado em 50 frequências dentro do intervalo de estudo. Portanto, foi determinado o intervalo entre 0,031 e 2,275 rad/s, ou seja, em um período compreendido entre 200 e 2,760 s, com um intervalo entre frequências de 0,084 rad/s.

Já no WAMIT, não foram encontradas limitações de quantidades de frequências dentro de um intervalo, então determinou-se utilizar 1.000 frequências dentro do intervalo. Desta forma, foi determinado o intervalo entre 0,307 e 12,566 rad/s, ou seja, em um período compreendido entre 20,480 e 0,5 s, com um intervalo entre períodos de 0,02 s.

Na tabela 18, resume-se as informações anteriores, contendo a quantidade de pontos e o intervalo de estudo nos dois softwares.

Tabela 18 - Frequências analisadas nos softwares.

	ANSYS-AQWA	WAMIT
Quantidade de pontos analisados	50	1.000
Intervalo de frequências (rad/s)	0,031 – 2,275	0,307 – 12,566

3.4.4 Direção das ondas

A direção das ondas se avalia pelo ângulo de incidência da onda no dispositivo. Nos softwares, este pode variar entre -180° e 180° em um corpo, sendo o intervalo entre os ângulos especificado pelo usuário, e podendo assumir uma vasta gama de direções de incidência.

Aumentar o número de ângulos tem um impacto relativamente pequeno no tempo de simulação. Para um corpo assimétrico, a variação do ângulo de incidência pode ser uma informação bastante valiosa em que, para cada ângulo, os resultados assumem valores distintos entre si. (BOSMA, 2013)

Como o modelo em estudo possui uma simetria axial, ou seja, é radialmente simétrico em relação ao eixo z, a variação do ângulo de incidência não é um fator necessário, por gerar resultados equivalentes entre si. Desta forma, foi estudado apenas o ângulo de incidência equivalente a 0° .

3.4.5 Análise no domínio da frequência

O cálculo da resposta no domínio da frequência permite obter o comportamento dos RAO's, que levam ao cálculo da energia de saída, com base nos valores obtidos das forças de excitação e radiação.

Como citado anteriormente, o programa utiliza a teoria linear, em que, a partir da matriz de massa adicional, amortecimento e forças externas, pode-se obter os operadores de amplitude

e o espectro de resposta. Segundo Bosma (2013), o principal benefício desse tipo de análise é a capacidade de fazer um estudo sistemático de parâmetros, a partir dos operadores de amplitude de resposta, a fim de obter previsões de energia para o dispositivo.

3.4.6 Análise das forças de excitação

Uma vez que todos os parâmetros exigidos foram determinados em cada um dos softwares, foi possível realizar a análise das forças de excitação, subdividida pelas forças de Froude-Krylov e de difração, no caso do software ANSYS-AQWA, e da relação de Haskind, no caso do software WAMIT.

Esta análise determina os cálculos de resposta às forças na estrutura sob o efeito das ondas, bem como as respostas hidrostáticas e hidrodinâmicas. Os dados de saída pelo programa incluem as forças de Froude-Krylov, as forças de difração, a matriz de amortecimento e a matriz de massa e inércia adicional no domínio da frequência. Os resultados devem apresentar características semelhantes, apesar de nomenclaturas e metodologias diferentes no cálculo das forças de excitação da onda, visto que são desenvolvidos para análise de uma mesma finalidade.

Primeiro, será avaliado o corpo flutuante sem a presença da base. Esse estudo é realizado com finalidade de analisar a geometria de maior interesse em relação à sua movimentação em *Heave*, visto que se estabeleceu que a base fica com movimentação restrita devido aos cabos de amarração. As figuras 32 e 33 representam os dados de saída obtidos no ANSYS-AQWA e no WAMIT, dos módulos das forças de excitação e das respectivas fases, respectivamente.

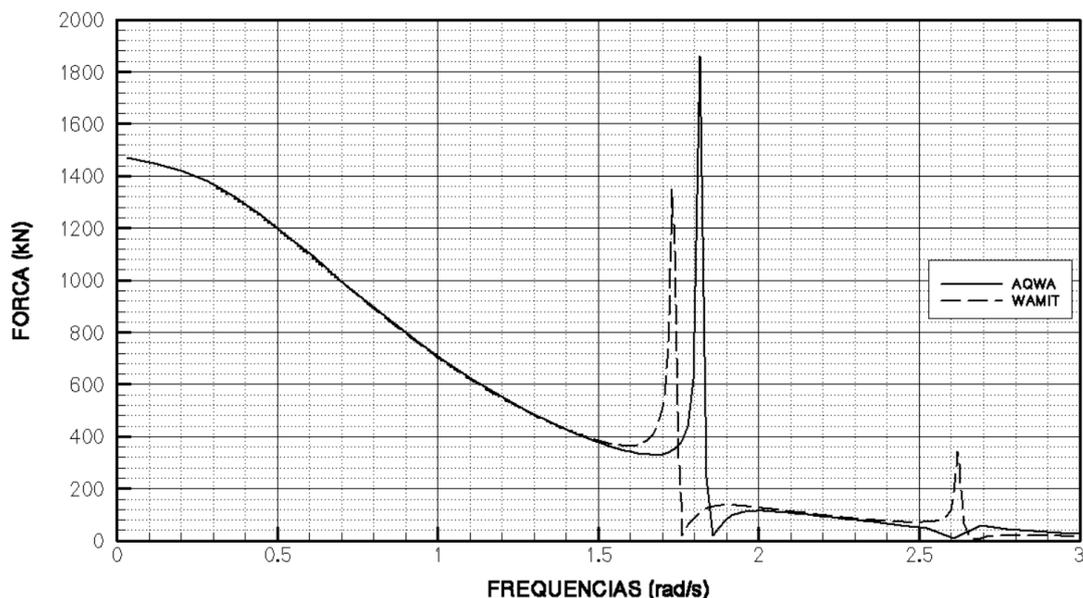


Figura 32 - Força de excitação no corpo flutuante em *Heave*, sem a presença da base.

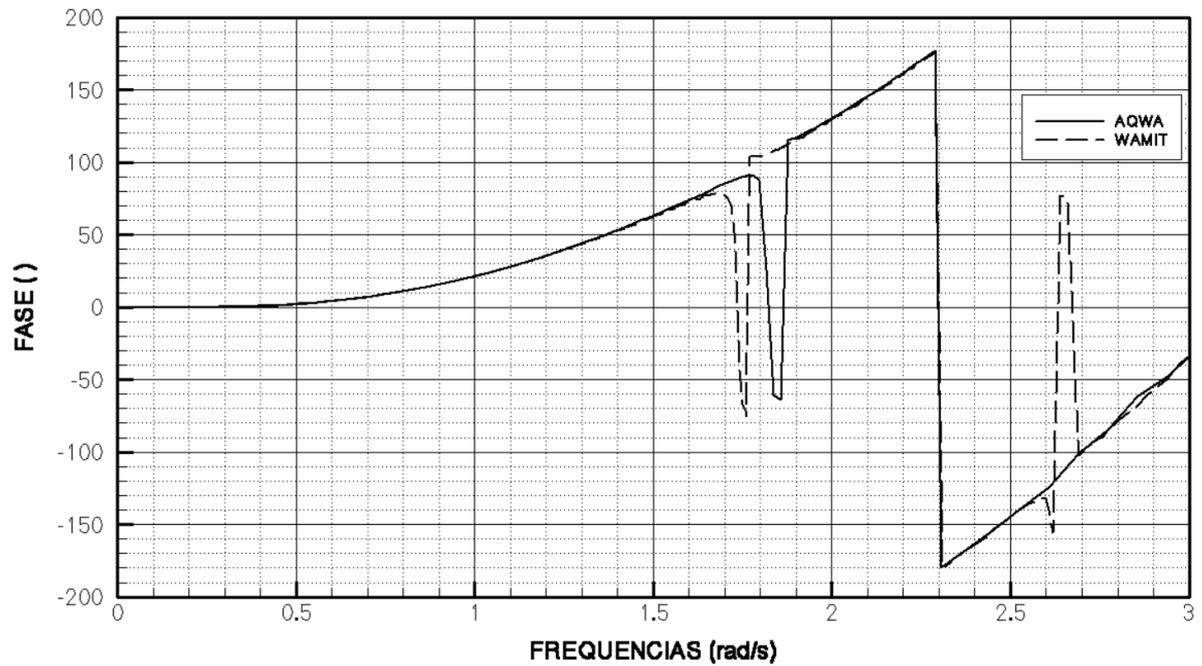


Figura 33 - Fase de excitação no corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.

As figuras 34 e 35 são apresentadas a massa adicional e o amortecimento, respectivamente, em *Heave* do corpo flutuante, sem a presença da base.

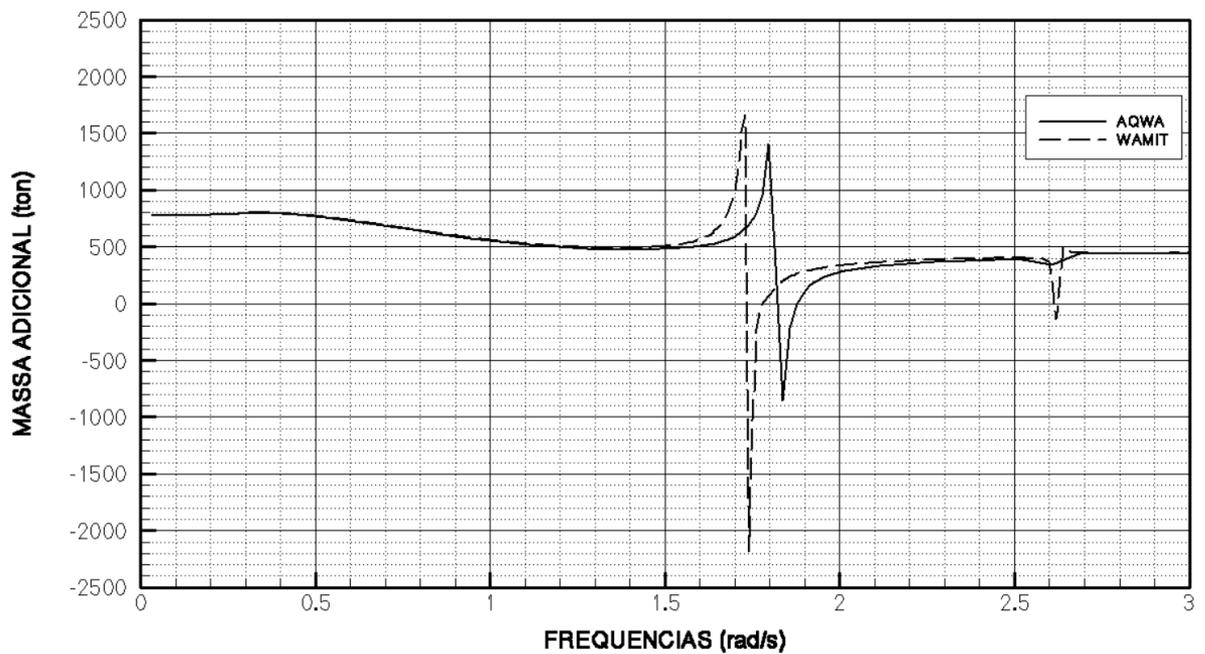


Figura 34 - Massa adicional do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.

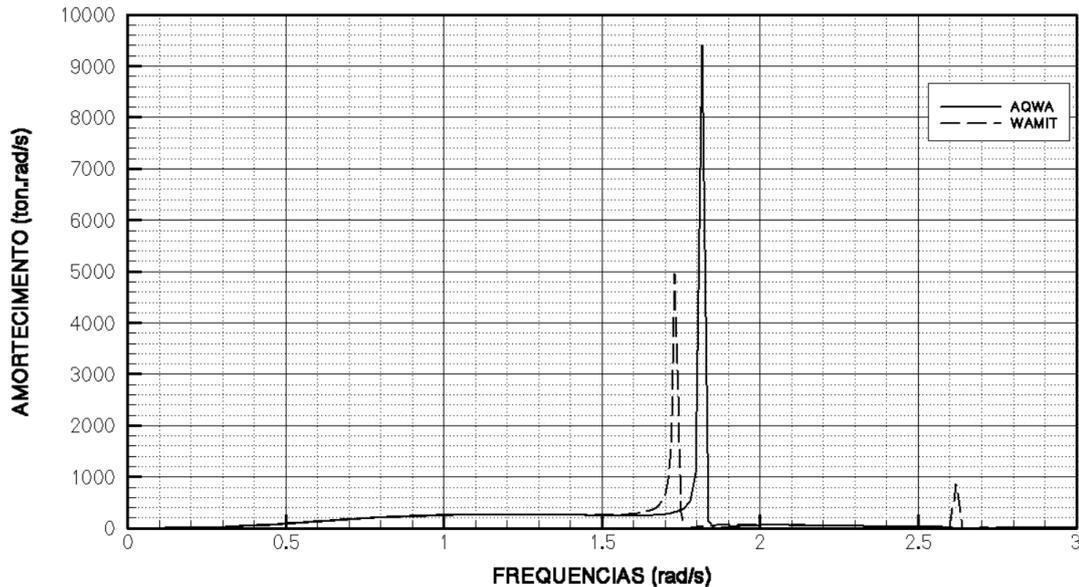


Figura 35 - Amortecimento do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.

Foi evidenciada uma pequena diferença entre os resultados obtidos pelos softwares nestes resultados. Apesar de ambos os resultados apresentarem o mesmo comportamento em relação à forma do gráfico, existe um pequeno deslocamento entre os gráficos gerados pelo WAMIT e ANSYS-AQWA. Isto pode ser justificado pela qualidade das malhas computacionais, que foram geradas com características diferentes.

Também foram observados, em relação ao comportamento da forma do gráfico, alguns picos adicionais no WAMIT em comparação com o ANSYS-AQWA, e algumas variações nos valores de pico máximo. Por exemplo, na figura 35, enquanto o ANSYS-AQWA forneceu apenas um pico entre o intervalo de frequências de 1,5 e 2,0, o WAMIT, além do pico nesse intervalo, retornou um outro pequeno pico entre o intervalo de 2,5 e 3 rad/s. Isso se deve à quantidade de pontos de frequências dadas como input nos para as análises hidrodinâmicas nos softwares, permitindo o aparecimento de alguns dados adicionais quando comparados entre si.

Na comparação entre os valores das abcissas nas figuras 32 a 35, nota-se uma discrepância acentuada, no intervalo de frequência entre 1,5 e 2,0 rad/s. Desta forma, avaliando a figura 34, referente a massa adicional, há um crescimento rápido para valores positivos seguida de decréscimo brusco, atingindo valores negativos.

No entanto, ao se deparar com essa brusca variação, aventou-se a possibilidade de que nesse intervalo de frequência ocorreria o efeito de *Sloshing*, devido a característica do gráfico,

no furo central do corpo flutuante. Logo, foram realizados os estudos necessários para a comprovação desse efeito durante a movimentação do corpo flutuante.

Utilizando a referências indicadas no capítulo 2, na seção 2.8, que se refere a fundamentação teórica para os efeitos de *Sloshing*, foi realizada uma investigação da frequência natural de *Sloshing*, a fim de comparar com a frequência em que ocorre a variação da massa adicional de positiva para negativa.

Admitindo o estudo apenas no furo central, de 1,6 m de raio e 4 m de altura, no calado de projeto de 2 m, e utilizando as equações (25) e (26), de Gaillarde & Cotteleer (2004) e de Jaiswal *et al.* (2008), respectivamente, obteve-se os resultados da tabela 19.

Tabela 19 - Frequência natural devido ao efeito de *Sloshing*.

MÉTODO	Gaillarde & Cotteleer	Jaiswal <i>et al.</i>
Frequência (rad/s)	1,797	1,890
Período (s)	3,496	3,324

A diferença entre os resultados foi menos do que 0,1 rad/s, obtendo valores próximos entre as metodologias.

Voltando a analisar da figura 34, de massa adicional, a variação brusca da massa adicional no WAMIT ocorreu entre o intervalo de frequência de 1,7 e 1,8 rad/s, enquanto no ANSYS-AQWA ocorreu entre o intervalo de frequência de 1,8 e 1,9 rad/s. Comparando com os resultados obtidos na tabela 19, as frequências naturais do efeito de *Sloshing* estão dentro do intervalo da variação dos gráficos, comprovando o seu efeito sob o corpo flutuante.

Vale salientar que as metodologias utilizadas foram para corpos que possuem a superfície inferior fechada e a superior aberta, o que não ocorre no caso do corpo em estudo. Ambas as extremidades são abertas, fornecendo um sistema mais complexo. Entretanto, a aproximação foi bastante satisfatória, visto que retornou resultados semelhantes aos comportamentos dos gráficos.

Outro ponto importante se deve ao se tratar do primeiro modo do efeito de *Sloshing* na estrutura. O segundo modo pode ser evidenciado nas curvas geradas pelo WAMIT, entre as frequências 2,6 e 2,7 rad/s.

Em seguida, foram feitas as mesmas análises do corpo flutuante com a presença da base, dos módulos das forças de excitação e das respectivas fases em *Heave*, respectivamente. Os resultados são mostrados nas figuras 36 e 37, em que é feita a comparação com e sem a presença da base, no software ANSYS-AQWA.

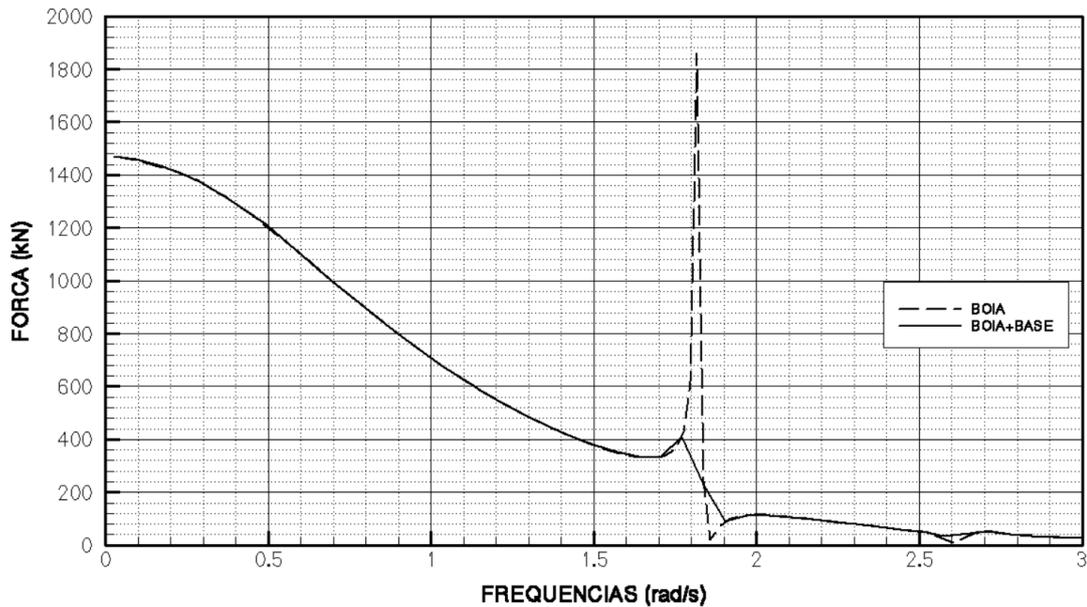


Figura 36 - Força de excitação no corpo flutuante em Heave, com a presença da base.

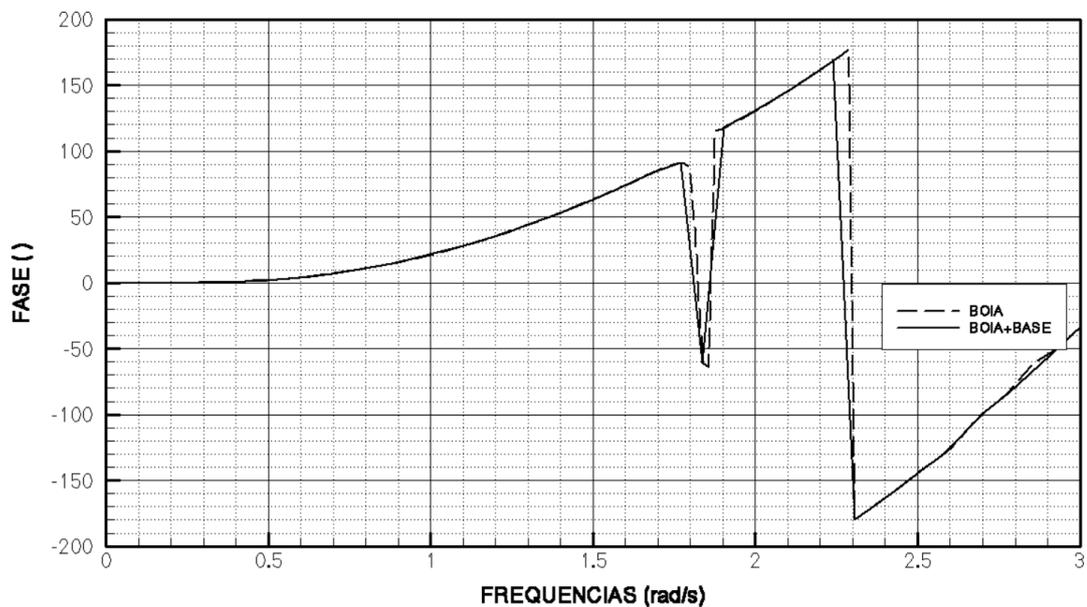


Figura 37 - Fase de excitação no corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.

Já as figuras 38 e 39 representam a massa adicional e o amortecimento, respectivamente, em *Heave* do corpo flutuante, com a presença da base.

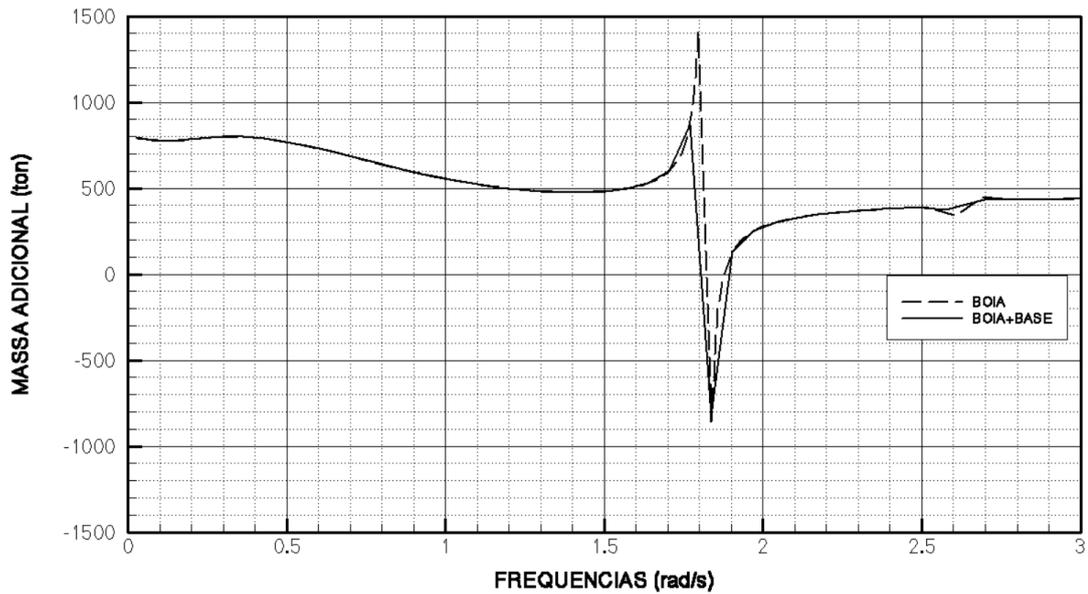


Figura 38 - Massa adicional do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.

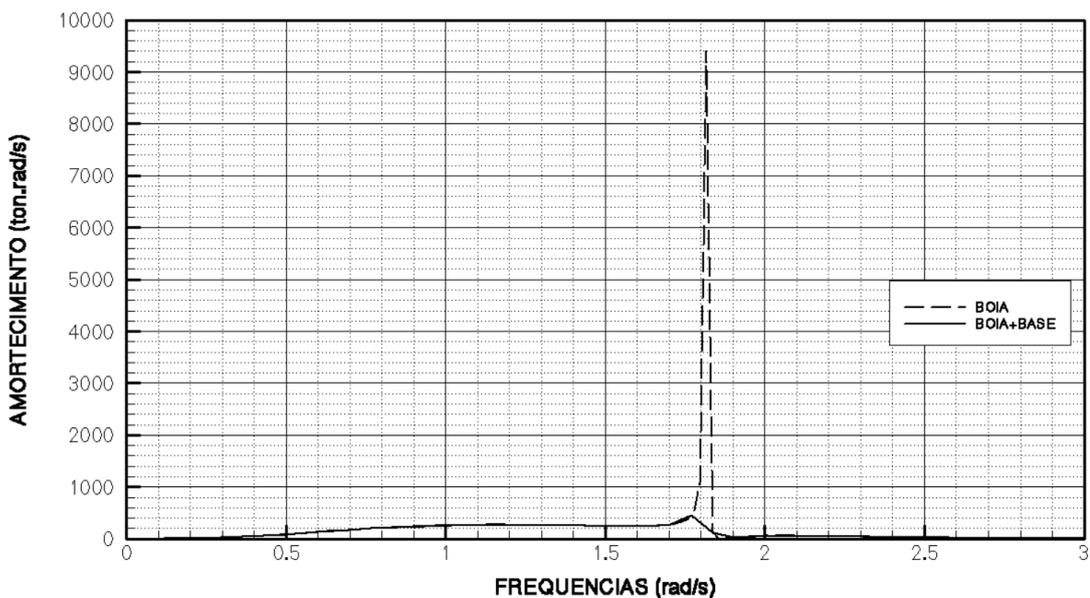


Figura 39 - Amortecimento do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.

Como se pode notar, nas figuras de 36 até 39, os mesmos efeitos foram obtidos nas análises do corpo flutuante sem a presença da base. Desta forma, constata-se que, entre as frequências 1,7 e 1,8 rad/s há o efeito de *Sloshing*, devido a folga existente entre o corpo flutuante e a base.

O intervalo de ocorrência da frequência natural de *Sloshing* não variou segundo os dados obtidos pelo software ANSYS-AQWA. Isso se deve pelas características principais externas do corpo não variar com a adição da base, ocorrendo a movimento do fluido no furo axial do corpo

flutuante. Mas, devido ao volume interno do furo do corpo flutuante diminuir com a presença da base, observa-se um decaimento nos valores de massa adicional quando comparado as duas curvas da figura 38. Isso provavelmente ocorre porque o volume fluido é menor, e as partículas fluidas terão uma influência menor sobre o corpo flutuante devido ao efeito de *Sloshing*.

3.4.7 Operadores de amplitude de resposta

Os softwares fornecem os operadores de amplitude de resposta, em que os dados são a magnitude e a fase da resposta à excitação de onda de amplitude unitária. Para uma absorção de máxima energia das ondas, deve-se obter uma relação entre amplitude e fase ótimas. A condição ideal para um dispositivo de absorção de energia, na direção do movimento de oscilação em *Heave*, situa-se na região de ressonância com as ondas. Isto significa que a velocidade de oscilação do corpo está em fase com a excitação da onda.

Assim como feito no tópico anterior, primeiro, foi avaliado o corpo flutuante, sem a presença da base. Esse estudo foi realizado com finalidade de analisar a geometria de maior interesse em relação à sua movimentação em *Heave*, visto que a base foi considerada que ficará ancorada, restringindo sua movimentação.

As figuras 40 e 41 representam os dados de saída obtidos no ANSYS-AQWA e no WAMIT, dos módulos do RAO e das respectivas fases, respectivamente.

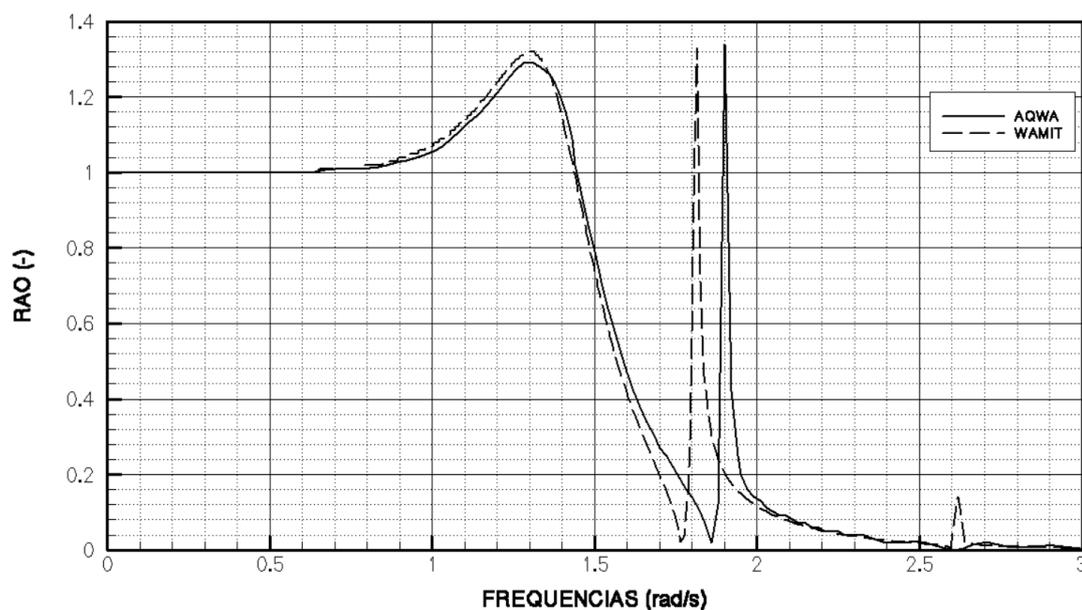


Figura 40 - RAO do corpo flutuante em *Heave*, sem a presença da base.

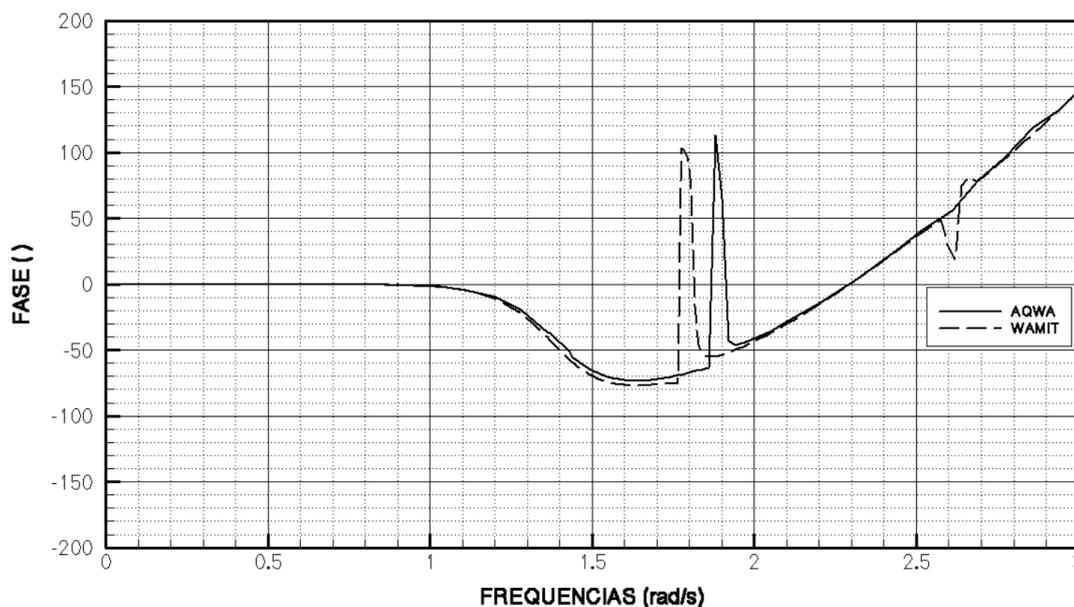


Figura 41 – Fase do RAO do corpo flutuante em Heave, sem a presença da base.

Percebe-se uma pequena diferença entre os resultados obtidos pelos softwares nestes resultados, assim como apresentado no tópico anterior. Apesar de ambos os resultados apresentarem o mesmo comportamento em relação à forma do gráfico, existe um pequeno deslocamento entre os gráficos gerados pelo WAMIT e ANSYS-AQWA. Isto pode ser justificado pelas diferenças das malhas computacionais.

Também foram evidenciados, em relação ao comportamento da forma do gráfico, alguns picos adicionais no WAMIT em comparação com o ANSYS-AQWA, e algumas variações nos valores de pico máximo. Na figura 40, enquanto o ANSYS-AQWA forneceu apenas um pico entre o intervalo de frequências de 1,5 e 2,0 rad/s, o WAMIT, além do pico nesse intervalo, retornou um outro pequeno pico entre o intervalo de 2,5 e 3 rad/s. Isso se deve à quantidade de pontos de frequências dadas como entrada nos para as análises hidrodinâmicas nos softwares, permitindo o aparecimento de alguns dados adicionais quando comparados entre si.

Como no tópico anterior, foram evidenciados o primeiro modo devido ao efeito de *Sloshing* entre as frequências 1,7 e 1,8 rad/s, no WAMIT, e entre 1,8 e 1,9 rad/s, no ANSYS-AQWA. No WAMIT, ainda pode ser notado o segundo modo devido ao efeito de *Sloshing*, entre as frequências 2,6 e 2,7 rad/s.

Analisando a figura 40 e sabendo dos efeitos de *Sloshing* na massa adicional em *Heave* do corpo flutuante, pode-se concluir que são coerentes, pois, após a frequência de ressonância de um corpo, o movimento é dominado pelos termos de massa adicional, como mostrado no capítulo 2, seção 2.7, sobre operadores de amplitude de resposta (RAO).

Para que a absorção de energia seja máxima deve-se situar na região de ressonância com as ondas, e excluindo os efeitos devido ao *Sloshing*, a frequência de ressonância do corpo flutuante encontra-se próximo de 1,4 rad/s, oferecendo uma amplificação da amplitude de resposta de 1,3. Isto significa que, com a incidência da onda regular no corpo, ele irá oscilar com amplitude 30% maior que as ondas.

Em seguida, foi feita a mesma análise do corpo flutuante com a presença da base, no ANSYS-AQWA. As figuras 42 e 43 representam os dados de saída obtidos, dos módulos do RAO e das respectivas fases da boia com e sem a presença da base, respectivamente.

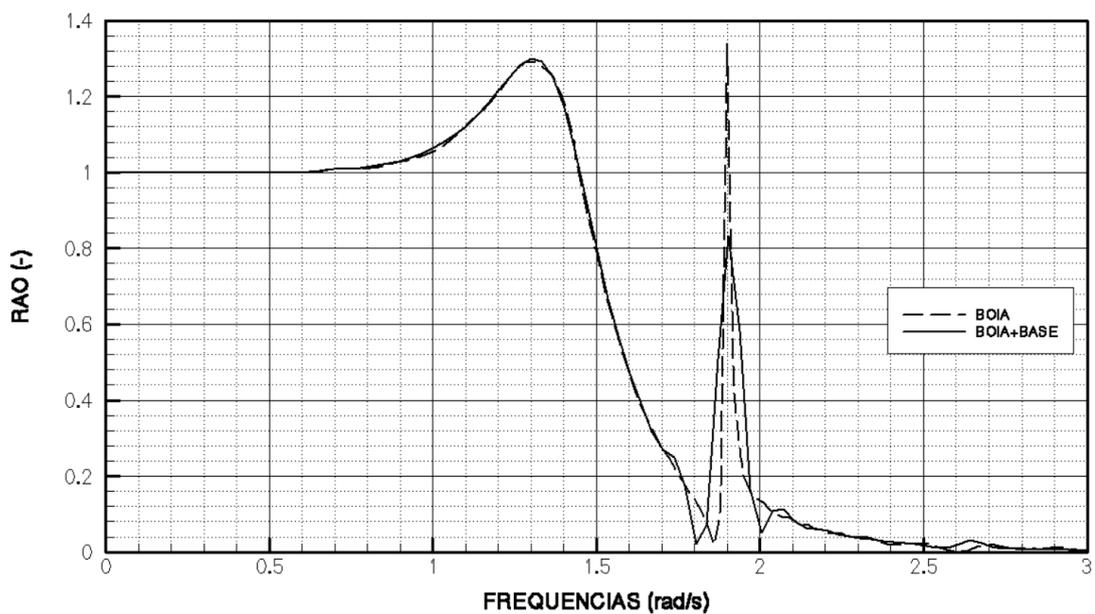


Figura 42 - RAO do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.

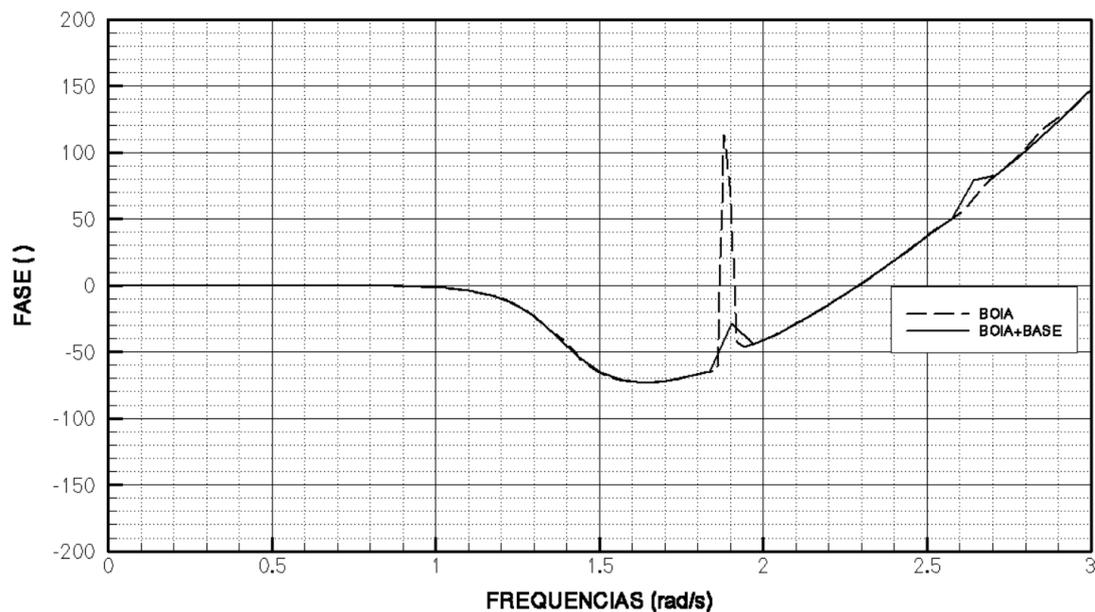


Figura 43 - Fase do RAO do corpo flutuante em Heave, com a presença da base.

Nas figuras de 42 e 43, contata-se que, entre as frequências 1,7 e 1,8 rad/s há o efeito de *Sloshing*, devido à folga existente entre o corpo flutuante e a base.

A frequência natural de *Sloshing* não variou o intervalo de sua ocorrência, segundo os dados obtidos pelo ANSYS-AQWA, devido as características principais externas do corpo não variar com a adição da base, ocorrendo a movimento do fluido no furo axial do corpo flutuante.

Mas, devido à diminuição do volume interno do furo do corpo flutuante pela presença da base e, como observado anteriormente o decaimento nos valores de massa adicional, houve também um decaimento em relação à resposta do corpo flutuante em comparação à condição sem a presença da base. Isso se deve pelo volume fluido ser menor, em que as partículas fluidas irão ter uma influência menor sob o corpo flutuante devido ao efeito de *Sloshing*.

3.5 APLICAÇÃO

A frequência de ressonância do corpo flutuante encontra-se próximo de 1,4 rad/s, oferecendo uma amplificação da amplitude de resposta de 1,3, em que irá oscilar com amplitude 30% maior que as ondas.

O espectro de onda da região demonstra o estado do mar no domínio da frequência e pode descrever a energia transmitida pelas ondas em uma determinada frequência, como mostrado no capítulo 2, seção 2.3. Utilizando a metodologia de JONSWAP, foi possível obter o espectro de onda da região em estudo, através da equação (13), como mostra a figura 44.

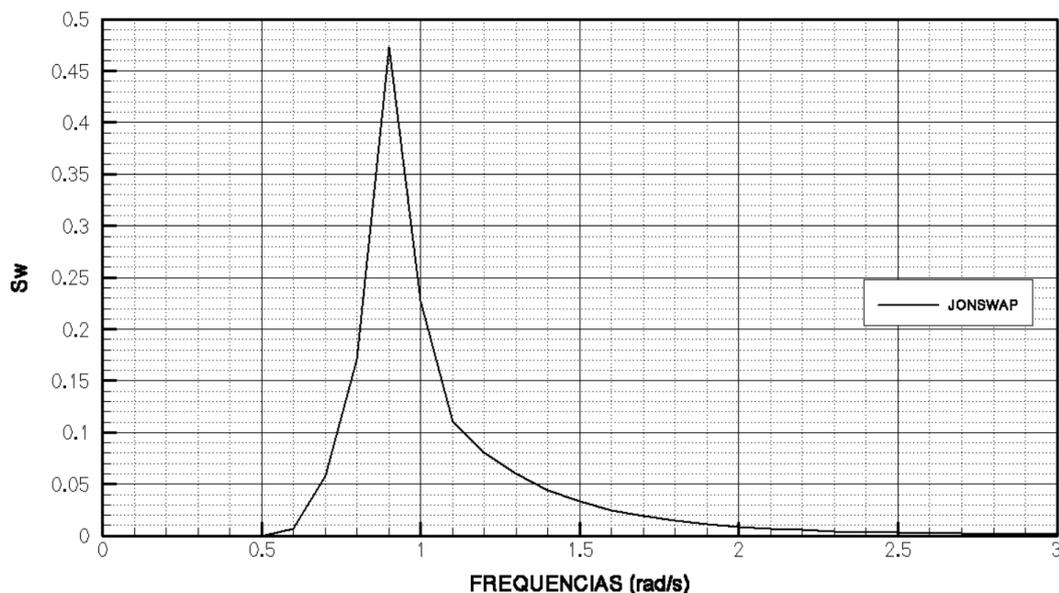


Figura 44 - Espectro de onda da região em estudo.

Então, a energia das ondas pode ser obtida através da área abaixo da curva, como demonstrado na equação (17), ou feita a utilização da equação (18), uma forma mais simples e direta em se obter a energia das ondas em função da altura significativa. Desta forma, o dispositivo geraria uma de 2,42 MW, se absorvesse toda energia da onda, sem levar em consideração as dissipações e perdas de energia.

Levando em consideração a premissa que uma boia não absorve toda a energia da onda, segundo a Waveco (2018), devido ao movimento da boia induzir um movimento atrasado em relação à onda e a criação de ondas, e que, na prática, é difícil converter mais de 25% da energia de uma onda em energia elétrica, a energia de saída do absorvedor equivalerá a 0,78 MW.

A Celpe (2018) fornece dados do consumo de energia elétrica em Pernambuco, pelos consumidores do tipo residencial, industrial, comercial, rural, poderes públicos, iluminação pública e outros, conforme a figura 45. Fornece também o consumo de todas as cidades Pernambucanas consumidoras dessa concessionária de energia.

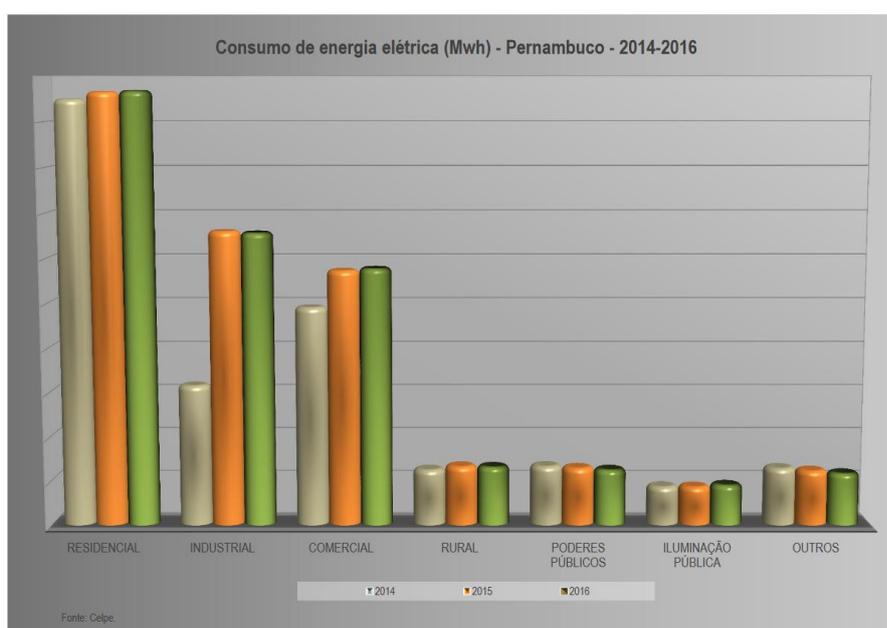


Figura 45 - Consumo de energia elétrica (Mwh). Fonte: Celpe.

O total de consumidores na região de Pernambuco, equivale a 3.597.726, sendo 17.454 situados na região da Ilha de Itamaracá. Os consumidores do tipo residencial, da região da Ilha de Itamaracá, equivalem a cerca de 16.611 pessoas. Estes consumidores, segundo a Celpe (2018), consumiram cerca de 18.568 Mwh, ao longo do ano de 2016.

Logo, 20 absorvedores de energia desenvolvido neste projeto é capaz de atender cerca de 31% do consumo diário desses habitantes.

CAPÍTULO 4 - CONCLUSÕES

Inicialmente foi feita uma análise bibliográfica, procurando expor os trabalhos já existentes, as vantagens e motivações sobre a aplicação do sistema de absorção de energia das ondas, numa região da costa de Pernambuco.

A abordagem teórica necessária foi realizada, a fim de esclarecer e informar todo conceito envolvido no estudo do tema, relacionando o conceito da energia das ondas e sua interação com o sistema de absorção da energia.

A proposta de localização de aplicação do dispositivo teve como finalidade atender a população da região pernambucana. Para isso, foi feito o levantamento das características das ondas e do vento, para se obter uma geometria que retornasse maior absorção de energia e que atendesse essas características.

Pelo trabalho realizado por Shadman (2017), obteve-se a geometria que melhor se aplicava à região de estudo. Com isso, foi possível realizar as análises hidrodinâmicas a partir dos softwares ANSYS-AQWA e WAMIT.

Coletando os dados de saída dos softwares, foram feitas as análises das forças de excitação da onda, massa adicional, amortecimento e operadores de resposta, em um único movimento, de afundamento. Essas análises foram feitas para o corpo flutuante sem a presença da base. Já para a interação de ambos os corpos, foram realizados os estudos apenas no ANSYS-AQWA.

Durante os estudos, foi constatado o efeito de *Sloshing*, de forma detalhada e embasado nas teorias já existentes, e sua influência nos resultados. Esse efeito pôde ser identificado durante o estudo dos resultados da massa adicional do corpo flutuante, calculando suas as frequências naturais, e comparando com os demais resultados obtidos pelos softwares.

A fim de obter a máxima absorção de energia, foi identificado o intervalo de frequências em que ocorre a ressonância do sistema, sem considerar o efeito de *Sloshing*, objetivando manter a operação do sistema nessa região o maior tempo possível, para permitir uma absorção com alto rendimento durante um ano de produção.

Com os resultados dos operadores de resposta em *Heave* do sistema, no domínio da frequência, foi possível observar que a amplitude é relativamente pequena, um fator não desejável para um sistema de absorção de energia.

Desta forma, o trabalho deve ser feito de modo interativo: mudando a geometria, bem como suas dimensões principais, e realizando o estudo novamente, comparando os resultados, até obter uma geometria que forneça amplitudes maiores de resposta.

Também deve-se levar em consideração os efeitos de *Sloshing*, a fim de minimizar esses efeitos na estrutura, uma vez que é prejudicial para a integridade do corpo e compromete a eficiência do absorvedor de energia.

Deve-se levar em consideração, para um estudo mais aprofundado, a incorporação dos efeitos viscosos nos resultados, bem como a análise dos outros graus de liberdade em mar irregular, tornando o problema mais próximo do real. Desta forma, é possível obter uma previsão mais aproximada da quantidade de energia que um absorvedor de energia das ondas do mar pode gerar.

4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho serve como partida do estudo da absorção da energia das ondas nas costas pernambucanas. Existem outros mecanismos para absorver a energia das ondas, como foi apresentado neste trabalho, que podem ser estudados com o intuito de achar soluções mais eficientes para este propósito.

Finalmente considera-se que será necessário realizar testes experimentais que permitam otimização, determinar uma metodologia, e obter maior conhecimento dos sistemas de absorção da energia das ondas.

4.2 TRABALHOS FUTUROS

Propõe-se que para um maior entendimento dos sistemas de absorção das ondas realizar os seguintes trabalhos:

- Realizar o estudo que forma evitar os efeitos de *Sloshing*;
- Aprimorar, de forma mais realística, o estado de mar, fazendo o estudo do absorvedor de energia em ondas irregulares;
- Simular em CFD, permitindo prever os movimentos ressonantes do sistema;

- Incorporar sistema de otimização para sincronizar o movimento ressonante do dispositivo com a onda significativa, a fim de obter a maior absorção da energia das ondas;
- Estudar as forças, massas adicionais, amortecimentos e os operadores de respostas da base fixada por tendões do dispositivo, para ter uma noção mais detalhada do comportamento do sistema de forma individual;
- Realizar um estudo mais profundo da quantidade de energia que o tipo de dispositivo escolhido pode absorver e transformar em energia elétrica, levando em consideração todo o sistema envolvido, de treliças ou sistemas de travamento;
- Implementar o sistema de *Latching Control*, para obter um sistema que absorve maior quantidade de energia;
- Realizar testes experimentais em escala reduzida, para representar os corpos estudados neste trabalho e verificar os efeitos viscosos na dinâmica do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANEEL. *Agência Nacional de Energia Elétrica*. 2005. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>> (acesso em 25 de Junho de 2017).
- ANSYS-AQWA. *Manual*. 2018. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Other+Products/ANSYS+Qwa>> (acesso em 26 de Junho de 2018).
- BENTO, J. *Verificação Visual do Momento de Inércia por simples experimentação*. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2016.
- BOSMA, B. “On the Design, Modeling, and Testing of Ocean Wave Energy Converters.” Oregon: Dissertacao de doutorado; Oregon State University., 2013.
- CELPE. *Consumo de energia elétrica*. 2018. Disponível em: <<http://servicos.celpe.com.br/Pages/index.aspx>> (acesso em 13 de Julho de 2018).
- CLÉMENT, A.; MCULLEN, P.; FALCAO, A.; FIORENTINO, A.; GARDNER, F.; HAMMARLUND, K.; LEMONIS, G.; LEWIS, T.; NIELSEN, K.; PETRONCINI, S.; PONTES, M; SCHILD, B; SJOSTROM, P.; SORESEN, H. *Wave Energy in Europe: Current Status and Perspectives*. Energy Rev., 2002.
- CROXON, J. *EHOW*. 2015. Disponível em: <http://www.ehow.com.br/propriedades-materiais-aco-a36-info_46889/> (acesso em 28 de Maio de 2018).
- CRUZ, J.; SARMENTO, A. *Energia das Ondas: Introducao aos Aspectos Tecnológicos, Econômicos e Ambientais*. Instituto do Ambiente, 2004.
- DREW, B.; PLUMMER, A.; SAHINKAYA, M. *A review of wave energy converter technology*. Bath: Department of Mechanical Engineering, University of Bath, 2009.
- DUCKERS, L. *In Renewable energy*. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- ENERGYCARRER. *Wave-power progress from Germany*. 2013. Disponível em: <<http://www.energycareer.com.au/archived-news/wave-power-progress-from-germany/>> (acesso em 2018 de Junho de 07).
- FALNES, J. *Principles for Capture of Energy from Ocean Waves*. Phase Control and Optimum Oscillation, 1997:1-8.
- . *A Review of Wave-Energy Extraction*. Mar Struct., 2007.
- GAILLARDE, G.; COTTELEER, A. *Water Motion in Moonpools Empirical and Theoretical Approach*. Maritime Research Institute Netherlands, MARIN, 2004.
- GOMES, M.; OLINTO, C.; ROCHA, L.; SOUZA, J.; ISOLDI, L. *Computational Modeling of a Regular Wave Tank*. Universidade Federal do Rio Grande, 2010.
- GONÇALVES, W.; TEIJÓ, F.; ABDALLAH, P. *Energia de ondas: aspectos tecnológicos e econômicos e perspectivas de aproveitamento no Brasil*. Rio de Janeiro: Dissertacao de Mestrado, FURG, 2008.
- GOOGLE MAPS. 2018. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/8%C2%B01'20.6%22S+32%C2%B031'06>>

- 6%22W/@-8.0966767,-36.6791792,7z/data=!4m5!3m4!1s0x0:0x0!8m2!3d-8.0224!4d-32.51849> (acesso em 24 de Abril de 2018).
- GREENPEACE BRASIL. *Cima e Energia*. 2008. Disponível em: <http://www.greenpeace.org/brasil/pt/o-quefazemos/clima-e-energia/?gclid=cmpm_y6dllocfywe4aodaweayw> (acesso em 09 de Setembro de 2017).
- JAISWAL, O.; KULKARNI, S.; PATHAK, P. *A Study on Sloshing Frequencies of Fluid-Tank System*. Beijing: World Conference on Earthquake Engineering, 2008.
- JOURNÉÉ, J. *Offshore Hydromechanics*. Dalfit: Dalfit University of Technology, 2001.
- KUMAR, N. *Study of Sloshing Effects in a Cylindrical Tank With and Without Baffles under Linear Acceleration*. Rourkela: National Institute of Technology, 2013.
- LAGES, E. N. *Forças Distribuídas: Momentos de Inércia*. Alagoas: Universidade Federal de Alagoas, 2018.
- MEI, C. *Numerical Methods in Water-Wave Diffraction and Radiation*. Vol.10, Pag 393-416, 1978.
- NAVE, R. *Hyperphysics*. 2018. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/icyl.html>> (acesso em 25 de Janeiro de 2018).
- OGLOBO. *Sobretaxa na conta de luz chega a R\$ 18 bilhões, quase uma usina de Jirau*. 2017. Disponível em: <<https://oglobo.globo.com/economia/sobretaxa-na-conta-de-luz-chega-r-18-bilhoes-quase-uma-usina-de-jirau-21182990>> (acesso em 06 de Junho de 2018).
- OMRON. *Fast Liquid Stabilization*. 2018. Disponível em: <<http://www.omron-ap.com/solutions/packagingsolutions/vibration-suppression/fast-liquid-stabilization.asp>> (acesso em 13 de Julho de 2018).
- PELAMIS. *Pelamis Wave Power*. 2018. Disponível em: <<https://www.pelamiswave.com/pelamis-technology>> (acesso em 05 de Abril de 2018).
- PENA, R. *Racionamento de água e energia no Brasil em 2014: risco real?* 2014. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/acionamento-agua-energia-no-brasil-2014-risco-real.htm>> (acesso em 01 de Abril de 2018).
- POLYU. *Ship Dynamics*. 2018. Disponível em: <<http://www.polyu.edu.hk/proj/gef/index.php/glossary/ship-dynamics/>> (acesso em 01 de Fevereiro de 2018).
- POWERBUOY. *Ocean Power Technologies*. 2018. Disponível em: <<https://www.oceanpowertechnologies.com/powerbuoy?page=powerbuoy-technology>> (acesso em 01 de Junho de 2018).
- RODRIGUES, A. *O apagão no Brasil e motivação para o Programa Prioritário de Termoeletricidade*. Rio de Janeiro: Dissertacao de Mestrado, 2013.
- RONCHI, F. P.; SCHAEFFER, L. . *Classificacao das Tecnologias para Conversao de Energia das Ondas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.
- SANTOS, J. A.; RODRIGUES, S. *Relações de Haskind na Interacção de Vários Corpos Flutuantes com Ondas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2006.

- SHADMAN, M. *Application of the Latching on a Wave Energy Converter*. Rio de Janeiro: Dissertacao de Doutorado. COPPE., 2017.
- SIMCOS. *Forecasting System and Coastal Monitoring along the Brazilian Coast*. 2018. Disponível em: <ondas.cptec.inpe.br/~rondas/simcos/index.php?cod=38#PointHist> (acesso em 14 de Maio de 2018).
- VEJA. *Brasil Caminha para o Racionamento de Energia*. 2012. Disponível em: <<https://veja.abril.com.br/economia/brasil-caminha-para-o-acionamento-de-energia/>> (acesso em 05 de Fevereiro de 2018).
- WAVECO. *Wave Energy*. 2018. Disponível em: <<https://www.waveco.no/wave-energy/wave-energy.html>> (acesso em 05 de Junho de 2018).
- WAVEPOWER. *How Wave Power Works: Salter's Duck*. 2018. Disponível em: <http://greenthefuture.com/wavepower_howitworks_saltersduck/> (acesso em 05 de Junho de 2018).