ISSN 2446-5275

CADERNOS DE ENERGIA

Nº5 - MAIO / AGOSTO - 2017

DESENVOLVIMENTO DE DISPOSITIVOS DE CONVERSÃO DE ENERGIAS MARINHAS

O CASO DO MODELO DE ENERGIA DAS ONDAS NO PROGRAMA DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Eliab Ricarte

COPPE UFRJ
Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

COPPE UFRJ Programa de Planejamento Energético

ISSN 2446-5275

CADERNOS DE ENERGIA

Nº5 - MAIO / AGOSTO - 2017

Desenvolvimento de dispositivos de conversão de energias marinhas

O caso do modelo de energia das ondas no Programa de Planejamento Energético

Eliab Ricarte*

** Pesquisador da COPPE / UFRJ*

C122 Cadernos de Energia /PPE – Programa de Planejamento Energético
COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro. – Rio de Janeiro : PPE, 2015-
80p. : il. ; 15 x 20,5 cm

Quadrimestral

ISSN 2446-5275

1.Energia – Periódicos. 2. Biomassa – Periódicos. I.Título
CDD: 333.7905

Editor Executivo:

Prof. Marco Aurélio dos Santos

Conselho Editorial:

Prof. Alexandre Salem Szklo

Prof. André Frossard Pereira de Lucena

Prof. Luiz Fernando Loureiro Legey

Prof. Lucio Guido Tapia Carpio

Prof. Marco Aurélio dos Santos

Prof. Mauricio Cardoso Arouca

Esta edição do **Cadernos de Energia** contou com apoio financeiro do
PROEX/CAPES

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

PPE – Programa de Planejamento Energético

Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 211, Cidade Universitária CEP 21941-972 – Rio de Janeiro - RJ

APRESENTAÇÃO

Temos a grata satisfação de disponibilizar mais um número da série "Cadernos de Energia", uma publicação do Programa de Planejamento Energético da COPPE/UFRJ, com periodicidade quadrimestral.

O planejamento energético na atualidade é, sem sombra de dúvidas, uma contribuição inegável na sociedade moderna. Seu campo de estudo é iminentemente interdisciplinar e abrangente, repercutindo em todos os campos do conhecimento.

Busca-se com o planejamento energético, reunir a dimensão tecnológica com uma análise política, econômica, social e, enfim, ambiental da questão energética.

Neste número temos um assunto interessante sobre a questão da vazão hídrica reduzida a jusante de aproveitamentos hidrelétricos, um tema de interesse ambiental.

Esperamos que com este novo veículo, tenhamos um canal adicional de divulgações do conhecimento para a sociedade brasileira.

Atenciosamente,
Prof. Marco Aurélio dos Santos
Editor Executivo

Sumário

- Resumo 8
- Abstract 8
1- Introdução 9
2- As Ondas Oceânicas 13
3- Aparatos de Conversão 18
3.1- O Modelo Brasileiro *Nearshore* de Conversão de Ondas em Eletricidade 21
4- Etapas de Desenvolvimento 25
4.1- Modelagem Física 25
4.2- Estudos Hidrodinâmicos 28
4.2.1- Limites geométricos 29
4.2.2- Modelos geométricos 30
4.3- Análise Estrutural do Flutuador 35
4.4- Geradores de Energia 36
4.5- Sistema de Deslizamento do Corpo Flutuante 39
4.6- Estrutura de Sustentação 41
4.7- Base de Transporte e Fixação 45
5- Conclusão e Perspectivas 50
- Agradecimentos 51
6- Referências Bibliográficas 52

Resumo

O artigo apresenta um conceito de aparato de conversão de energia das ondas oceânicas em eletricidade, em desenvolvimento no Programa de Planejamento Energético da COPPE / UFRJ. Mostra suas etapas de desenvolvimento experimental e de engenharia conceitual nas especialidades fundamentais a projetos dessa natureza como Hidrodinâmica, Estruturas e Geração Elétrica, dentre outras. Por fim, lança perspectivas sobre o desenvolvimento futuro e aplicações possíveis do uso da força motriz das ondas do mar.

Abstract

This paper presents a concept of a Wave Energy Converter (WEC) under development in the Energy Planning Program from COPPE / UFRJ. It shows the stages of development and conceptual engineering by the fundamental specialties needed to projects of this nature such as Hydrodynamics, Structures and Electric Generation, among others. Finally, it launches perspectives on the future development and applications of the uses of the driving force of the sea waves

1. INTRODUÇÃO

A crise do petróleo na década de 1970, em detrimento das ameaças energéticas, deixou um legado importante para a humanidade que foi o renascimento das fontes renováveis de energia. Diante da ameaça de embargos constantes no abastecimento do combustível, percebeu-se quão vital essa fonte era à economia e à sobrevivência, em alto grau de dependência. Diante desse cenário foram trazidas à tona questões, até então negligenciadas, como o uso racional dos recursos fósseis e a introdução de fontes verdadeiramente renováveis.

Práticas de aproveitamento de fenômenos da natureza para a realização de trabalho, até mesmo primitivas, foram trazidas às pranchetas das academias para ganharem nova abordagem à luz de novas técnicas e ferramentas recém-incorporadas às ciências desde o pós-guerra. Todo esse arcabouço propiciou uma rápida evolução no desenvolvimento das novas energias renováveis e principalmente melhor entendimento dos recursos primários, porém, sem esquecer que se trata de tecnologia recente e muitas ainda em estágio embrionário.

Como exemplo, por mais que se declarem tecnologias maduras, muitas plantas eólicas não chegam a cumprir o seu tempo de vida útil originalmente estabelecido porque são atropeladas pelo surgimento e substituição de aero geradores de última geração de forma a otimizar os sítios. Painéis fotovoltaicos esbarram na baixa eficiência do conceito vigente. A energia das marés ficou estagnada por décadas devido às implicações ambientais de inundação das áreas de mangue. E a energia das ondas ainda não convergiu

para um único princípio de aproveitamento, havendo diversos modelos e proposições para seu uso. Outras promessas sequer saíram do papel.

A verdade é que com as intervenções geopolíticas contemporâneas nas regiões produtoras de petróleo realizadas pelos países de maior consumo se obteve maior controle sobre esse mercado, afastando novas e repentinas ameaças de embargos. Isso justifica em parte a desaceleração nos desenvolvimentos de tecnologias para o aproveitamento das fontes renováveis, permanecendo incapazes de alterar a atual matriz energética estabelecida.

A figura 1 ilustra o consumo de energia por tipo de fonte, onde pode ser visto o alto grau de dependência dos combustíveis fósseis (petróleo, gás e carvão) representando mais de 80% da atual oferta de energia. Uma matriz com essa configuração não se modifica em uma geração. Não há dúvida quanto ao caráter finito dos recursos fósseis, por mais que se discuta o tempo que ainda resta para a extinção das suas fontes e a sobrevida obtida com a descoberta de possíveis novas jazidas. É um quadro assombroso que aponta para um futuro preocupante em termos energéticos e consequentemente de bens, produtos e alimentos.

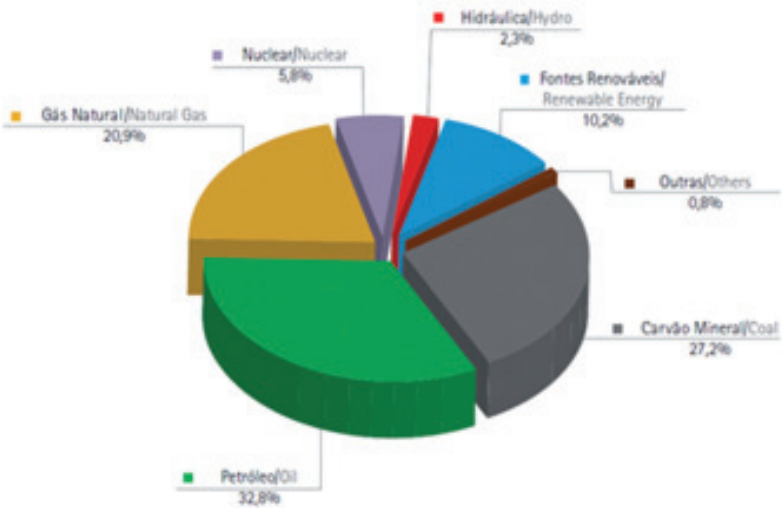

Figura 1: Distribuição da oferta mundial de energia
Fonte: Balanço Energético Nacional – Empresa de Pesquisa Energética

A Agência Internacional de Energia do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (EUA) elaborou um gráfico (Figura 2) no ano de 2013 com dados estatísticos de 20 anos, coletados até o ano de 2010, onde fez uma progressão prevendo o comportamento do consumo mundial de energia. De acordo com o estudo que avalia no total um período de 50 anos, até o ano de 2040 haverá um acréscimo de mais de 100% na demanda, seguindo os atuais padrões de consumo. Situação que uma vez confirmada agrava e antecipa o esgotamento dos combustíveis fósseis ou, em outras palavras, desestrutura drasticamente a oferta mundial de energia.

Talvez, seja esse o principal papel das energias renováveis, o de atender demandas futuras crescentes de energia, preservando aos combustíveis fósseis funções mais nobres já conquistadas por seus derivados. Em detrimento do presente tímido aporte de capital em favor de fontes alternativas de energia, o seu contínuo desenvolvimento continua imperioso sabendo que dias piores poderão surgir.

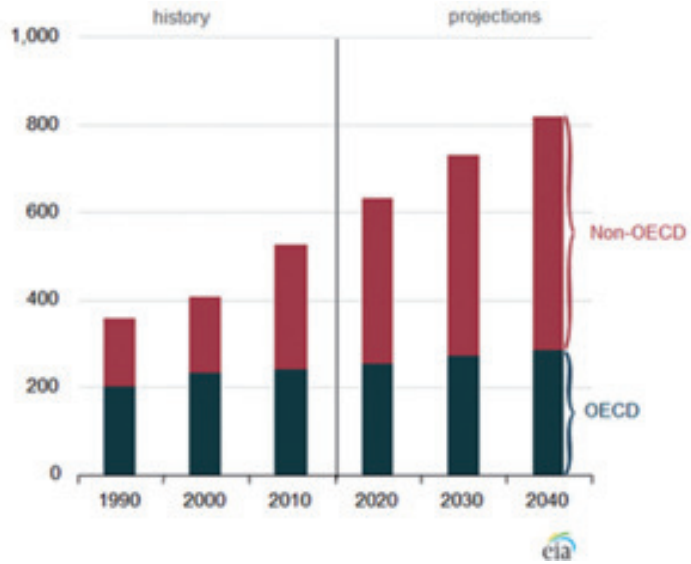

Figura 2: Consumo mundial de energia (1990 – 2040)
Fonte: Agência Internacional de Energia do Departamento de Energia dos EUA

Em termos gerais os oceanos ocupam aproximadamente dois terços da superfície terrestre, portanto, o dobro de área do solo firme onde toda a população do planeta habita e exerce suas atividades e conflitos. Por corolário pode-se supor que em dois terços do planeta pode haver mais recursos que em apenas um terço e dentre eles que haja mais energia disponível no mar que no continente. Vide os exemplos do potencial energético da fonte primária de cada fenômeno oceânico a seguir:

- Ondas geradas pelo vento, 10 (dez) terá watt (TW);
- Marés, 3 (três) TW;
- Corrente de maré, 5 (cinco) TW e
- Energia térmica dos oceanos (OTEC), 14 (quatorze) TW.

Ainda que avaliado isoladamente cada fenômeno percebe-se que o seu potencial excede aquele do atual consumo mundial. Somados então representam fontes inesgotáveis de energia em apenas quatro de seus fenômenos. Além destes existem outros fenômenos oceânicos com potencial energético global ainda não avaliado, mas que certamente contribuem positivamente para que o mar possa ser visto como fonte energética, por exemplo:

- Energia osmótica ou diferença de salinidade entre estuário e oceano;
- Biomassa marinha de algas e outros;
- Energia eólica *offshore* com baixa rugosidade e
- Energia solar acima do espelho d'agua.

O presente artigo apresenta um conceito técnico de um conversor de energia para aproveitamento das ondas como força motriz, em desenvolvimento no Programa de Planejamento Energético (PPE) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

2. AS ONDAS OCEÂNICAS

As ondas oceânicas são resultantes da passagem dos ventos sobre a superfície do mar, que em um processo de fricção transfere grande quantidade de energia para a água, formando ondulações. Uma vez alterada a superfície do mar por essas deformações, a matéria água elevada acima do nível do mar sofre o efeito da gravidade e tenta retornar ao seu nível original e, por esse efeito, recebe o nome de onda de gravidade.

Tais ondas de gravidade são geradas a milhares de quilômetros da costa. O principal sistema atmosférico impactando o clima na costa brasileira é o Anticiclone do Atlântico Sul, posicionado entre o Brasil e a África, com características estacionárias, pois atua de forma quase permanente e é o responsável pela formação de frentes frias que se deslocam em direção ao norte. Desde o seu nascimento e quase durante todo o seu trajeto o fenômeno se mantém constante em seu comportamento hidráulico, no que tange as equações físicas que a descrevem por seu trajeto.

A **figura 3** sintetiza a distribuição mundial da potência energética das ondas. Nela podemos visualizar as potências médias ao redor do globo contidas em um metro de frente de onda.

A distribuição da potência das ondas poderia ser generalizada variando numa graduação decrescente à medida que se dirige às regiões equatoriais e, crescente no sentido dos polos. Quanto à regularidade dessa potência ao longo do ano, fator importante em geração de eletricidade, pode-se dizer que quanto mais próximo do equador o regime de ondas se apre-

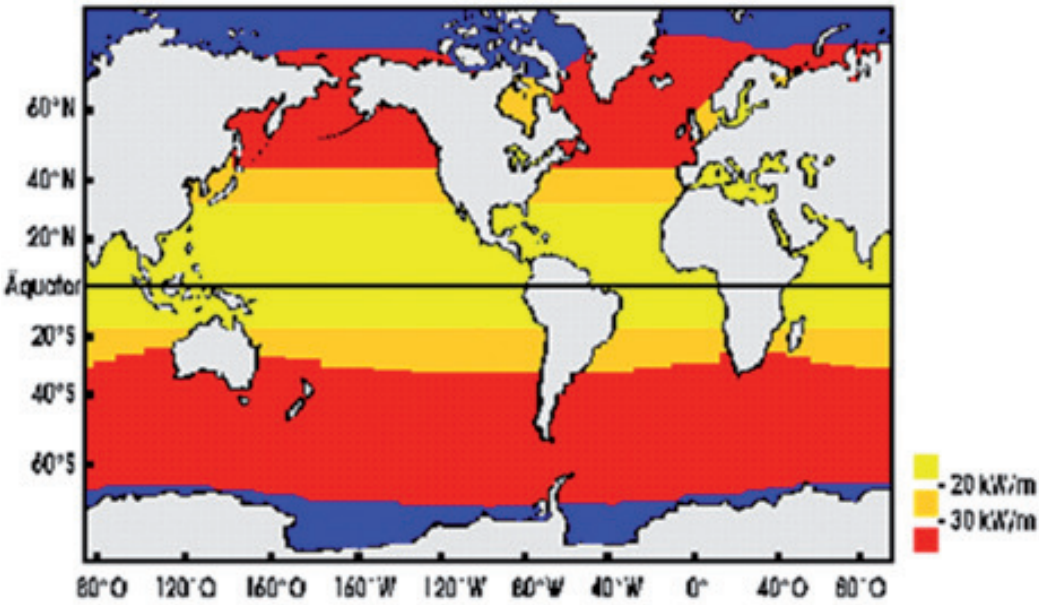

Figura 3: Distribuição de potência das ondas
Fonte: Universidade de Leipzig

senta de forma mais regular e maiores variações são encontradas à medida que se dirige aos polos.

Uma onda gerada pelo vento, Onda de Gravidade, é um fenômeno cíclico e pode ser descrita por uma função trigonométrica senoidal composta por uma altura, comprimento, período e uma direção, conforme diagrama da figura 4.

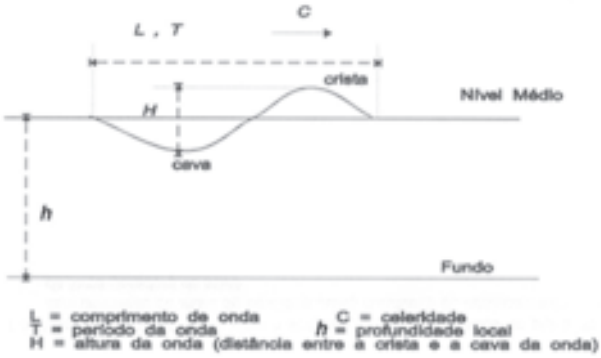

Figura 4: Características de uma onda

Em pequenas profundidades, as ondas sofrem transformações devido à interferência do fundo do mar. Esses efeitos aumentam com a diminuição da profundidade e a irregularidade do fundo. Em águas profundas, a potência por unidade de comprimento da frente de onda (kw/m), é estimada pela Equação 1 abaixo:

$$P(kW/m) = 0{,}49 H_s^2 T_e \qquad (1)$$

onde H_s (m) é a altura significativa de onda e T_e (s) o período da onda.

Quando essa camada de água que foi agitada pelo vento alcança profundidades menores em aproximação da costa, começa a sentir o efeito do fundo marinho, modificando por completo o seu comportamento hidráulico e não sendo mais regida pelas teorias físicas de águas profundas. O orbital da onda, que possuía um equilíbrio quantitativo de energia potencial e energia cinética em ambiente *offshore*, é deformado em águas intermediárias (*nearshore*) e rasas (*onshore*), passando a possuir maior quantidade de energia cinética no seu orbital que a energia potencial, promovendo o transporte de massa. O ganho de energia cinética aumenta à medida que a profundidade cai gradativamente até conter somente energia cinética após a arrebentação. Fenômeno ilustrado na figura 5.

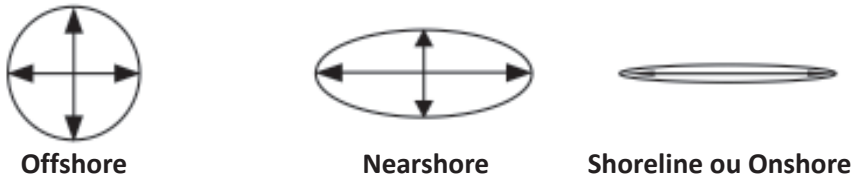

Figura 5: Esquema ilustrativo do conteúdo de energia cinética e potencial no orbital de uma onda em função da profundidade local.

Certamente que o maior potencial energético das ondas se encontra em lâminas profundas, normalmente longe da costa. Contudo, estudos recentes, como FOLLEY *et al.* (2007) ratificado por MONÁRDEZ *et al.* (2008), afirmam que as perdas devido ao atrito da onda com o leito marinho em águas intermediárias são apenas da ordem de 5-10%, justificando

plenamente a preferência por lâminas menores tendo em vista os custos de geração, logísticos, operação e manutenção. Do ponto de vista da física não se pode simplesmente admitir perdas sem entender o destino dessa parcela que "simplesmente" some. Fazendo valer Lavoisier onde "*Nada se perde, nada se cria, tudo se transforma*", essa parcela de energia é empregada para iniciar o transporte de massa, ou seja, adquire energia cinética.

Esse princípio físico tem forte influência sobre os diversos modelos de conversores de energia das ondas existentes, fazendo grande diferenciação. Um modelo dito *offshore* trabalha sob um determinado regime hidráulico sendo mais eficiente nesse meio, enquanto que um modelo *nearshore* trabalha sob um regime diferenciado e mais complexo, sendo eficiente no seu meio. Portanto, não se trata apenas de uma simples denominação, pois uma máquina desenhada e pretendida para uma função *offshore* será pouco eficiente em um ambiente *nearshore* por trabalhar dentro de um fenômeno hidráulico diferenciado.

É o que ilustra a figura 6 que compara a eficiência de alguns modelos de conversores de energia das ondas em função de diferentes alturas de onda. Percebe-se que a eficiência de conversão em energia elétrica (eixo das abscissas) varia em função de cada altura de onda (eixo das ordenadas), onde há uma condição de onda na que o aparato responde melhor. Caso essa condição climática não represente a aquela presente na maior parte do tempo no sítio em questão (clima reinante) a máquina não obterá bom desempenho ficando aquém do prometido.

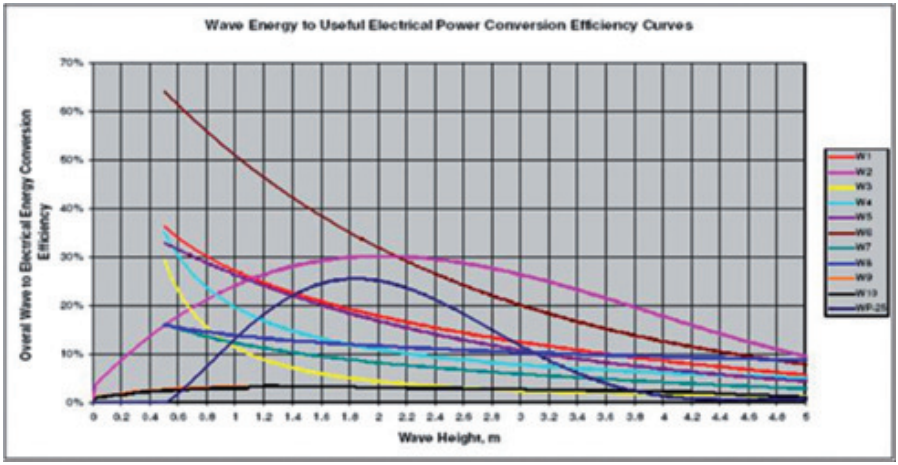

Figura 6: Eficiência de um grupo de aparatos em função da altura de onda na Nova Zelândia
Fonte: Sanders; Gardiner; Gorman & Penny - 2002

A costa brasileira pode ser considerada como uma área calma, já que não está afetada por nenhum sistema climático capaz de gerar tormentas de grandes magnitudes, como ocorre no mar do norte, por exemplo. O clima de ondas na maior parte do litoral brasileiro, considerando todas as direções e estações climáticas, apresenta ondas do tipo vaga (*sea*) com alturas entre 1m e 2m na maior parte do ano. Os períodos de propagação predominantes são de 5 a 9 segundos. Há ainda o aparecimento sazonal de algumas ondas longas do tipo *swell* (RICARTE, 2007).

3. APARATOS DE CONVERSÃO

Existe um vasto número de aparatos para conversão de energia das ondas que fazem uso de diferentes conceitos tecnológicos. A figura 7 apresenta um esquema que tenta classificar as máquinas conhecidas pelo princípio básico de operação.

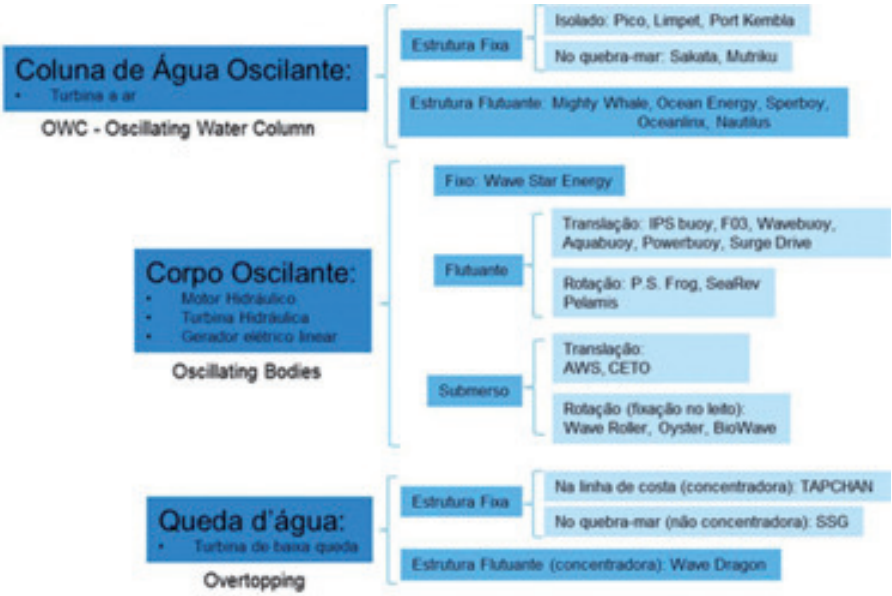

Figura 7: Classificação dos modelos segundo o princípio de funcionamento
Fonte: Traduzido de Falcão (2010)

Quanto à onda incidente, os conversores de ondas podem ser classificados em três tipos:

Atenuadores:

Posicionam-se com seu maior comprimento em paralelo a direção da onda incidente, como se as "montassem". O efeito pretendido é de atenuar a energia das ondas ao longo do corpo flutuante. Um exemplo deste tipo de conversor é o *Pelamis UK*, desenvolvido pela empresa britânica *Pelamis Wave Power*.

Terminadores:

Possuem a maior dimensão perpendicular à direção da onda, e as interceptam, com o objetivo de "termina-las". *Salter's Duck*, conversor desenvolvido pela Universidade de Edimburgo é um dos exemplos deste tipo.

Pontos-absorvedores:

São mecanismos com dimensões relativamente pequenas quando comparadas as da frente de onda, podendo ser matematicamente vistos como "pontos" no oceano. Podem ser estruturas flutuantes que oscilam em um ou mais graus de liberdade (por exemplo, a oscilação vertical conhecida como arfagem ou *heave*) ou uma estrutura submersa que oscila devido aos diferenciais de pressão das ondas na superfície. Geralmente, os sistemas deste tipo são projetados para terem a faixa de ressonância do grau de liberdade útil na mesma faixa de frequência das ondas incidentes, para maximização da energia. Um arranjo de conversores *point absorbers* altera as condições de mar de forma similar aos atenuadores e terminadores. Um exemplo desse tipo é a *Powerbuoy* da *Ocean Power Technology's*. Possuem a vantagem de absorver energia independentemente da direção das ondas incidentes. Estratégias de controle idealizadas para pontos absorvedores variam dependendo do sistema de potencia do conversor. Sistemas hidráulicos ou equipados com geradores lineares de imãs permanentes são, no entanto, os mais comuns.

Quanto à distância da costa podem ser:

Shoreline ou *Onshore* – Conversores de costa ou águas rasas:

Mecanismos localizados na costa ou *shoreline* tem a vantagem de estarem mais perto da rede de distribuição, menores custos estruturais e maior facilidade com manutenção, transmissão e instalação. São também menores as probabilidades de danos causados por condições extremas, já que a energia das ondas nessa faixa é menor. Em contrapartida, esta é também a maior desvantagem dessa faixa de locação, já que quanto menor for a energia disponível, menor será a potencia máxima gerada. Essa desvantagem pode ser parcialmente compensada pela concentração natural de energia em determinadas localidades na costa, os chamados "*hot spots*". Dependendo da localização na costa, a formação das frentes de onda pode ter dinâmica diferente, sendo mais regular e sinusoidal, ou seja, atuando em menos direções do que em aguas mais profundas. Mecanismos *onshore* podem ser instalados fixos ao leito marinho, dando estabilidade para o corpo oscilatório, ou, acoplados a um quebra mar, uma barragem ou um rochedo. O efeito das marés deve ser previamente levado em consideração. É um fenômeno lento e dependente do local.

Nearshore – Conversores de águas médias:

Estes estão localizados em aguas relativamente rasas, a algumas centenas de metros da costa, geralmente em profundidades inferiores a um quarto do comprimento da onda, o que seria algo entre 10 e 25 metros. Dispositivos nessa faixa do mar geralmente ficam ancorados ao leito marinho se utilizando de uma base inercial ou *heave plate*, que mantem o corpo fixo. A base inercial fica em uma profundidade onde o movimento das ondas não interfere na estrutura, garantindo que esta permaneça estática e forneça as forças de reação para o flutuador. Também há casos de conversores presos ao leito marinho. A desvantagem é a mesma dos dispositivos de costa, onde o contato com o leito marinho gera ondas com energia reduzida, o que limita o potencial energético.

Offshore – Conversores de águas profundas:

Localizados em grandes profundidades, esses dispositivos tem como vantagem a disponibilidade de maiores quantidades de energia. No entanto, mecanismos *offshore* são mais difíceis de instalar, operar e obter acesso para manutenção. Mais energia é perdida na transmissão via cabos marinhos devido a distancia até a estação elétrica. Além disso, os conversores precisam ser projetados para suportar condições mais extremas, o que aumenta os custos de fabricação. Embora os custos aumentem, alguns especialistas argumentam que maior potencia também possibilitaria maior estrutura econômica para o projeto.

A diferença entre tantos modelos se deve basicamente a especialização acadêmica do grupo que concebeu o mecanismo, geomorfologia do sítio de exploração, e às características do mar no local de aplicação, em especial o clima de ondas e batimetria. Vide novamente a figura 6 mostrando máquinas adequadas a cada altura de onda reinante em determinado sítio.

Os principais centros de pesquisa em energia das ondas estão na Europa em países como Dinamarca, Portugal, Noruega, Suécia e no Reino Unido, dentre outros países que também conduzem pesquisas, porém sem a existência de planta ou protótipo em operação.

3.1 O Modelo Brasileiro *Nearshore* de Conversão de Ondas em Eletricidade

Supõe-se um corpo rígido flutuante em que a maior parcela esteja submersa e em oscilação vertical, acompanhando o movimento das ondas. O flutuador é guiado por uma estrutura que restringe e torna negligenciável os movimentos em outras direções. Assume-se, portanto, que o movimento do conversor devido à ação das ondas ocorre apenas em um único grau de liberdade, verticalmente, movimento este conhecido na indústria naval como arfagem ou *heave*. A interação entre o objeto e as ondas incidentes causa distúrbio no movimento natural das ondas com a passagem de energia para o corpo oscilante e devido a isso forças atuarão no corpo flutuador.

Pesquisadores do PPE da UFRJ desenvolveram um conceito inédito de conversão da energia das ondas oceânicas em eletricidade em ambiente *nearshore*, principal característica de grande parte da costa brasileira, com tecnologia totalmente nacional.

O modelo foi desenhado para ser implantado em regiões muito próximas da costa, em zonas *nearshore*, antes da formação da zona de *surf*. Essa proximidade possibilita uma redução nas fainas de instalação e transmissão de energia para a terra com consequências sobre o custo de geração, quando comparada aos modelos de conversão ditos *offshore* mais distantes da costa.

O ambiente *nearshore* promete menores custos de geração, porém nesses ambientes de baixas profundidades há o desafio das ondas do mar passarem a ter comportamento diferenciado daquelas em águas profundas, iniciando o transporte de massa, inexistente em ambiente *offshore*.

Neste aspecto reside a originalidade do dispositivo proposto, realizando o aproveitamento simultâneo das energias potencial e cinética das ondas através da elaborada geometria para captação dessas duas formas de energia existente nas ondas de gravidade.

Em linhas gerais, o conceito pode ser descrito como corpo evoluído de uma pirâmide acrescido de quatro aletas, uma em cada aresta da pirâmide, conforme ilustra a figura 8.

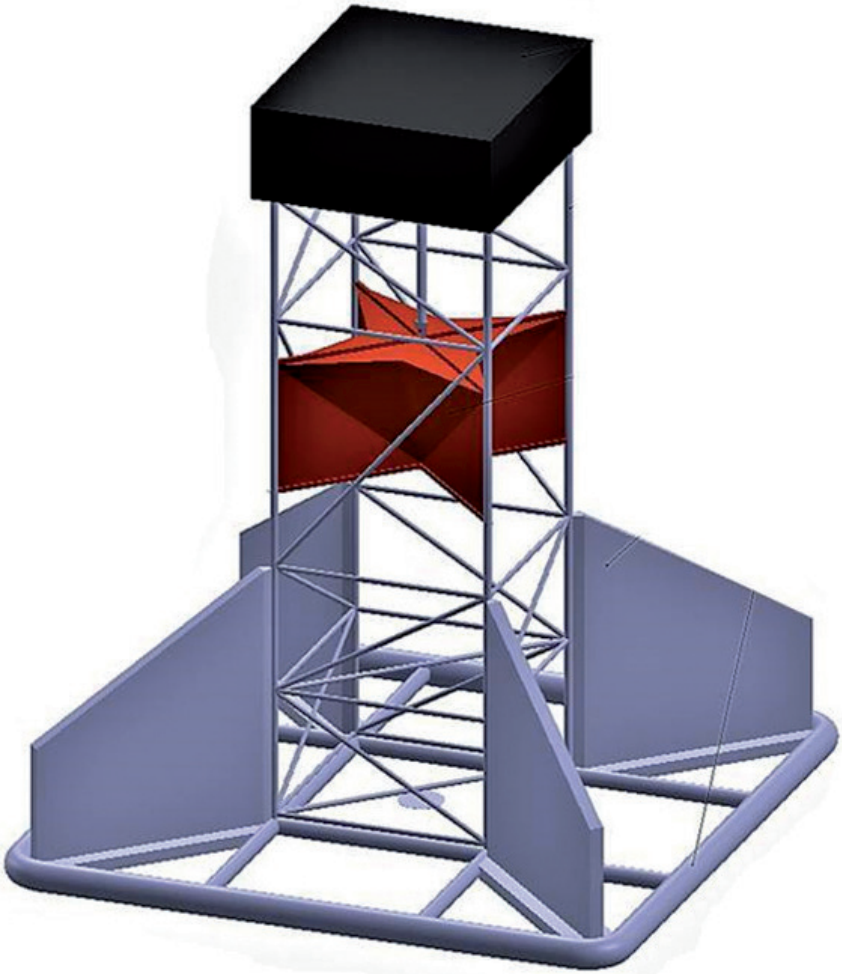

Figura 8: Esquema do conceito proposto
Fonte: D'Egmont (2017)

A pirâmide tem a função de atuar como boia e trabalha de forma invertida com a base da pirâmide para cima e sua ponta virada para baixo. Como qualquer corpo flutuante ele segue o movimento vertical de moção das ondas garantindo que parcela de energia potencial da onda será absorvida pelo corpo. As aletas, por sua vez, tem o objetivo de aumentar a captação da frente da onda incidente na largura do corpo, garantido assim que a parcela de energia cinética da onda seja captada. As paredes inclinadas da pirâmide direcionam o escoamento do fluido ao fundo do corpo flutuante, incrementando assim a parcela de energia cinética.

Sobre a superfície da boia um eixo de movimento alternado, segundo ação das ondas, garante mover o gerador instalado em uma casa de máquinas fixa no topo de uma jaqueta treliçada. Opcionalmente, ao invés de um gerador elétrico, pode-se optar pela instalação de uma bomba alternativa, onde o eixo central fixo atuaria como pistão da bomba.

A torre por sua vez descansa sobre um *radier* formado por tubos que tem as funções de:

- Balsa de transporte do conjunto;
- Tanques inundáveis de lastro da estrutura e
- Base de instalação no leito marinho.

Sobre o *radier* estão dispostos quatros refletores com a função principal de concentrador de ondas, a exemplo de um tubo Venturi, e adicionalmente auxiliando no equilíbrio estrutural da torre combatendo o momento fletor e como tanques auxiliares para lastro na fixação da estrutura no leito marinho por ação da gravidade.

É desejada a maximização do movimento vertical do corpo flutuante e para tanto a limitação de movimento em outras direções é limitado pela ação de uma torre treliçada. O corpo flutuante desliza ao longo das pernas da torre pela inclusão de rolos de polietileno dispostos nas arestas do corpo.

4. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO

O dispositivo em desenvolvimento desde o ano de 2012 no PPE/UFRJ é único e inovador no seu princípio de funcionamento e teve como primeiro passo a prova do conceito. Passo de vital importância antes que maiores esforços fossem empreendidos e recursos de diversas naturezas empregados em uma iniciativa que pudesse não ser promissora. Em tese, desejava-se comprovar o comportamento do corpo flutuador como bom captador da energia da onda, tendo como parâmetro resultante o seu deslocamento em função da altura de onda incidente sobre o aparato. Decidiu-se pela realização de modelagem com base em dados reais para verificação da discussão teórica e compreensão dos processos naturais que envolvem a dinâmica da energia oceânica.

4.1- Modelagem Física

Um modelo reduzido do conceito, na escala 1:40, foi confeccionado e submetido a testes experimentais em condições de laboratório no canal de ondas do Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária (INPH), de forma a reproduzir em escala os fenômenos aos quais o modelo estaria submetido na natureza. A figura 9 apresenta o modelo reduzido na escala 1:40 confeccionado em acrílico. A modelagem física foi realizada e relatada no âmbito da pesquisa de mestrado de MACHADO (2016) e reproduzida no texto que segue.

O canal de ondas é equipado com uma plataforma eletromecânica de geração de ondas irregulares, denominada batedor de ondas. Essa plata-

forma consiste de um sistema informatizado de geração de ondas que garante fidelidade e controle na reprodução mecânica, em escala reduzida, das ondas ocorridas na natureza.

A reprodução das ondas ocorre a partir de um arquivo digital de geração, o qual é produzido a partir da análise espectral (altura e período) de energia da onda na natureza. O arquivo digital gera um sinal eletrônico e, através de uma placa controladora de posição que emite um sinal elétrico, aciona um servomotor acoplado a um fuso-esfera que movimenta mecanicamente as placas dos batedores de onda. Esse movimento provoca o deslocamento da massa d´agua, e de forma acurada, reproduz as ondas, com a altura e o período correspondente aos da natureza. O sistema de geração efetua o controle de posição do batedor, monitorando em tempo real, os sinais a serem reproduzidos e os que são efetivamente gerados.

Figura 9: Modelo reduzido na escala 1:40
Fonte: Machado (2016)

Todos os sensores de medições de onda são conectados a um sistema de aquisição e análise de dados, e, de cada ensaio, é emitido um relatório de análise espectral e estatística das ondas gerados no modelo.

Após a construção e instrumentação do modelo MACHADO (2016) executou os ensaios de calibração. Os aspectos físicos envolvidos nos ensaios caracterizam-se pela predominância das forças inerciais e gravitacionais, razão pela qual são aplicadas as leis de semelhança de *Froude*. A escala linear adotada no modelo (l) de 1:40 deu origem às seguintes escalas complementares, para o modelo sem distorção:

- Força: 1: l 3® 1:64 000
- Tempo: 1: l 0,5® 1:6,324

Em função da escala de tempo, cada ensaio teve 18 minutos de duração, que equivalem em torno de três horas na natureza (1:1). Fixados os parâmetros de ajuste, executa-se a sequência de ensaios estabelecida na programação. Cada ensaio é repetido no mínimo duas vezes, a fim de se verificar a consistência dos valores registrados pelos equipamentos de medição. Havendo necessidade, os ensaios são repetidos até os resultados obtidos serem considerados íntegros e confiáveis. E, para calibrar a altura de onda desejada, foram realizados três ensaios com alturas diferenciadas de onda, sendo os ensaios repetidos para cada período de onda (T) e nível d'agua estabelecida na programação dos ensaios. Através dos resultados das medições de onda obtidos nos ensaios de calibração, obtidas as curvas de calibração, que fornecem com exatidão o alcance dos valores de altura significativa de onda (Hs) programada. Em linhas gerais esse estudo de modelagem física compreendeu:

- Gerar ondas com as características determinadas pelo estudo do clima de ondas na referida área de estudo;
- Avaliar o desempenho técnico do modelo de engenharia no aproveitamento da energia das ondas costeiras.

Os testes no modelo 1:40 (vide figura 10) comprovaram a eficácia do conceito como captador de energia das ondas com desempenho

satisfatório, apontando para o prosseguimento do seu desenvolvimento em escalas maiores e como promissora máquina de conversão de energia.

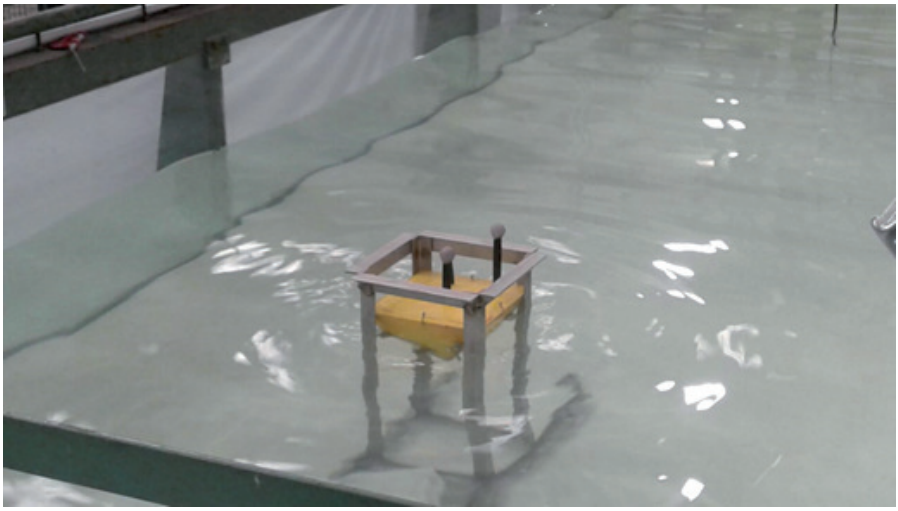

Figura 10: Modelo reduzido em teste
Fonte: D'Egmont (2017)

4.2- Estudos Hidrodinâmicos

KHAN (2017) estudou a geometria do corpo flutuante do dispositivo conversor de energia das ondas e realizou simulações modificando suas características físicas a fim de identificar a sensibilidade dos parâmetros geométricos na resposta do dispositivo às cargas ambientais de um sítio. Combinou as cargas hidrodinâmicas atuantes em um sítio real, sob um clima de ondas real, com mudanças paramétricas na geometria do flutuador visando maximizar seu rendimento energético.

KHAN criou modelos computacionais de diversas variações na geometria do corpo flutuante utilizando o *software Rhinoceros* de modelagem computacional, sobre os quais realizou análises hidrodinâmicas do fenômeno onda em águas rasas e intermediárias no domínio da frequência, recorrendo a Teoria Potencial Linear através do programa *Ansys Aqwa*.

Com base nas análises, identificou os parâmetros geométricos do flutuador do *point absorber* que mais impactam no seu desempenho na extração de energia das ondas, utilizando os dados reais de um sítio real monitorado por cinco anos como base.

4.2.1 Limites geométricos

O primeiro estabelecimento a ser feito é adquirir sensibilidade sobre qual será a faixa de comprimentos característicos do flutuador a ser testada. A faixa de períodos de onda com maior frequência de ocorrência no sítio estudado é de 5 a 15 segundos, com uma concentração maior nos períodos de 6 e 7 segundos. Vale ressaltar que, para definição da faixa com maior frequência, se levou em conta os períodos que tinham pelo menos 5% de frequência de ocorrência, onde frequências menores foram desprezadas.

Conforme citado por FALNES (2007), as unidades *wave energy converters* (WEC) devem ser relativamente pequenas. Para isto, é interessante que o comprimento característico de dispositivos *point absorber* seja da ordem de 5 a 10% do comprimento de onda predominante no sítio, de forma que a energia extraída seja maximizada em relação ao custo de construção e operação do dispositivo. O objetivo é que o dispositivo atue em águas consideradas rasas e intermediárias. Apesar de não haver um consenso na comunidade acadêmica sobre a definição exata dos limites entre essas águas e águas profundas, neste estudo será considerada uma profundidade máxima de 20 metros.

A expressão (2) é a relação de dispersão com a qual é possível se calcular o comprimento de onda em águas intermediárias.

$$\left(\frac{2\pi}{T_o}\right)^2 = \frac{2\pi g}{\lambda} tanh\left(\frac{2\pi d}{\lambda}\right) \qquad (2)$$

onde:

5ØGÜ5Ø\Ü: período de ondas [s].

Fazendo o cálculo iterativo para os períodos de 5 e 15 segundos, tem-se que:

5Øß5 = 36,5 5ØZÜ

5Øß15 = 143,0 5ØZÜ

Levando em conta estes comprimento de onda característico no sítio de implantação considerado, o menor comprimento característico do flutuador seria 5% do comprimento de onda para 5 segundos e o maior seria 10% do comprimento de onda para 15 segundos, portanto:

5Ø?Ü5Ø\Ü5,5% = 1,825 5ØZÜ

5Ø?Ü5Ø\Ü15,10% = 14,300 5ØZÜ

onde:

5Ø?Ü5Ø\Ü: comprimento característico do flutuador, conforme modelo geométrico [m].

Portanto, o corpo flutuante poderia assumir qualquer comprimento lateral entre esses dois limites máximos e mínimos. De posse desses valores estipulou-se que seriam testados modelos computacionais de 3, 5, 8 e 15 metros, abrangendo de forma satisfatória a faixa estipulada por FALNES (2007), bem como atendendo aos períodos de onda do sítio. Além disso, a outra variável livre do modelo geométrico do flutuador é o ângulo da lateral 5ØüÞ, e para tal, foi estipulado que a princípio seriam testados ângulos de 30p , 45p , 60p e 75p

4.2.2 Modelos geométricos

Foram realizadas duas rodadas de testes, uma sem considerar os chanfros na geometria (recuos nas laterais da pirâmide) e outra considerando os chanfros. O comprimento do chanfro ficou definido como uma porcentagem do lado 5Ø?Ü5Ø\Ü. O ângulo da parte lateral no chanfro por sua vez é influenciado pelo comprimento do chanfro, portanto:

x '! x (L) 5ØüÞ5Ø\Ü '! 5ØüÞ5Ø\Ü (x) '! 5ØüÞ5Ø\Ü (L) (3)

4.2.2.1 Modelo para testes sem chanfro

Partindo primeiramente de um modelo geométrico onde não se consideram os chanfros no topo do flutuador, nem qualquer parte do flutuador que esteja emersa (obras mortas) tem-se a seguinte geometria (figura 11):

Figura 11: Ilustração do modelo geométrico sem chanfros, feita no *Rhinoceros*
Fonte: KHAN (2017)

onde:

L: lado da área de linha d'água do flutuador [m];

T: calado do flutuador [m] e

5ØüÞ: ângulo da parte lateral do flutuador [graus].

A relação trigonométrica entre estes três parâmetros se torna explícita nas equações 4 e 5:

T=L/2"tan5ØüÞ (4)

T '! T (L,á) (5)

Conclui-se, portanto, que as variáveis geométricas que caracterizam a geometria preliminar do flutuador são três - L, T e á. No entanto, levando-se em consideração a relação (5), quem governa a geometria são na verdade, L e á. Estas duas últimas são, desta forma, as variáveis livres do problema, que devem ser manipuladas, sendo T a variável dependente, definida em função das variáveis livres.

4.2.2.2 Modelo para testes com chanfro

Considerando um modelo geométrico que contenha chanfros nas laterais, mostrando a parte de obras mortas (figuras 12 e 13) onde:

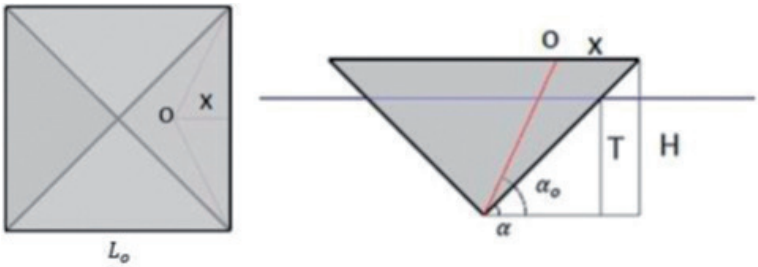

Figura 12: Ilustração do modelo geométrico com chanfros, feita no *Rhinoceros*
Fonte: KHAN (2017)

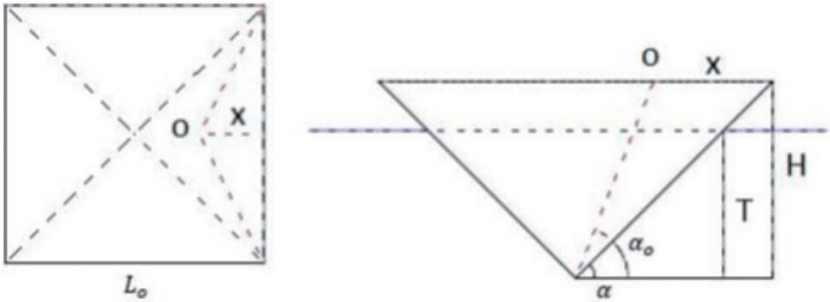

Figura 13: Outra vista do modelo geométrico com chanfros, feita no *Rhinoceros*
Fonte: KHAN (2017)

5Ø?Ü5Ø\Ü: lado da parte quadrada superior do flutuador, comprimento de obras mortas [m];

H: altura do flutuador [m];

5ØüÞ: ângulo da parte lateral do flutuador [graus];

5ØüÞ5Ø\Ü: ângulo da parte lateral do flutuador no chanfro [graus];

X: comprimento do chanfro [m] e

O: ponto de referência da quina do chanfro.

O comprimento do chanfro será definido como uma porcentagem do lado 5Ø?Ü5Ø\Ü, e, o ângulo da parte lateral no chanfro por sua vez será influenciado pelo comprimento do chanfro, portanto:

x ’! x (L) (6)

5ØüÞ5Ø\Ü’! 5ØüÞ5Ø\Ü (x)’! 5ØüÞ5Ø\Ü (L) (7)

A figura 14 apresenta um dos muitos resultados da simulação, desta feita para um corpo piramidal flutuante de 8 metros de lado e uma inclinação das paredes da pirâmide de 45º e recuos laterais (chanfros) de zero, um quarto e um oitavo da medida do lado.

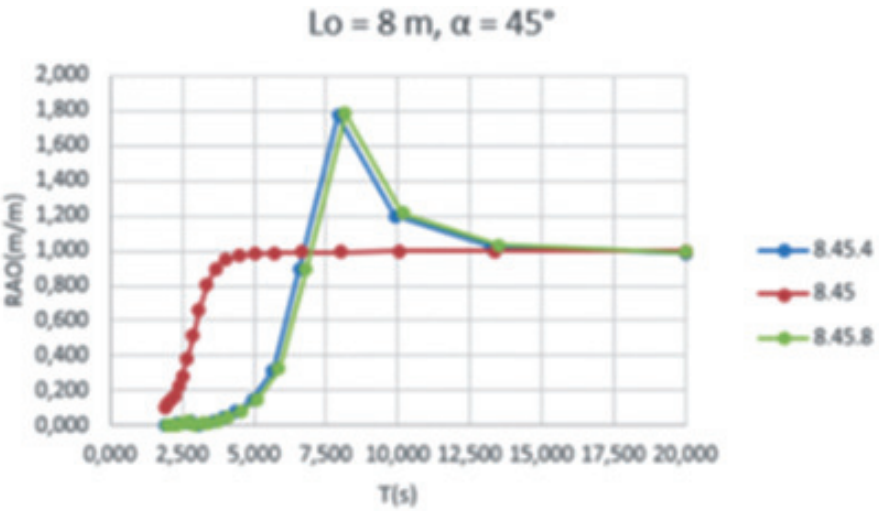

Figura 14: Resultados análise do RAO para modelos de 45º e 8 m
Fonte: KHAN (2017)

Como pode ser visto para um modelo sem chanfro, representado na cor vermelha, o corpo flutuador se deslocou verticalmente a mesma altura da onda que o elevou, enquanto que nos demais modelos houve uma amplificação no deslocamento vertical de 80% em relação à onda incidente que o elevou.

Com base nestes resultados estabeleceu-se em definitivo a geometria do corpo flutuante captador de ondas com os recuos laterais (chanfros) conforme ilustrado na figura 15.

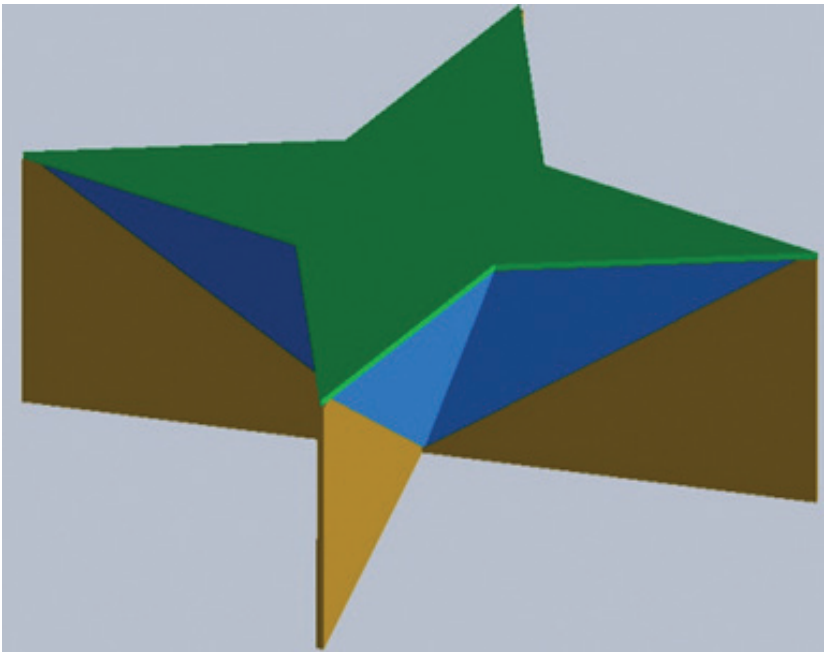

Figura 15: Corpo flutuante captador de energia das ondas com chanfros

Com base em todas as análises realizadas simulou-se a geometria do flutuador adaptada para as condições de mar do sítio e estimou a potência extraída de ondas regulares e irregulares para cada comprimento do corpo flutuante, importante para estabelecer a potencia nominal de cada unidade do conversor de energia. Dada à variação climática e as inúmeras possibilidades de sítios de aplicação, estabeleceu uma rotina de adaptação da geometria do flutuador para sítios genéricos.

4.3. Análise Estrutural do Flutuador

Gomes (2016) elaborou projeto básico estrutural do flutuador captador de ondas a partir de dutos tubulares, como visto na figura 16. Essa estrutura assim como demonstrada receberá o fechamento com chapas de aço e, alternativamente, será avaliado o uso de chapas de material compósito em HDPE (*High-density polyethylene*). Adicionalmente, Gomes (2016) simulou o comportamento estrutural diante da solicitação de diferentes carregamentos pela concentração das ondas sobre o dispositivo, permitindo assim, com iterações múltiplas verificar a estabilidade do corpo e realizar o correto dimensionamento do material a ser empregado na sua fabricação. A figura 17 mostra o resultado de uma dessas simulações.

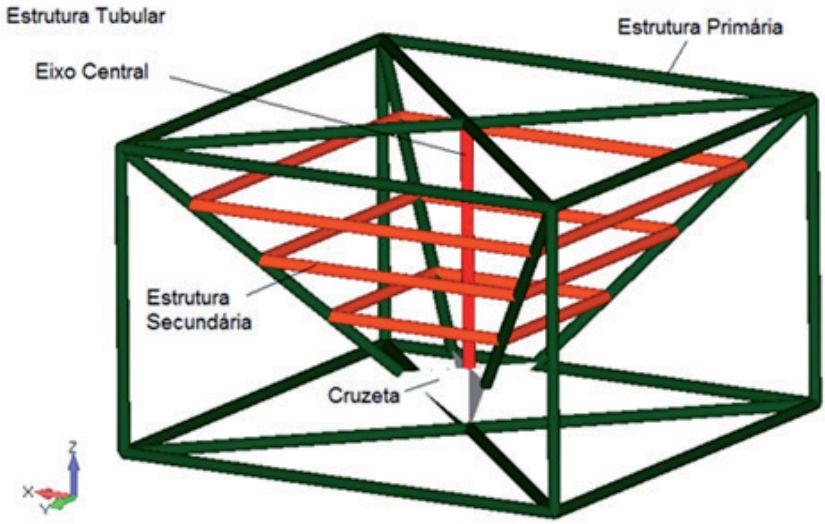

Figura 16: Projeto Básico da Estrutura do Flutuador
Fonte: Gomes, R. K. (2016)

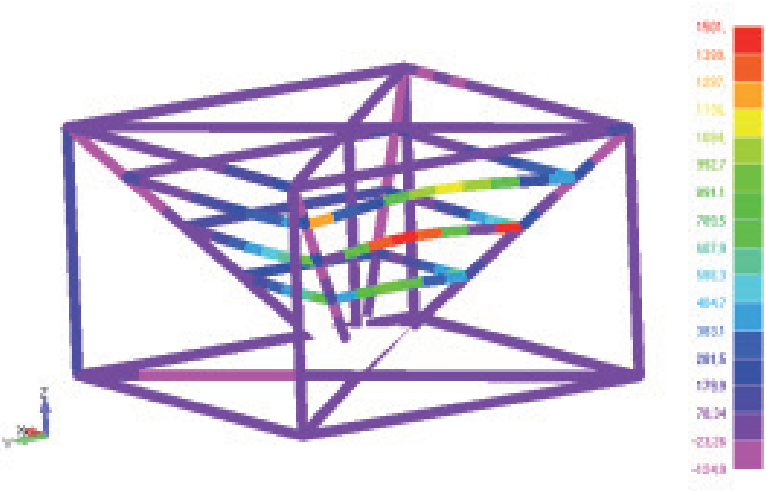

Figura 17: Simulação e Análise de Tensões no Flutuador
Fonte: Gomes R. K. (2016)

4.4. Geradores de Energia

Em conversores oscilador-flutuantes o corpo deve interagir com o oceano a fim de reduzir a quantidade de energia que estava antes presente no mar e transferi-la para o seu sistema oscilatório.

No processo de desenvolvimento de um conversor, a escolha do melhor conceito para o sistema gerador de potência, o chamado *power-take-off system* ou simplesmente PTO é fundamental para garantir utilidade à energia explorada. Este sistema é o responsável por converter potência na forma de energia elétrica. A forma que a energia é convertida e o número de conversões necessárias até a transformação final dependerá do princípio de funcionamento escolhido.

O sistema de potência atua invariavelmente como um amortecimento aos movimentos do conversor e, portanto, não só tem função na produ-

ção e transmissão de energia para o consumidor final, mas também na hidrodinâmica da transferência primária de energia ao corpo oscilante.

NETO (2017) analisou algumas dessas possibilidades de conversão da energia e as vantagens e desvantagens dos sistemas de potência considerados hoje como o estado da arte. Comparou atributos como eficiência, princípio de operação, complexidade, estágio de desenvolvimento do conceito, custo, volume, peso, disponibilidade de componentes, etc., com o intuito de definir a melhor solução tecnológica para este dispositivo.

Em sua análise NETO (2017) delineou requisitos desejáveis no sistema de potencia a ser selecionado para um dispositivo de energia de ondas:

- Reduzir investimento inicial, custos operacionais e de manutenção - diminuir ao máximo *CAPEX* e *OPEX* do projeto de modo a dar competitividade ao preço da energia.
- Eficiência: é um aspecto importante, pois altera diretamente o valor final da energia produzida.
- Peso: o peso do sistema de geração de potencia deve ser projetado para ser o menor possível, dado que pesos maiores demandam ao mecanismo flutuabilidade extra, exigem estrutura de suporte mais robusta e dificultam a instalação do equipamento no sitio.
- Confiabilidade: as intervenções para manutenção devem ser evitadas sempre que possível, devido à inacessibilidade dos módulos durante vários meses do ano e ao custo de acesso a esses equipamentos em ambientes marítimos. A manutenção deve ser anual.
- Simplicidade: o mecanismo deve ser simples e com o menor número de modos de falha.

Além disso, considerando a escala real, aspectos como *grid code compliance* (ou a capacidade que uma instalação conectada a rede possui de assegurar funcionamento apropriado, seguro e econômico), segurança do equipamento e dos operadores e acessos para manutenção, são também questões de relevância para o projeto.

Para extrair potencia, o flutuador acompanha a elevação da superfície d'agua em cada ciclo. Essa característica leva a um número extremo de ciclos durante a vida útil do mecanismo. De acordo com experiências com o desenvolvimento do cilindro hidráulico para o conversor da *Oyster WEC,* assume-se que sistema *power take off* (PTO) deve ser projetado para suportar cerca de 25 milhões de ciclos durante um período de cinco anos de serviço, logo 5 x 106 ciclos por ano.

Para comparar as alternativas foi desenvolvido um método de matriz de decisão adaptado do método de Pugh, que propõe uma forma de ordenar as opções de sistema PTO de acordo com critérios específicos que atendam os objetivos do projeto ou requisitos de potenciais clientes/consumidores. Todas as alternativas são comparadas entre si em três possíveis escalas para cada critério: ótima (+), médio (0) e ruim (-). O número de pontos total é a soma de pontos multiplicados pelo peso de cada critério. Essas análises são aqui usadas como base para a escolha de critérios, para o peso dado a cada critério e para a avaliação dos sistemas, cujos resultados são apresentados na Tabela 1.

Fundamentada nesta análise NETO indica um sistema hidráulico em circuito fechado para o conversor. Em paralelo, BESSO (2017) e TURCI (2017) propõem como PTO, respectivamente, o uso de pião e cremalheira para o acionamento direto do gerador; um multiplicador de velocidade para utilização de geradores empregados no mercado de energia eólica e um motor de indução linear.

Tabela 1: Escala real – potência máxima: 435 KW/ Nominal: 60 KW

Item	Criterios	Grau de Importância	Alternativas				
			C1	C2	C3	C4	C5
1	Custo Inicial	10	+	-	+	-	+
2	Eficiência em carga total	10	+	+	+	0	-
3	Eficiência em carga Parcial	10	-	+	+	-	-
4	Peso	8	+	-	0	0	+
5	Volume	6	+	-	0	0	+
6	Complexidade do Sistema	8	0	+	0	-	0
7	Disponibilidade de componentes	8	+	-	+	-	-
8	Escalabilidade	8	+	0	+	+	-
9	Adaptação às condições de mar	9	+	+	+	-	-
10	Facilidade de fabricação	8	+	-	+	0	+
11	Manutenção	8	+	+	0	-	0
12	Impacto Ambiental	8	-	+	0	0	0
13	Sistema de parada	6	+	+	+	-	+
14	Qualidade do sinal elétrico	8	+	-	+	+	+
Total		107	71	11	69	-43	1

Dessa maneira, os estudos concernentes ao emprego de sistemas de geração de eletricidade dão a oportunidade de emprego de diferentes princípios de geradores, capacitando uma escolha para cada caso em função do custo, disponibilidade, manutenção e área geográfica.

4.5. Sistema de Deslizamento do Corpo Flutuante

TORRES (2017) dimensionou o sistema de deslizamento do flutuador ao longo da jaqueta treliçada com roldanas de polietileno, considerando as tensões principais na haste de seu suporte. Utilizando o carregamento de onda extrema e regime operacional, foram avaliados os efeitos de flexão, compressão, cisalhamento e fadiga utilizando teoria da elasticidade, ratificada por meio de métodos finitos com vistas à identificação de pontos críticos e possíveis falhas.

As figuras 18 e 19 mostram o sistema de deslizamento no seu conjunto e o detalhe de cada um dos conjuntos, respectivamente, para melhor visualização.

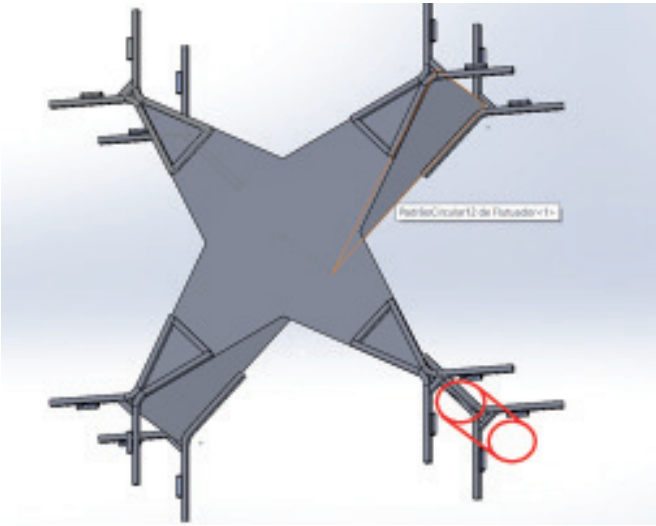

Figura 18: Visão geral do sistema de deslizamento do corpo flutuante
Fonte: TORRES (2017)

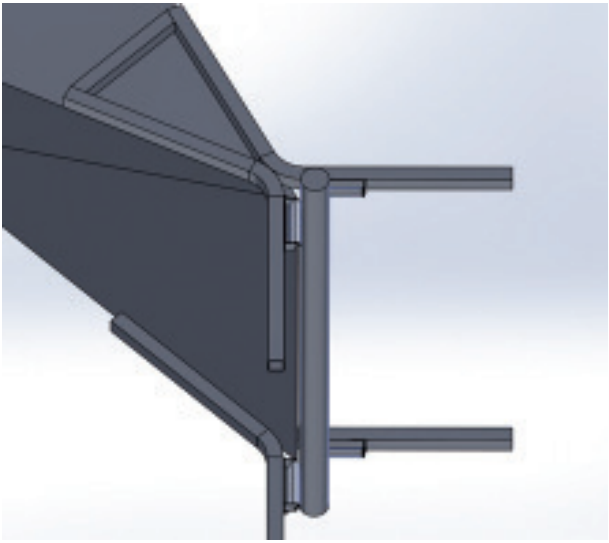

Figura 19: Detalhe do sistema de deslizamento do corpo flutuante
Fonte: TORRES (2017)

4.6- Estrutura de Sustentação

Jaqueta é uma estrutura tubular cujas pernas servem de gabarito para a cravação das estacas e de contraventamento lateral das mesmas. Normalmente em terra recebe o nome de Torre Treliçada e foi escolhida como estrutura que sustentará o sistema de conversão de energia das ondas, do tipo *point absorber*. O corpo flutuante se movimentará verticalmente no interior da torre por sistemas de roldas de polietileno como será visto adiante.

A estrutura em questão será instalada em águas rasas (*nearshore*), definida como uma região com profundidades inferiores a um quarto do comprimento da onda, o que seria algo até 40 metros. Mecanismos nessa faixa do mar, geralmente ficam ancorados ao leito marinho fazendo uso de uma base inercial ou *heave plate*, que mantém o corpo fixo.

Adicionalmente, o pórtico sustentará o flutuador que receberá a energia das ondas e todos os equipamentos que serão responsáveis por transformar o movimento em energia elétrica ou potencial. Além do peso próprio citado, é necessário ter resistência no sistema para enfrentar as solicitações das ondas e do vento. A estrutura de suporte do conversor será submetida a carregamentos dinâmicos, induzidos pelo conversor, e hidrodinâmicos, induzidos pela ação da onda e da correnteza.

O dimensionamento da estrutura se assemelha ao de uma plataforma *offshore*, a qual deve ser projetada e dimensionada para resistir a todas as solicitações e diferentes condições de contorno durante a sua operação. Para carregamentos como o peso próprio de seus componentes e os carregamentos ambientais extremos, a estrutura deve atender aos critérios de limite de tensões e deformações, baseado na tensão atuante na seção e os parâmetros da resistência dos materiais. Desse modo, o dimensionamento consiste em calcular uma estrutura *offshore*, similar a uma jaqueta, com todas as análises e resultados com base nas normas API RP 2A-WSD e DNV 30.5.

A escolha de uma jaqueta como estrutura de suporte do aparato conversor reside no fato de ser uma estrutura relativamente mais barata, quando comparada a outras estruturas marinhas artificiais. Ainda mais quando se deseja

combater momentos fletores de grandes magnitudes há de se supor que dividir o esforço estrutural por quatro pernas de uma torre para descarregamento no solo requererá estruturas menos complexas que no caso de um monoposte, como cogitado em fase inicial de desenvolvimento.

GOMES (2017) avaliou o comportamento estrutural de um suporte para conversores de energia de ondas localizados em região *nearshore*, levando em consideração as solicitações atuantes durante a sua operação. O conceito deste suporte é semelhante ao das estruturas do tipo jaqueta, encontradas em plataformas utilizadas na indústria de óleo e gás, tendo este a particularidade de prover um grande vão sem a presença de peças de contraventamento de forma a permitir o deslocamento do corpo flutuante sem interferências. A figura 18 mostra o esquema da torre projetada para o dispositivo de conversão de energia das ondas.

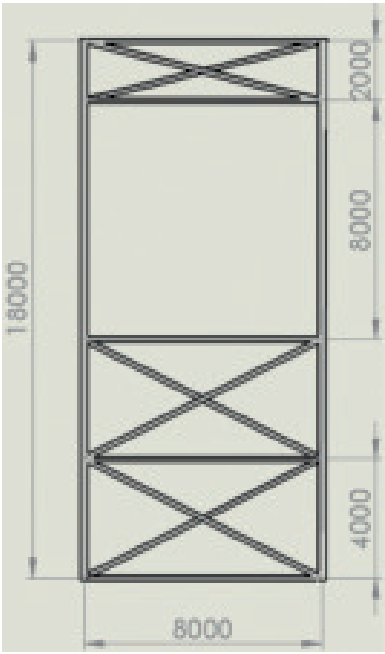

Figura 20: Vista frontal da estrutura estudada de base quadrada
Fonte: GOMES (2017)

No caso de carregamentos que acarretam tensões variadas, quando as ondas e os ventos atuam simultaneamente, a estrutura pode apresentar falhas para valores de tensão inferiores ao limite de resistência. Dessa forma, para um dimensionamento seguro e conservador da estrutura, deve-se considerar dados e materiais com a finalidade de se obter um alto Fator de Segurança. Este é um dos desafios do projeto, podendo-se alterar algumas proposições iniciais a partir dos resultados alcançados nos cálculos.

As seções críticas da torre e os esforços atuantes encontram-se apresentados na figura 19 e os principais resultados estão resumidos na tabela 2. A figura 20 mostra o projeto da torre treliçada elaborado por GOMES (2017).

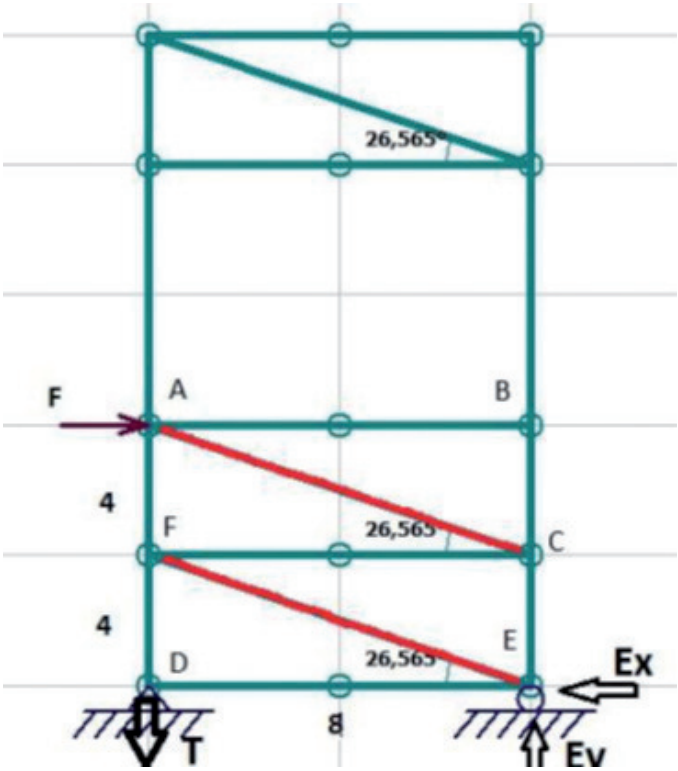

Figura 21: Simulação de cargas e indicação dos tramos críticos do pórtico
Fonte: Gomes (2017)

Tabela 2 – Esforços atuantes nas treliças

TRAMO	ESFORÇO
AC	- 28,75 KN
AF	14,19 KN
FE	- 22,54 KN
FC	- 20,16 KN
CE	14,93 KN
DE	4,85 KN

Fonte: Gomes (2017)

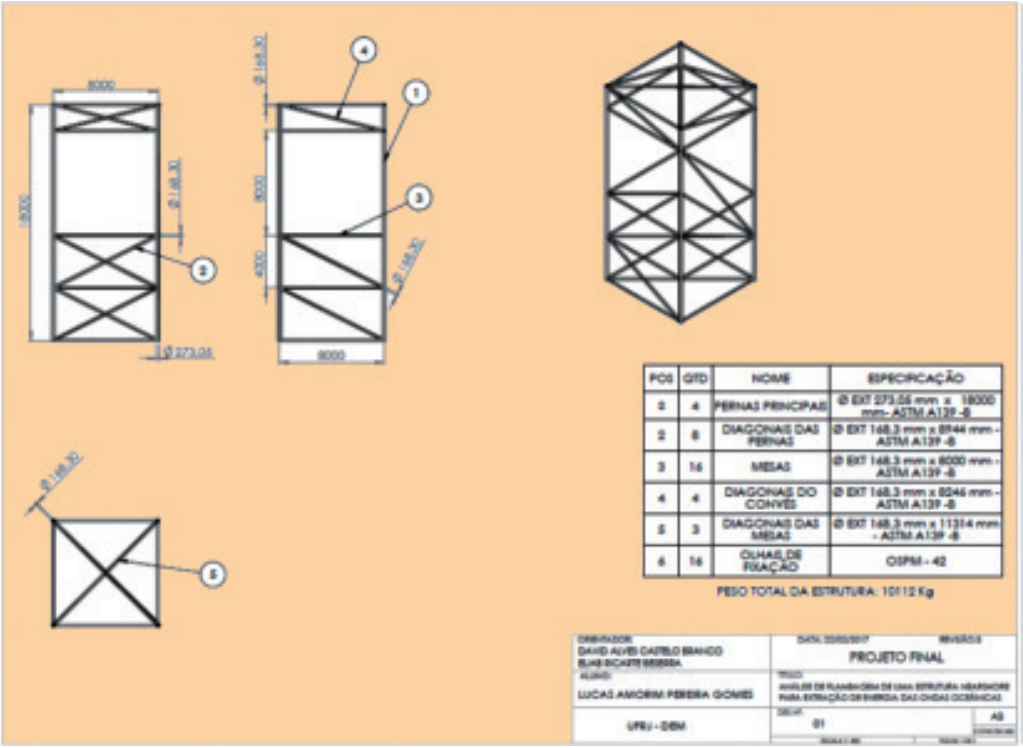

Figura 22: Projeto da torre treliçada de suporte ao aparato *point absorber* de energia das ondas

Fonte: Gomes (2017)

4.7- Base de Transporte e Fixação

Um fator de suma importância para um aparato de conversão de energia de ondas é o sistema de fixação ao fundo do mar (*mooring*) ao qual este estará ligado. Ainda que um dispositivo esteja perfeitamente dimensionado em todos os aspectos técnicos, mecânico-elétrico e hidrodinâmicos e não estiver devidamente ancorado inviabilizará o projeto como um todo. Seja no aspecto técnico ou pelos altos custos que um projeto inadequado pode implicar. Um sistema de fixação para águas profundas pode em alguns casos ser tão complexo que não viabilize o projeto de um WEC.

A torre dimensionada por GOMES (2017) estará conectada na sua base a uma estrutura tubular em formato de *radier* para realizar o transporte do conjunto conversor de ondas, assemelhando-se a uma balsa formada por dutos. A grande vantagem desse sistema é garantir que toda a construção e montagem da usina de ondas ocorram em terra firme ou estaleiro. Uma vez concluída a montagem da usina em estaleiro ela pode ser rebocada até o sítio de implantação e por um processo de inundação dos dutos que constituem o *radier* ela aderna, ocupando seu lugar no leito marinho.

Além da importância de simplificação de macro e micro logística envolvidas na montagem de usinas de ondas, a inclusão do *radier* traz efeitos positivos de implicações ambientais. A conversão de energia das ondas é um processo verdadeiramente limpo, sendo-lhe imputado como aspecto negativo o período de montagem no mar e os movimentos de embarcações e equipes utilizadas no processo. O *radier* projetado diminui sobremaneira o tempo de permanência e movimentação no mar, além de garantir o rápido descomissionamento completo da estrutura, quando desejado, injetando ar nos dutos da base permitindo sua emersão. Processo inverso da inundação.

Existem algumas considerações que devem ser feitas com relação ao sistema de fixação para que se possa pensar na viabilidade do projeto como um todo:

o O sistema tem de ser capaz de garantir a estabilidade do aparato, tanto que este consiga operar em situações de bom tempo ou mesmo em tempestades.

o O aparato deve ser fixado de tal forma que evite grandes tensões em cabos de transmissão elétrica.

o Todos os componentes têm de ter resistência mecânica tanto para cargas eventuais quanto para cargas cíclicas (resistência à fadiga).

o Algum grau de redundância em componentes mais críticos é extremamente recomendável.

o O sistema como um todo deve ser capaz de trabalhar com segurança e eficiência por pelo menos 30 anos, podendo haver trocas de componentes ou manutenção a cada 5 anos.

o O sistema de fixação deve ser projetado levando em conta as variações de maré do local.

o Remoção de componentes do sistema de fixação para manutenção deve ser possível.

o O sistema deve ser projetado para permitir atracação de embarcações com equipe de manutenção.

o Deve ser evitado o contato entre os cabos das amarras.

o O sistema de fixação não deve interferir negativamente na eficiência do sistema de geração de energia.

SILVA (2017) realizou estudos de equilíbrio e estabilidade para o transporte seguro do conjunto e para uma instalação precisa do equipamento proposto. Fez diversas simulações nas operações de transporte e instalação do aparato, garantindo a segurança do conjunto desde o estaleiro onde será montado até o local de operação.

Para realizar o estudo de equilíbrio há de satisfazer o princípio de Arquimedes e para tanto foram testados vários diâmetros de tubulação, de maneira a encontrar a configuração com o menor peso que consiga fazer o sistema flutuar. A figura 21 mostra um esquema unifilar utilizado na simulação computacional de equilíbrio e estabilidade da estrutura para transporte no mar.

Foram comparadas as diferentes configurações até se encontrar aquela mais adequada ao objetivo do estudo, segundo os critérios de estabilidade descritos na NORMAM 01 - 2005 que regulamenta as embarcações que navegam dentro da costa brasileira. A configuração viabilizada pelo estudo está demonstrada na figura 22 e os parâmetros com os quais se chegou a esse resultado estão explícitos na tabela 3.

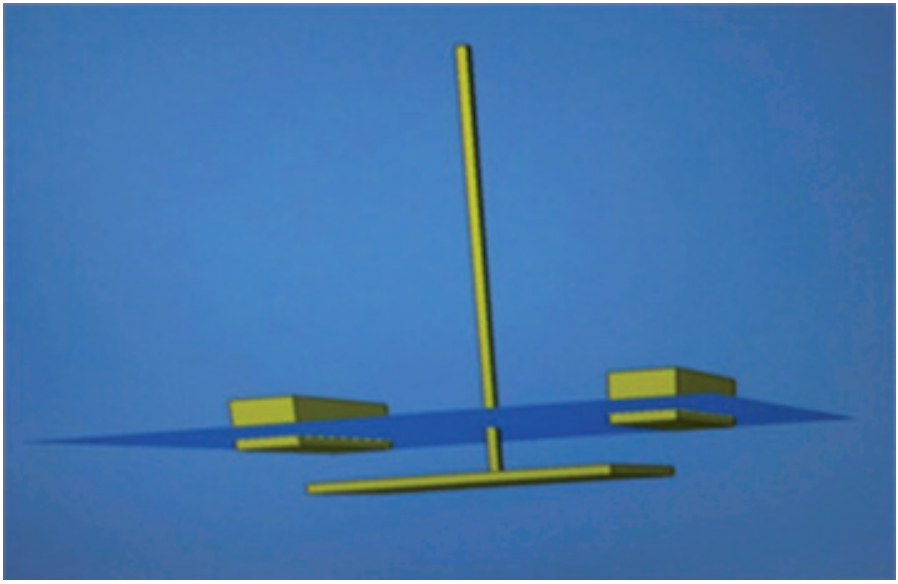

Figura 23: Simulação computacional de estabilidade no transporte marítimo do WEC
Fonte: Silva (2017)Tabela 3 - Equilíbrio do Sistema Final

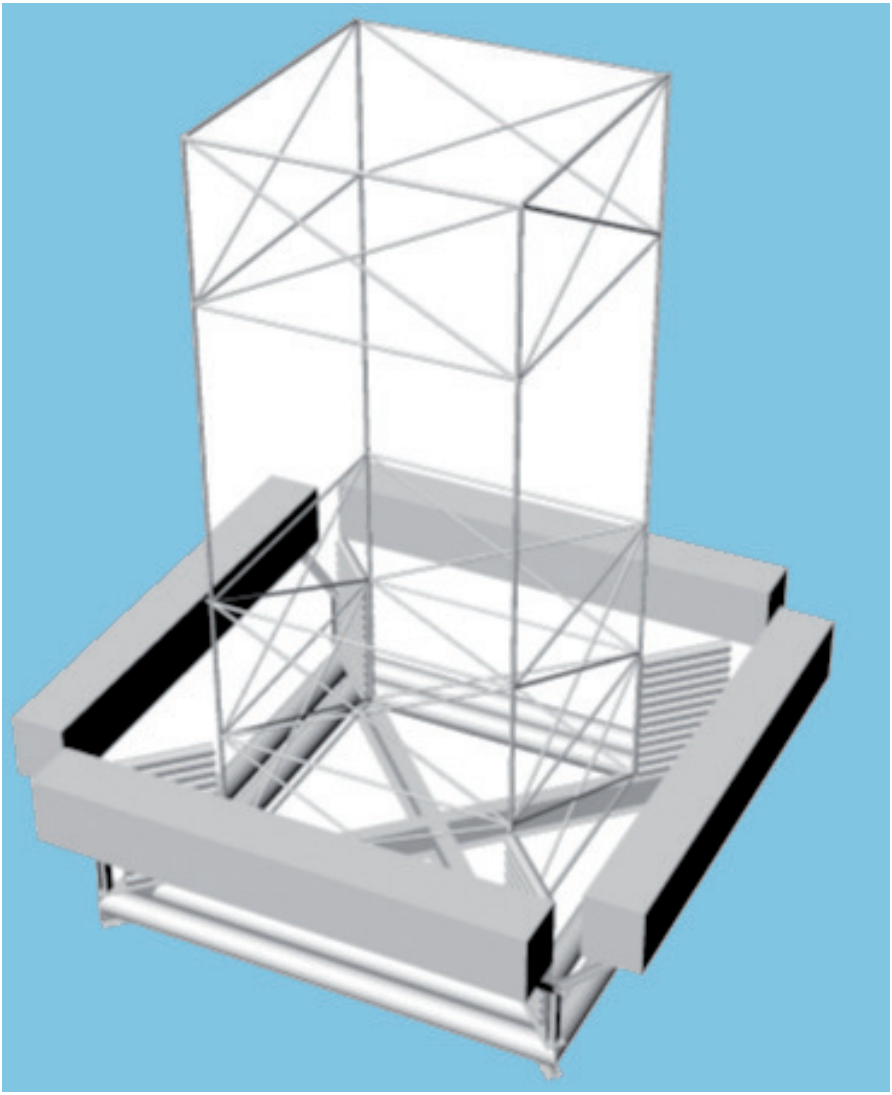

Figura 24 - Estrutura Final Completa
Fonte: Silva (2017)

Tabela 3 - Equilíbrio do Sistema Final

Draft Amidships m	3.491
Displacement t	84.44
Heel deg	0.0
Draft at FP m	3.491
Draft at AP m	3.491
Draft at LCF m	3.491
Trim (+ve by stern) m	0.000
WL Length m	16.900
Beam max extents on WL m	16.900
Wetted Area m^2	325.756
Waterpl. Area m^2	80.158
Prismatic coeff. (Cp)	0.425
Block coeff. (Cb)	0.107
Max Sect. area coeff. (Cm)	0.887
Waterpl. area coeff. (Cwp)	0.365
LCB from zero pt. (+ve fwd) m	0.000
LCF from zero pt. (+ve fwd) m	0.000
KB m	1.863
KG fluid m	6.471
BMt m	35.616
BML m	35.068
GMt corrected m	31.008
GML m	30.460
KMt m	37.479
KML m	36.931
Immersion (TPc) tonne/cm	0.822
MTc tonne.m	1.522
RM at 1deg = GMt.Disp.sin(1) tonne.m	45.697
Max deck inclination deg	0.0000
Trim angle (+ve by stern) deg	0.0000

Fonte: Silva (2017)

5- CONCLUSÃO E PERSPECTIVAS

O desenvolvimento do conceito de conversão de energia das ondas em eletricidade tem se mostrado promissor em todas as suas etapas, apontando para a continuidade da pesquisa e suas novas etapas subsequentes. A possibilidade de utilização da força motriz das ondas para a obtenção de outros produtos de infraestrutura como agua potável em alta pressão para a dessalinização por osmose reversa, geração de calor e frio, armazenamento de energia na forma de ar comprimido ou água bombeada, etc., todas sem o uso de eletricidade abre um leque de possibilidades para sua aplicação.

Em todo e qualquer projeto de inovação tecnológica chega um momento em que a pesquisa precisa sair do ambiente controlado dos laboratórios e ser experimentada nas condições reais de funcionamento de um sítio oceânico, onde fatores físicos, químicos e bióticos inesperados possam atuar. As repostas obtidas de campo permitirão especificar um modelo cabeça de série, etapa fundamental para início de sua comercialização.

Outro cenário que se vislumbra é a utilização combinada do dispositivo de conversão de energia das ondas em compartilhamento da infraestrutura com a energia eólica, por exemplo, onde estrutura de sustentação e cabeamento elétrico pode ser comum, com custos divididos, para uma geração multiplicada. Este conceito denominado *co-location* vai além das fontes geradoras de energia, podendo ser em outro cenário o uso conjunto de obras costeiras, portuárias ou afins que ao invés de obras passivas poderiam trazer algum retorno financeiro com a venda da eletricidade.

O trabalho de desenvolvimento técnico de um dispositivo de ondas é apenas a etapa inicial de desdobramentos de alcance também econômico e social

Agradecimentos

Ao agradecer às instituições abaixo que apoiam o projeto, estende-se o preito de gratidão aos profissionais que se empenharam além de suas obrigações para permitir que este projeto chegasse ao seu atual estágio de desenvolvimento:

Programa de Planejamento Energético PPE / COPPE / UFRJ

Laboratório de Ensaios Dinâmicos e Análise de Vibração LEDAV / PENO / COPPE / UFRJ

Laboratório de Ondas e Correntes LOC / PENO / COPPE / UFRJ

Instituto Nacional de Pesquisa Hidroviária INPH

Marinha do Brasil MB

6- Referências Bibliográficas

BESSO, M. (2017) – *Projeto de Eixo de Transmissão de um Flutuador Point Absorber de Energia das Ondas para Acionamento do Gerador Elétrico*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

D'EGMONT, L. B. F. (2017) - *Avaliação de um dispositivo conversor de energia de ondas do mar e o papel das patentes nos projetos de engenharia*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

FALCÃO, A. F. de O. (2010). *Wave energy utilization: A review of the technologies*. In: Renewable and sustainable energy reviews, v. 14, n. 3, p. 899-918, 2010.

FALNES, J. (2007) - *A review of wave-energy extraction*. In: Marine Structures 20 (2007) 185–201.

FALNES, J.; LILLEBEKKEN, Per M. (2003). *Budal's latching-controlled-buoy type wave-power plant*. In: Proceedings of the 5th European Wave Energy Conference, Cork, Ireland. 2003.

FOLLEY, M.; WHITTAKER, T.J.T.; HENRY, A. (2007). *The effect of water depth on the performance of a small surging wave energy converter*. In: *Ocean Engineering,* N. 34 pp 1265–1274, Elsevier, 2007.

GOMES, L. A. P. (2017) - *Análise de Flambagem de uma estrutura nearshore para extração de energia das ondas oceânicas*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

GOMES, R. K. (2016) - *Análise estrutural do flutuador de dispositivo nearshore para extração de energia das ondas oceânicas*. Documento interno sem publicação, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

KAHN, B. de M. (2017) - *Estudo Hidrodinâmico da Geometria de um Flutuador para um Dispositivo Conversor de Energia das Ondas*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

MACHADO, G. A. (2016) - *Energia oceânica em zonas costeiras urbanas: estudo de caso no Bairro do Leme*. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade, Católica do Rio de Janeiro, 2016.

MONÁRDEZ, P.; ACUÑA, H.; SCOTT, D. (2008). *Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile*. In: Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE2008. Estoril, Portugal, 15-20 de junho de 2008.

NETO, S. de A. (2017) - *Análise, seleção e dimensionamento de sistema mecânico para transmissão de potencia em um conversor de energia de ondas oceânicas*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

RICARTE, E. (2007). *Avaliação de Sítios para o Aproveitamento dos Recursos Energéticos das Ondas do Mar*. Tese de Doutorado, Programa de Engenharia Naval e Oceânica (PENO) do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: http://www.oceanica.ufrj.br/intranet/teses/2007-doutorado_eliab_ricarte_beserra.pdf.

SANDERS, I.; GARDINER, A.; GORMAN, R. & PENNY G. (2003). *New Zealand Wave Energy Potential: Riding the Crest of a Wave or Gone with the Wind?*. In: Industrial Research Limited & National Institute for Water and Atmospheric Research, New Zealand.

SILVA, G. A. C. (2017) - *Proposição de um sistema de transporte e instalação para dispositivo de conversão de energia de ondas*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

TORRES, C. B. de A. (2017) – *Dispositivo de deslizamento guia de um WEC tipo Point Absorber*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

TURCI, D. R. B. (2017) – *Projeto de Caixa Multiplicadora de Velocidade para Dispositivo de Geração de Energia das Ondas do Mar*. Projeto de Graduação do Curso de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

Esta edição do **Cadernos de Energia** contou com apoio financeiro do
PROEX/CAPES

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

COPPE – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia

PPE – Programa de Planejamento Energético

Centro de Tecnologia, Bloco C, sala 211, Cidade Universitária
CEP 21941-972 – Rio de Janeiro - RJ