



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

WALLACE SOEIRO FERREIRA

**PROJETO EXPERIMENTAL PARA A PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTES OCEÂNICAS:
ONDAS E CORRENTES MARINHAS**

SÃO LUÍS - MA

2018

WALLACE SOEIRO FERREIRA

**PROJETO EXPERIMENTAL PARA A PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTES OCEÂNICAS:
ONDAS E CORRENTES MARINHAS**

Monografia de graduação apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA MONOGRAFIA DEFENDIDA PELO ALUNO WALLACE SOEIRO FERREIRA E ORIENTADA PELO PROF. DR. FERNANDO LIMA DE OLIVEIRA.

PROF. DR. FERNANDO LIMA DE OLIVEIRA
ORIENTADOR

SÃO LUÍS - MA

2018

FICHA CATALOGRÁFICA
BIBLIOTECA CENTRAL – UEMA

Ferreira, Wallace Soeiro.

Projeto experimental para a produção de energia elétrica a partir de fontes oceânicas: ondas e correntes marinhas / Wallace Soeiro Ferreira. – São Luís, 2018.

62 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira.

1.Energia renovável. 2.Energia oceânica. 3.Bancada experimental. 4.Projeto. 5.Construção. I.Título

CDU: 621.311.24

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**PROJETO EXPERIMENTAL PARA A PRODUÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE FONTES OCEÂNICAS:
ONDAS E CORRENTES MARINHAS**

Autor: Wallace Soeiro Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta monografia.

Prof. Dr. Fernando Lima de Oliveira (Orientador)

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Dr. Lourival Matos de Sousa Filho

Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Me. Flavio Nunes Pereira

Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual do Maranhão

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

São Luís - MA, 13 de dezembro de 2018.

Dedicatória

Aos meus pais que investiram em mim por toda uma vida para que esse momento pudesse ser realizado.

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus por ter me sustentado até aqui com vida, saúde e disposição para realizar as mais diversas ações em todas as áreas da minha vida.

Agradeço a minha mãe Rosiane e a meu pai José de Ribamar, que dedicaram suas vidas sem hesitar para que eu fosse educado. Agradeço muito pela educação cristã que me firmou em um caráter digno. Um dia os recompensarei por todo esforço que tiveram em educar seus quatro filhos.

Agradecimentos a minha namorada Jacqui que em nenhum momento me abandonou neste trabalho, me deu tempo para concluir e se dispôs continuamente em ajudar, tanto nos testes, quanto emocionalmente quando muitas vezes eu achava que não daria certo.

Agradeço ao meu professor orientador Dr. Fernando Lima de Oliveira por ter, inicialmente, me contemplado com a oportunidade de fazer parte dessa pesquisa na área de energia oceânica. Agradeço a paciência, a compreensão e a confiança em minha capacidade.

Reginaldo, o idealizador desse projeto, eu tenho muito a agradecer-lo, por ter confiado em mim desde o começo e me ajudado nos momentos difíceis. Futuramente nós seremos recompensados quando o primeiro modelo em escala real do Princesa do Mar estiver em funcionamento no litoral maranhense. Todo este esforço valerá a pena.

Agradeço a UEMA pela oportunidade de me fazer cursar o que eu pretendia desde o ensino médio, se não fosse essa instituição, nada disso estaria se tornando realidade.

Agradeço ao professor Dr. Lourival Matos de Sousa Filho que me deu a oportunidade de ser o monitor da disciplina Dinâmica dos Fluidos, a qual é considerada por todos a mais difícil do curso. Foi uma experiência incrível e de muita responsabilidade.

Aos meus amigos da turma 2014.1 de Engenharia Mecânica eu tenho meus sinceros agradecimentos. A todos sem exceção que estiveram junto comigo quando eu estive hospitalizado me ajudando no que eu precisava! Nossas alegrias nas quadras, nas brincadeiras, curtições e nos churrascos - única panelinha que funcionou nessa turma. A todos vocês, meus amigos, desejo muito sucesso em suas caminhadas profissionais.

Agradeço a Equipe Zeus de Aerodesign e aos professores Flavio Nunes, Antônio Mohana e Fernando Abreu, pelos grandes momentos proporcionados. Parabéns a esta equipe que, em 2018, conquistamos o melhor resultado da história ficando em 12º lugar nacional e a menção honrosa de maior acuracidade de carga paga. E lá voamos nós!

Obrigado, Wesley Brandão da empresa Turbo Jato, por ter cedido os materiais em vidro necessários para a construção da bancada.

Agradeço a empresa Só Cores pelos motores de impressora cedidos para os geradores deste projeto.

Obrigado, meu amigo Leandro Lima, por me ajudar com as impressões dos materiais em 3D por um preço irrisório. Que continue como és e serás um grande engenheiro na área de automação e controle.

Obrigado, Família! Obrigado, Igreja Presbiteriana Betesda! Obrigado, UEMA! Obrigado, Deus!

Epígrafe

*“Assim, ao Rei eterno, imortal, invisível,
Deus único, honra e glória pelos séculos
dos séculos. Amém!”*

I Timóteo 1.17

Resumo

A demanda por energia elétrica aumenta exponencialmente devido ao crescimento populacional e tecnológico, o que tem levado o setor energético a estudar meios para produzir energia elétrica partindo de fontes renováveis, as quais não proporcionam desequilíbrio ambiental. Mares e oceanos são fontes de energia inesgotáveis, suficientes para suprir a necessidade de todos os continentes. Neste trabalho fez-se o aprimoramento de uma bancada experimental de um modelo de conversão de energia cinética e potencial contidas respectivamente, nas correntes oceânicas e ondas, de maneira integrada, com o intuito de fazer com que a produção de energia elétrica a partir das águas dos oceanos e mares seja maximizada. Os resultados experimentais mostraram que houveram melhorias na construção, na realização dos testes, no desempenho do conjunto e no rendimento dos geradores de energia quando comparados com resultados anteriores, indicando viabilidade de instalação desse dispositivo na costa brasileira.

Palavras-chave: Energia renovável; Energia oceânica; Bancada experimental; Projeto; Construção

Abstract

The demand for electricity increases exponentially due to population and technological growth, which has led the energy sector to study ways to produce electricity from renewable sources, which do not provide an environmental imbalance. Seas and oceans are inexhaustible sources of energy, sufficient to meet the needs of all continents. In this work, an experimental workbench of a kinetic and potential energy conversion model contained in the ocean currents and waves, in an integrated way, was designed in order to make the production of electric energy from the waters oceans and seas is maximized. The experimental results showed that there were improvements in the construction, testing, assembly performance and power generator performance when compared to previous results, indicating feasibility of installing this device in the Brazilian coast.

Keywords: Renewable energy; Ocean energy; Experimental workbench; Project; Construction

Lista de Figuras

	Pag.
Figura 3.1 – Oferta mundial de todas as fontes de energia	5
Figura 3.2 – Capacidade instalada em projetos de geração oceânica	7
Figura 3.3 – Interação entre as ondas e o fundo do mar à medida que se aproximam da costa	10
Figura 3.4 – Representação das duas formas de energia contidas na onda	11
Figura 3.5 – Modelo de geração da onda oceânica.....	11
Figura 3.6 – Configuração das correntes oceânicas ao redor do globo terrestre.....	13
Figura 3.7 – Classificação quanto à localização dos dispositivos conversores de energia	15
Figura 3.8 – Dispositivo <i>offshore</i> Mighty Wale do tipo coluna d'água oscilante	16
Figura 3.9 – Conversor de energia das ondas Pelamis <i>offshore</i> do tipo progressivo	17
Figura 3.10 – Dispositivo <i>Wavebob</i> para conversão de energia das ondas.....	17
Figura 3.11 – Princípio de funcionamento do protótipo AWS.....	18
Figura 3.12 – Dispositivo de conversão de energia das ondas no Porto de Pecém.....	19
Figura 3.13 – Funcionamento do conversor de energia oceânica <i>Wave Dragon offshore</i> do tipo galgamento	19
Figura 3.14 – Projeto dinamarquês <i>Wave Dragon</i>	20
Figura 3.15 – Protótipo SeaGen S com as turbinas emersas e as turbinas submersas	21
Figura 3.16 – Esquema do projeto SeaGen U	21
Figura 3.17 – Demonstração das turbinas Darrieus.....	22
Figura 3.18 – Protótipo conversor da energia de correntes que utiliza turbina Kaplan.....	23
Figura 4.1 – Primeiro protótipo definitivo do projeto Princesa do Mar	26
Figura 4.2 – Protótipo do projeto conversor de energia oceânica desmontado.....	26
Figura 4.3 – Modelo do projeto Princesa do Mar durante o experimento	27
Figura 4.4 – Representação em CAD do protótipo 1.....	28
Figura 4.5 – Representação em CAD do protótipo 2.....	29
Figura 4.6 – Detalhes do gerador de energia das ondas em cortes	30
Figura 4.7 – Mecanismos utilizados na conversão da energia das ondas em eletricidade	31
Figura 4.8 – Detalhes do gerador de energia das correntes.....	32
Figura 4.9 – Mecanismos utilizados na conversão da energia das correntes em eletricidade..	32
Figura 4.10 – Perfil hidrodinâmico NACA 4412 para modelagem das turbinas	33

Figura 4.11 – Turbinas de 3 pás com diferentes ângulos de ataque	33
Figura 4.12 – Turbina de sustentação/arrasto modelada em CAD	34
Figura 4.13 – Mecanismo de transmissão de rotação com uso de engrenagens.....	34
Figura 4.14 – Protótipo construído apto para a realização dos testes	35
Figura 4.15 – Materiais confeccionados em estudos anteriores e fabricados atualmente.....	36
Figura 4.16 – Bobina do protótipo antigo e do novo projeto	36
Figura 4.17 – Bancada experimental montada em funcionamento.....	37
Figura 4.18 – Verificação dos dados obtidos no sistema	38
Figura 5.1 – Rendimento máximo do protótipo nas variadas condições de teste.....	41
Figura 5.2 – Protótipo flutuando atendendo às condições de projeto	42
Figura 5.3 – Ataque de corrosão nos rolamentos	42

Lista de Tabelas

	Pag.
Tabela 3.1 – Classificação dos Conversores de energia das ondas quanto ao seu princípio ...	15
Tabela 4.1 – Itens utilizados para a confecção do protótipo	37
Tabela 5.1 – Resultados obtidos nos testes para as ondas.....	39
Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos testes para as correntes	40
Tabela 5.3 – Principais resultados extraídos do experimento	40

Lista de Abreviaturas

3D	3 Dimensões
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AWS	<i>Archimedes Wave Swing</i>
BEN	Balanço Energético Nacional
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAO	Coluna d'Água Oscilante
COPPE/UFRJ	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro
DDP	Diferença de Potencial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Changes</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
OTEC	<i>Ocean Thermal Energy Conversion</i>
PLA	Poliácido Láctico
PVC	Policloreto de Vinil
RE	<i>Renewable Energy</i>
UEMA	Universidade Estadual do Maranhão
UFMA	Universidade Federal do Maranhão

Lista de Símbolos

η	Rendimento
ρ	Massa específica (kg/m^3)
$A_{Turbina}$	Área transversal da pá da turbina (m^2)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
H	Altura da onda (m)
L_{fo}	Comprimento de frente de onda (m)
$P_{Teórica}$	Potência teórica ou disponível (W)
P_{Real}	Potência real ou extraída (W)
Q	Vazão (L/h)
R	Resistência elétrica (Ω)
T	Período da onda (s)
U	Tensão (V)
v	Velocidade da corrente (m/s)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	4
2.1	Objetivo Geral	4
2.2	Objetivos Específicos	4
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	5
3.1	Energia dos Oceanos	7
3.2	Ondas e correntes marinhas e oceânicas	9
3.2.1	Ondas Oceânicas.....	9
3.2.2	Correntes oceânicas/marinhas	12
3.3	Extração de energia das ondas oceânicas	14
3.3.1	Dispositivos de coluna d'água oscilante (CAO)	16
3.3.2	Dispositivos de corpo oscilante	16
3.3.3	Dispositivos de galgamento	19
3.4	Extração de energia das correntes oceânicas/marinhas	20
3.4.1	Turbinas de eixo horizontal.....	21
3.4.2	Turbinas de eixo vertical.....	22
3.4.3	Outros tipos de turbinas	22
3.5	Cálculo da potência teórica e real e do rendimento dos protótipos conversores de energia oceânica	23
4	MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1	Características gerais do projeto Princesa do Mar	25
4.2	Desenvolvimento e projeto da nova bancada experimental	27
4.2.1	Mecanismo para extração da energia das ondas.....	29
4.2.2	Mecanismo para extração da energia das correntes.....	31
4.3	Construção da bancada e realização dos testes	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
	REFERÊNCIAS	46
	APÊNDICES	50

1 INTRODUÇÃO

A eletricidade é atualmente um dos bens mais preciosos para a humanidade, onde em praticamente todas as áreas na vida humana há sua total dependência, mas nem sempre foi assim. Até os anos 1800, a energia era geralmente oriunda da força humana, a hidráulica e a tração animal utilizada principalmente em atividades agrícolas. A partir daí a humanidade dominou a eletricidade com a evolução dos sistemas de potência para que, depois de gerada, a energia fosse transportada para uso industrial e doméstico, sendo hoje uma necessidade para a civilização moderna.

Desde o século XIX com a expansão da demanda por energia elétrica devido ao desenvolvimento tecnológico com a revolução industrial e o crescimento populacional mundial, a humanidade estuda meios de converter a energia advinda de outras fontes como combustíveis fósseis e construções de represas em rios e mares. Do ponto de vista sustentável, estes meios de conversão de energia causam grandes impactos ambientais (DAM, 2018) gerando preocupações ao sistema energético do mundo, fazendo com que outros meios de energia limpa sejam mais viáveis. A construção de barragens, por exemplo, causa grandes impactos ambientais e econômicos, pois há um custo alto de instalação e manutenção.

Dentre as fontes limpas, os oceanos albergam um potencial energético enorme, que contribui significativamente para as necessidades a um nível global. De acordo com o Ministério de Minas e Energia (2018), o consumo mundial final de eletricidade foi estimado em cerca de 22.386 TWh/ano em 2015, sendo essa apenas 1,09% do potencial teórico das energias oceânicas (SAAVEDRA, 2016). As energias do oceano são extraídas através do gradiente de maré, gradiente salino, gradiente térmico, ondas e correntes marinhas. Esse tipo de extração de energia também pode ser feito em rios e mares, favorecendo o abastecimento de todo o planeta. O Brasil tem uma localização estratégica para o uso desta tecnologia.

O consumo anual de energia elétrica no Brasil é aproximadamente 524,6 TWh, bem abaixo do potencial energético em torno da costa brasileira (FILHO, 2017). O Brasil possui uma grande extensão litorânea, cerca de 7.491 km voltado ao Oceano Atlântico, sendo 8,7% pertencente ao território maranhense, segundo maior litoral brasileiro, conforme a *Central Intelligence Agency* (2018). A população brasileira que vive em regiões litorâneas é bem alta devido muitas das capitais estaduais se localizarem nessa região, tornando viável o estudo da

extração de energia elétrica a partir de fontes oceânicas, pois os custos de transmissão da energia elétrica serão menores por abastecer, em sua maior escala, a costa brasileira.

Há várias maneiras de aproveitar a energia de oceanos e mares, sendo elas utilizando as ondas, as correntes marinhas, as marés e os gradientes térmico e salino. A energia extraída das ondas é a potencial gravitacional, obtida através da subida e descida de um flutuador. A extraída das correntes marinhas e/ou oceânicas é a cinética, advinda do deslocamento de massas de água movimentando turbinas. A energia advinda do gradiente de marés é obtida através de construções de grandes represas. O gradiente térmico é obtido pela diferença de temperatura entre o fundo e a superfície, e o gradiente salino através da osmose (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Visando o desenvolvimento sustentável com o uso de energia limpa em sua maior porcentagem, vários países da maioria dos continentes desenvolvem pesquisas aplicadas à produção de energia elétrica partindo das ondas e correntes marinhas, entre estes estão o Reino Unido, Noruega, Suécia, Dinamarca e Portugal, na Europa - em que mais de 50% da energia é extraída de fontes não-renováveis -, os Estados Unidos da América do Norte e a China, Índia e o Japão na Ásia (CRUZ e SARMENTO, 2004).

Na América do Sul, precisamente no Brasil, há um projeto desenvolvido pela COPPE (O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ) que extrai a energia das ondas para produzir energia elétrica, instalada no quebra-mar do Porto de Pecém, projeto ainda em fase de desenvolvimento (COPPE, 2018). Isso mostra que o Brasil, maior país da América Latina, tem muito a contribuir com esse ramo de pesquisa da energia limpa e renovável, despertando a curiosidade de estudantes de graduação em todo território nacional.

Este trabalho de monografia teve como objetivo fazer um estudo sobre a conversão das energias oceânicas em eletricidade com enfoque nas correntes marinhas e nas ondas. Após um estudo minucioso das causas desses fenômenos e de protótipos conversores de energia oceânica já em desenvolvimento, foram definidos os parâmetros para uma nova bancada experimental de um modelo de conversão de energia cinética e potencial contidas respectivamente, nas correntes marítimas e ondas, de maneira integrada, tomando como base os protótipos já confeccionados em estudos anteriores.

Com a construção do novo protótipo, foi feito o comparativo dos rendimentos dos diversos modelos testados com a mudança de alguns parâmetros como amplitude das ondas, velocidade das correntes e mecanismos de transmissão de potência.

No decorrer do trabalho tem-se o protótipo final, testado e construído com materiais simples, de fácil aquisição e baixo custo. Equipamentos simples foram utilizados para causar as ondas e as correntes para a conversão em energia elétrica. Uma grande oportunidade desenvolver um modelo em escala real futuramente foi idealizada a partir dos estudos feitos neste trabalho, mostrando que é possível uma tecnologia de extração de energia das ondas e correntes oceânicas genuinamente maranhense atuando em grande escala em todo o litoral brasileiro e ao redor do mundo.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Confeccionar uma bancada experimental capaz de simular o fenômeno de ondas e correntes marítimas, de forma integrada, para a produção de energia elétrica.

2.2 Objetivos Específicos

- Estudar e definir os parâmetros de projeto para a construção e operação de uma nova unidade experimental;
- Avaliar a produção de energia da nova unidade experimental em relação aos protótipos desenvolvidos anteriormente;
- Verificar e medir experimentalmente a produção de energia elétrica fornecido pela unidade experimental em acessórios apropriados, tais como: LEDs, voltímetros e outros dispositivos do experimento;
- Identificar o rendimento do dispositivo na produção de energia elétrica de acordo com as condições que forem submetidas através de cálculos e sistemas comparativos;
- Avaliar o funcionamento das formas de transmissão da energia mecânica gerada com o movimento das ondas e das correntes para o gerador afim de ter um maior rendimento do dispositivo.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O grande avanço tecnológico aliado ao crescimento populacional descontrolado acarreta numa demanda cada vez mais crescente por energia elétrica, essa essencial para atender às necessidades básicas da civilização humana moderna, como hospitais, iluminação pública e o simples uso do celular. Essa necessidade faz o setor energético mundial estudar meios de conversão de energia que não emitam gases que causem efeito estufa e não provoquem impactos ambientais em grande escala (IPCC, 2011). As energias oceânicas são opções favoráveis por atender aos pontos de vista sustentável.

A energia advinda dos oceanos é bem ampla por poder ser obtida de diversas maneiras. Ao contrário da energia eólica que pode ser extraída apenas através das correntes de ar (IPCC, 2011), as energias oceânicas são derivadas das correntes de água, das ondas e das variações de marés, essas comumente conhecidas. Em pequena representatividade, também é convertida energia do oceano advinda dos gradientes de temperatura e salino. Ainda em fases iniciais de desenvolvimento, o que acarreta em custos elevados de projeto, a energia oceânica desperta interesse na comunidade científica mundial (TOLMASQUIM, 2016).

Os oceanos são considerados fontes inesgotáveis de energia limpa e renovável e de grande potencial energético, o que os tornam viáveis do ponto de vista sustentável. Pelo motivo dos oceanos banharem todos os continentes em largas extensões litorâneas, a redução de perdas devido a grandes linhas de transmissão de energia elétrica cai de forma considerável (TOLMASQUIM, 2016). Apesar das grandes vantagens, as fontes oceânicas ocupam apenas 0,002% na oferta total de energia na matriz energética mundial (IPCC, 2011), ainda pouco em comparação a outros tipos de energias renováveis. A humanidade conhece mais a superfície lunar do que o oceano. A oferta total de todas as fontes de energia é mostrada na Figura 3.1.

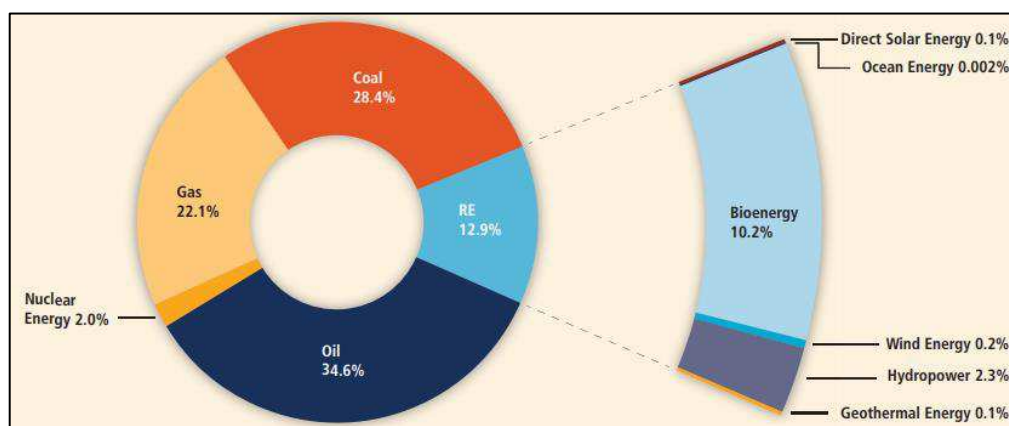


Figura 3.1 – Oferta mundial de todas as fontes de energia (Adaptado de IPCC, 2011).

Uma preocupação frequente na elaboração do *Intergovernmental Panel on Climate Changes* (2011), entidade da Organização das Nações Unidas (ONU), é a emissão de gases de efeito estufa que contribuem para as mudanças climáticas acentuadas na produção de energia elétrica, como a queima de combustíveis fósseis por exemplo. Para que haja diminuição da emissão desses gases poluentes, é proposto o desenvolvimento de novas tecnologias no ramo das RE (*Renewable Energy*). Além do acréscimo dessas novas fontes na matriz energética, é ponto crucial o aumento do rendimento na geração de energia elétrica das fontes não renováveis.

A forma mais conhecida de extrair energia das marés é com a construção de grandes barragens, utilizando a variação de altura das marés para o movimento de turbinas que converte a energia mecânica em elétrica, interessante em se tratando de uma grande capacidade de armazenamento e rápidas respostas operativas (TOLMASQUIM, 2016). Alguns países como Canadá nas Américas, Portugal, França e Reino Unido na Europa, utilizam dessa fonte de energia para a produção de eletricidade (CRUZ e SARMENTO, 2004).

No continente sul-americano, precisamente no Brasil que tem uma extensão litorânea de 7.491 km banhado pelo Oceano Atlântico, é grandemente favorável para a extração das principais fontes de energias oceânicas. As correntes velozes são observadas na foz do rio Amazonas e na baía de São Marcos em São Luís - MA com grande potencial energético. Há registros pontuais de correntes superiores a 2,5 m/s em vários locais do país (MARONE, 2011).

Alertas da Marinha Brasileira são frequentes quanto a questão das amplitudes das ondas no litoral brasileiro entre a cidade de Natal (RN) e São Luís (MA). Como exemplo, no mês de julho de 2017 foi noticiado no Jornal G1 (2018) que a previsão para as ondas era de uma amplitude de 3,5 m junto a ventos fortíssimos, algo único no mundo. As variações de marés em São Luís podem chegar a 8 m entre a preia mar e a baixa mar, bem perceptíveis nas praias de toda a Ilha. Essas características colocam o litoral maranhense como uma alternativa altamente viável de utilizar a energia oceânica limpa e renovável e transformar em eletricidade.

Pelo Brasil ser privilegiado para o estudo dessas tecnologias, a COPPE (O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro) vem desenvolvendo um protótipo que extrai a energia das ondas localizado no quebra mar do Porto de Pecém (MARONE, 2011). Outros estudos são feitos na UFMA (Universidade Federal do Maranhão) no curso de Pós-graduação em energias oceânicas para contribuir com o desenvolvimento sustentável com o aumento da utilização de energias renováveis.

3.1 Energia dos Oceanos

Os oceanos e mares ocupam uma área de 360,6 milhões de km², aproximadamente 70,7% da superfície terrestre (MOREIRA, 2015), área essa que possui fontes de energia com enorme potencial energético. A *International Energy Agency* (IEA), em português a Agência Internacional de Energia, em estudos já realizados, indica que para ondas de grandes amplitudes (acima de 2 m) e elevado período (entre 7 e 10 s) excedem os 50 kW/m de frente de onda, unidade utilizada para a medição do potencial energético das ondas (SAAVEDRA, 2016).

Mundialmente, os projetos para extração de energia dos oceanos cresceram consideravelmente, com ênfase ao continente asiático que a partir de 2011 com o início de um grande projeto na Coreia do Sul. O continente americano ainda está bem abaixo da produção em relação a média mundial. O único país com uma produção expressiva é o Canadá com um projeto de 20 MW (TOLMASQUIM, 2016). Os demais detalhes dos projetos de geração oceânica dos continentes são ilustrados na Figura 3.2.

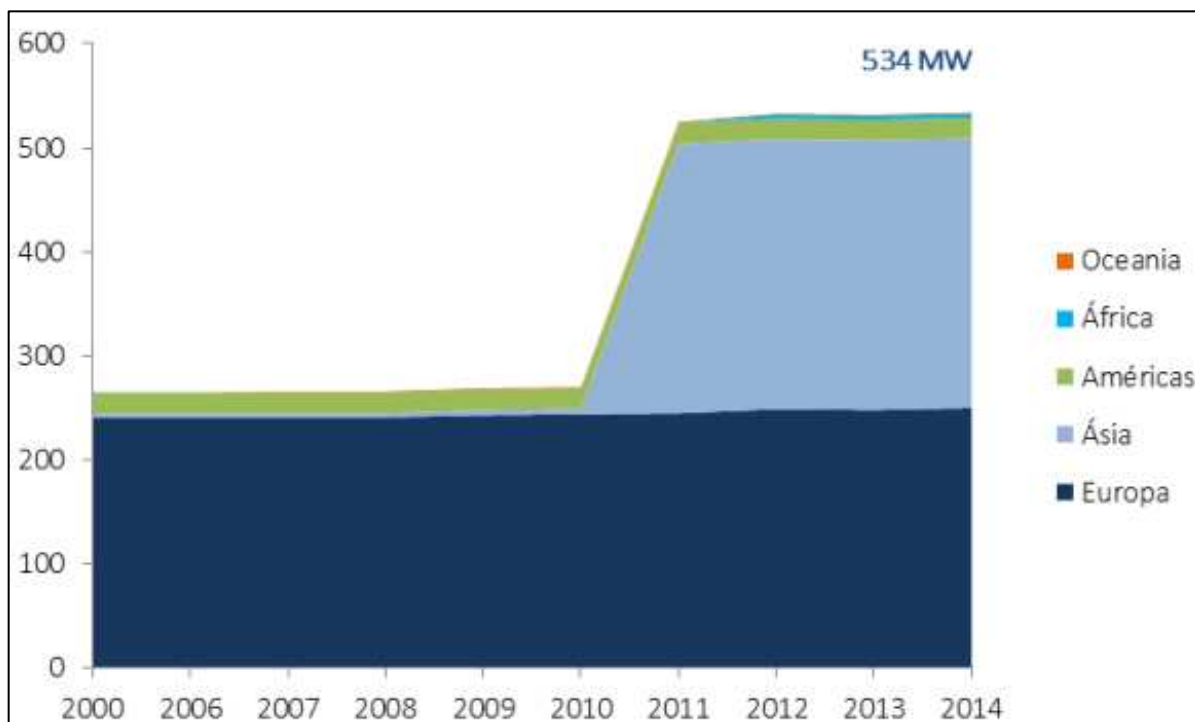


Figura 3.2 – Capacidade instalada em projetos de geração oceânica (Adaptado de Tolmasquim, 2016).

É possível converter a energia mecânica oceânica em energia elétrica de cinco maneiras diferentes de tecnologia (CRUZ e SARMENTO, 2004; SAAVEDRA, 2016; PARK e BROWN, 1999; CUNHA e ONOFREI, 2010):

- Energia das ondas → é extraída através do aproveitamento de sua energia potencial através dos movimentos de subida e descida entre os picos (cristas) e vales (cavas) das ondas utilizando dispositivos modulares;
- Energia das Correntes → extraída através do aproveitamento da energia cinética do deslocamento das massas de água em oceanos e mares utilizando dispositivos modulares;
- Energia das Marés → é aproveitada sua energia potencial com a construção de barragens convertendo-se a queda d'água em cinética para que seja convertida em energia elétrica com usos de turbinas;
- Energia do Gradiente térmico → conhecida como *Ocean Thermal Energy Conversion* (OTEC), essa energia é convertida em eletricidade através do diferencial de temperatura entre a superfície mais quente e as águas geladas do fundo do mar utilizando motor térmico;
- Energia do Gradiente salino → aproveitada através da diferença de salinidade entre as águas doces dos rios e salgadas de oceanos e mares através de processos de osmose reversa.

O aproveitamento do potencial energético do oceano é garantia de produção de energia limpa e renovável, um ponto ideal para o desenvolvimento sustentável da energia sem a emissão de gases de efeito estufa. Com respaldo na aceitabilidade, disponibilidade e confiabilidade – conceitos utilizados pela definição de manutenção como função estratégica (XAVIER e PINTO, 2012) –, o Conselho Mundial da Energia (WEC, 2014) – em inglês, *World Energy Council*) – concatenam que as ondas, marés e correntes marinhas são essenciais para a geração de eletricidade e imprescindível para o avanço tecnológico.

A exploração das energias das marés já são realidade em vários países da Europa, onde em boa parte já está em fase de comercialização (CUNHA e ONOFREI, 2010). Um projeto de destaque no panorama nacional é a Barragem do Bacanga (FERREIRA, 2007), construído nos anos 70 com potência instalada de 72 MW. Devido à grande inviabilidade econômica, o projeto foi descartado (TOLMASQUIM, 2016).

O oceano oferece energia mecânica potencial na forma de ondas e cinética em forma de correntes marinhas. Os dispositivos utilizados para extrair energia das ondas tem o princípio de acompanhar em movimentos lineares verticais entre a crista e a cava das ondas. Extrai-se energia cinética das correntes marinhas através de turbinas semelhantes às utilizadas em energia eólica que movimentam geradores, logo após há a transformação em eletricidade (CUNHA e ONOFREI, 2010).

A energia extraída do gradiente térmico, nomeado de tecnologias OTEC, são viáveis quando a diferença de temperatura entre a superfície e águas subsuperficiais excede os 20 °C com um limite de profundidade inferior a 100 m. Devido serem poucos os locais no mundo com condições favoráveis (próximo ao equador e aos trópicos), a sua utilização não se torna tão viável mundialmente. A energia extraída do gradiente de salinidade pode ser feita de vários modos, o mais conhecido é o Compressão a Vapor, o qual tira partido de diferenças de pressões entre o vapor d'água e da água do mar para obter a energia (CUNHA e ONOFREI, 2010).

3.2 Ondas e correntes marinhas e oceânicas

Entre todas as formas de extração de energias oceânicas, as advindas das ondas e correntes são as mais viáveis do ponto de vista sustentável e econômico, pois é onde se encontra os maiores potenciais energéticos e culminam favoravelmente para sua instalação sem grandes impactos ambientais, como no caso das marés com utilização de barragens, que acabam alagando grandes áreas muitas vezes habitadas por índios, além de causar impactos na comunidade de peixes do rio (TOLMASQUIM, 2016). Com base nisso, este trabalho mostrará detalhes dos fenômenos por trás do aparecimento das ondas e correntes oceânicas.

3.2.1 Ondas Oceânicas

A onda surge através de uma perturbação inicial que gera oscilações no corpo fazendo com que tenha uma propagação de energia sem que haja o transporte de matéria (PARK e BROWN, 1999). Sem que em muitas vezes saibamos, as ondas fazem parte de nosso cotidiano, desde pequenos barulhos até as belíssimas notas afinadas de um piano. Enquadrado a esta definição, há ondas de dois tipos: a mecânica e a eletromagnética. A onda mecânica é a que temos mais familiaridade por estarmos em contato constantemente, como a sonora. As ondas eletromagnéticas estão entre as mais utilizadas mesmo não sendo tão familiares, entre elas as ondas de rádio e televisão, a luz visível e a ultravioleta. Todas as ondas eletromagnéticas

se propagam a velocidade constante no vácuo de 300 km/s aproximadamente. Há as ondas de matéria, mas só são utilizadas em laboratório por estarem associadas aos elétrons, prótons e nêutrons, fazendo delas não familiares (HALLIDAY e RESNICK, 2009a).

As ondas dos oceanos e mares se enquadram nos tipos de ondas mecânicas por haver apenas um meio material de propagação, no caso, a água. A formação das ondas oceânicas se dá da seguinte forma: a energia é transportada entre as moléculas na água que giram e oscilam em todas as direções e se movem em órbitas circulares com diâmetro que diminui com a diminuição da profundidade, gerando o formato da onda. Como há apenas o transporte de energia e não de material, quaisquer objetos colocados na superfície da onda apenas se deslocará para cima e para baixo até que uma força externa o tire da inércia horizontal (HALLIDAY e RESNICK, 2009a). A Figura 3.3, partes A e B, mostra os movimentos circulares das moléculas e a mudança de diâmetro quando a profundidade atinge metade do comprimento da onda.

A Figura 3.3 C mostra a mudança de perspectiva da onda a medida que ela começa a interagir com o fundo na forma de atrito. Nesse momento a onda começa a perder velocidade e o seu comprimento diminui, tendo como consequência um aumento abrupto da amplitude da onda. Quando a onda fica muito alta, as partículas passam a se movimentar horizontalmente, nesse instante ocorre a quebra da onda. Frisa-se que é nesta região de quebra da onda que os surfistas utilizam para executarem suas manobras, não na onda propriamente ditas. As ondas se quebram mais próximos a superfície da praia por exemplo em casos que haja correntes de retorno, fenômeno que causa a morte de muitos banhistas nas praias brasileiras.

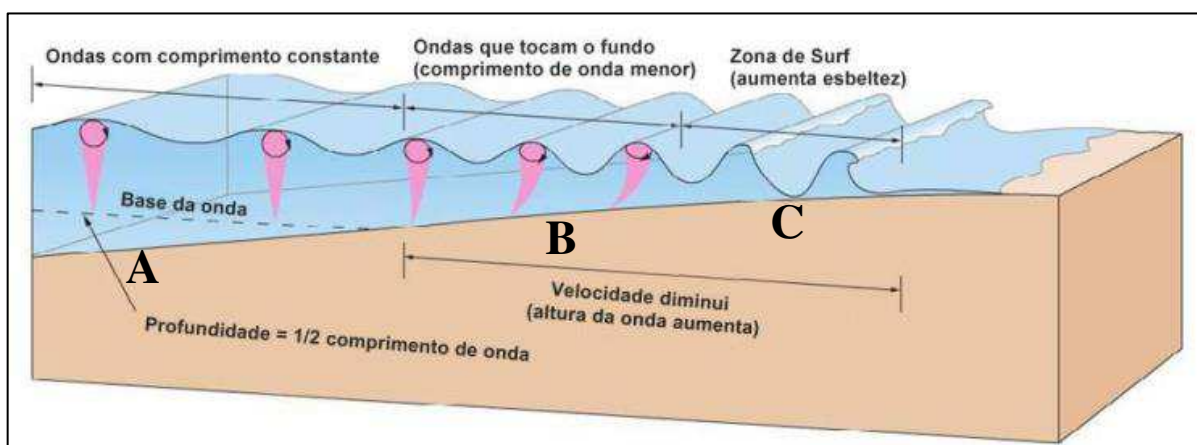


Figura 3.3 – Interação entre as ondas e o fundo do mar a medida que se aproximam da costa (Adaptado de Fleming, 2012).

Pode ser dito que as ondas oceânicas são formadas pela energia do sol. De maneira mais clara, o vento que causa as ondas é causado por um aquecimento desigual da superfície da

Terra provocando as correntes de ar, então essas correntes de ar transferem sua energia para que as ondas sejam formadas. As ondas sempre se formam no sentido da corrente de ar, onde propagam sua energia com perdas mínimas entre as moléculas de água até a algum local de dissipação de energia, como a costa dos continentes e ilhas (FLEMING, 2012). A onda oceânica possui dois tipos de energia: a cinética das partículas que se movimentam em trajetórias orbitais e a potencial dos movimentos verticais da onda; isso é mostrado com clareza na Figura 3.4.

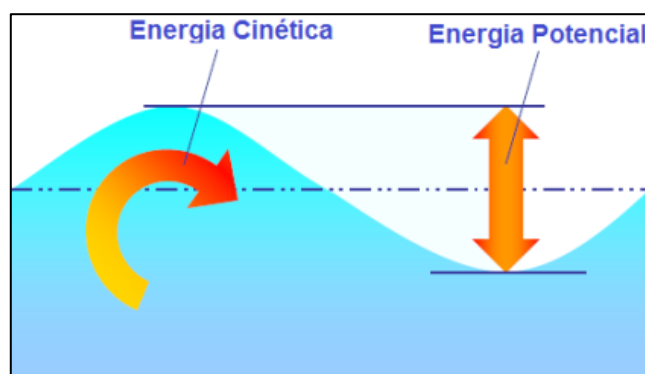


Figura 3.4 – Representação das duas formas de energia contidas na onda (Adaptado de Tolmasquim, 2016).

Como ilustrado na Figura 3.3, o vento se forma através da transferência da energia cinética para a superfície do oceano e então o formado ondular das ondas é obtido da seguinte forma: se duas camadas de fluido com diferentes velocidades estiverem em contato, haverá tensão de atrito entre elas e há a transferência de energia. Na superfície oceânica, a maior parte dessa energia transferida resulta nas ondas. Como mostra a Figura 3.5, a face posterior da onda contra a qual o vento sopra experimenta uma pressão mais alta do que a face frontal que é protegida da força do vento. Redemoinhos aéreos são formados na frente de cada onda, levando a excessos e deficiências de pressão (indicados pelos sinais positivos e negativos), e a diferença de pressão impulsiona a onda.



Figura 3.5 – Modelo de geração da onda oceânica (Adaptado de Park e Brown, 1999).

A quantidade de energia que a corrente de ar transfere para a superfície do oceano depende de alguns fatores, como a intensidade do vento, o tempo de atuação do vento e a área da pista (área onde o vento atua), quanto maior forem a velocidade, o tempo e a pista, maior será a resultante.

Como visto, as ondas variam de maneira significativa e com essa mudança, a variação do clima é um fator a se considerar no projeto, então tem-se necessidade de preparar um dispositivo conversor de energia das ondas que atenda a condições extremas de funcionamento, como altas ondas e ventos muito fortes.

Com base em teorias, é suposto que a potência total disponível das ondas seja equivalente a 2,7 TWh (FOX et al., 2014), mais de 10% da energia total gasta no ano de 2015 no mundo inteiro, que foi de 22.386 TWh (FILHO, 2017). Apesar do grande índice de aproveitamento desse tipo de tecnologia nas costas brasileiras, poucos protótipos conversores de energia estão em fase de desenvolvimento e nenhum em comercialização, o que não coloca a energia oceânica dentro do Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2018).

3.2.2 Correntes oceânicas/marinhas

O termo corrente é bastante abrangente e é associado aos diversos tipos. Há correntes elétricas advinda do fluxo de elétrons livres em determinado material condutor de eletricidade (HALLIDAY e RESNICK, 2009b), há correntes de ar relacionadas ao deslocamento de massas de ar pela superfície terrestre e, de maneira análoga, as correntes oceânicas que advém do deslocamento de massas de água pela superfície terrestre. Enfatizando os tipos de correntes de águas, há as correntes de maré, ou marinhas, e as correntes oceânicas, comumente chamadas de marítimas. As correntes oceânicas surgem através do aquecimento desigual da superfície do mar provocando o transporte das massas de água a lugares bem distantes de sua origem (PALZ, 1981).

Também chamado de circulação oceânica, as correntes oceânicas são causadas por dois motivos principais: o sistema superficial é quando a superfície dos oceanos combina com as interações do vento causando um sistema de circulação dirigido; e a circulação em profundidade, que ocorre das diferenças de densidades entre as massas de água e do gradiente de temperatura, formando rios em grandes profundidades oceânicas (SESMIL, 2013).

Outra causa de circulação oceânica é o Efeito de *Coriolis*, que é resultado da rotação do planeta Terra em torno de si mesmo (SESMIL, 2013). Como causa, pode-se citar uma das definições de fluido na condição de não deslizamento em uma escala oceânica, onde as massas de água não deslizam acompanhando o movimento de rotação da Terra tendo um perfil de velocidade diferente das águas superficiais (FOX et al., 2014).

No tocante as correntes de maré, elas ocorrem entre a resultante de atração gravitacional Sol-Terra-Lua, movimentando as massas de água causando variações de maré que são mais elevadas em períodos de lua cheia e lua nova (TOLMASQUIM, 2016). A costa maranhense é a que tem a maior variação de maré no Brasil, podendo chegar a 8 m, o que causa correntes de maré com velocidades bem elevadas. Sabendo-se as causas das correntes, a Figura 3.6 ilustra as características da circulação oceânica ao redor do globo terrestre (XAVIER, 2011).

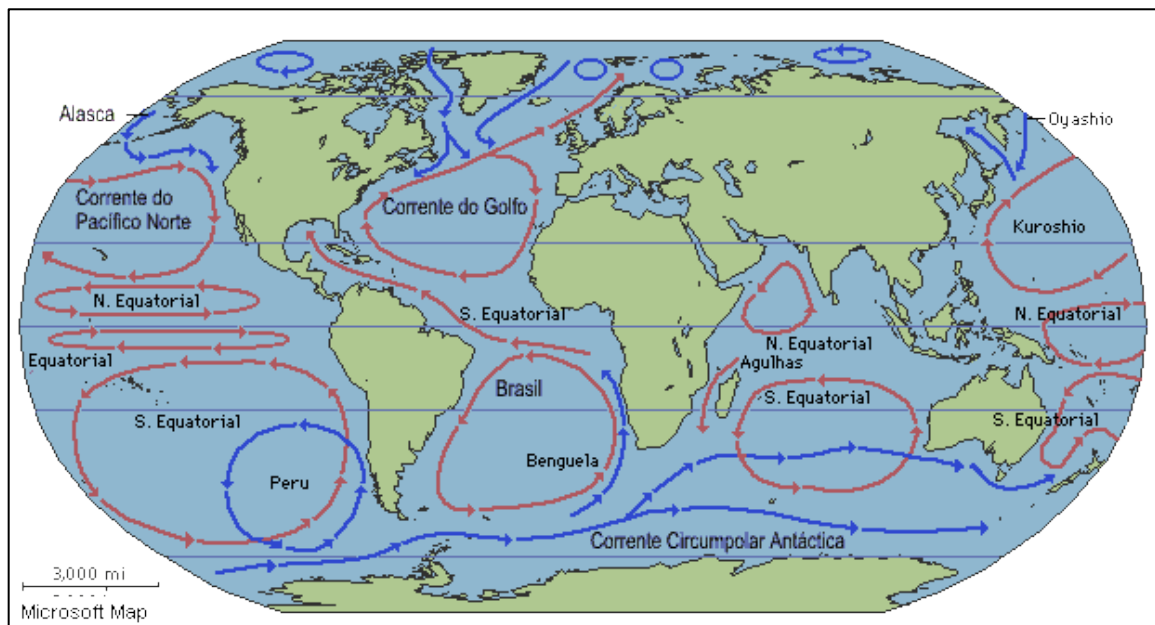


Figura 3.6 – Configuração das correntes oceânicas ao redor do globo terrestre (Adaptado de Xavier, 2011).

Deve-se frisar os efeitos significativos que o grande potencial energético advindo das correntes marinhas/occeânicas pode acarretar para a matriz energética mundial. Algumas vantagens tem-se em relação a energia eólica; os ventos são imprevisíveis (MINGUES, 1993) e as correntes de ar são de baixas densidades (em média $1,23 \text{ kg/m}^3$), já as correntes oceânicas são previsíveis e as águas possuem densidades em torno de 1020 kg/m^3 , o que torna as pás das turbinas de sustentação dos dispositivos oceânicos menores em relação às eólicas, garantindo melhor aproveitamento de energia em menor espaço (SEYMOUR e ISAACS, 1973).

As correntes de velocidades elevadas associadas à grande densidade da água do mar concatenam que o potencial energético das correntes oceânicas é bem considerável. Estima-se

que a energia oceânica em forma de correntes nos ofereça 5 TWh de energia disponível, ultrapassando em mais de 20% o consumo mundial de energia elétrica (FILHO, 2017), tornando este tipo de energia limpa e renovável uma fonte alternativa muito eficaz para o desenvolvimento sustentável da humanidade com impactos ambientais mínimos.

3.3 Extração de energia das ondas oceânicas

O desenvolvimento tecnológico foi tamanho no tocante às diversas formas de extração de energia das ondas oceânicas convertendo-as em eletricidade. Na atualidade, muitos dos protótipos conversores de energia ainda estão em fase de estudos e testes, mas poderá ser que em um futuro não muito distante esta seja uma das poucas soluções de energia renovável vigentes. Muitas empresas e países já investem neste tipo de tecnologia que se apresenta de diversas formas e em variadas localizações. Para que se tenha uma organização que facilite diferenciação entre os protótipos, foi necessário que se estabelecesse critérios de classificação para diferenciar as demais tecnologias (CRUZ e SARMENTO, 2004).

De início, a classificação quanto à distância da instalação do dispositivo para a costa terrestre, os dispositivos conversores de energia das ondas foram agrupados da seguinte forma (CRUZ e SARMENTO, 2004; ROSA, 2008):

- *Onshore* ou *shoreline* → este grupo abrange os dispositivos costeiros (acesso por terra). Este grupo é vantajoso com relação à facilidade de instalação e manutenção, além de ter uma diminuição expressivas nos custos por necessitar de cabeamentos elétricos de menor comprimento e minimizando as perdas;
- *Near-shore* → estes são os dispositivos mais ou menos próximos à costa, localizados em até 20 m da costa terrestre, com proximidade em quebra-mares e molhes;
- *Offshore* → este grupo abrange os dispositivos afastados da costa, algo entre 20 e 50 m de distância da costa terrestre, ou além disso. estes dispositivos são para explorarem áreas de maiores profundidades e maiores amplitudes oceânicas, ou seja, regiões de maiores potências, porém com algumas desvantagens quanto à manutenção.

A Figura 3.7 ilustra a classificação quanto à localização dos dispositivos conversores de energia das ondas, tanto submerso, quanto flutuante.

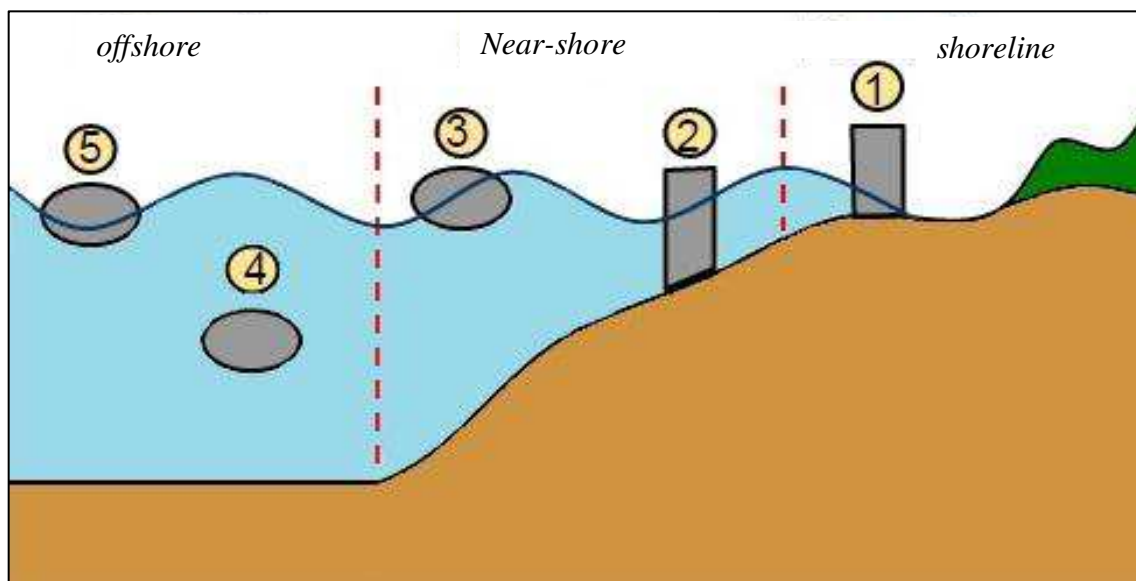


Figura 3.7 – Classificação quanto à localização dos dispositivos conversores de energia (Adaptado de Lorenzo, 2018).

Outra maneira em que são classificados os dispositivos conversores da energia das ondas é quanto ao modo primário de conversão de energia das ondas e também ao tamanho do dispositivo em relação ao comprimento de onda incidente do local, podendo ser de coluna d'água oscilante, corpos oscilantes e *overtopping* (ou galgamento) (ROSA, 2008). A Tabela 3.1 mostra as três principais classes desses dispositivos conversores, a posição em relação ao oceano e alguns exemplos.

Tabela 3.1 - Classificação dos Conversores de energia das ondas quanto ao seu princípio (Adaptado de Projeto EONDAS, 2009).

Princípio de Funcionamento	Posição ao Oceano	Exemplos
Coluna d'Água Oscilante	Estrutura fixa	Pico, LIMPET, Sakata
	Estrutura flutuante	Mighty Wale
Corpo Oscilante	Submerso	AWS: Translação Vertical
		WaveRoller: Rotação
	Flutuante	WaveBob, Usina de Pecém: Translação Vertical
		Pelamis: Rotação
Galgamento	Estrutura fixa	Tapchan, SSG
	Estrutura flutuante	Wave Dragon

3.3.1 Dispositivos de coluna d'água oscilante (CAO)

Há diversos tipos de dispositivos de coluna d'água oscilante. Esses dispositivos são estruturas ocas que se encontram abertas e parcialmente submersas no mar. A energia é extraída pela passagem da onda que provoca um ciclo de aumento e diminuição de água dentro do dispositivo, girando uma turbina pela pressão do ar (RONCHI e SCHAEFFER, 2010). Um exemplo desse dispositivo é o *Mighty Whale*, ilustrado na Figura 3.8, que por seu caráter flutuante, pode ser ancorada em diversas profundidades com capacidade de extração de 110 kW, que o tornou inviável economicamente no Japão em que a o potencial energético das ondas não é expressivo (CRUZ e SARMENTO, 2004).

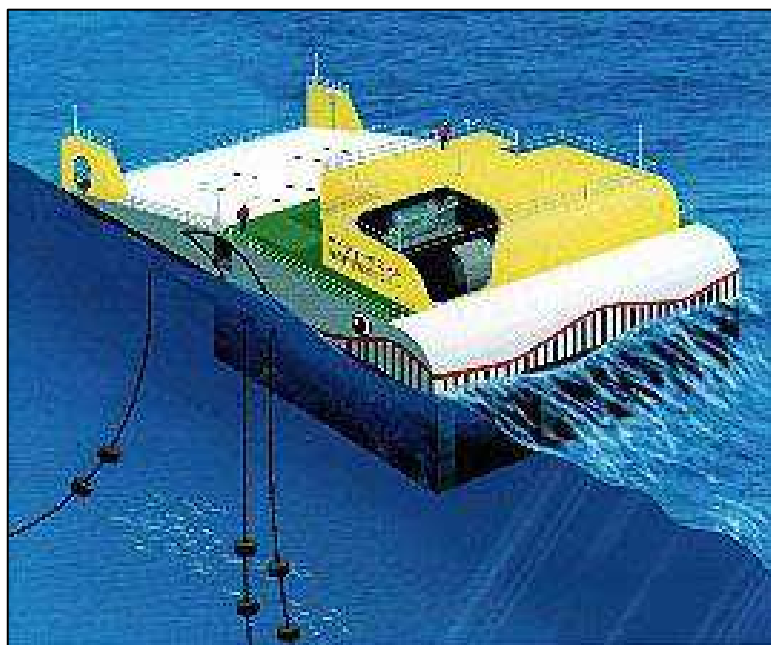


Figura 3.8 – Dispositivo *offshore Mighty Whale* do tipo coluna d'água oscilante (Adaptado de Washio, 2018).

3.3.2 Dispositivos de corpo oscilante

Os dispositivos que estão entre os mais utilizados para a conversão de energia das ondas em eletricidade são os de corpo oscilante. O princípio básico de funcionamento é que as ondas provocam oscilações neste dispositivo impulsionando sistemas hidráulicos que acionam um gerador, produzindo assim eletricidade. São também classificados em submersos que

aproveitam os movimentos de rotação e translação da estrutura; flutuantes em que o flutuador se move verticalmente; e progressivos que se movem sobre sua própria estrutura (RONCHI e SCHAEFFER, 2010). Alguns desses dispositivos são o Pelamis, a WaveBob, a AWS e a usina de Pecém no Ceará.

O Pelamis, dispositivo *offshore* do tipo progressivo (Figura 3.9), foi desenvolvido pela *Ocean Power Delivery Ltd*, uma empresa escocesa fundada em 1998. Segundo dados da própria empresa, há um parque de 40 dispositivos dispostos em 1 km² capaz de gerar 30 MW, responsável pelo abastecimento de 20.000 residências (CRUZ e SARMENTO, 2018).



Figura 3.9 – Conversor de energia das ondas Pelamis *offshore* do tipo progressivo (Adaptado de Power Technology, 2018).

A empresa irlandesa *WaveBob* dispõe do seu dispositivo de corpo oscilante *offshore* conversor de energia das ondas batizado pelo mesmo nome da empresa. É um protótipo que visa transformar em eletricidade a energia oceânica acompanhando o movimento vertical das ondas. Ainda em fase de testes, esse protótipo promete revolucionar a indústria das energias oceânica, pois funciona bem em áreas com ondas bastante turbulentas. O protótipo *Wavebob* em desenho e em alto mar é ilustrado na Figura 3.10.

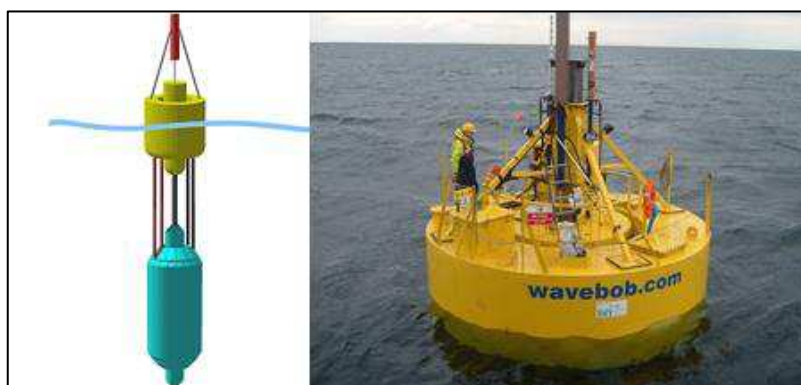


Figura 3.10 – Dispositivo *Wavebob* para conversão de energia das ondas (Adaptado de Science 20 e *New Energy News*, 2018).

O protótipo *Archimedes Wave Swing* (AWS) de uma empresa bengalesa é um dispositivo submerso de absorção pontual que oscila verticalmente sobre uma base fixa. O flutuador é preenchido por ar e quando há a passagem das ondas, move-se em movimentos retilíneos acionando um gerador linear de magnetos permanentes. Quando a onda está pico, a pressão é maior, fazendo com que o flutuador desça, e quando está no vale, o flutuador se move para cima por conta da menor pressão (CUNHA e ONOFREI, 2010). O dispositivo AWS é mostrado na Figura 3.11.

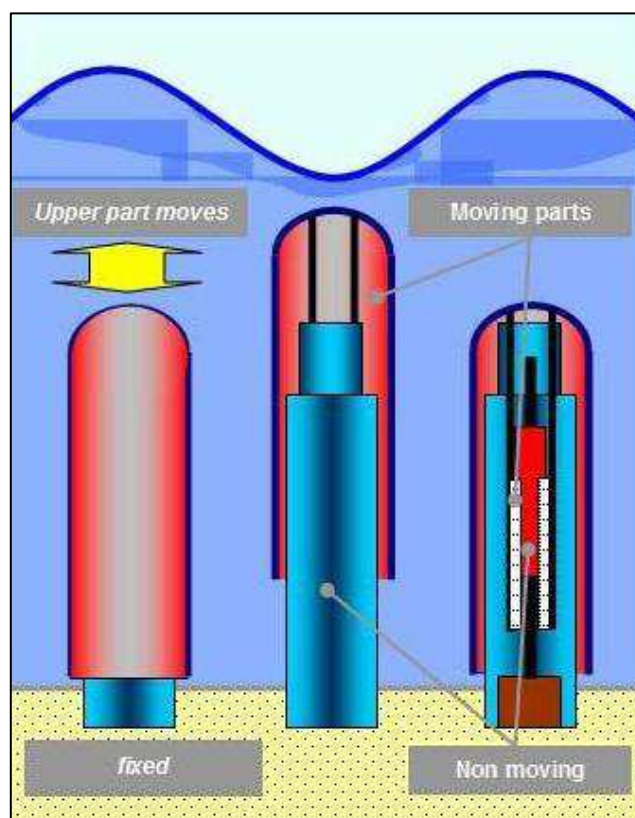


Figura 3.11 – Princípio de funcionamento do protótipo AWS (Adaptado de *Research Gate*, 2018).

O projeto pioneiro na América Latina em conversão de energia oceânica em eletricidade é o realizado na Usina de Pecém no Ceará, Brasil. Com início em 2011, este protótipo *shoreline* consiste de um flutuador que acompanha o movimento das ondas acionando geradores através de dispositivos hidráulicos. Essa pesquisa teve um custo bem alto e que devido a reformas ocorridas no porto de Pecém, a pesquisa foi inativada, voltando a ter prioridade no início do ano de 2017 (COPPE, 2018).

O litoral brasileiro ainda é pouco estudado nas universidades e a pesquisa em energias oceânicas não são vistas com prioridade. A energia no Brasil é predominantemente renovável, mas a presença de hidrelétricas causa diversos impactos ambientais e econômicos, então a energia oceânica passa a ser uma boa solução em vista do grande potencial energético

da costa brasileira (VECCHIA, 2016). A Figura 3.12 mostra protótipo da Usina de Pecém instalado na costa cearense.



Figura 3.12 – Dispositivo de conversão de energia das ondas no Porto de Pecém (Adaptado de Vecchia, 2016).

3.3.3 Dispositivos de galgamento

Nos dispositivos de galgamento como o projeto da empresa dinamarquesa *Wave Dragon*, as ondas são direcionadas à um reservatório acima da média do nível do mar utilizando uma rampa. Com o avanço das ondas em direção a este dispositivo, grandes massas de água são depositadas (galgadas) preenchendo o reservatório e movimentando turbinas para a geração de energia elétrica quando a água é depositada novamente ao oceano (VECCHIA, 2016). O *Wave Dragon* é um projeto *offshore* que facilita o aproveitamento de energia das ondas de maiores potenciais. O princípio de funcionamento é ilustrado na Figura 3.13.

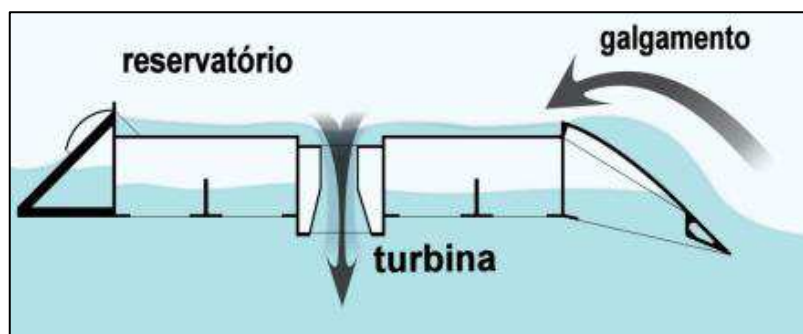


Figura 3.13 – Funcionamento do conversor de energia oceânica *Wave Dragon offshore* do tipo galgamento (Adaptado de Vecchia, 2016).

De acordo com o site *Wave Dragon* (2018), este protótipo pode vir em quatro tamanhos diferentes, gerando em seu maior tamanho até 35 GW. O *Wave Dragon* em funcionamento em alto mar é ilustrado na Figura 3.14.



Figura 3.14 – Projeto dinamarquês *Wave Dragon* (Adaptado de *Magic Ocean*, 2018).

3.4 Extração de energia das correntes oceânicas/marinhas

As turbinas foram utilizadas para extrair a energia cinética das correntes marinhas inicialmente para atender a pequenas comunidades ribeirinhas europeias. Com o avanço tecnológico e a carência por energia limpa e renovável, muitos projetos de tipos variados estão sendo desenvolvidos para a extração de energia das correntes oceânicas, em sua maioria tecnologias *offshore*.

Além da classificação quanto a posição que pode ser *shoreline*, *near-shore* e *offshore*, os dispositivos de extração de energia das correntes podem ser classificados quanto a forma de extração. Como trata-se de correntes oceânicas, o princípio é o mesmo da energia eólica, utilizando-se turbinas de diversas configurações: eixo horizontal e eixo vertical, tendo também projetos que conseguem transformar a energia cinética das correntes superficiais de rios com grande eficiência para o abastecimento direto a casas próximas a instalação. Como a densidade da água é aproximadamente 800 vezes superior à do ar, necessita-se de pás de menores tamanhos para gerar uma quantidade semelhante de energia em comparação à eólica.

3.4.1 Turbinas de eixo horizontal

Ainda há poucos estudos de protótipos que convertam a energia das correntes marinhas, mas as que já existem são bem sugestivas. Devido a grandes diferenças entre as áreas de instalação, as turbinas ainda não convergiram para um único formato como é na extração de energia eólica. O protótipo mais conhecido é o SeaGen S que é desenvolvido pela empresa *Marine Current Turbines*, um dispositivo que é composto por duas turbinas presas a uma viga, característica essencial que facilita a manutenção e ajusta-se com o sentido da corrente (FLEMING, 2012). O protótipo SeaGen S é mostrado na Figura 3.15.

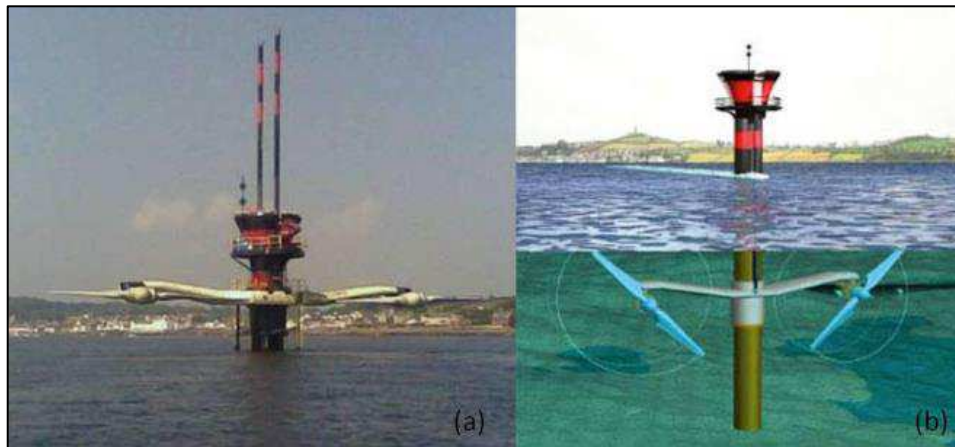


Figura 3.15 – Protótipo SeaGen S com (a) as turbinas emersas e (b) as turbinas submersas
(Adaptado de Fleming, 2012).

O SeaGen S é um equipamento de 1,2 MW de potência, que no ano de 2008 conseguiu gerar 3 GWh. Mais estudos estão sendo desenvolvidos por essa empresa irlandesa afim de projetar turbinas de 2 MW de potência (FLEMING, 2012). Esta empresa também desenvolve o SeaGen U *near-shore*, composto por três turbinas de 1 MW cada, mostrada na Figura 3.16.

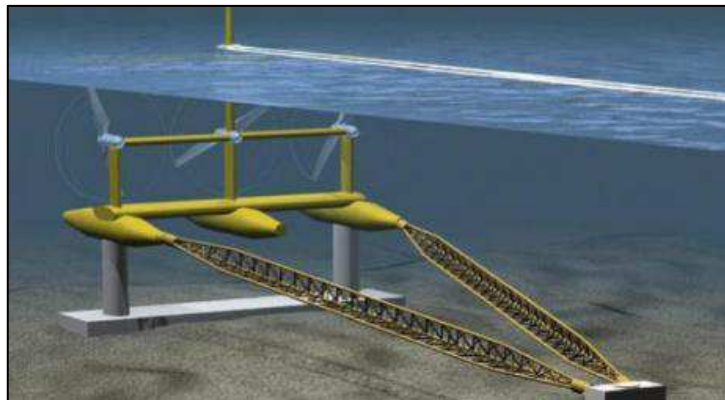


Figura 3.16 – Esquema do projeto SeaGen U (Adaptado de Fleming, 2012).

3.4.2 Turbinas de eixo vertical

As turbinas verticais, geralmente denominadas de turbinas Darrieus, são movimentadas pelo fluxo transversal à pá. Estudos de protótipos com esses tipos de turbinas ainda em fases iniciais estão sendo realizados no Japão e Canadá, país norte-americano que, inclusive, já instalou projetos de 30 MW nas Filipinas como demonstração. De acordo com Ambiente Marinho (2018), estes tipos de turbinas não necessitam de mudança na instalação com as mudanças de direção das correntes, pois funcionam com correntes em quaisquer direções. Uma demonstração de turbinas Darrieus que funciona com princípio de sustentação é demonstrada na Figura 3.17.

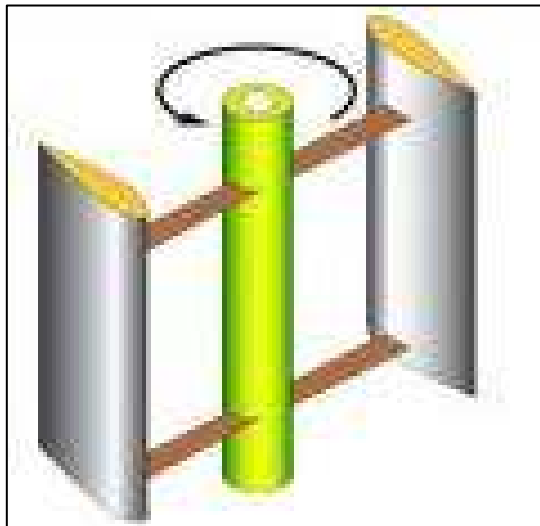


Figura 3.17 – Demonstração das turbinas Darrieus (Adaptado de Ambiente Marinho, 2018).

3.4.3 Outros tipos de turbinas

Uma forma diferenciada de extrair a energia das correntes pode ser feita utilizando as correntes superficiais de pequenos rios de baixa profundidade ou próximos a nascentes. Desenvolvido pela empresa belga *Turbulent* (2018), um protótipo de baixo custo foi desenvolvido utilizando-se uma pequena turbina Kaplan e causando um desvio em parte da corrente de águas do rio como recurso. O propósito da empresa com este projeto é de facilitar o alcance da energia elétrica para regiões afastadas e com características favoráveis para a instalação deste tipo de tecnologia. A representação deste protótipo é mostrada na Figura 3.18.

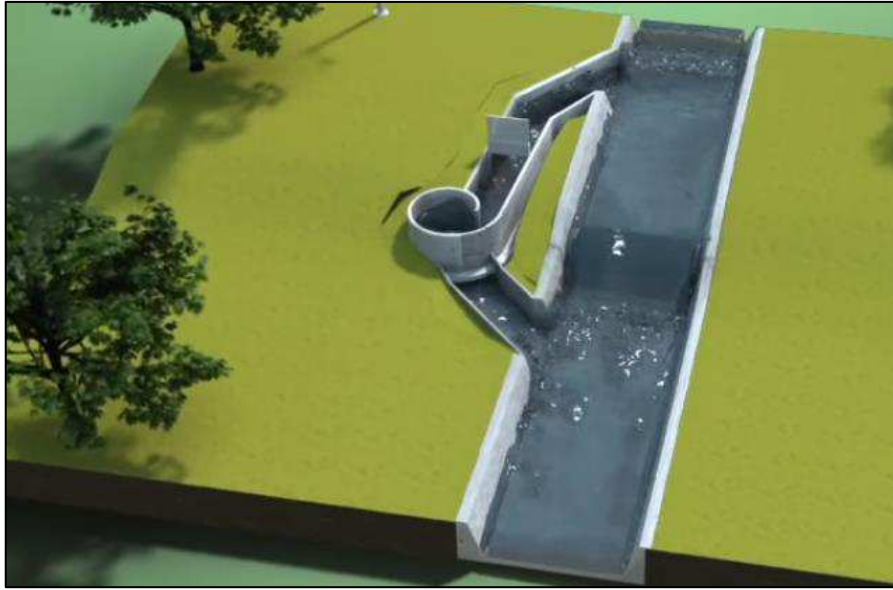


Figura 3.18 – Protótipo conversor da energia de correntes superficiais que utiliza turbina Kaplan (Adaptado de *Turbulent*, 2018).

3.5 Cálculo da potência teórica e real e do rendimento dos protótipos conversores de energia oceânica

Para validar o desempenho de um protótipo que converte energia de fontes oceânicas, deve-se dar atenção aos cálculos de potência. Como o presente trabalho tem enfoque nas ondas e correntes oceânicas, deve-se ter ideia das potências fornecidas por essas fontes de energia. Em se tratando das ondas oceânicas, o potencial teórico das ondas pode ser calculado pela Equação 2.1 (OLIVEIRA, 2015):

$$\frac{P_{teórica}}{L_{fo}} = \frac{\rho g^2}{32\pi} H^2 T \quad (2.1)$$

Onde:

$P_{teórica}$ → Potência teórica (W);

ρ → Massa específica da água (kg/m^3);

g → Aceleração da gravidade (m/s^2);

H → Altura da onda (m);

T → Período da onda (s);

L_{fo} → Comprimento de frente de onda (m).

Para o cálculo do potencial energético das correntes, utiliza-se a Equação 2.2 (FLEMING, 2018).

$$\frac{P_{teórica}}{A_{turbina}} = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.2)$$

Onde:

$P_{teórica}$ → Potência teórica (W);

ρ → Massa específica da água (kg/m^3);

v → Velocidade da corrente de água (m/s);

$A_{turbina}$ → Área transversal de fluxo interceptada pela turbina (m^2).

O rendimento de quaisquer protótipos conversores de energia oceânica é calculado através da razão entre a potência real extraída nos experimentos e a potência teórica calculada analiticamente com base na configuração de cada protótipo que é um comparativo ideal para este trabalho. Na Equação 2.3 tem-se a expressão que calcula o rendimento para o conversor de energia oceânica tanto para as ondas, quanto para as correntes proposto neste trabalho.

$$\eta = \frac{P_{real}}{P_{teórica}} \quad (2.3)$$

Nos experimentos desse trabalho, toda potência real do protótipo foi convertida em eletricidade. A potência elétrica gerada que, para o protótipo, é a potência disponível no dispositivo é calculado pela Equação 2.4 (HALLIDAY e RESNICK, 2009b).

$$P_{real} = \frac{U^2}{R} \quad (2.4)$$

Onde:

P_{real} → Potência extraída nos testes (W);

U → Diferença de potencial medida nos testes (V);

R → Resistência do cabeamento utilizado nos testes (Ω).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Dando continuidade ao trabalho, neste capítulo serão mostrados em detalhes todos os materiais e métodos que foram utilizados para a construção de uma nova bancada experimental capaz de converter a energia das ondas e das correntes de maneira integrada. Estudos anteriores foram desenvolvidos através de trabalhos de conclusão de curso e projetos de iniciação científica no desenvolvimento desse dispositivo. O que diferencia o presente trabalho em particular é a construção de uma nova bancada com características inovadoras. A nova bancada trouxe melhorias que são satisfatórias para o desenvolvimento de um modelo em escala real.

Inicialmente, deu-se ênfase no planejamento das atividades a serem realizadas. Foi realizada uma revisão bibliográfica para uma maior interação com o tema de geração de energia oceânica utilizando autores renomados na área que atuam nas universidades e empresas do Brasil e do mundo.

Como planejado para o desenvolvimento do trabalho, o projeto foi dividido em quatro partes principais: (1) aprofundamento no tema que cercam as energias renováveis com ênfase nas energias oceânicas com enfoque nas ondas e correntes oceânicas, tanto as características de formação das ondas e correntes, quanto os protótipos que estão em desenvolvimento nos principais países do mundo; (2) o estudo das características dos protótipos do projeto Princesa do Mar anteriormente realizados para efeitos comparativos; (3) Confecção de um novo protótipo com características mais aprofundadas de projeto viabilizando melhorias no rendimento; e (4) a realização dos experimento com a nova bancada como meio de validação das melhorias propostas no trabalho.

4.1 Características gerais do projeto Princesa do Mar

O protótipo conversor de energia oceânica idealizado nesta pesquisa foi batizado de Princesa do Mar. A ideia inicial é que o protótipo pudesse converter a energia mecânica potencial das ondas e a cinética advinda das correntes. Para isso, o protótipo é composto por um flutuador que acompanha o movimento vertical das ondas e duas turbinas que faz movimentos rotativos com o ataque das massas de água nas pás. Este é o primeiro estudo de

um dispositivo no mundo que extrai a energia advinda das ondas e das correntes de maneira integrada. A Figura 4.1 ilustra o primeiro dispositivo construído por Silva (2016) na Universidade Estadual do Maranhão (UEMA).



Figura 4.1 – Primeiro Protótipo definitivo do projeto Princesa do Mar (Adaptado de Silva, 2016).

Este modelo do projeto Princesa do Mar utilizou-se de alguns geradores específicos para cada maneira de extração de energia. No tocante as ondas, foram utilizados fios de cobre esmaltado juntamente com ímãs de neodímio. Quanto às correntes, fora utilizado motores encontrados em impressoras. O protótipo desmontado é ilustrado na Figura 4.2.



Figura 4.2 – Protótipo do projeto conversor de energia oceânica desmontado (Adaptado de Silva, 2016).

Segundo Silva (2016), o modelo tem 480 mm de distância entre uma ponta e outra e cerca de 300 mm de altura. Nos testes realizados, foi utilizado como causador das ondas um rolo de pintura e como causador das correntes, bombas submersas para aquário. A Figura 4.3 ilustra o modelo utilizado por Silva (2016) durante os testes.

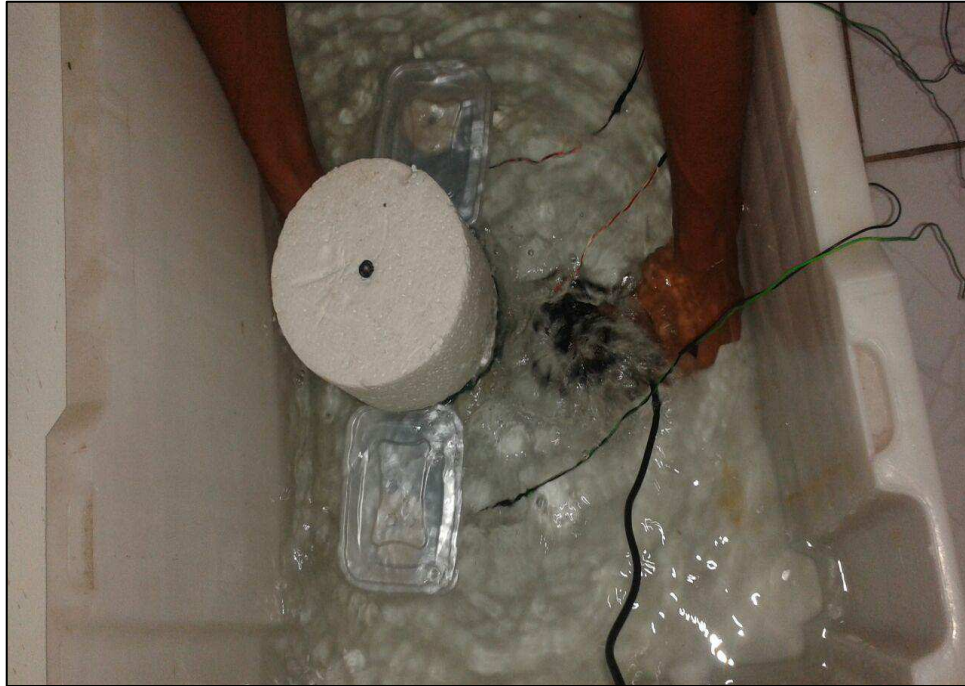


Figura 4.3 – Modelo do projeto Princesa do Mar durante o experimento (Adaptado de Silva, 2016).

Com esses estudos, foi mostrado que o protótipo funciona e que tem ótimas condições de operação. Deu-se continuidade nos estudos do projeto para melhorias tanto na construção de um novo protótipo conversor de energia oceânica, quanto na confecção de uma nova bancada experimental capaz de simular os efeitos de ondas e correntes do oceano com o objetivo de aumentar o rendimento do protótipo na conversão de energia.

4.2 Desenvolvimento e projeto da nova bancada experimental

Ao estudar a história do desenvolvimento dos protótipos, pode-se entender os fenômenos naturais que geram as ondas e as correntes nos oceanos, altura das ondas e velocidades das correntes no litoral do Maranhão, que por sinal é privilegiado para o desenvolvimento desse tipo de tecnologia. Características essas foram aproveitadas afim de desenvolver um protótipo que atenda as condições de ondas e correntes oceânicas.

A primeira etapa de desenvolvimento do protótipo foi recriar um modelo que tivesse menores dimensões e fosse melhor construído com materiais padronizados, mas com um aumento significativo em seu rendimento. Para isso, o mesmo foi modelado em CAD (sigla de *Computer Aided Design*) no *software* SolidWorks, programa de desenho 3D e simulação de movimento.

O protótipo 1 é ilustrado na Figura 4.4, o qual conta com algumas mudanças específicas no tamanho, na geometria da boia, na espessura da caixa de vedação, melhorias nos geradores das turbinas e da boia e menor comprimento de viga de sustentação.

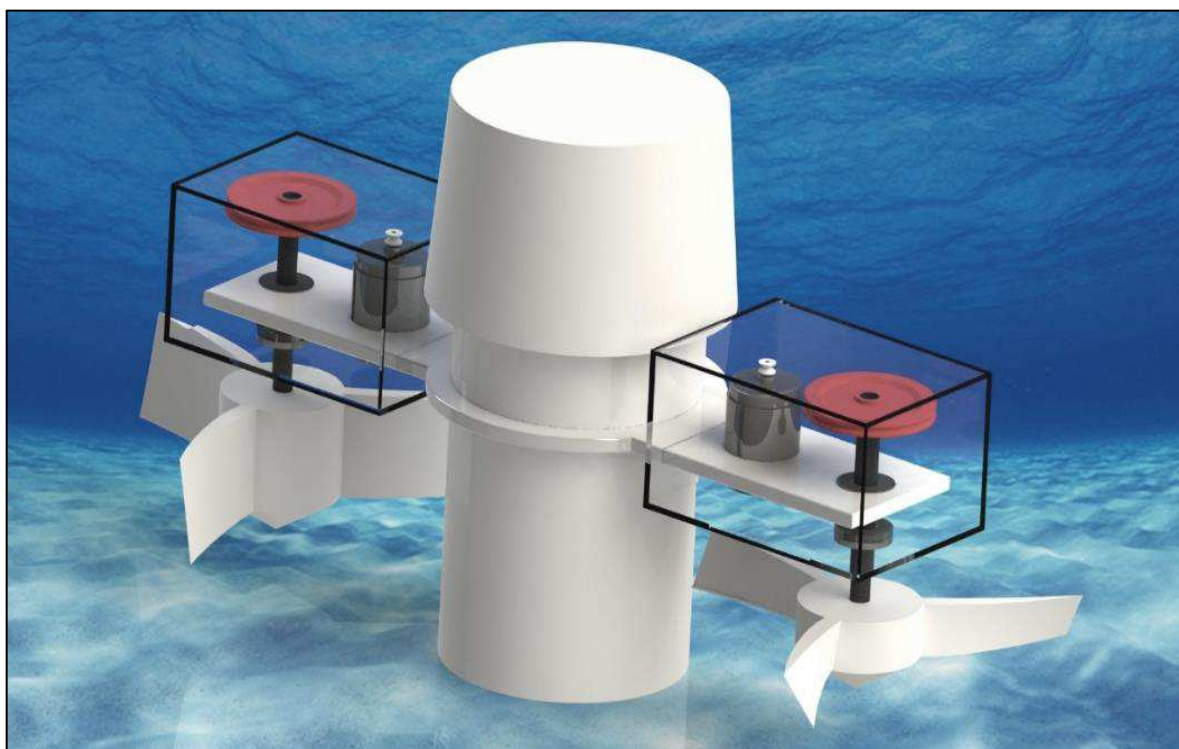


Figura 4.4 – Representação em CAD do protótipo 1.

No projeto deste modelo, foram constatados alguns erros de seleção de material que impossibilitariam a construção, por exemplo, a caixa de vedação em vidro com espessura de 2 mm que, nessa espessura, torna-se um material altamente cortante e muito frágil. A tensão nos rolamentos seria alta por conta do momento da força peso da caixa de vedação exercida sobre o eixo, que acarretaria em dificuldades na transmissão de rotação.

Para que estes erros fossem corrigidos, foi projetado um novo protótipo que se adequasse melhor às condições de ambientes oceânicos, ainda objetivando ser desmontável e confeccionado com materiais de fácil aquisição. A viga de sustentação foi prolongada visando que a caixa de vedação se apoiasse em dois pontos minimizando os efeitos de tensão nos rolamentos e nos eixos. A caixa de vedação teve seu material inicial, o vidro, trocado pelo acrílico, que é mais leve e de melhor manuseio pelo fato de não ser cortante.

Auxiliando o desenvolvimento de um novo modelo, foi novamente utilizado o SolidWorks para representação em 3D que se tornasse visível todos os componentes de uma forma mais clara. De maneira geral, os erros de seleção de material do protótipo 2 foram solucionados e o mesmo é ilustrado na Figura 4.5.

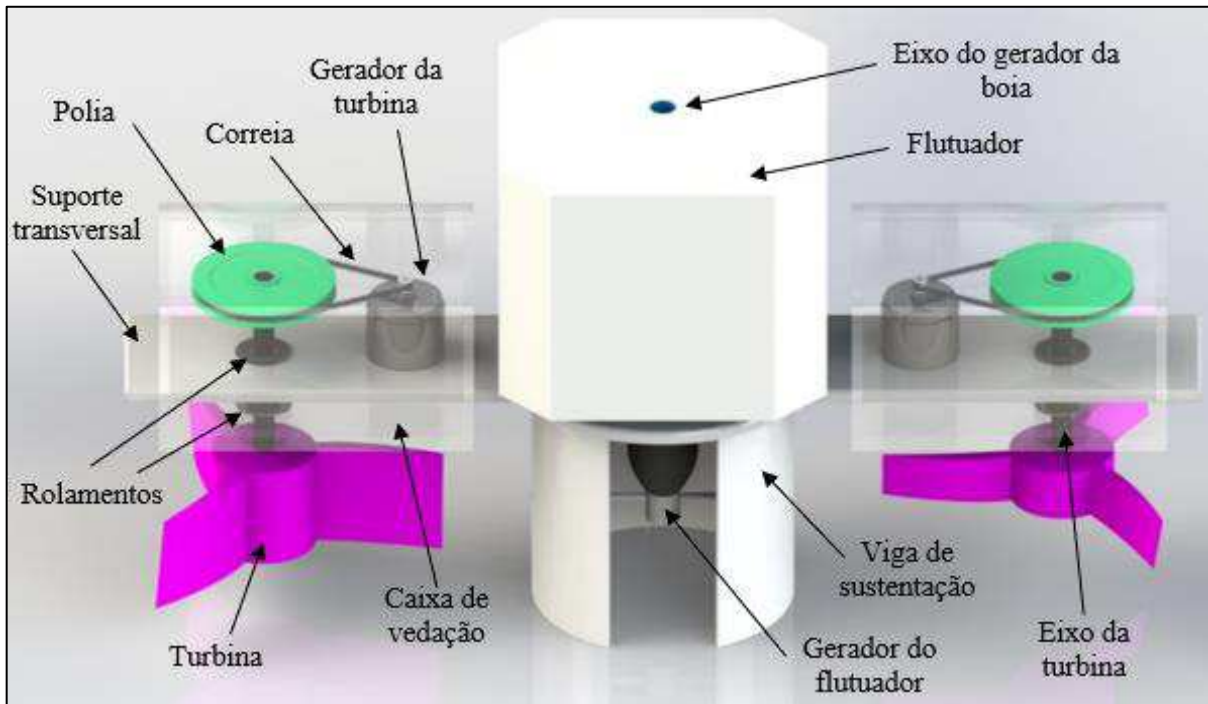


Figura 4.5 – Representação em CAD do protótipo 2.

Os detalhes quanto a tecnologia utilizada na extração da energia das ondas e das correntes e seus mecanismos são discutidos posteriormente.

4.2.1 Mecanismo para extração da energia das ondas

A energia mecânica presente nas ondas vem sob a forma cinética e potencial (Figura 3.4), mas em estudo específico para este protótipo, é necessário apenas a parte potencial da energia presente nas ondas oceânicas. O projeto Princesa do Mar consiste de um conversor de energia das ondas do tipo corpo oscilante (discutido na seção 3.3.2), que consiste em um flutuador que se movimenta verticalmente com o intuito de acompanhar o movimento entre a crista e a cava das ondas afim de extrair a sua energia potencial.

O flutuador do protótipo 1 era circular e devidos limitações geométricas, não era possível aumentar o seu diâmetro. Com a nova configuração do flutuador no protótipo 2, o

mesmo tem base quadrada com o intuito de aproveitar em maior quantidade a área do flutuador em contato com a superfície da água melhorando o acompanhamento da excitação da onda.

Como ilustrado na Figura 4.6, o mecanismo idealizado para extrair a energia das ondas foi a utilização de ímãs de neodímio 4x10 mm presos a um eixo que é preso ao flutuador, uma bobina feita com fios de cobre esmaltado dados 600 voltas em torno de um tubo e barbantes para que a bobina se mantivesse presa ao dispositivo pela viga de sustentação.

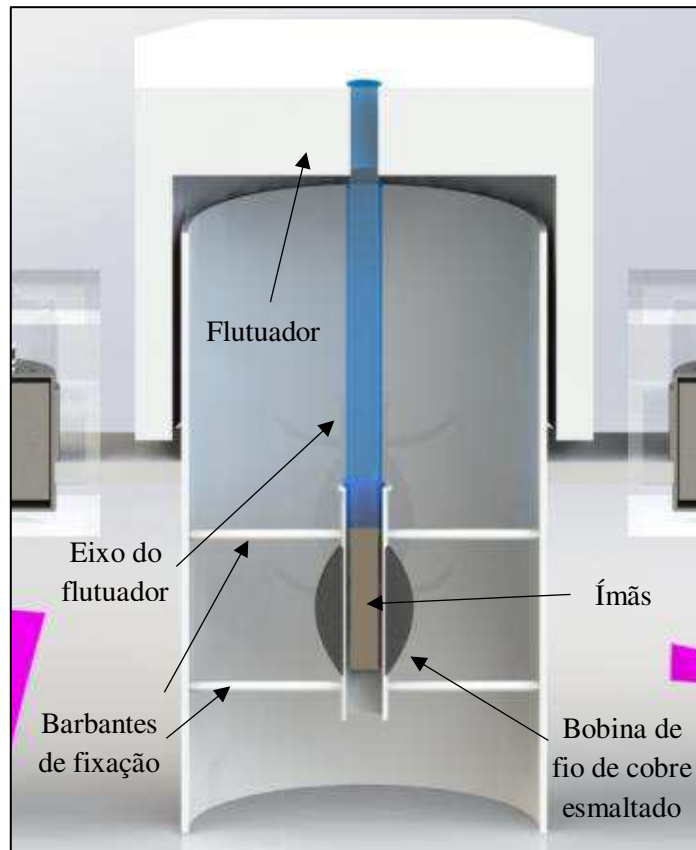


Figura 4.6 – Detalhes do gerador de energia das ondas em cortes.

O flutuador tem um furo ao meio com um diâmetro maior que o da pilastra para que, enquanto ocorrerem os movimentos verticais, o flutuador não perca seu curso. O mesmo tem uma área de 125 mm² com adição de filetes de 15 mm nos cantos e com um furo inferior.

O gerador funciona da seguinte forma: o ímã ao passar pela bobina feita com o fio de cobre esmaltado faz os elétrons livres se movimentarem, criando uma força eletromotriz induzida surgindo assim uma diferença de potencial (DDP). Enquanto o flutuador se movimentar verticalmente acompanhando a amplitude das ondas, os elétrons continuarão a se movimentar de um lado ao outro. Se há DDP, surge corrente elétrica, o que garante que o dispositivo consegue extrair a energia advinda das ondas.

Os mecanismos principais do gerador das ondas são ilustrados na Figura 4.7 com o protótipo desmontado.



Figura 4.7 – Mecanismos utilizados na conversão da energia das ondas em eletricidade.

4.2.2 Mecanismo para extração da energia das correntes

A energia mecânica presente nas correntes vem sob a forma cinética devido aos grandes deslocamentos de massas de água de um ponto a outro muito distante. Geralmente a conversão da energia das correntes é realizada através da presença de turbinas nos dispositivos, podendo ser verticais ou horizontais com o princípio de funcionamento por sustentação, ou arrasto (discutido na seção 3.4). No tocante ao projeto Princesa do Mar, a forma de extrair a energia das correntes é com a utilização de turbinas verticais e tendo por seu princípio de funcionamento o arrasto e a sustentação devido o ataque da água nas pás das turbinas.

O mecanismo utilizado para extrair a energia cinética das ondas é composto pelas turbinas verticais geram uma rotação devido ao ataque da corrente nas pás e é transmitida através de um eixo até uma polia motora. Entre as turbinas e a polia há a presença de rolamentos que auxiliam na transmissão da rotação sem que haja rotação no dispositivo. A rotação da polia motora é transmitida à polia movida através de correias. A polia movida é posta no motor de impressora funcionando como o gerador que através de seu movimento, cria-se uma diferença

de potencial causando a passagem de corrente contínua e, com isso, a eletricidade é gerada. Isso garante que o dispositivo, ilustrado na Figura 4.8, consegue converter a energia das correntes.

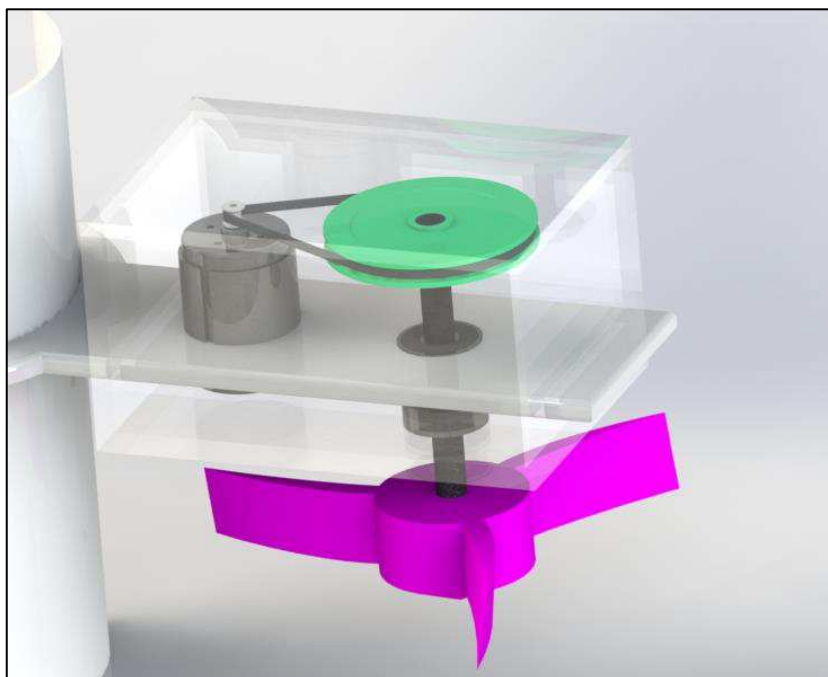


Figura 4.8 – Detalhes do gerador de energia das correntes.

Verifica-se nesse protótipo 2 em relação ao protótipo 1 que a caixa de vedação, que antes era em vidro e agora em acrílico, é bi apoiada no suporte transversal, eliminando esforços desnecessários no eixo. A relação de transmissão utilizada no projeto foi de 7/1, pois quanto maior a rotação, maior a energia gerada pelo motor de corrente contínua. O mecanismo gerador das correntes já montado é ilustrado na Figura 4.9.



Figura 4.9 – Mecanismos utilizados na conversão da energia das correntes em eletricidade.

As turbinas de três pás com área de $0,00135 \text{ m}^2$ foram confeccionadas com ajuda de uma impressora 3D assim como as polias. O perfil hidrodinâmico utilizado foi o NACA 4412, por suas características geométricas possibilitarem um melhor escoamento das massas de água através das pás. A geometria do perfil naca 4412 é ilustrado na Figura 4.10

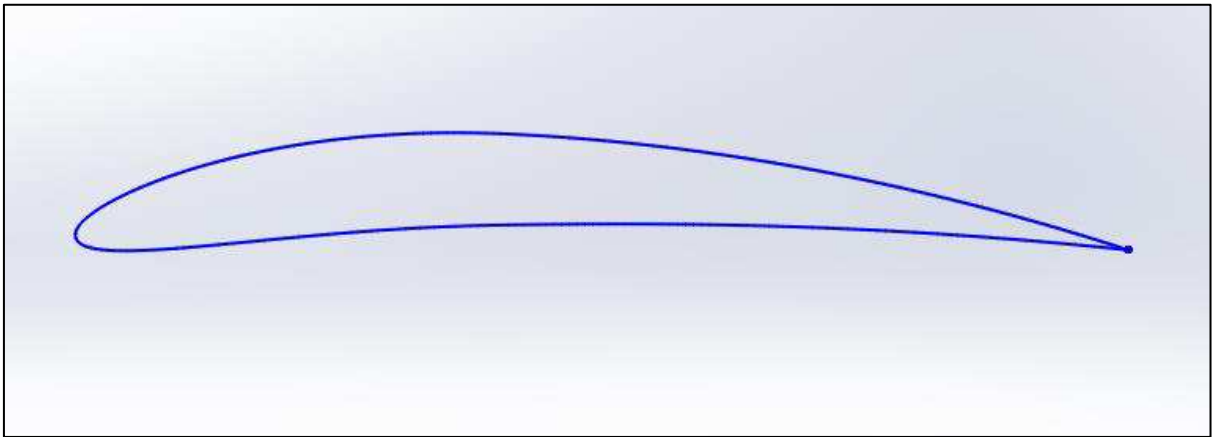


Figura 4.10 – Perfil hidrodinâmico NACA 4412 para modelagem das turbinas.

Foram impressos três tipos de turbinas com diferença entre os ângulos das pás e será escolhida a definitiva para o projeto a que obtiver o melhor desempenho. Limitações surgiram na impressão das turbinas por motivo de a área da impressora ser bastante limitada. É ilustrado na Figura 4.11 as turbinas do protótipo em CAD.

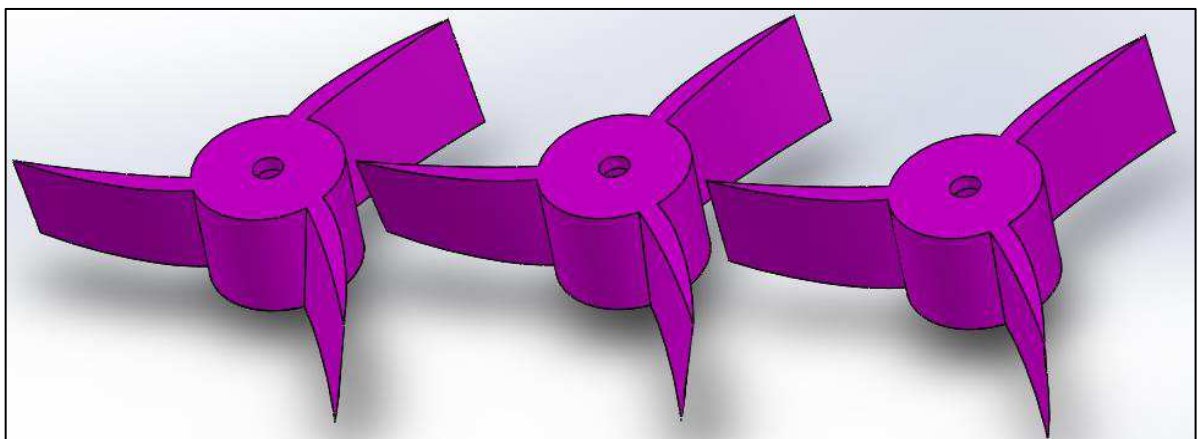


Figura 4.11 – Turbinas de 3 pás com diferentes ângulos de ataque.

Os ângulos nas pás são para analisar o rendimento de cada turbina para que seja escolhida a ideal para o projeto. Cada uma gera um arrasto diferente e resultam diferentemente na extração de energia. Uma outra turbina foi confeccionada com um alto ângulo de ataque (45° precisamente) para que fosse feito mais um comparativo. Para essa turbina, a força nas pás ocorre devido a pressão no intradorso do perfil ser maior que a do extradorso gerando sustentação, e tendo um alto arrasto devido ao seu alto ângulo de ataque mesmo com um perfil

pouco arqueado. Através dessa turbina mostrada na Figura 4.12, ver-se-á o rendimento da turbina de sustentação/arrasto.

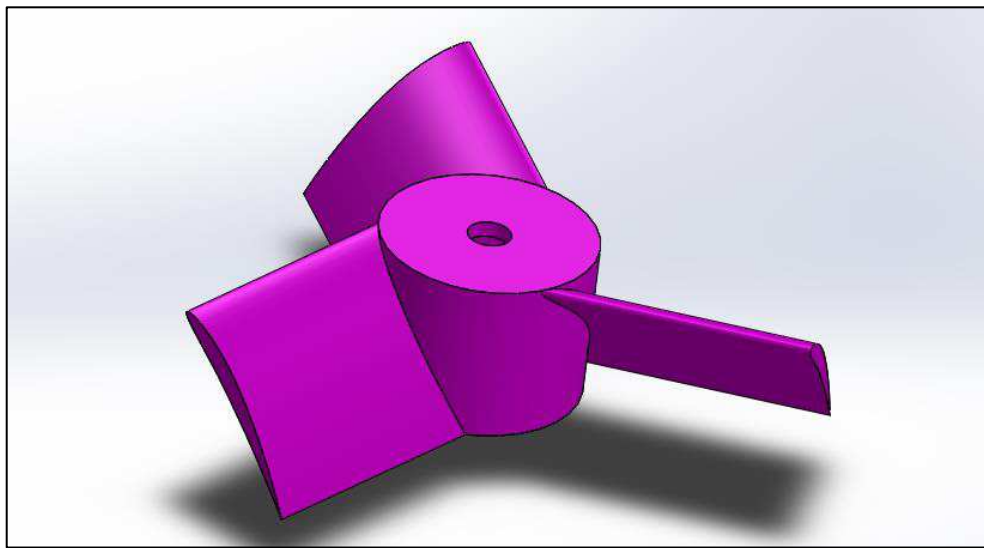


Figura 4.12 – Turbina de sustentação/arrasto modelada em CAD.

As polias auxiliam na transmissão da rotação ao gerador através de correias e é notório algumas desvantagens como o escorregamento das correias e a dificuldade em obter uma correia dentada, fazendo-se optar por um novo mecanismo de transmissão de rotação. As engrenagens, por um alto rendimento e possibilidade de rotação sem interrupções, foram idealizadas para o protótipo conversor de energia oceânica. Seguindo o modelo de cálculo de engrenagens proposto por Antunes e Freire (2000), foram projetados a coroa e o pinhão para serem as engrenagens motora e movida. A ilustração em CAD do mecanismo de extração de energia das correntes utilizando engrenagens é ilustrado na Figura 4.13.

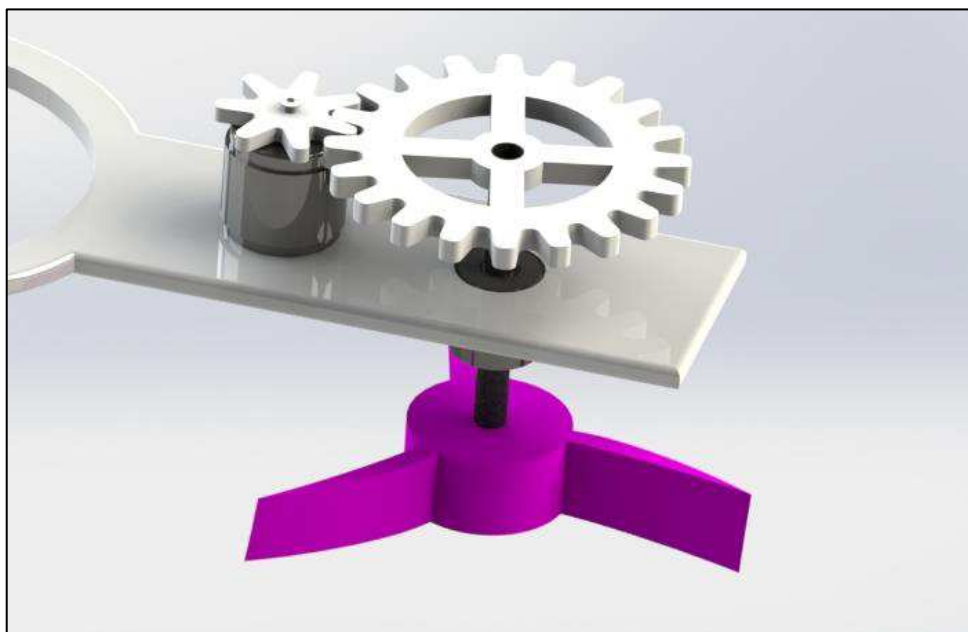


Figura 4.13 – Mecanismo de transmissão de rotação com uso de engrenagens.

4.3 Construção da bancada e realização dos testes

Após o projeto detalhado de todo o protótipo, deu-se início à confecção do mesmo e a bancada que simulasse as ondas e as correntes de maneira integrada aproximando-se o máximo dos ambientes naturais oceânicos. O protótipo montado para os testes é mostrado na Figura 4.14.

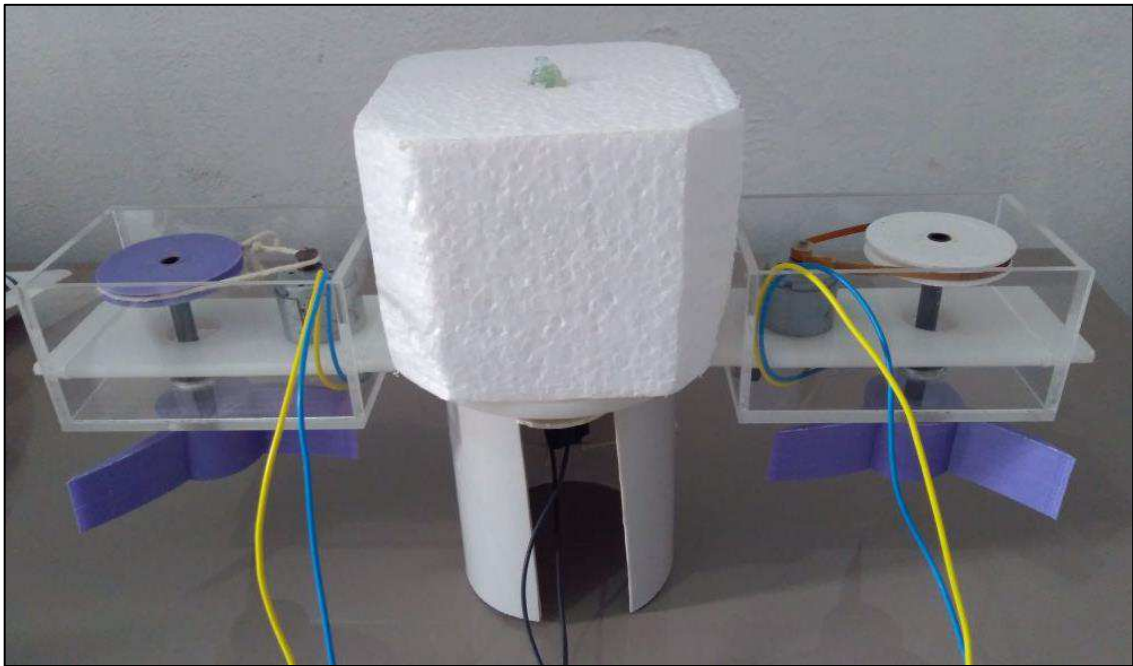


Figura 4.14 – Protótipo construído apto para a realização dos testes.

Todos os materiais foram selecionados de acordo com a necessidade de projeto atendendo aos seguintes requisitos:

- Facilidade de aquisição do material;
- Baixo custo;
- Facilidade no manuseio;
- Praticidade na montagem/desmontagem;
- Baixa necessidade de manutenção/alta resistência.

Além disso, a boa fabricação dos itens do dispositivo acarreta no mantimento das boas características de projeto. Em exemplo, a chapa de nylon que serve de suporte aos componentes foi, anteriormente, fabricada com cortes a mão resultando em pouca precisão. O suporte transversal foi desenvolvido para que pudesse ser garantido uma precisão de 100% na usinagem afim de facilitar a montagem. A caixa de vedação, que anteriormente era feita de um recipiente plástico, foi fabricada em material acrílico para que os componentes dentro da caixa

fossem atingidos pela água, que acarretaria em um mau funcionamento. A Figura 4.15 ilustra as chapas de nylon e os recipientes de vedação que anteriormente fabricados artesanalmente, agora feitos em alta precisão com materiais de maior qualidade.

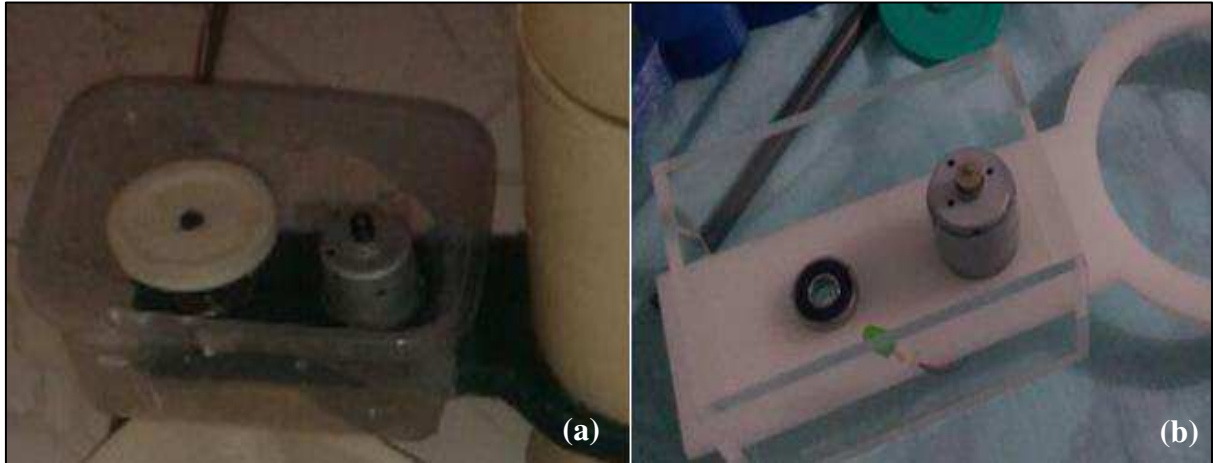


Figura 4.15 – Materiais confeccionados (a) em estudos anteriores (Adaptado de Silva, 2016) (b) e fabricados atualmente.

Para o gerador da onda, outrora era utilizada uma bobina com dimensões maiores e ímãs bem pesados e volumosos. Com o intuito de diminuir as dimensões da bobina, passou-se a utilizar ímãs de neodímio, que é muito mais forte que os ímãs comuns podendo aumentar ainda mais a eficiência do gerador. a Figura 4.16 mostra o comparativo entre a utilizada por Silva (2016) com 30 mm de diâmetro e a nova bobina com uma redução de 60%.



Figura 4.16 – (a) Bobina do protótipo antigo (Adaptado de Silva, 2016) e (b) do novo projeto.

A Tabela 4.1 apresenta cada item que foi utilizado na construção do protótipo e o material de que o mesmo é fabricado atendendo a todos os requisitos propostos.

Tabela 4.1 – Itens utilizados para a confecção do protótipo.

ITEM	MATERIAL
Viga de sustentação	Cano PVC
Suporte transversal	Chapa de nylon 6 mm
Turbinas e polias	Plásticos (ABS e PLA)
Flutuador	Isopor (Poliestireno)
Gerador da turbina	Motor de impressora
Gerador do flutuador	Fio de cobre esmaltado e ímãs de neodímio 4x10 mm
Caixa e tampa da vedação	Acrílico transparente
Eixos	Tubo de caneta e de fibra de carbono
Correia	Correia de impressora
Causador das correntes	Bomba submersa para fonte (1000 L/h)
Causador das ondas	Tábua de madeira
Tanque de testes	Recipiente de vidro 60x80x30 cm
Fixação dos componentes	Supercola, cola quente e epóxi

Para que se pudesse simular o fenômeno das ondas e das correntes, fora idealizado um recipiente de grande capacidade de água, afim de as ondas geradas não quebrarem em frente ao protótipo evitando falhas no rendimento do flutuador, e também para que o fluxo de água corra livremente sobre o tanque de testes. A Figura 4.17 mostra a bancada experimental montada e sendo testada.

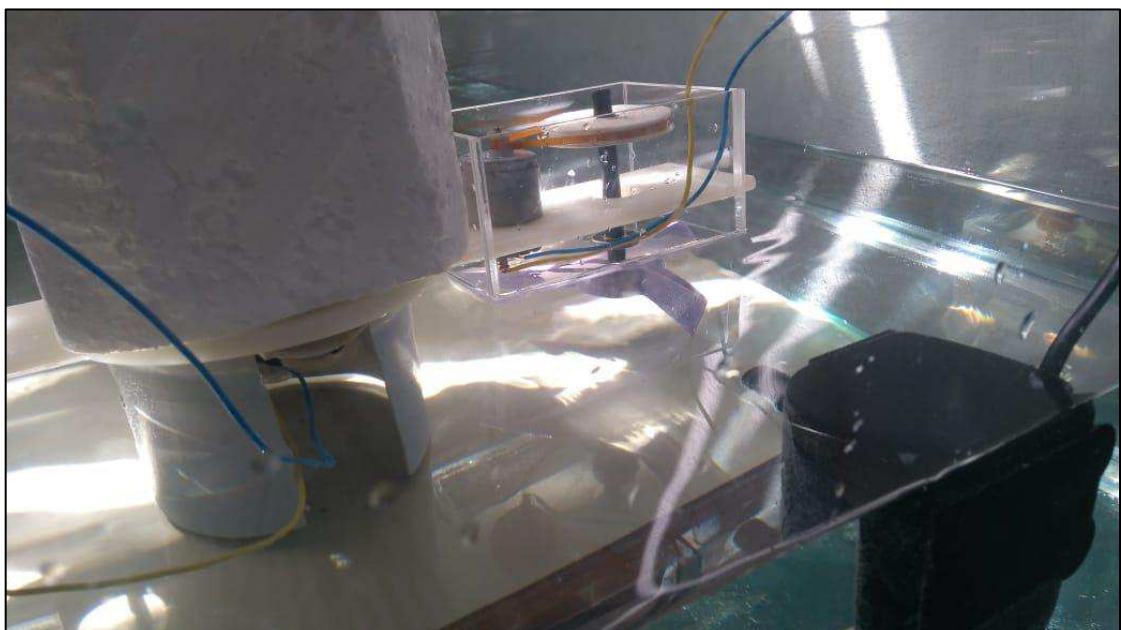


Figura 4.17 – Bancada experimental montada em funcionamento.

Para que os resultados fossem satisfatórios, os testes foram realizados com vazões na bomba e excitação na água variáveis, garantindo diferentes velocidades de correntes e amplitudes de ondas especificados para cada teste.

No experimento, as correntes variaram entre 1,25 e 1,5 m/s. A velocidade da corrente fora alterada através da mudança da área transversal ao fluxo da bomba submersa para fontes. Com a vazão $Q = 1000 \text{ L/h}$, a velocidade da corrente fora aumentada diminuindo a área.

A amplitude das ondas em teste foi entre 35 e 60 mm. A superfície da água é excitada com uma tábua de madeira. O gabarito de amplitude da onda foi posto no recipiente para que se tenha ideia da amplitude real da onda no experimento. Com maior força de excitação, as ondas tendem a aumentar sua amplitude.

A produção elétrica da bancada experimental fora medida através de multímetro. Os valores oferecidos pelo multímetro são a DDP do sistema, a corrente e a resistência elétrica entre os terminais medidos. A Figura 4.18 apresenta a leitura do multímetro durante os testes.



Figura 4.18 – Verificação dos dados obtidos no sistema.

Para garantir confiabilidade ao experimento, cada teste envolvido na bancada fora realizado pelo menos cinco vezes e considerando a mediana dos valores obtidos nas medições. As características do funcionamento da bancada e dos geradores foram analisadas visando perspectivas de futuras melhorias.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como proposto inicialmente, o presente trabalho objetivou-se em simular uma bancada experimental que produzisse energia elétrica a partir de fontes de águas com ênfase nas ondas e correntes. O protótipo foi desenhado e construído para avaliar de maneira experimental melhorias na eficiência dos geradores, como também em sua parte construtiva, visando que será base para um modelo em escala maior para funcionamento nos oceanos e mares. Esse é um experimento único, pois não há estudos - além dessa linha de pesquisa - que acarreta na extração de energia de forma simultânea por apenas um mecanismo. Toda as etapas cumpridas de acordo como cronograma do projeto.

Em se tratando da energia das ondas, os testes foram feitos em duas condições primárias de amplitude de onda e período. A excitação da superfície das águas foi realizada utilizando uma tábua de madeira afim de provocar as ondas no tanque. Na Tabela 5.1 são mostrados os resultados obtidos.

Tabela 5.1 – Resultados obtidos nos testes para as ondas.

Extração de Energia das Ondas			
Característica das Ondas		Medições	
Amplitude (mm)	Período (s)	Tensão (V)	Resistência (Ω)
35	0,5	0,012	37
	1	0,025	
50	0,5	0,075	
	1	0,119	

Tratando-se da energia das correntes, os testes foram realizados com as diversas características de turbinas. A ideia é analisar as medições para todas as turbinas nas diferentes condições de operação. Para as turbinas de arrasto, foram selecionados os ângulos entre 8 e 15°, afim de escolher a melhor configuração. A turbina de sustentação/arrasto foi analisada afim de indicar se ela é a ideal ao projeto.

As velocidades de corrente de 1,25 e 1,5 m/s foram as utilizadas para o experimento de cada turbina. A maneira antes utilizada para causar as correntes foi o próprio fluxo de água da mangueira, mas que se tornou ineficaz por sua impossibilidade de medição de velocidade. O modo então utilizado foi com uma bomba submersa para fontes de vazão controlável, podendo assim possibilitar a variação da velocidade das correntes de água. Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados obtidos.

Tabela 5.2 – Resultados obtidos nos testes para as correntes.

Extração de Energia das Correntes					
Característica das Turbinas / Transmissão por correias (7x1)			Característica das correntes	Medições	
				Velocidade (m/s)	Tensão (V)
Ângulo das Pás	Arrasto	8°	1,25	1,26	3,1
			1,5	1,66	
		13°	1,25	1,30	
			1,5	1,70	
		15°	1,25	1,10	
			1,5	1,60	
	Sustentação/ Arrasto	45°	1,25	1,30	
			1,5	1,80	

Importante frisar que todos os testes foram feitos utilizando polias para a transmissão do torque do eixo das turbinas ao gerador. Erros na impressão da engrenagem movida impossibilitou a realização do experimento, pois não foi possível a transmissão contínua do movimento.

Para validar os resultados obtidos, fora necessário calcular a potência disponível e a real extraída no experimento, tendo como base para o cálculo as Equações 2.2, 2.3 e 2.5 citadas na seção 2.5, seguindo os modelos propostos por Oliveira (2015) e Fleming (2012). Após o cálculo das potências disponíveis e as extraídas no experimento, calcula-se o rendimento com base na Equação 2.4. As máximas potências extraídas nos experimentos bem como os rendimentos dos protótipos são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Principais resultados extraídos do experimento.

Ondas	Período	Potência disponível (W/m)	Potência máxima extraída (W/m)	Rendimento
	0,5	0,0006125	0,000152027	24,82%
	1	0,001225	0,00038273	31,24%
Correntes	Velocidade (m/s)	Potência disponível (W/m ²)	Potência máxima extraída (W/m ²)	Rendimento
	1,25	975,59	403,82	41,39%
	1,5	1685,81	774,19	45,92%
Dados para o cálculo				
	Densidade da água (kg/m ³)	Amplitude da onda em teste (mm)	Área transversal da pá das turbinas (m ²)	
	999	50	0,00135	

Como visto na Tabela 5.3, fora analisado, para a extração da energia das ondas, todas as condições de amplitude e período, porém os resultados foram mais expressivos com amplitudes maiores onde obteve-se o êxito de 31,24% de rendimento para o período de 1 s. Importante frisar que, pelo motivo das ondas não estarem em condições reais oceânicas, o potencial energético é bem menor, visto que as amplitudes no teste são mínimas comparadas ao oceano que possui ondas superiores a 2 m e períodos elevados de 10 s onde o potencial pode chegar aos 50 kW/m (SAAVEDRA, 2016). O dispositivo respondeu em funcionamento às expectativas de projeto de alto rendimento, podendo, no litoral do Maranhão, gerar cerca de 2,25 kW/m em cada dispositivo instalado.

Quanto a extração da energia das correntes, foi analisado que, através dos dados de potência oferecidos pelas turbinas nas duas condições de correntes, a turbina com maior rendimento foi a de arrasto/sustentação com seu rendimento máximo de 45,92%. O potencial energético das correntes se aproxima de a realidade dos oceanos pelo motivo do fluido utilizado no teste ter densidade próxima à água do mar e, também, pela velocidade semelhante. Com esses resultados, o dispositivo é capaz de gerar cerca de 4,9 kW/m² no litoral maranhense, tornando-o eficaz para continuar os estudos futuros para um modelo em escala real.

Percebe-se que, quanto mais severa a condição de funcionamento, ou seja, maior a potência disponível, maior será o rendimento do protótipo do projeto Princesa do Mar. Em forma de gráfico, o rendimento máximo do dispositivo é mostrado na Figura 5.1.

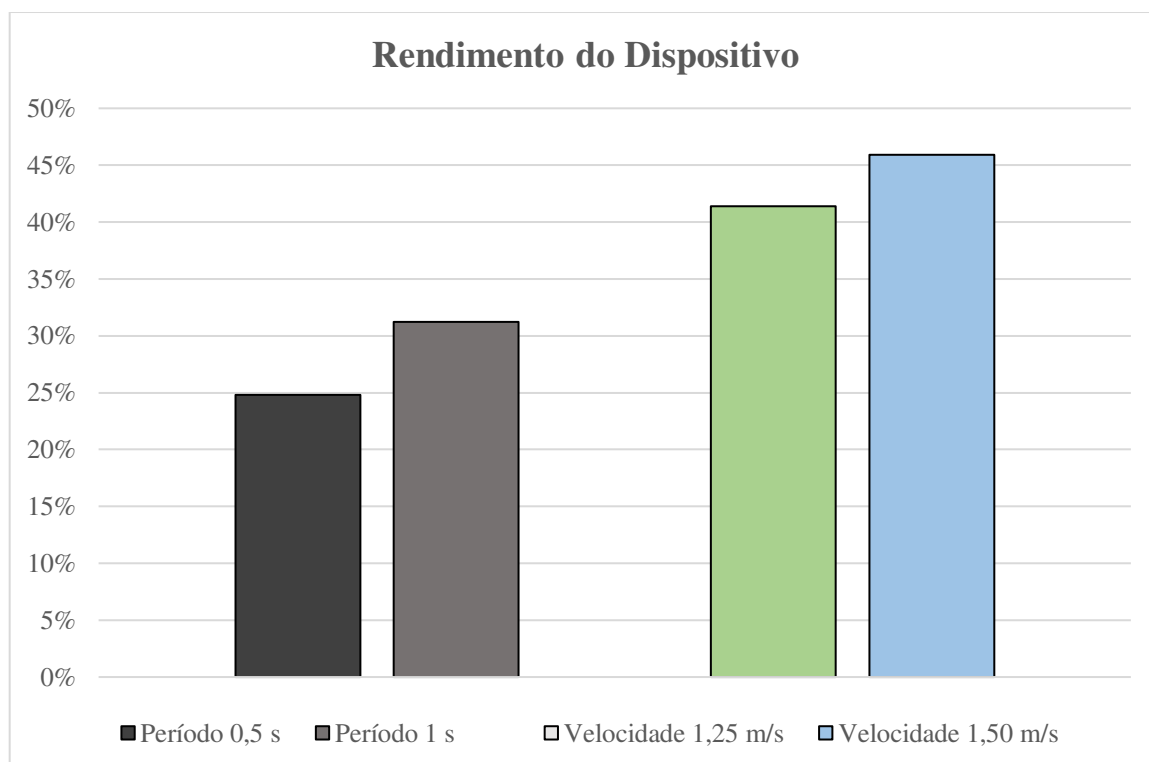


Figura 5.1 – Rendimento máximo do protótipo nas variadas condições de teste.

Características a serem consideradas é que o dispositivo teve empuxo suficiente para mantê-lo em equilíbrio sem que afundasse por estar apresentando uma boa vedação, melhorando o seu aspecto construtivo. Durante os testes, fora percebido que o correto é o dispositivo estar preso ao fundo do tanque para que o arrasto das correntes não o desloque. A Figura 5.2 mostra-o flutuando durante o funcionamento no tanque de testes acima do nível d'água.

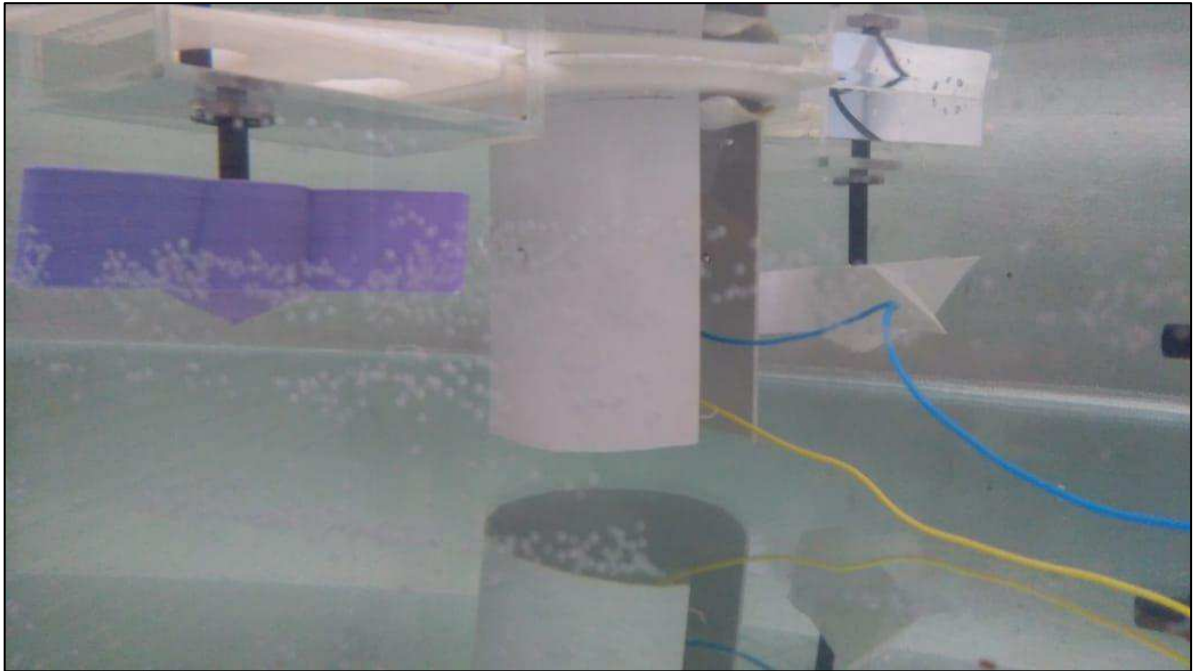


Figura 5.2 – Protótipo flutuando atendendo às condições de projeto.

Algumas deficiências no projeto devem ser revistas. Os rolamentos utilizados para fixarem os eixos das turbinas aos recipientes de vedação apresentaram sinais evidentes de corrosão após à sua contínua exposição em água. Para tanto, os materiais em aço utilizados nesse dispositivo devem ser repostos por outros materiais inoxidáveis. A Figura 5.3 ilustra o rolamento utilizado com evidências de corrosão.



Figura 5.3 – Ataque de corrosão nos rolamentos.

A seleção dos materiais foi feita de acordo com a necessidade e atenderam bem às expectativas de projeto exceto os rolamentos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve o objetivo de projetar uma nova bancada experimental capaz de simular os fenômenos naturais de ondas e correntes oceânicas, bem como construir um novo protótipo em escala reduzida que produzisse energia elétrica a partir dessas fontes de maneira integrada. Esse projeto, do ponto de vista sustentável, é viável por apresentar impactos ambientais irrelevantes produzindo energia elétrica de uma das fontes limpas e renováveis. No estado do Maranhão, este projeto tem uma grande viabilidade por ter condições favoráveis à conversão em eletricidade das energias oceânicas, tendo em vista que o estado possui um imenso litoral com ondas e correntes com grande potencial energético.

A produção de energia elétrica da nova bancada experimental foi avaliada e comparada com protótipos construídos anteriormente, apontando melhorias na construção do protótipo e nas condições de testes do dispositivo. A medição das variáveis foi feita através de um multímetro e ocorreu sem interrupções e por várias repetições de testes para garantir maior confiabilidade.

Com os dados brutos extraídos do experimento, foi calculado o rendimento para os mecanismos de conversão de energia das ondas e correntes. Foi percebido que o gerador do flutuador obteve rendimento máximo de 31,24% e o gerador das turbinas, um rendimento máximo de 45,92%, mostrando que o dispositivo tem viabilidade enorme para a sua instalação nas regiões costeiras ao redor do globo terrestre gerando energia com grande eficiência.

Os sistemas de transmissão de energia mecânica foram analisados e, por impossibilidade do teste das engrenagens, as polias foram as escolhidas para fazer parte do mecanismo de conversão de energia das correntes. A turbina de sustentação/arrasto é a ideal para o dispositivo. Quanto ao flutuador, foi mostrado que sua área não influi em seu rendimento. Com um gerador de menor dimensão, o dispositivo apresentou melhor eficiência na extração da energia das ondas em comparação aos estudos feitos anteriormente.

Com todas as análises discutidas neste projeto, conclui-se que o dispositivo batizado de Princesa do Mar possui características únicas como a conversão da energia das ondas e das correntes de maneira integrada, relacionando-o a outros tipos de tecnologias já desenvolvidos. O dispositivo é capaz de gerar mais energia com o melhor aproveitamento de espaço no oceano.

Como objetivos futuros, tem-se: (1) executar análises mais específicas quanto ao acoplamento do dispositivo ao fundo do mar e seu aspecto construtivo afim de minimizar o

arrasto do dispositivo; (2) realizar análises numéricas para a condição ideal do ângulo da pá para o desenvolvimento de uma turbina de sustentação/arrasto com o melhor perfil hidrodinâmico com a perspectiva de melhorar o rendimento final do dispositivo; (3) realizar um estudo do flutuador com vista à sua resposta às ondas com excitação pela base afim de diminuir os efeitos de arrasto no dispositivo; (4) melhorar a transmissão da energia mecânica, seja através da confecção de engrenagens com maior relação e transmissão, ou através da confecção de uma nova bobina do gerador das ondas para minimizar sua resistência elétrica à passagem de corrente aumentando assim seu rendimento.

Estudos posteriores poderão ser realizados para que sejam analisadas todas as melhorias significativas para o desenvolvimento de um dispositivo conversor de energia em escala real para a produção de energia elétrica atendendo às comunidades litorâneas do litoral maranhense e de todo o mundo.

REFERÊNCIAS

Ambiente Marinho. *Energia Marémotriz*. Disponível em: < <http://ifbaer.blogspot.com/p/energia-maremotriz.html> >. Acesso em 2 out. 2018.

ANTUNES, Izildo. FREIRE, Marcos A. C. *Elementos de Máquinas*. 8ª ed. Érica Ltda. 2000. Big Bigger Biggest. *DAM*. Disponível em: < <https://www.youtube.com/watch?v=j3J196bLP5E&t=180> >. Acesso em 5 jul. 2018.

Central Intelligence Agency. *The World Factbook. Coastline*. Disponível em: < <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/fields/2060.html> >. Acesso em 6 ago 2018.

Conselho Mundial de Energia. *World Energy Council*. 2014. Disponível em: < https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2014/12/WEC-Brochure-Portuguese_FINAL.pdf >. Acesso em 12 set. 2018.

COPPE UFRJ | Usina de Ondas. Disponível em: < <http://www.coppe.ufrj.br/pt-br/a-coppe/coppe-produtos/usina-de-ondas> >. Acesso em 10 ago 2018.

CRUZ, J. M. B. P. SARMENTO, A. J. N. A. *Energia das ondas introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais*. Editora do Instituto do Ambiente, 1ª Ed. Lisboa – Portugal, 2004.

CUNHA, Jorge Fernandes. ONOFREI, Roxana. *Energia Oceânica*. Trabalho apresentado para aprovação de patente – INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial). Rio de Janeiro – Brasil, 2010.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE / Ano base 2017. *Balanco Energético Nacional. Relatório Final*. Rio de Janeiro, 2018.

FERREIRA, R. M. S. A. *Aproveitamento da Energia das Marés Usina Maremotriz do Bacanga, MA*. Dissertação de Mestrado (Engenharia Oceânica). Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE, 2007.

FILHO, Fernando Coelho. *Energia no Mundo. 2015-2016. Matrizes Energéticas, Matrizes Elétricas, Indicadores*. 2017. Ministério de Minas e Energia. Disponível em: < <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/14+-+Energia+no+Mundo+-+Matrizes+e+Indicadores+2017+-+anos+ref.+2015+-+16+%28PDF%29/60755215-705a-4e76-94eeb27def639806;jsessionid=23A29A5505323A1DD0ED0E7D02E956E2.srv155> >. Ed. 13 dez. 2017. Acesso em 6 ago. 2018.

FLEMING, F. P. *Avaliação do Potencial de Energias Oceânicas no Brasil*. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) - Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro - RJ, 2012.

FOX, Robert W. MCDONALD, Alan T. PRITCHARD, Philip J. *Introdução à mecânica dos Fluidos*. 8ª ed. Editora LTC. 2014.

HALLIDAY, David. RESNICK, Robert. WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: Gravitação, Ondas e Termodinâmica*. Vol 2. 8ª ed. Editora LT, 2009.

HALLIDAY, David. RESNICK, Robert. WALKER, Jearl. *Fundamentos de Física: Eletromagnetismo*. Vol 3. 8ª ed. Editora LT, 2009.

Intergovernmental Panel on Climate Change. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. New York, 2011. Disponível em: < <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/> >. Acesso em 20 ago. 2018.

Jornal G1 – Rio Grande do Norte. *Marinha alerta para ventos fortes e ondas de até 3,5 metros de Natal (RN) a São Luís (MA)*. Disponível em: < <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/marinha-alerta-para-ventos-fortes-e-ondas-de-ate-35-metros-de-natal-rn-a-sao-luis-ma.ghtml> >. Acesso em 10 set. 2018.

LORENZO, Maria José Soto. *La energía offshore ¿Una solución para la crisis?* Disponível em: < <https://estudiantes.elpais.com/EPE2015/periodico-digital/ver/equipo/776/articulo/la-energia-offshore-una-solucion-para-la-tesis> >. Acesso em 22 set. 2018.

Magic Ocean. *Wave Dragon Overtopping Device*. Disponível em: < <http://www.magicocean.top/wave-dragon-overtopping-device.html> >. Acesso em 31 set. 2018.

MARONE, E. *Escócia usará correntes marítimas para gerar eletricidade*. Agencia Iberoamericana para la Difusión de la Ciencia y la Tecnología. Campinas, São Paulo, 2011.

MINGUES, A.P. *Navegação: A ciência e a Arte – Volume I – Navegação Costeira, Estimada e em Águas restritas*. Ed. Marinha do Brasil, 1993. cap. 10.

MOREIRA, Luana de Sousa. *Simulação numérica da energia ondomotriz gerada por ondas superficiais não-lineares*. 2015. 49f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2015.

New Energy News. Disponível em: < <http://newenergynews.blogspot.com/2010/10/ready-to-make-waves-in-wave-energy.html> >. Acesso em 24 set. 2018.

OLIVEIRA, Alessandro Pontual de. et al. *Modelagem Matemática e Hidrodinâmica do Sistema de Acoplamento Maremotriz-Gerador*. Augusto Guzzo Revista Acadêmica. Guarulhos, v. 1, n. 16, p. 269-293, 2015.

PALZ, W. *Energia Solar e Fontes Alternativas*. Editora Hemus Livraria Editora Limitada. São Paulo, 1981.

PARK, D. BROWN, E. *Waves, Tides and Shallow - Water Processes*. Germany: European Ocean Energy Association, Butterworth-Heinemann in association with The Open University. 2ª ed. 1999.

Power Technology. *Pelamis, World's First Commercial Wave Energy Project, Agucadoura*. Disponível em: < <https://www.power-technology.com/projects/pelamis/> >. Acesso em 24 set. 2018.

Projeto EONDAS: Relatório Final. Petrobras/CENPES e Universidade Federal do Rio Grande – FURG. 2009. Rio Grande - RS

Research Gate. *Wave Power in Bangladesh*. Disponível em: < https://www.researchgate.net/figure/Archimedes-Wave-Swing2-III-WAVE-POWER-IN-BANGLADESH-Wave-energy-is-a-potential-energy_fig3_317718853 >. Acesso em 30 set. 2018.

RONCHI, F. P. SCHAEFFER, L. *Classificação das Tecnologias para a Conversão de Energia das Ondas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto alegre, 2010.

ROSA, Paulo Bastos G. *Controle e Otimização de um Sistema de Conversão de Energia das Ondas do Mar em Energia Elétrica*. 2008. 135f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

SAAVEDRA, O. R. *Potencial Energético do Maranhão: Energias Oceânicas*. Instituto de Energia Elétrica e Renováveis-IEE. UFMA. 2016.

Science 20. *New Ideas to Harness Wave Power*. Disponível em: < https://www.science20.com/welcome_my_moon_base/new_ideas_harness_wave_power >. Acesso em 24 set. 2018.

SESMIL, Edson L. F. *Energia maremotriz: impactos ambientais e viabilidade econômica no Brasil*. 2013. 62f. Monografia (Pós-graduação em Fontes alternativas de Energia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2013.

SEYMOUR, R. J. ISAACS, J. D. *The ocean as a power resource.*, volume 4. Int. Journal of Environmental Studies, 1973.

SILVA, Reginaldo Nunes da. *Estudo Experimental de Geração de Energia Elétrica através de Ondas e Correntes Marítimas.* 2016. 69f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2016.

The Most Profitable MICRO HYDRO POWER PLANT. Disponível em < <https://www.turbulent.be/> >. Acesso em 3 out. 2018.

TOLMASQUIM, M. T. *Energia renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica.* Empresa de Pesquisa Energética (EPE). 1ª ed. Rio de Janeiro, Brasil. 2016.

VECCHIA, Leonardo Casagrande D. *Modelagem e Dimensionamento de um Sistema de Geração de Energia a partir das Ondas do Oceano.* 2016. 29f. Monografia (Graduação em Engenharia de Energia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá, 2016.

WASHIO, Yukihsa. *Wave Energy Research and Development at JAMSTEC: Offshore Floating Wave Energy Device Mighty Whale.* Disponível em: < http://www.takesteps.org/empower/exhibition/B1b3_d2_1-2_c4_Mighty%20Whale_wave-power.html >. Acesso em 23 set. 2018.

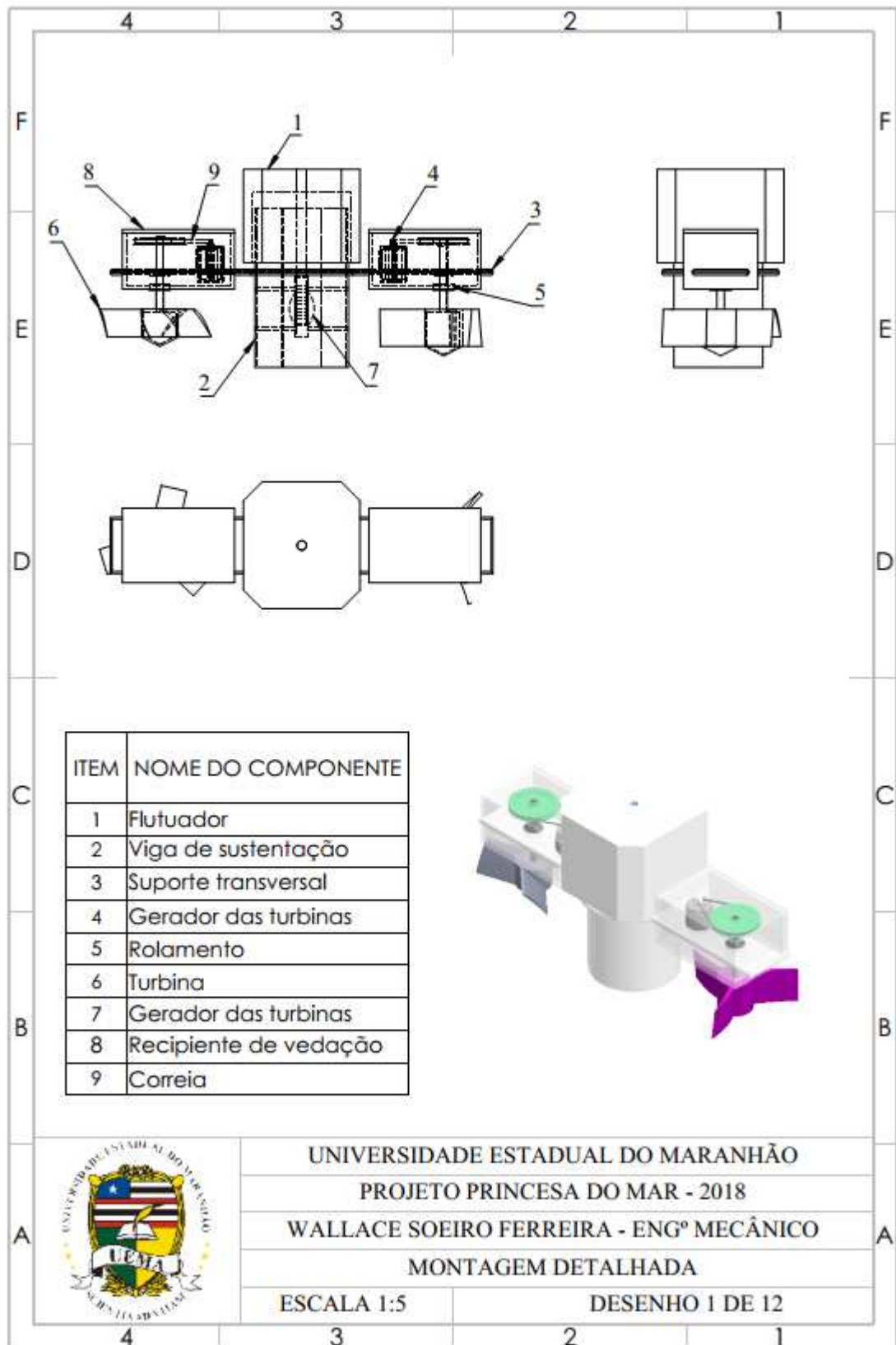
Wave Dragon. Disponível em: < <http://www.wavedragon.net/> >. Acesso em 31 set. 2018.

XAVIER, Júlio de A. N. PINTO, Alan Kardec. *Manutenção: Função Estratégica.* Editora Qualitymarker. 4ª ed. 2012. Cap 2.

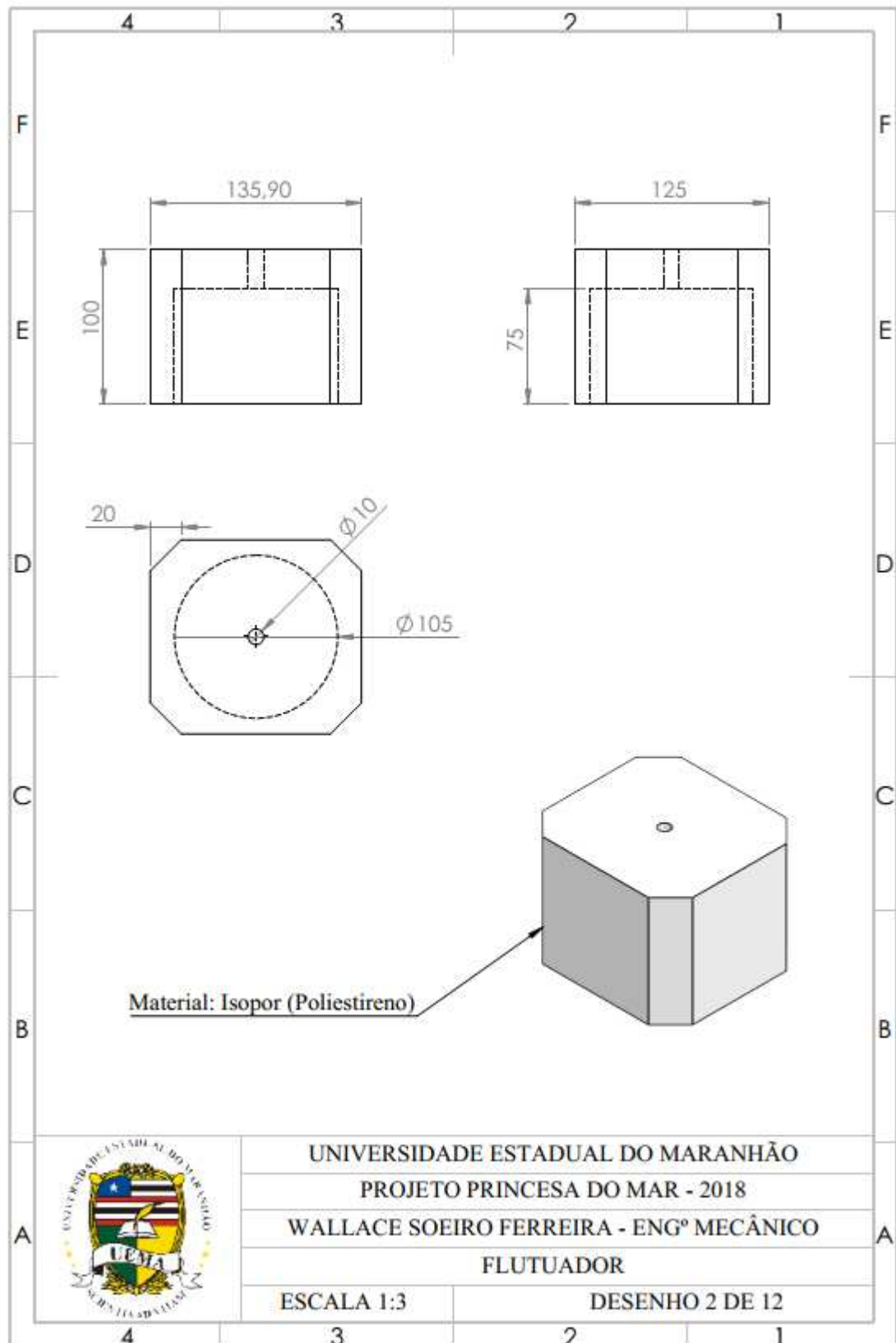
XAVIER, Mario. *Corrente das Agulhas.* 2011. Disponível em: < <http://surftododia.blogspot.com/2011/04/corrente-das-agulhas.html> >. Acesso em 15 set. 2018.

APÊNDICES

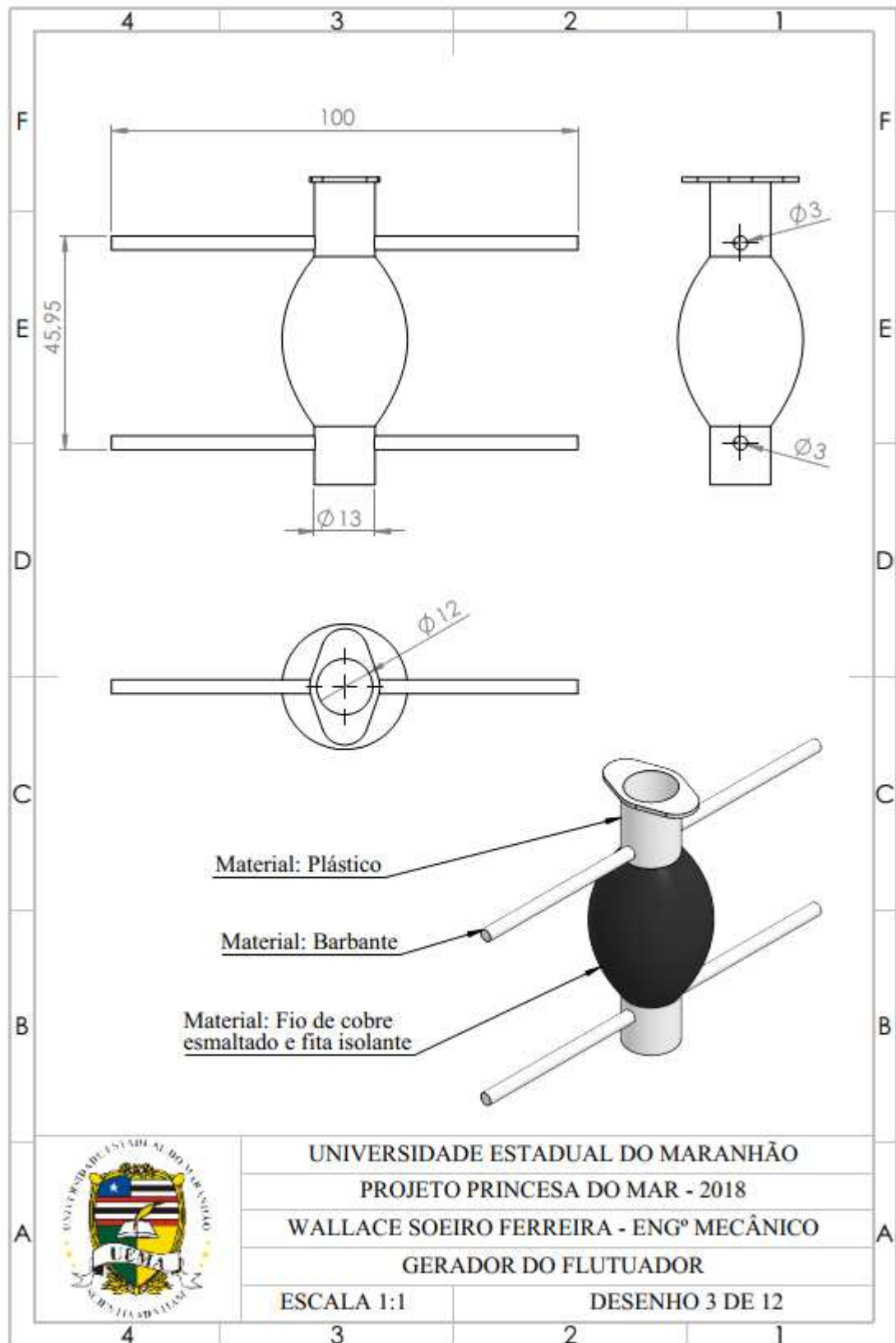
APÊNDICE A – MONTAGEM DETALHADA



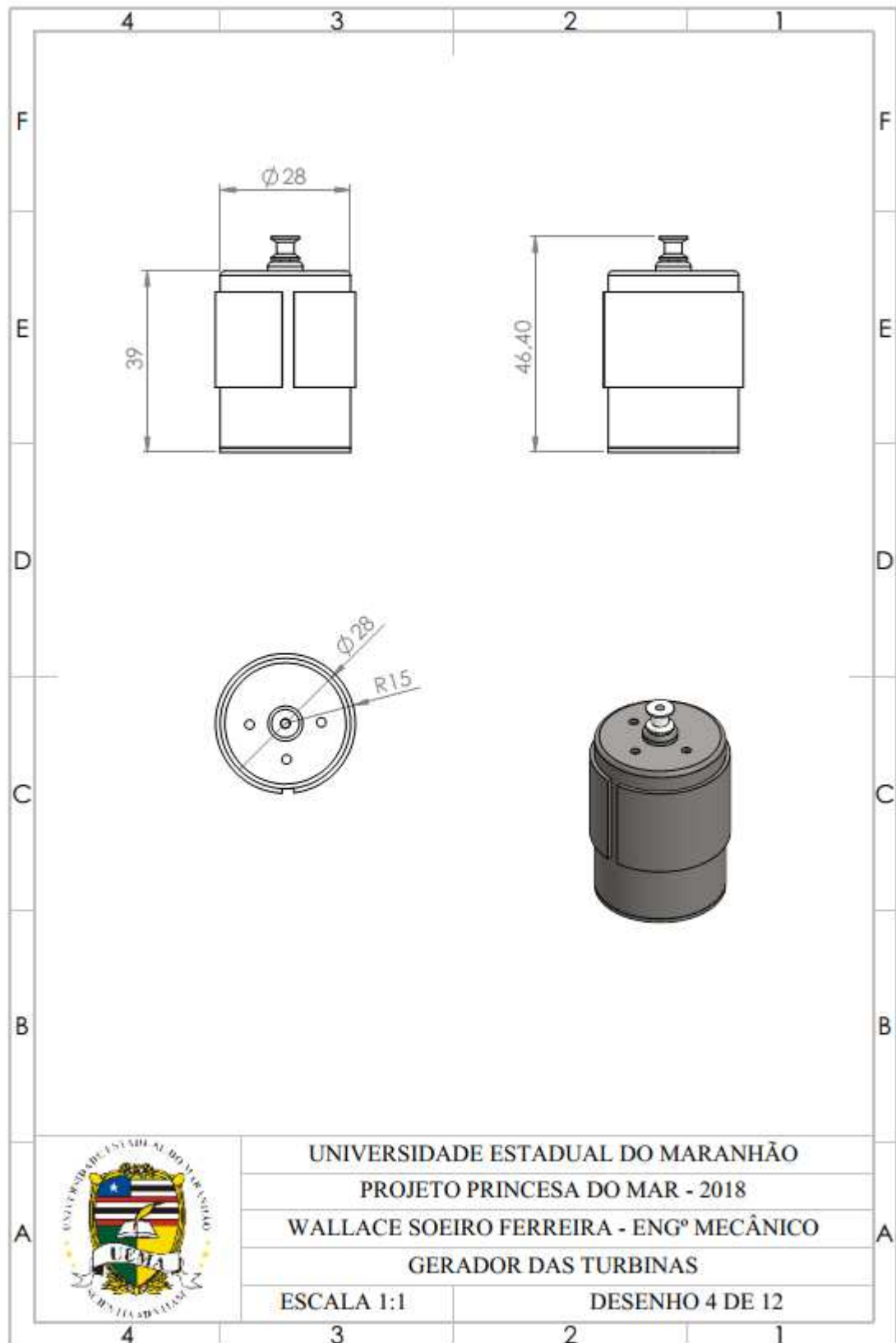
APÊNDICE B – FLUTUADOR



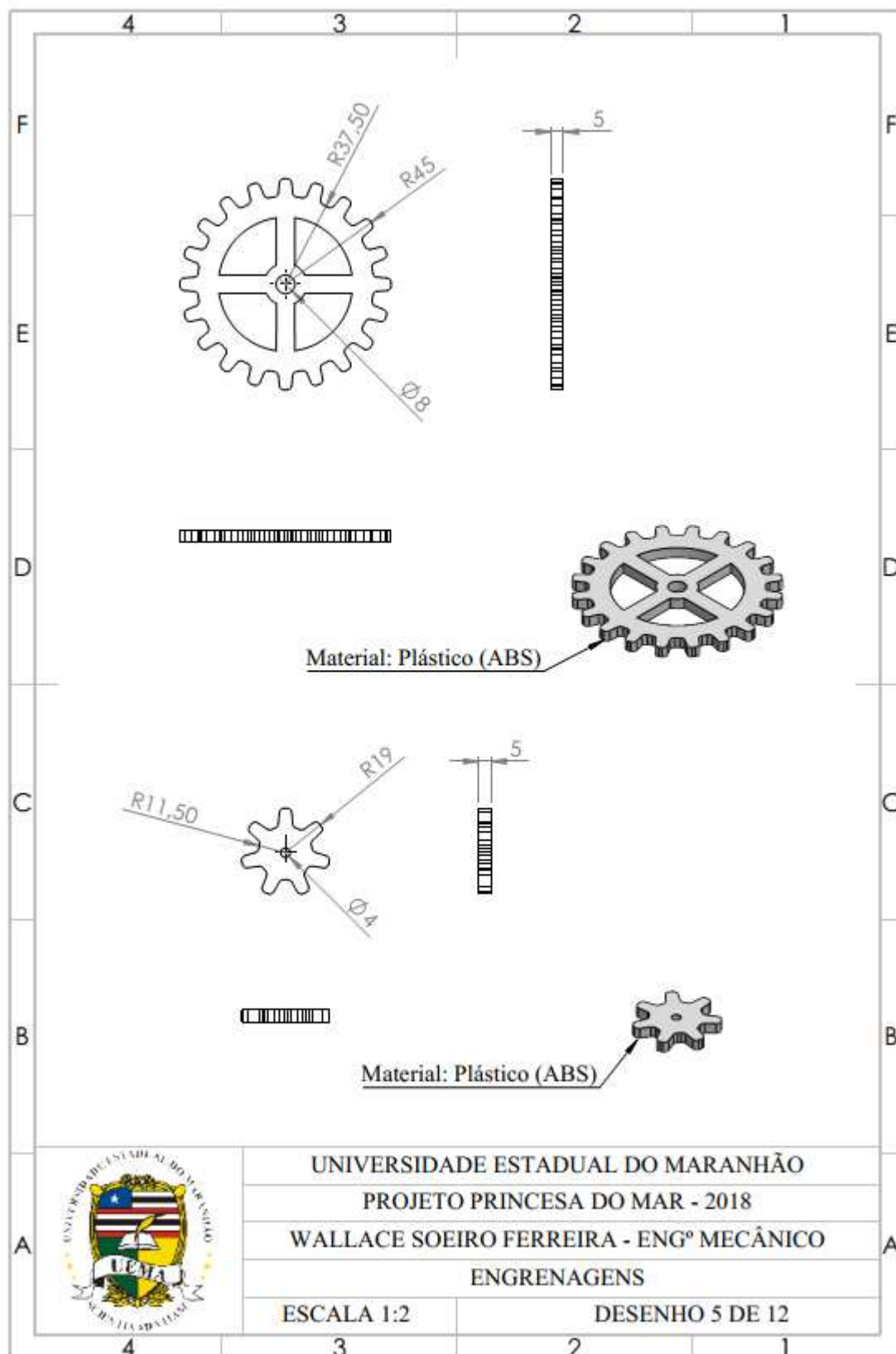
APÊNDICE C – GERADOR DO FLUTUADOR



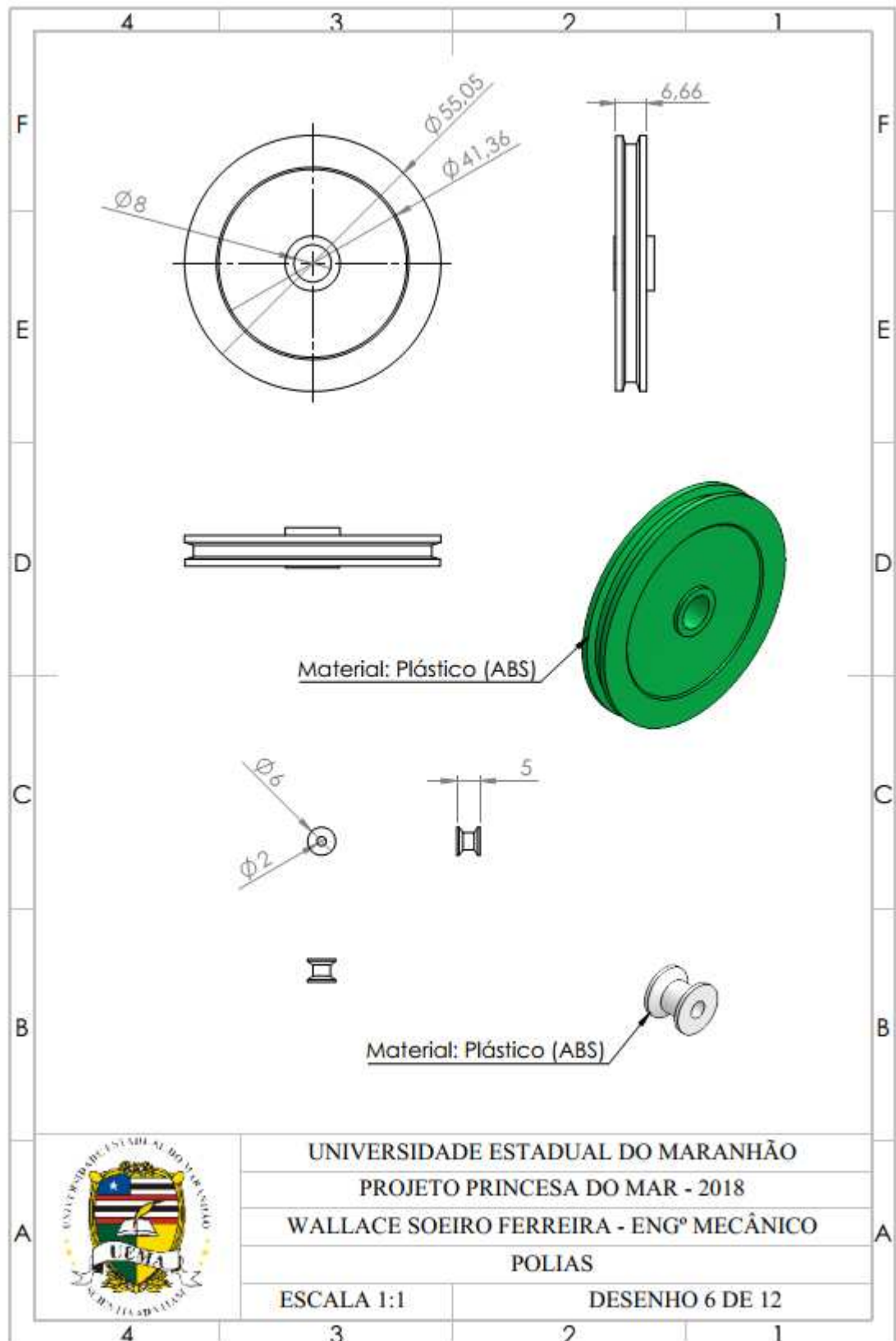
APÊNDICE D – GERADOR DAS TURBINAS



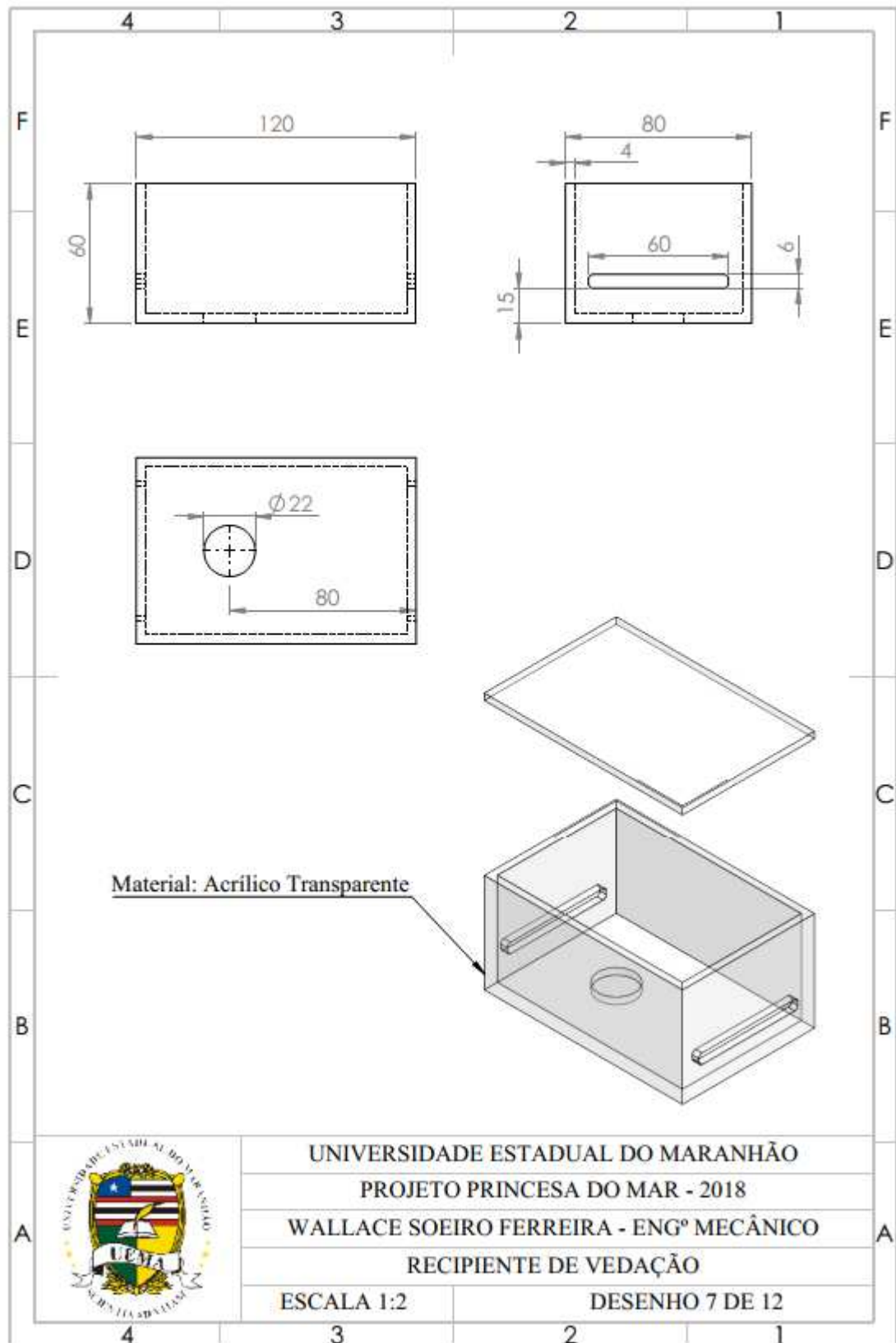
APÊNDICE E – ENGRENAGENS



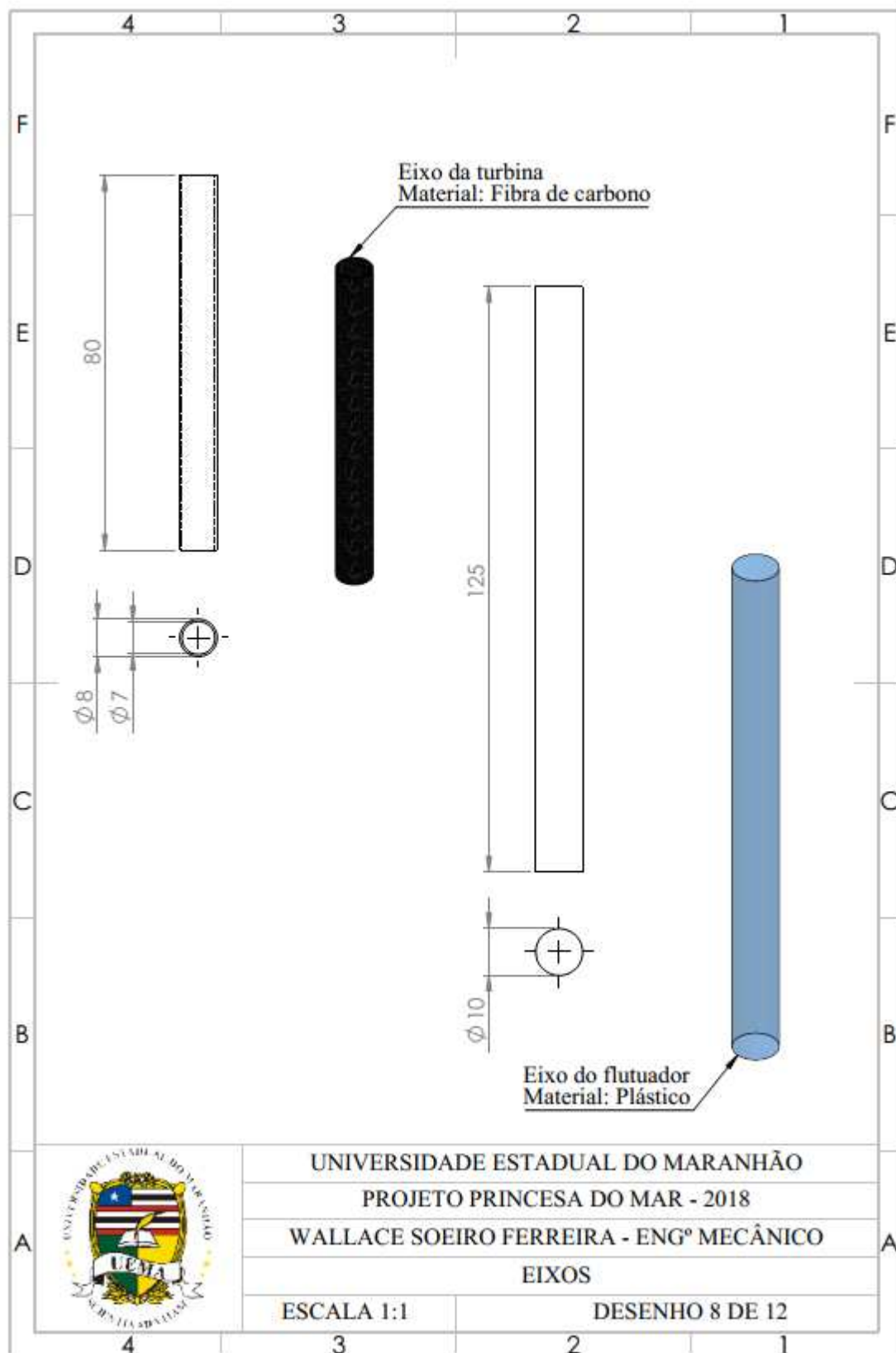
APÊNDICE F – POLIAS



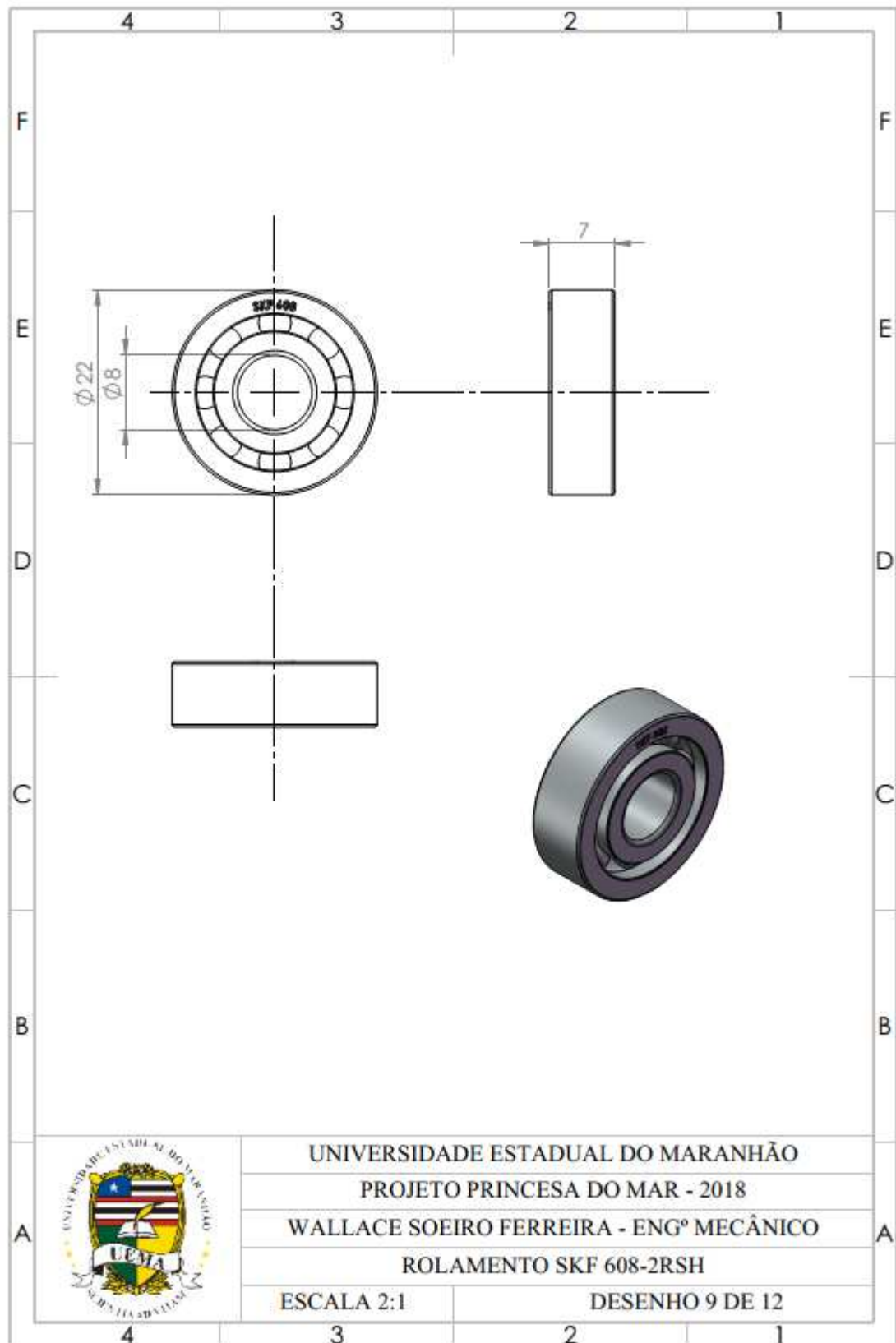
APÊNDICE G – RECIPIENTE DE VEDAÇÃO



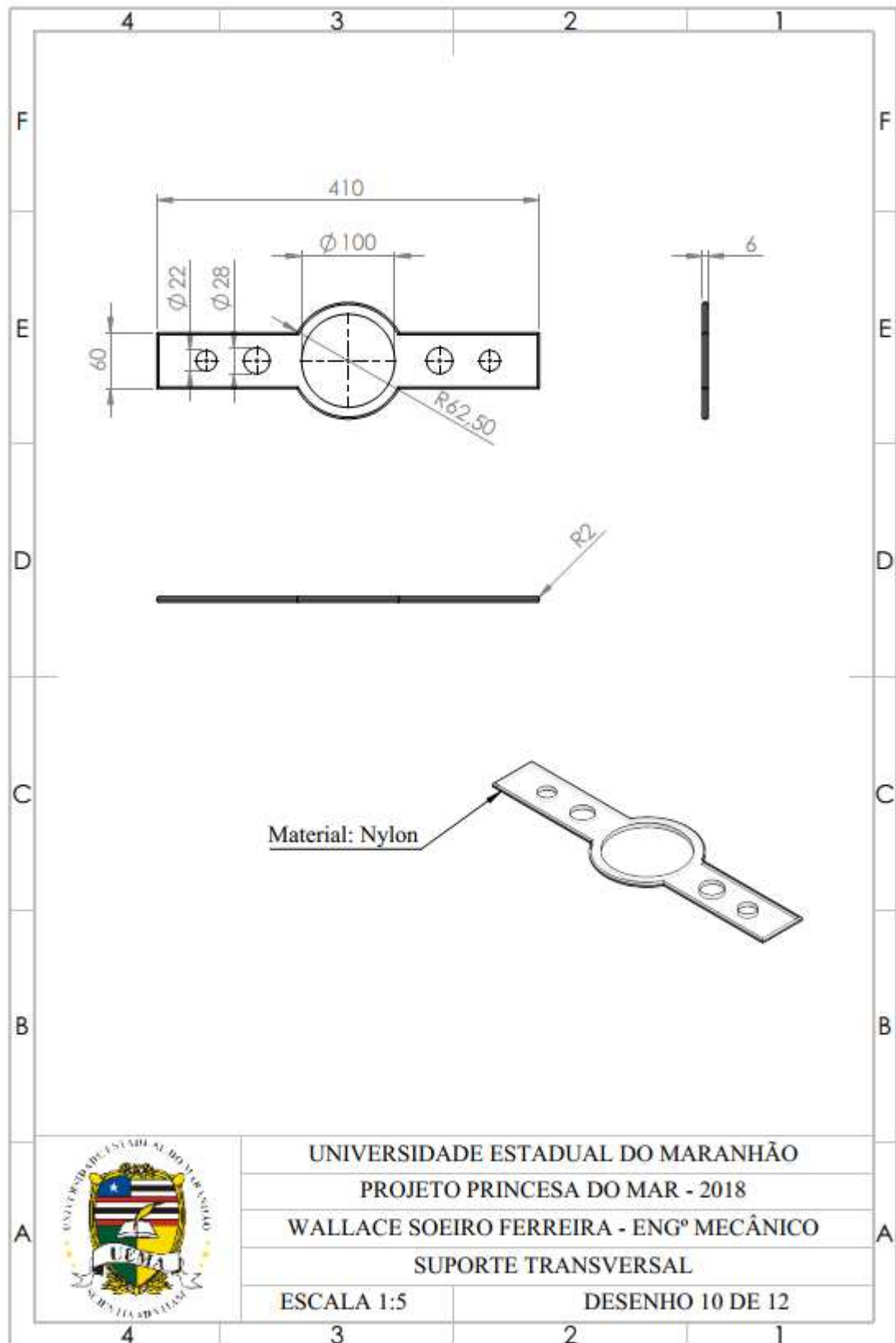
APÊNDICE H - EIXOS



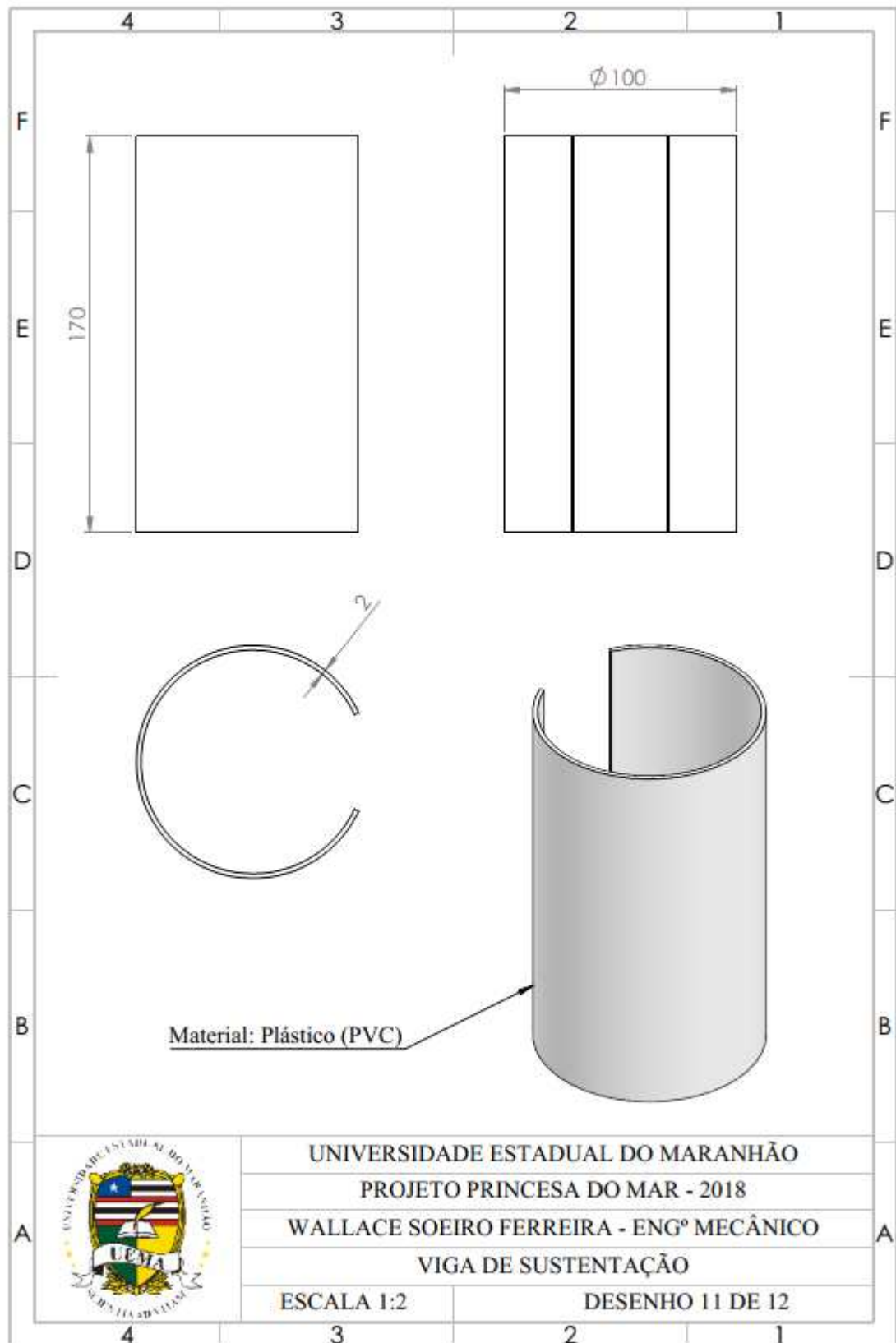
APÊNDICE I – ROLAMENTO SKF 608-2RSH



APÊNDICE J – SUPORTE TRANSVERSAL



APÊNDICE K – VIGA DE SUSTENTAÇÃO



APÊNDICE L – TANQUE DE TESTES

