INSTITUTO FEDERAL
DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
Fluminense
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
PÁTRIA AMADA BRASIL
GOVERNO FEDERAL

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E INOVAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MESTRADO EM ENGENHARIA AMBIENTAL
MODALIDADE PROFISSIONAL

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR DE FLUXO TRANSVERSAL PARA APLICAÇÃO EM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS

EDUARDO BELINE DA SILVA MARTINS

MACAÉ-RJ

2019

EDUARDO BELINE DA SILVA MARTINS

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR DE FLUXO TRANSVERSAL PARA APLICAÇÃO EM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, área de concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Orientador: Dr. Marcos Antonio Cruz Moreira

MACAÉ-RJ

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

M386d Martins, Eduardo Beline da Silva, 1980-.
Desenvolvimento de um protótipo de gerador linear de fluxo transversal para aplicação em conversor de energia das ondas / Eduardo Beline da Silva Martins. — Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.
xi, 51, [35] f.: il. color.

Orientador: Marcos Antônio Cruz Moreira, 1964-.

Dissertação (Mestrado). — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Campos dos Goytacazes, RJ, 2019.
Inclui referências.

1. Oceano - Recursos energéticos - Lagos (RJ: Microrregião). 2. Energia - Fontes alternativas - (RJ: Microrregião). 3. Método dos elementos finitos. 4. Dínamos. 5. Simulação (Computadores). 6. Engenharia de protótipos. I. Moreira, Marcos Antônio Cruz, 1964-, orient. II. Título.

CDD 621.316 23.ed.

Bibliotecário-Documentalista |Henrique Barreiros Alves | CRB-7/ 6326

Dissertação intitulada **DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR DE FLUXO TRANSVERSAL PARA APLICAÇÃO EM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS**, elaborada por **Eduardo Beline da Silva Martins** e apresentada, publicamente perante a Banca Examinadora, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental do Instituto Federal Fluminense - IFFluminense, na área concentração Sustentabilidade Regional, linha de pesquisa Desenvolvimento, Sustentabilidade e Inovação.

Aprovado em: 11/07/2019

Banca Examinadora:

Marcos Antonio Cruz Moreira, Doutor em Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) – Orientador

Augusto Eduardo Miranda Pinto, Doutor em Direito / Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense)

Edwin Benito Mitacc Meza, Doutor em Ciências da Computação / Universidade Federal Fluminense (UFF), Universidade Federal Fluminense (UFF)

Carlos Frederico de Oliveira Barros, Doutor em Engenharia de Produção / Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Universidade Federal Fluminense (UFF)

DEDICATÓRIA

Ao Bernardo, meu filho, que me incentivou com suas curiosidades e questionamentos na tentativa de entender o mundo ao seu redor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Federal Fluminense pelo suporte institucional e à minha esposa pelo incentivo e ajuda durante esta etapa.

LISTA DE FIGURAS

Figuras do Artigo Científico 1	
Figura 01 – Metodologia da revisão.....	5
Figura 02 – Artigos de 2014 a 2019.....	6
Figura 03 – Publicações por país.....	6
Figura 04 – Os dez autores mais citados.....	7
Figura 05 – Participação das fontes de publicação.....	7
Figura 06 – Localização da boia utilizada.....	10
Figura 07 – Rotina computacional básica implementada no R.....	13
Figura 08 – Variabilidade das alturas médias mensais para as estações do ano de 2017.....	14
Figura 09 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos.....	15
Figura 10 – *Boxplot* representando a dispersão dos resíduos.....	15
Figura 11 – Gráfico dos resíduos ordenados.....	16
Figura 12 – Gráfico dos intervalos de confiança de 95% para as diferenças das médias.....	18
Figura 13 – Esquema do WEC Point Absorber.....	19
Figuras do Artigo Científico 2	
Figura 01 – Estrutura plana e estrutura tubular de um gerador linear.....	27
Figura 02 – Modelo híbrido.....	28
Figura 03 – Tensão na bobina para os modelos convencional e proposto.....	29
Figura 04 – Estrutura do modelo proposto.....	29
Figura 05 – Intensidade de campo e curvas de tensão.....	30
Figura 06 – Modelo simplificado de um WEC do tipo *Point Absorber*.....	32
Figura 07 – Desenvolvimento dos materiais de ímãs permanentes em termos de máxima energia produzida.....	33
Figura 08 – Medição realizada.....	35
Figura 09 – Curva do Campo Magnético x Distância.....	35
Figura 10 – Partes do estator e do translador.....	38
Figura 11 – Comportamento do campo magnético.....	38
Figura 12 – Primeiro protótipo.....	39
Figura 13 – Formas de onda da tensão induzida, simulada e real.....	40
Figura 14 – Conjunto Estator/Translador.....	41
Figura 15 – Densidade de fluxo magnético.....	42

Figura 16 – Linhas de fluxo magnético no conjunto estator/translador.....	42
Figura 17 – Protótipo final do gerador linear.....	43
Figura 18 – Formas de onda da tensão induzida, simulada e real.....	43
Figura 19 – Forma de onda com gerador desalinhado.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabelas do Artigo Científico 1	
Tabela 01 – Tabela ANOVA.....	12
Tabela 02 – Valores médios para o ano de 2017, considerando as estações.....	13
Tabela 03 – Resumo dos testes estatísticos de adequação do modelo.....	16
Tabela 04 – Tabela ANOVA com os resultados do modelo.....	17
Tabela 05 – Resultados do Teste de Tukey.....	17
Tabelas do Artigo Científico 2	
Tabela 01 – Propriedades dos ímãs.....	34
Tabela 02 – Tensões induzidas em diferentes espiras para f = 1,2 Hz.....	40
Tabela 03 – Tensão induzida no conjunto de bobinas.....	44
Tabela 04 – Comparação entre simulação e real (sem carga)	44

LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS

ANOVA – Análise de Variância

Capes - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

IEEE - *Institute for Electrical and Electronics Engineers*

WEC – *Wave Eergy Converter*

PNBOIA - Programa Nacional de Boias

DOE - *Design of Experiments*

PMLG - *Permanent Magnet Linear Generator*

PTO - *Power take-off*

FEM – Força Eletromotriz Induzida

DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR DE FLUXO TRANSVERSAL PARA APLICAÇÃO EM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS

RESUMO

Este trabalho teve início no mês de agosto de 2017 com a proposta de construir um protótipo de Gerador Linear para ser usado em um Conversor de Energia das Ondas do tipo *Point Absorber*. Uma robusta pesquisa bibliográfica foi executada com a finalidade de levantar informações atuais no cenário mundial acerca do tema, tanto para questões ambientais quanto técnicas e operacionais. A partir de dados levantados no Programa Nacional de Boias da Marinha do Brasil, conheceu-se o comportamento mensal e sazonal das ondas na Região dos Lagos – RJ. Com o auxílio de *software* de simulação através da Análise de Elementos Finitos foi possível projetar e simular dois protótipos de Gerador Linear, um mais simples para análise preliminar desse tipo de dispositivo e o definitivo. Após simulação, ambos tiveram suas montagens executadas nas dependências do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé. As montagens foram de baixo custo devido ao reaproveitamento de materiais. Testes de geração de energia elétrica foram realizados e comparados com trabalhos anteriores que estavam na mesma linha temática.

Palavras-chave: Oceano. Ondas. Sustentabilidade. Gerador Linear.

DEVELOPMENT OF A TRANSVERSE FLUX LINEAR GENERATOR PROTOTYPE FOR APPLICATION IN WAVE ENERGY CONVERTER

ABSTRACT

This work began in August 2017 with the proposal to build a prototype of Linear Generator to be used in a Point Absorber Wave Energy Converter. A robust bibliographic research was carried out with the purpose of raising current information on the world scene about the theme, for environmental and technical/operational issues. Based on data collected in the National Buoy Program of brazillian Navy, the monthly and seasonal wave behavior in the Região dos Lagos - RJ was known. With the aid of simulation software through Finite Element Analysis it was possible to design and simulate two prototypes of Linear Generator, a simpler one for preliminary analysis of this type of device and the definitive one. After simulation, both had their assemblies executed in the dependencies of the Instituto Federal Fluminense campus Macaé. The assemblies had low cost due to the reuse of materials. Tests of electric energy generation were carried out and compared with previous works that were in the same thematic line.

Keywords*: Ocean. Waves. Sustainability. Linear Generator.*

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE TABELAS.....	vii
LISTA DE ABREVITURAS E SIGLAS.....	vii
RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
APRESENTAÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	1
ARTIGO CIENTÍFICO 1: AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS ESSENCIAIS NA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS.....	2
1. INTRODUÇÃO.....	3
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1. Visão geral.....	4
2.2. Revisão bibliográfica sistematizada.....	5
2.2.1. Resultados encontrados na revisão.....	6
2.2.2. Ideias que se destacaram.....	8
3. MATERIAL E MÉTODO.....	9
3.1. Material.....	9
3.2. Método.....	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	10
4.1. Análise estatística de sazonalidade das ondas.....	10
4.1.2. O modelo estatístico.....	11
4.1.3. Rotina básica no R.....	12
4.1.4. Análise exploratória de dados.....	13
4.1.5. Análise gráfica dos resíduos.....	14
4.1.6. Testes estatísticos para adequação do modelo.....	16
4.1.7. Análise de variância.....	17
4.2. Geração de eletricidade a partir da energia das ondas.....	18
4.2.1. A conversão de energia das ondas.....	18
4.2.2. O conversor do tipo *Point Absorber*.....	19
4.2.3. O Gerador Linear de ímãs permanentes.....	20
5. CONCLUSÃO.....	20
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	21

ARTIGO CIENTÍFICO 2: DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR COMO PARTE DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO *POINT ABSORBER*.....	24
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	26
2.1. Visão Geral.....	26
2.2. Configuração de um de gerador linear.....	26
2.3. Topologias e estudos recentes.....	27
3. MATERIAL E MÉTODO.....	30
3.1. Material.....	30
3.2. Método.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1. O Conversor de Energia das Ondas do tipo *Point Absorber*.....	31
4.2. Materiais Magnéticos.....	32
4.3. As Leis de Maxwell.....	36
4.4. Protótipos e testes.....	37
4.4.1. Simulação e testes com o primeiro protótipo.....	37
4.4.2. Simulação e testes com o protótipo final.....	40
5. CONCLUSÃO.....	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO.....	50
APÊNDICES Apêndice 1: Artigo Científico publicado no XIV Congresso Nacional de Excelência em Gestão & V INOVARSE. Rio de Janeiro, 2018. TÍTULO: CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS: UMA ATUALIZAÇÃO DA TECNOLOGIA UTILIZADA E VARIÁVEIS CONSIDERADAS PARA A CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DE GERADORES DO TIPO *POINT ABSORBERS* Apêndice 2: Artigo Científico publicado no 11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, 2018. TÍTULO: AVALIAÇÃO DE REQUISITOS PARA MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO *POINT ABSORBER*	51

APRESENTAÇÃO

A proposta inicial deste trabalho foi mantida até o final mesmo com dificuldades encontradas durante a parte mais complexa do projeto, a montagem do protótipo final. Respeitando o cronograma inicial, um levantamento bibliográfico foi realizado em fontes científicas nacionais e internacionais, assim como o entendimento do comportamento das ondas em região próxima ao local de execução do projeto. Estas ações produziram duas publicações em 2018 na forma de artigo científico, uma no XIV Congresso Nacional de Excelência em Gestão & V INOVARSE e outra no 11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Nesta etapa inicial foi possível realizar uma atualização sobre a demanda energética mundial, a disponibilidade energética dos oceanos e também fatores construtivos de um Conversor de Energia das Ondas do tipo *Point Absorber*.

A robustez dos dados levantados, para o ano de 2017, de alturas das ondas oceânicas para a região da cidade de Cabo Frio – RJ, tornou possível a realização de um completo estudo estatístico utilizando a Análise de Variância (ANOVA), onde se concluiu que as alturas das ondas variam em função da estação do ano e que estatisticamente a primavera apresenta um potencial energético maior que as outras estações. Segundo Dean e Dalrymple (1991), a energia total disponível na onda tem relação direta com o quadrado de sua altura.

Uma revisão bibliográfica sistematizada foi realizada em duas bases de dados: *Scopus* (*Elsevier*) e *Science Citation Index Expanded* (*Web of Science*). O período analisado foi de 2014 a 2019 e a metodologia utilizada foi semelhante à encontrada no trabalho de Alrabghi e Tiwari (2015). Em relação ao tema deste projeto, foi possível verificar a quantidade de trabalhos publicados anualmente, países que mais investiram no tema, autores mais atuantes e fontes de publicação que mais se dedicaram a esta temática.

Nesta mesma revisão foi percebido que, para o desenvolvimento de um protótipo de gerador linear, é importante a realização de simulação computacional. Um protótipo preliminar foi pensado, simulado (através da Análise de Elementos Finitos) e montado para entender a dinâmica desta máquina. O protótipo definitivo passou pelas mesmas etapas e no final foi possível verificar seu comportamento em diferentes frequências de translação.

ARTIGO CIENTÍFICO 1

AVALIAÇÃO DE VARIÁVEIS ESSENCIAIS NA CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS

EVALUATION OF ESSENTIAL VARIABLES IN THE CONVERSION OF WAVE ENERGY.

Eduardo Beline da Silva Martins - IFFluminense/PPEA
Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA
Flavia Ribeiro Villela - UFRJ

RESUMO

O consumo de energia tem aumentado no mundo e esse acréscimo de demanda tem como consequências problemas ambientais que muitas vezes não estão localmente limitados e refletem de forma global transtornos como poluição e aquecimento. Métodos alternativos de geração de energia elétrica têm sido pesquisados por várias nações. Devido a um elevado potencial energético, o oceano ganha destaque como fonte limpa e sustentável nesta busca por soluções. Pesquisadores buscam por soluções de conversão da energia das ondas estudando formas e dispositivos para tal. Foram identificadas como as nações que mais investem nesta temática, China e Suécia. Através de análise estatística de sazonalidade das ondas na Região dos Lagos – RJ, com base na Análise de Variância (ANOVA), percebeu-se que as alturas das ondas têm comportamentos diferentes nas estações do ano, tendo como a primavera a estação mais energética. Na conversão de energia das ondas, o dispositivo *Point Absorber* foi considerado pelo fato de absorver energia independentemente da direção da onda. Um protótipo de gerador linear será projetado, simulado e construído baseado em trabalhos anteriores para que possa ser usado como parte de um *Point Absorber*.

Palavras chave: Ondas Oceânicas. Energias Alternativas. Meio Ambiente. Conversor de Energia das Ondas.

ABSTRACT

Energy consumption has increased worldwide and this increment in demand has resulted in environmental problems that are often not locally limited and have globally reflect disturbances such as pollution and warming. Alternative methods of electric power generation have been researched by several nations. Due to its high energy potential, the ocean stands out as a clean and sustainable source in this quest for solutions. Researchers are looking for wave energy conversion solutions by

studying ways and devices. The nations that invest the most in this issue were identified as China and Sweden. Through the statistical analysis of the seasonality of the waves in the Região dos Lagos - RJ, based on the Analysis of Variance (ANOVA), it was observed that the wave heights have different behaviors in the seasons and the spring is the most energetic season. In the wave energy conversion, the Point Absorber was considered due to absorb energy independently of the direction of the wave. A prototype of linear generator will be designed, simulated, and built based on previous work so that it can be used as part of a Point Absorber.

Keywords: *Ocean Waves. Alternative energies. Environment. Wave Energy Converter.*

1. INTRODUÇÃO

A demanda de energia está aumentando continuamente em todo o mundo e os métodos convencionais de geração de energia estão causando muitos problemas ambientais, como aquecimento global, chuva ácida e poluição do ar. Aproveitar os recursos naturais e convertê-los em energia elétrica pode ser uma solução eficaz para aliviar os conflitos entre a grande demanda de energia e a poluição do meio ambiente (LEJERSKOG *et al*., 2015). Como uma das fontes de energia renováveis, a energia das ondas oceânicas tem um potencial promissor de fornecer grandes quantidades de energia limpa para atender à crescente demanda para o desenvolvimento mundial (LI *et al*., 2016). O desenvolvimento de tecnologias de conversão de energia das ondas oceânicas também poderia reduzir o consumo de combustíveis fósseis a longo prazo e fornecer uma solução confiável para o desenvolvimento sustentável da sociedade humana. Em muitos países, locais de testes com a energia das ondas oceânicas foram estabelecidos para estudar as tecnologias mais viáveis na coleta de energia das ondas e também testar experimentalmente conversores de energia de ondas em escala real. Devido à diferença nas condições das ondas de um local para outro, o conhecimento das características do clima de onda local para um local de teste específico é essencial para o desenvolvimento bem sucedido da tecnologia de conversão de energia das ondas (GROLL *et al*., 2013). A investigação de vários aspectos do clima de ondas em um local de teste fornece informações significativas para o projeto, seja na construção ou na otimização do desempenho dos sistemas de conversão (LI *et al*., 2016).

Quando se tem uma quantidade de dados relativamente grande, capaz de retratar sistemas complexos como o comportamento das ondas ao longo dos anos, uma análise estatística pode ser de grande valia. Montgomery (2013), ressalta que observar um sistema ou processo enquanto ele está em

pleno funcionamento é uma parte significativa do processo de aprendizagem e é parte integrante da compreensão do funcionamento dos sistemas e processos. Um experimento bem planejado é importante porque os resultados e as conclusões que podem ser extraídas dele dependem em grande parte da maneira como os dados foram coletados. Quando se deseja comparar médias, um teste estatístico recomendado é a Análise de Variância (ANOVA), ela é largamente propagada entre os analistas. O teste visa fundamentalmente verificar se existe uma diferença significativa entre as médias e se fatores exercem influência em alguma variável dependente.

Um modelo de Conversor de Energia das Ondas que vem sendo testado e experimentado em vários locais do mundo, por ter a capacidade de captar a energia das ondas independentemente de suas direções, é o *Point Absorber* (DREW *et al*., 2009). Este modelo de dispositivo quando utiliza uma boia para captação da energia das ondas, encontra no gerador linear uma interessante interação sob o ponto de vista da transferência de energia que normalmente ocorre de forma direta. O gerador linear tem a capacidade de transformar o deslocamento vertical, gerado pela passagem das ondas, em eletricidade.

Pesquisas diversas têm sido feitas em busca de geradores mais eficientes na conversão. Mudanças de topologias, modificações em projetos já existentes e substituição do material utilizado são alguns exemplos que podem ser encontrados no ambiente científico/tecnológico.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Visão Geral

Devido às crises globais de energia, cientistas e engenheiros estão trabalhando duro para superar o problema, utilizando fontes de energia renováveis. O oceano é uma gigantesca fonte de energia renovável que abrange cerca de três quartos da superfície da Terra e a energia pode ser extraída das ondas do oceano em muitos aspectos (VERMAAK e KAMPER, 2012).

Uma busca realizada em duas diferentes fontes de divulgação científica permitiu uma análise de quão avançados estão os estudos e testes práticos com a geração de eletricidade a partir da energia das ondas do mar. Este levantamento foi capaz de identificar nos últimos seis anos quais foram os países que mais investiram em pesquisas científicas, profissionais mais envolvidos com o assunto e fontes de publicação que dedicaram uma boa parte do seu espaço a este tema. Segundo Alrabghi e

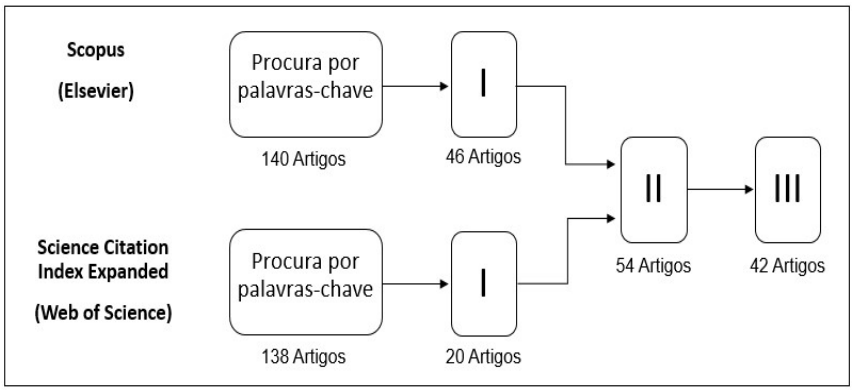
Tiwari (2015), este tipo de levantamento pode identificar atuais lacunas existentes e futuras perspectivas. Mais pesquisas podem ser feitas para desenvolver uma estrutura que servirá de guia para experimentos com diferentes estratégicas e políticas.

2.2. Revisão bibliográfica sistematizada

A metodologia utilizada nesta etapa teve como base o trabalho de Alrabghi e Tiwari (2015). Para este levantamento foi utilizado o Portal de Periódicos da Capes (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), uma biblioteca virtual que reúne e disponibiliza a instituições de ensino e pesquisa no Brasil um acervo de mais de 45 mil títulos em 130 bases referenciais, onde possuem acesso livre e gratuito ao conteúdo do portal professores, pesquisadores, alunos e funcionários vinculados às instituições participantes (CAPES, 2019). As duas bases de dados escolhidas foram definidas em função das referências citadas por Martins e Moreira (2018) e pela quantidade de textos completos disponíveis à comunidade científica: *Scopus* (*Elsevier*) e *Science Citation Index Expanded* (*Web of Science*).

Uma pesquisa sistemática foi realizada com o seguinte critério de busca, tanto no título quanto no assunto dos artigos para os últimos seis anos: "*wave energy converter*" AND "*linear generator*". A Figura 01 demonstra a metodologia de revisão utilizada. Em I foram selecionados artigos que estavam relacionados na íntegra com conversão de energia das ondas, em II foi realizada a remoção por redundância de títulos e, em III, uma leitura mais abrangente foi conduzida através dos documentos completos, totalizando 42 artigos.

Figura 01 – Metodologia da revisão

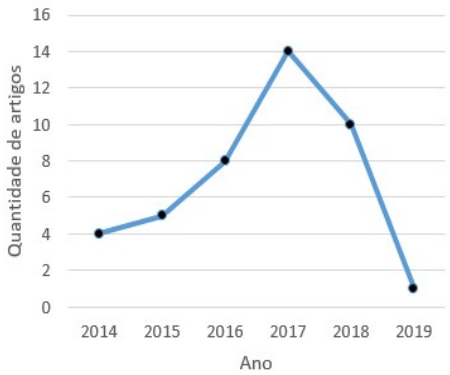


Fonte: Autores

2.2.1. Resultados encontrados na revisão

Todos os trabalhos foram publicados de 2014 em diante. A Figura 02 mostra uma tendência crescente nas publicações até 2017. Estes resultados correspondem aos observados em estudos anteriores, onde o custo de geração de energia elétrica, obtenção e a segurança ecológica são questões notáveis que levaram os cientistas a fazer o uso óbvio das energias renováveis. Como resultado, inúmeras pesquisas foram iniciadas para melhorar a tecnologia de conversão da energia das ondas oceânicas (FARROK *et al*., 2018).

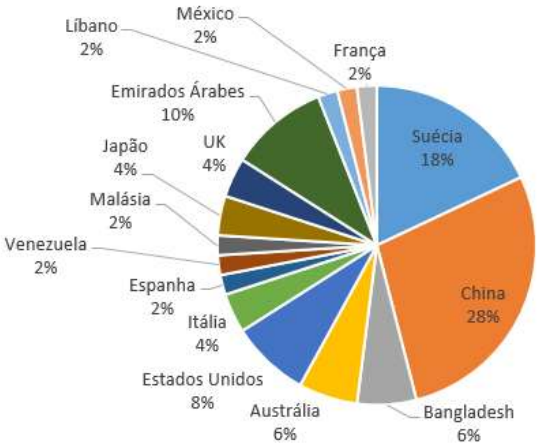
Figura 02 – Artigos de 2014 a 2019



Fonte: Autores

A China aparece liderando pesquisas nesta área seguida pela Suécia como ilustrado na Figura 03. Ambos países são responsáveis por 46% das publicações, os outros 54% abrange 13 países.

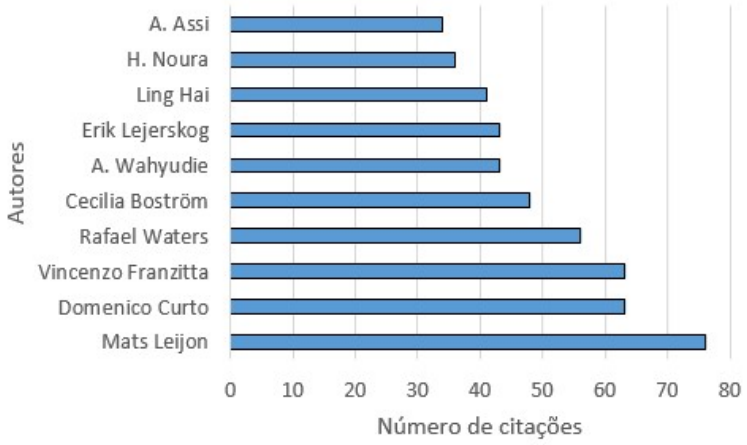
Figura 03 – Publicações por país



Fonte: Autores

O autor mais influente aparece na Figura 04, Mats Leijon da Divisão de Eletricidade da Universidade de Uppsala na Suécia. Ele é autor/coautor de 6 dos 42 artigos selecionados e foi citado 76 vezes com estes trabalhos. Já os autores/coautores Domenico Curto e Vincenzo Franzitta da Universidade de Palermo na Itália, foram citados 63 vezes cada um com apenas dois artigos dos selecionados.

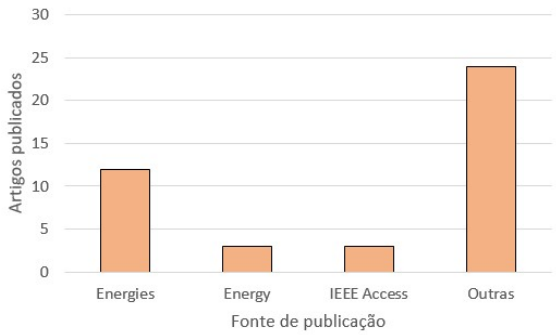
Figura 04 – Os dez autores mais citados



Fonte: Autores

A revista que mais investe no tema é a *Energies* que publicou 12 dos 42 artigos selecionados, Figura 05. Se considerar todos os periódicos mantidos pelo IEEE (*Institute for Electrical and Electronics Engineers*) que apareceram na pesquisa, são 10 publicações. O que colocaria o IEEE em um expressivo segundo lugar.

Figura 05 – Participação das fontes de publicação



Fonte: Autores

Após leitura dos artigos foi possível compreender as ideias dos autores aplicadas em cada trabalho, pode-se perceber que todos os artigos envolveram algum tipo de simulação por software no

tema proposto por cada um deles. Dezenove trabalhos se dedicaram a construção de um protótipo para colocar em prática o que foi proposto. Destes, apenas sete levaram seus experimentos ao mar. Alguns artigos estavam relacionados a trabalhos anteriores onde, por exemplo, a simulação estava relacionada a algum equipamento mencionado em um artigo mais antigo. A Universidade de Uppsala se destacou com a construção de um WEC na cidade de Lysekil, o equipamento rendeu muitos estudos, tanto de avaliação de rendimento, quanto de melhorias.

2.2.2. Ideias que se destacaram

Hultman e Leijon (2014) inovaram na confecção de bobinas para geradores, eles pesquisaram uma tecnologia alternativa para montagem de enrolamentos de grandes máquinas elétricas. Atualmente o enrolamento é feito de forma manual, que se torna muito repetitivo, consumidor de tempo e custoso. A pesquisa procurou desenvolver um alimentador de cabos para que robôs pudessem fazer o trabalho. Utilizando o projeto do WEC da Universidade de Uppsala, eles concluíram que o tempo de bobinamento total, que era de 80 horas e feito manualmente por quatro pessoas, pode ser reduzido para 20 horas de forma totalmente robotizada.

Kun *et al*. (2018) trabalharam no modelo matemático de um sistema de travamento de um WEC conceitual que utilizava um gerador linear de ímãs permanentes com possíveis operações em águas profundas. O controle de travamento foi realizado através de um sistema com cilindro hidráulico de água pura e uma válvula e testado com dados de ondas irregulares. No final eles concluíram que a potência média anual gerada teve um acréscimo em relação a um sistema de travamento simples.

Bosma *et al*. (2015) afirmaram que uma componente chave para levar os conversores de energia das ondas à comercialização é a construção e teste de protótipos em escala menor para fornecer modelo de validação. Um protótipo de um quarto do tamanho de um *Point Absorber* foi modelado, construído e testado. Os resultados dos testes em um tanque de ondas foram comparados com dois modelos implementados no ANSYS AQWA e MATLAB / Simulink. Na visão dos pesquisadores, este trabalho servirá como um guia para futuros desenvolvedores de WECs.

Franzitta e Curto (2017) foram além e estudaram a possibilidade de promover a transição energética a partir de combustíveis fósseis para energia renovável na ilha italiana Pantelária, situada no Mar Mediterrâneo e com quase 8000 habitantes. O trabalho esteve focado, segundo eles, em uma fonte renovável que hoje em dia está totalmente sem uso naquela localidade: energia das ondas. Graças ao inovador protótipo de gerador projetado pelo Departamento de Energia da Universidade de Palermo (Itália), a energia das ondas está sendo capaz de representar a fonte de produção de energia elétrica nas

ilhas do Mediterrâneo. Os procedimentos utilizados por eles, bem como as principais equações utilizadas, são resultados de aplicações anteriores feitas em diferentes campos técnicos que mostraram boa replicabilidade.

Leijon *et al*. (2017) simularam uma nova montagem de ímãs para o WEC da Universidade de Uppsala, cogitando a possibilidade de substituição dos ímãs Nd2Fe14B (Neodímio-Ferro-Boro) por ímãs de ferrite dos tipos Y30 e Y40. Estes autores afirmam que o tipo de ímã usado em um gerador linear afeta seu desempenho e a sua sustentabilidade. Ímãs Nd2Fe14B podem ser usados, no entanto, questões relativas a meio ambiente, saúde e preço tornam os chamados "ímãs de terras raras" impróprios para um WEC sustentável. Ímãs permanentes de ferrite, com magnetização em direção ao movimento, foram colocados de diferentes formas e provaram ser uma alternativa sustentável para o projeto.

Franzitta *et al*. (2016) avaliaram a possibilidade do emprego de energias renováveis nas ilhas maltesas, a fim de aumentar a sua independência energética. A principal fonte renovável proposta foi a energia das ondas. Graças a uma posição estratégica, Malta pode ser capaz de produzir energia elétrica usando um tipo inovador de conversor de energia das ondas baseado no protótipo de gerador linear da Universidade de Palermo. O uso desta nova tecnologia poderá ser capaz de reduzir a produção de energia elétrica da forma tradicional e, consequentemente, as emissões de gases de efeito de estufa. A tecnologia fotovoltaica também fez parte da proposta dos autores. O gerador apresentado é do tipo *Point Absorber* e possui uma boia com diâmetro de 10m e, no topo desta boia, uma placa fotovoltaica foi sugerida como forma de geração híbrida.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Material

Software estatístico R.

3.2. Método

- Revisão bibliográfica sistematizada realizada no Portal de Periódicos da Capes e limitada a duas bases científicas para uma atualização do tema proposto neste trabalho.

- Análise estatística de sazonalidade das ondas através da Análise de Variância para verificação do comportamento das alturas das ondas em cada estação do ano. Método usado para concluir estatisticamente que as amplitudes das ondas variam conforme a estação do ano.

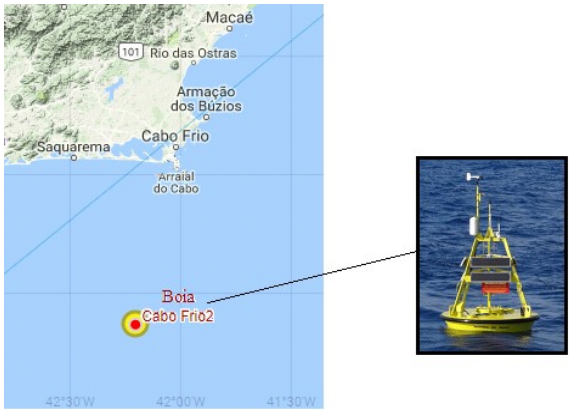
- Pesquisa exploratória e bibliográfica para compreensão da geração de eletricidade a partir da energia das ondas e orientação para seleção de um dispositivo conversor que venha a ser construído futuramente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise estatística de sazonalidade das ondas

Para compreender o padrão das ondas na Região dos Lagos – RJ, foram obtidos dados brutos da boia de deriva rastreada por satélite implantada em Cabo Frio (Figura 06), situada a aproximadamente 70km da costa. Os dados são disponibilizados pelo Programa Nacional de Boias (PNBOIA) coordenado pelo Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. A boia trabalha com medições horárias 24 horas por dia e pode medir variáveis como altura da onda, período da onda, direção da onda, direção do vento, temperatura do ar etc. Em um mês podem existir até 744 medições disponíveis se considerarmos que todas as medições foram validadas. Essa foi a base de dados utilizada nesta análise.

Figura 06 – Localização da boia utilizada



Fonte: GOOS-BRASIL, 2018. Adaptada pelos Autores

Os princípios básicos da experimentação foram considerados com uso de repetições, isto é, medições horárias ao longo do ano de 2017. Para o mês de novembro, segundo mês da primavera, foi feita a interpolação dos dados devido à inexistência dos mesmos para este mês específico. Houve uso da casualização, onde a aleatoriedade foi garantida com medições horárias, 24 horas por dia e durante os meses do ano de 2017.

4.1.2 O modelo estatístico

Como modelo estatístico, consideramos o modelo de médias da Equação (1).

$$y_{ij} = \mu_i + \epsilon_{ij} \begin{cases} i = 1, 2, \ldots, a \\ j = 1, 2, \ldots, n \end{cases} \tag{1}$$

onde y_{ij} é a variável resposta altura da onda, μ médias das estações e ϵ componente do erro aleatório.

Ondas superficiais são geradas nos oceanos devido à interação dos ventos com a superfície da água. Quando eles sopram paralelamente à superfície, transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia gera as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar depende da intensidade deste vento, do seu tempo de atuação e da área sobre a qual está atuando, a chamada pista. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante. No entanto, para cada situação existem dimensões máximas que a onda pode atingir, ou seja, as ondas não crescem indefinidamente (TRUJILLO e THURMAN, 2011).

Nos tratamentos temos quatro níveis, ou seja, estações do ano: verão, outono, inverno e primavera. Elas foram escolhidas para se avaliar o comportamento sazonal.

O Planejamento de Experimentos (do inglês *Design of Experiments*, DOE) tem como objetivo o estudo dos experimentos, isto é, seu planejamento, execução, análise dos dados e interpretação dos resultados obtidos. O procedimento adequado para testar se existem diferenças significativas entre médias de populações ou tratamentos em um experimento é a Análise de Variância, usualmente abreviada como ANOVA. A Análise de Variância é proposta como na Tabela 01.

Tabela 01 – Tabela ANOVA

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Média dos Quadrados	F_0
Entre os tratamentos	$SS_{\text{Treatments}} = n\sum_{i=1}^{a}(\bar{y}_{i.} - \bar{y}_{..})^2$	$a-1$	$MS_{\text{Treatments}}$	$F_0 = \frac{MS_{\text{Treatments}}}{MS_E}$
Erro (dentro dos tratamentos)	$SS_E = SS_T - SS_{\text{Treatments}}$	$N-a$	MS_E	
Total	$SS_T = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	$N-1$		

Fonte: MONTGOMERY, 2013. Adaptada pelos autores

Para que a análise de variância seja considerada válida, alguns pressupostos devem ser obedecidos, como: os erros devem ser independentes, devem ser normalmente distribuídos e devem ter variância comum (homocedasticidade).

Para verificar quais são as diferenças entre estações, foi utilizado o teste de comparação de médias de Tukey, um procedimento de investigação de dados eficiente quando o interesse se concentra em comparar todos os pares de médias de tratamentos.

4.1.3 Rotina básica no R

A análise estatística foi realizada utilizando o ambiente computacional R (*R Development Core Team*, 2017), software estatístico gratuito e de código aberto. O R se tornou uma importante ferramenta tecnológica na análise e manipulação de dados, realizando análises de variância, testes de hipóteses estatísticas, operações matemáticas, simulação, modelagem linear e não linear, análise de séries temporais, análise de sobrevivência e análise multivariada, entre outras, com recursos gráficos de alta qualidade. Na Figura 07 está a rotina computacional básica implementada.

Figura 07 - Rotina computacional básica implementada no R

```
altura <-read.table("altura_media.txt", head=TRUE) #leitura dos dados
altura_media <- data.frame(trat=factor(rep(1:4,each=3)), resp=altura) #dataframe
tapply(altura, tratamento, mean) #tabela de médias
boxplot(altura~tratamento) #gráfico bloxplot
altura_media.av <- aov(altura~trat, data=altura_media) #análise de variância
anova(altura_media.av) #tabela ANOVA
qqnorm(residuos) #verificação da normalidade
boxplot (residuos~tratamento) #verificação da homocedasticidade
plot(residuos) #verificação da independência
shapiro.test(residuos) #teste de normalidade
bartlett.test(residuos,tratamento) #teste de homocedasticidade
dwtest(altura_media.av) #teste de independência
altura_media.tu <- TukeyHSD(altura_media.av) #teste de Tukey
plot (altura_media.tu) #intervalos de confiança entre médias
```

Fonte: Autores

A metodologia seguida no presente artigo adotou o guia para planejamento de experimentos sugerido por Montgomery (2013).

4.1.4 Análise exploratória de dados

A Tabela 02 foi criada com dados levantados no PNBOIA para o ano de 2017, onde os valores mensais (médias mensais) foram lidos na primeira linha da rotina básica do R (Figura 07). Ela demonstra os valores médios dos respectivos meses das estações, assim como as alturas médias de cada estação calculadas pelo comando *tapply*.

Tabela 02 – Valores médios para o ano de 2017, considerando as estações

Altura média mensal em 2017 (metros)				
Estação	Mês 1	Mês 2	Mês 3	Média da estação
Verão	1,69	1,55	1,89	1,71
Outono	2,03	2,28	1,84	2,05
Inverno	1,88	2,18	2,26	2,11
Primavera	3,06	3,59	4,13	3,59

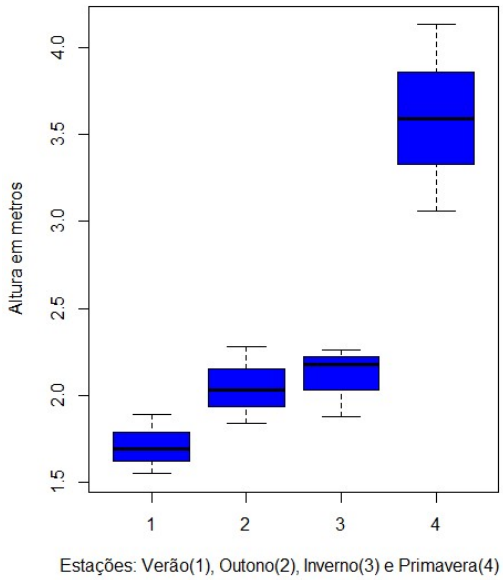
Fonte: Autores

Sabe-se que a altura de uma onda tem relação direta com a energia contida nela, pode ser notado na Tabela 02 que o segundo mês da estação verão (fevereiro) foi o mês menos energético do ano com altura média de 1,55m. Já o mês de dezembro, com 4,13m, apresentou ondas com mais energia disponível. Dentre as estações, a primavera se apresenta como a mais energética do ano. Vale a pena mencionar nesta etapa do trabalho a influência de fatores não controlados, como período de

manutenção da boia e medições validadas erroneamente durante processamento dos dados disponibilizados.

Com base na Tabela 02 e utilizando o software R, foi gerado um *boxplot* (Figura 08).

Figura 08 – Variabilidade das alturas médias mensais para as estações do ano de 2017



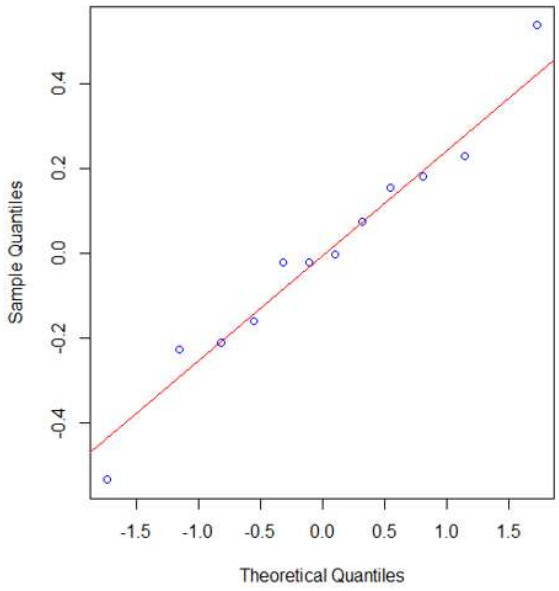
Fonte: Autores

Sob o ponto de vista de tendência central, a estação inverno é a mais assimétrica. Percebe-se que as alturas medianas são crescentes ao longo do ano. Já para a variabilidade, a primavera apresenta alturas mais heterogêneas que as demais estações. As estações verão, outono e inverno são mais homogêneas.

4.1.5 Análise gráfica dos resíduos

Para verificar a normalidade, homocedasticidade e a independência dos resíduos foram feitas análises gráficas dos mesmos. A normalidade dos resíduos foi verificada através do gráfico de probabilidade normal, Figura 09. O objetivo deste gráfico foi avaliar o ajuste dos resíduos à distribuição normal. A maioria dos dados deve estar concentrada no meio da reta, se estes seguem uma distribuição normal. Os valores das caudas da distribuição não devem ser considerados com rigor. Observamos que a maioria dos dados estão concentrados sobre a reta, indicando que se pode aceitar a suposição de normalidade dos resíduos.

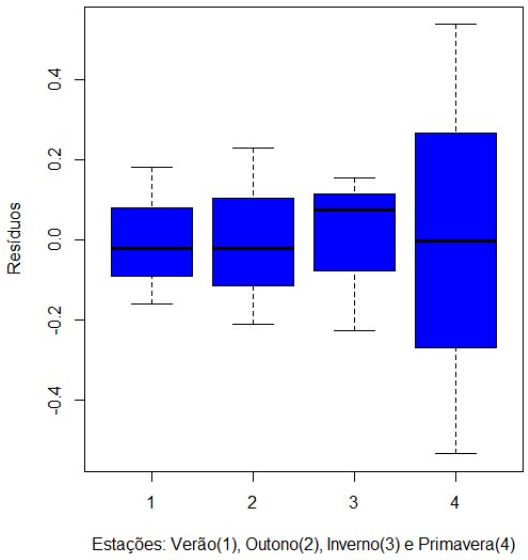
Figura 09 – Gráfico de probabilidade normal dos resíduos



Fonte: Autores

A homocedasticidade dos resíduos foi verificada através do gráfico de dispersão para os tratamentos *versus* resíduos, Figura 10. Ela pode ser confirmada, pois os desvios variam, relativamente, de forma homogênea, dentro de uma mesma amplitude.

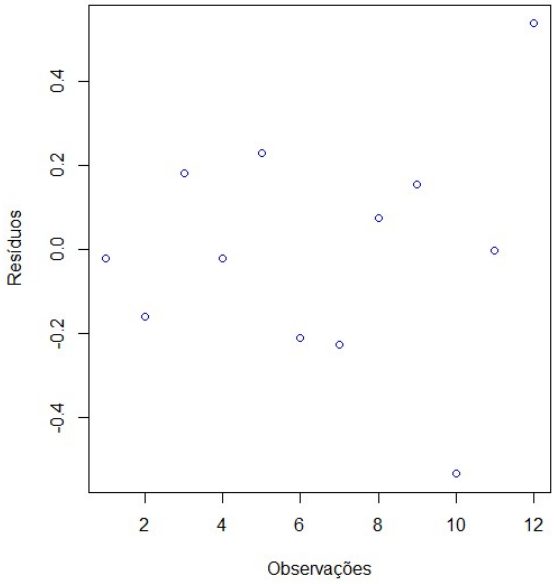
Figura 10 – *Boxplot* representando a dispersão dos resíduos



Fonte: Autores

A independência dos resíduos foi verificada através do gráfico dos resíduos ordenados, Figura 11. A dependência entre as observações aparece sob a forma de algum padrão de distribuição dos erros. Se existir independência, haverá ausência de padrão neste gráfico. Por este motivo, podemos concluir que existe independência entre as observações.

Figura 11 – Gráfico dos resíduos ordenados



Fonte: Autores

4.1.6 Testes estatísticos para adequação do modelo

A Tabela 03 apresenta os resultados dos testes estatísticos de adequação do modelo.

Tabela 03 – Resumo dos testes estatísticos de adequação do modelo

Teste estatístico	Verificação	Estatística de teste	p-valor
Shapiro-Wilk	Normalidade	W = 0.9753	0.9577
Bartlett	Homocedasticidade	B K-sq = 3.0691	0.3811
Durbin-Watson	Independência	DW = 1.9442	0.1188

Fonte: Autores

As hipóteses de normalidade, homocedasticidade e independência dos resíduos do modelo estatístico foram validadas ao nível de 5% de significância.

4.1.7 Análise de variância

A Tabela 04 segue o padrão proposto por Montgomery (2013).

Tabela 04 – Tabela ANOVA com os resultados do modelo

Fonte de Variação	Graus de liberdade	Soma dos Quadrados	Média dos Quadrados	F_0	p-valor
Altura média da onda	3	6,3134	2,10379	20,816	0,0003902
Erro	8	0,8085	0,10107		
Total	11	7,1219			

Fonte: Autores

A partir dos resultados obtidos pela Análise de Variância concluímos que há, ao menos, duas estações do ano com alturas médias estatisticamente diferentes ao nível de significância de 1% (α = 0,01) e com base no p-valor obtido (0,0003902). Como p-valor é menor que α, a hipótese de que todas as médias das estações são iguais estatisticamente foi negada.

Para o teste de comparação de médias o Teste de Tukey foi utilizado. A Tabela 05 mostra os resultados.

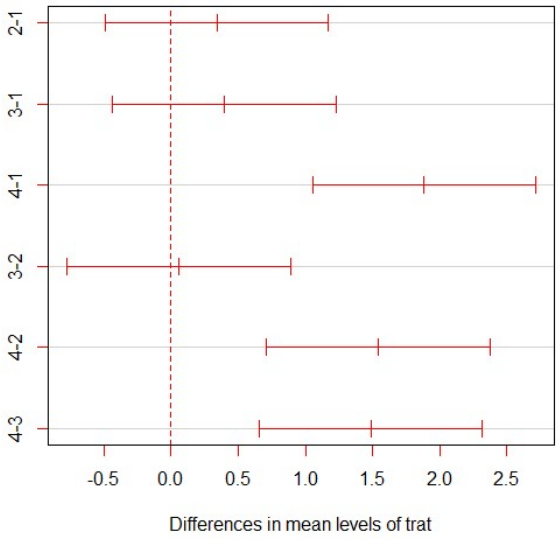
Tabela 05 – Resultados do Teste de Tukey

Estações	diff	p adj
Outono-Verão	0,34000	0,58227
Inverno-Verão	0,39667	0,46564
Primavera-Verão	1,88333	0,00040
Inverno-Outono	0,05667	0,99602
Primavera-Outono	1,54333	0,00154
Primavera-Inverno	1,48667	0,00197

Fonte: Autores

A Tabela 05 traz as comparações possíveis entre pares de estações e o Teste de Tukey executado pelo software R possui um α padrão de 5% (0,05). Quando os p-valores encontrados são comparados com este nível de significância, percebe-se que apenas a primavera se difere das demais estações em termos de média. A Figura 12 permite uma interpretação visual desta comparação entre médias.

Figura 12 - Gráfico dos intervalos de confiança de 95% para as diferenças das médias



Fonte: Autores

Percebe-se que para as observações verão (1), outono (2), inverno (3) e primavera (4), somente na primavera há uma diferença significativa quando comparada às demais estações, isto é, as barras não tocam a linha pontilhada do zero. Verificou-se que não houve diferença significativa entre verão, outono e inverno, isto é, as barras de intervalos tocam o zero.

4.2. Geração de eletricidade a partir da energia das ondas

Análises detalhadas mostraram que o potencial global anual de diferentes fontes de energia oceânica é significativamente maior do que nossa demanda global anual de eletricidade (KHAN *et al*., 2017). Como resultado, muitos países pretendem utilizar fontes de energia oceânica para geração de energia elétrica. No entanto, isso não é possível em larga escala porque a maioria das tecnologias de energia oceânica ainda está em desenvolvimento e há muitos problemas econômicos, técnicos e ambientais a serem resolvidos, justificando a pesquisa e o desenvolvimento em engenharia de energia oceânica fomentados pelos governos e pelo setor privado em todo o mundo. Assim podemos usar essas fontes de energia renováveis, confiáveis e limpas para suprir nossa crescente demanda global por eletricidade, concomitantemente à busca de um futuro sustentável (MELIKOGLU, 2018).

4.2.1 A conversão de energia das ondas

Segundo Cunha *et al*. (2017) a energia das ondas é captada por dispositivos chamados de forma genérica de Conversores de Energia das Ondas - WEC (*Wave Energy Converters*). Há divergências sobre o melhor método de extração de energia das ondas (DREW *et al*., 2009), onde pesquisas como a de Ayob *et al*. (2018) apontam o *Point Absorber* como alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção da onda quando comparado a outro WEC.

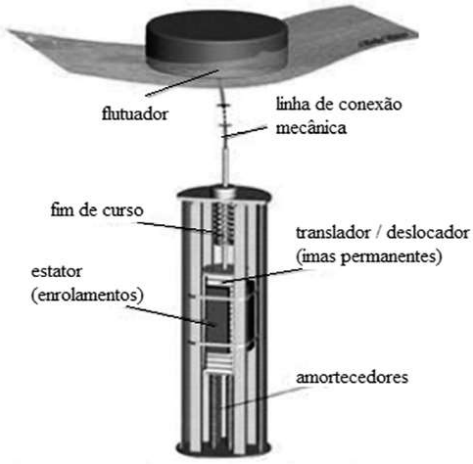
Leijon, em um de seus vários trabalhos, apresentou em Lejerskog e Leijon (2014), um modelo de *Point Absorber* produzido pela Universidade de Uppsala que utiliza um gerador linear com ímãs permanentes capaz de produzir uma tensão alternada em sua saída.

4.2.2 O conversor do tipo *Point Absorber*

Cunha *et al*. (2017) expõem um modelo de conversor *Point Absorber*, a Figura 13 mostra o princípio de funcionamento dessa instalação que consiste em um flutuador que se move de acordo com o movimento das ondas, sendo ligado a um sistema fixo, que possui a função de extrair parte da energia das ondas e converter em eletricidade.

O *Point Absorber* tem a capacidade de absorver energia em todas as direções através de seus movimentos na superfície da água. A energia do oceano é então convertida por sistemas mecânicos e/ou hidráulicos em movimento linear ou angular para deslocamento de geradores elétricos. Por sua característica original de movimento linear, é possível e conveniente o uso de um gerador linear para produção de energia elétrica, ao invés de geradores rotativos convencionais (CUNHA *et al*., 2017).

Figura 13 – Esquema do WEC *Point Absorber*



Fonte: CUNHA *et al*., 2017

4.2.3 O gerador linear de ímãs permanentes

O princípio de funcionamento de um gerador linear é exatamente igual ao de um gerador convencional. A única diferença consiste na forma como se estabelece o movimento relativo entre as bobinas de cada fase e o sistema de excitação, sendo, neste caso, um movimento linear (BOLDEA e NASAR, 1997). A parte fixa dos geradores lineares é chamada de estator e a parte móvel é chamada de translador (Figura 13). Os geradores lineares costumam ser classificados quanto: à sua geometria, usualmente, plana ou tubular; ao material do seu núcleo, ferromagnético ou não (núcleo de ar); a direção das linhas de fluxo magnético, que costuma ser longitudinal ou transversal; a quantidade de lados, normalmente simples (um lado) ou duplo (dois lados) (CORDOVIL, 2013).

Segundo Okuyama e Assano (2013), um gerador linear de ímãs permanentes é fundamentalmente composto por um eixo no qual são acoplados ímãs permanentes (indutor) e por bobinas alojadas num núcleo ferromagnético que envolve o conjunto de ímãs, formando um acoplamento magnético (induzido). A geração de energia se dá quando o conjunto de ímãs permanentes se move em relação a uma bobina de enrolamento. Este movimento alternativo modifica o fluxo magnético que passa pelo indutor e esta alteração nas condições do campo magnético induz um fluxo de corrente elétrica nos fios do enrolamento da bobina.

No estudo realizado em Farrok *et al*. (2017) referente a um gerador linear de ímãs permanentes com comutação de fluxo, percebeu-se que quase todos geradores deste tipo contêm um translador pesado e sólido devido às suas limitações de projeto para geração de eletricidade a partir das ondas oceânicas. Estes mesmos autores, a partir de um modelo dinâmico de onda oceânica, propuseram uma melhoria no equipamento: reduziram a massa do translador de estrutura de aço, colocando um material não magnético e mais leve. Desta forma foi possível gerar eletricidade de forma mais efetiva. Para analisar o desempenho e verificar a viabilidade do novo projeto, eles utilizaram simulação através da análise de elementos finitos.

5. CONCLUSÃO

Através da revisão bibliográfica foi possível verificar que países como China e Suécia representam cerca de 46% dos estudos realizados neste tema atualmente. Todos os trabalhos utilizaram algum tipo de *software* para simulação de variáveis, indicando que simulações são ferramentas importantes para um projeto. 41% dos trabalhos considerados tinham um protótipo construído e,

através destes protótipos, melhorias foram pensadas e executadas. Muitas só foram consideradas devido aos testes práticos e operacionais com os equipamentos.

O estudo com a ANOVA demonstrou que as alturas das ondas variam em função da estação do ano e que estatisticamente a primavera apresenta um potencial energético maior que as outras estações. Esta análise também confirmou que há possibilidades de instalação de um conversor de energia das ondas na Região dos Lagos – RJ.

Diante do que foi visto, encontra-se sustentação para construção de um protótipo de gerador linear de ímãs permanentes como parte de um conversor de energia das ondas do tipo *Point Absorber*, devido a sua estrutura relativamente simples e conversão eficiente. O circuito magnético do gerador é fator limitante na quantidade de eletricidade gerada. Tecnologias atuais já testadas por outros pesquisadores poderão ser utilizadas, assim como as informações levantadas vão colaborar para uma montagem adequada do dispositivo e melhorias na topologia escolhida para o protótipo.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. **Computers & Industrial Engineering**, vol. 82, 2015.

AYOB, M. N.; CASTELLUCCI, V.; GÖTEMAN, M.; WIDÉN, J.; ABRAHAMSSON, J.; ENGSTRÖM, J.; WATERS, R. Small-Scale Renewable Energy Converters for Battery Charging. **Journal of Marine Science and Engineering**, vol. 6, no. 26, 2018.

BOLDEA, I.; NASAR, Syed A. **Linear Electric Actuators and Generators**. USA: Cambridge University Press, 1997. 248 p.

BOSMA, B.; LEWIS, T.; BREKKEN, T; JOUANNE, A. V. Wave Tank Testing and Model Validation of an Autonomous Wave Energy Converter. **Energies**, vol. 8, 2015.

CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior). **Portal de Periódicos CAPES/MEC**. Disponível em: <www.periodicos.capes.gov.br>. Acesso em: 04 mar. 2019.

CORDOVIL, P. T. C. **O gerador linear de magnetos permanentes aplicado à recuperação de energia das ondas**. Lisboa-Portugal, 111 p., 2013. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico de Lisboa.

CUNHA, I. P. C.; MOREIRA, M. A. C.; SANTOS, R. C.; SANTOS, J. A. M. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. **Revista Vértices**, vol. 19, no. 2, 2017.

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Journal of Power and Energy**, vol. 223, 2009.

FARROK, O.; ISLAM, Md. R.; SHEIKH, Md. R. I.; GUO, Y.; ZHU, J. G. A Split Translator Secondary Stator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 65, no. 9, 2017.

FARROK, O.; ISLAM, Md. R.; GUO, Y.; ZHU, J.; XU, W. A Novel Design Procedure for Designing Linear Generators. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 65, no. 2, 2018.

FRANZITTA, V.; CURTO, D. Sustainability of the Renewable Energy Extraction Close to the Mediterranean Islands. **Energies**, vol. 10, 2017.

FRANZITTA, V.; CURTO, D.; MILONE, D.; RAO, D. Assessment of Renewable Sources for the Energy Consumption in Malta in the Mediterranean Sea. **Energies**, vol. 9, 2016.

GOOS-BRASIL. **Programa Nacional de Boias**. Disponível em: <http://www.goosbrasil.org/pnboia/>. Acesso em: 20 abr. 2018.

GROLL, N.; GRABEMANN, I.; GASLIKOVA, L. North Sea wave conditions: An analysis of four transient future climate realizations. **Ocean Dynamics**, vol. 64, 2013.

HULTMAN, E.; LEIJON, M. A cable feeder tool for robotized cable winding. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 30, 2014.

KHAN, N.; KALAIR, A.; ABAS, N.; HAIDER, A. Review of ocean tidal, wave and thermal energy Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 72, 2017.

KUN, L.; DONGJIAO, W.; SHOUQIANG, Q.; JIAWEI, Y.; JINPING, O. A feedback latching controller for two-body wave energy converters under irregular wave conditions. **Science China Technological Sciences**, vol. 61, no. 8, 2018.

LEIJON, J.; SJÖLUND, J.; EKERGÅRD, B.; BOSTRÖM, C.; ERIKSSON S.; TEMIZ, I.; LEIJON, M. Study of an Altered Magnetic Circuit of a Permanent Magnet Linear Generator for Wave Power. **Energies**, vol. 11, 2018.

LEJERSKOG, E.; LEIJON, M. Detailed Study of Closed Stator Slots for a Direct-Driven Synchronous Permanent Magnet Linear Wave Energy Converter. **Machines**, vol. 2, 2014.

LEJERSKOG, E,; BOSTRÖM, C.; HAI, L.; WATERS, R.; LEIJON, M. Experimental results on power absorption from a wave energy converter at the Lysekil wave energy research site. **Renewable Energy**, vol. 77, 2015.

LI, W.; ISBERG, J.; WATERS, R.; ENGSTRÖM, J.; SVENSSON, O.; LEIJON, M. Statistical Analysis of Wave Climate Data Using Mixed Distributions and ExtremeWave Prediction. **Energies**, vol. 9, 2016.

MARTINS, E. B. S.; MOREIRA, M. A. C. Avaliação de requisitos para montagem de um protótipo de conversor de energia das ondas do tipo *point absorber*. In: 11º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2018, Porto Alegre. *Anais eletrônicos...* Disponível em:

http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2_5585_20180803181326.pdf . Acesso em: 15 mar. 2019.

MELIKOGLU, M. Current status and future of ocean energy sources: A global review. **Ocean Engineering**, vol. 148, 2018.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 8.ed. New York, John Wiley & Sons, 2013.

OKUYAMA, M. O.; ASSANO, R. **Projeto de gerador elétrico linear para aproveitamento da energia de ondas marítimas**. São Paulo, 125 p., 2013. Monografia - Universidade de São Paulo.

R Development Core Team. 2017. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Disponível em <http://www.r-project.org/>. Acesso em: 5 jul. 2018.

TRUJILLO, A. P.; THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. USA: Prentice Hall, 2011. 551p.

VERMAAK, R.; KAMPER, M. J. Design aspects of a novel topology aircored permanent magnet linear generator for direct drive wave energy converters. **IEEE Trans. Ind. Electron.**, vol. 59, no. 5, 2012.

ARTIGO CIENTÍFICO 2

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPO DE GERADOR LINEAR COMO PARTE DE UM CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO *POINT ABSORBER*.

DEVELOPMENT OF LINEAR GENERATOR PROTOTYPE AS PART OF A POINT ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER.

Eduardo Beline da Silva Martins - IFFluminense/PPEA

Marcos Antonio Cruz Moreira - IFFluminense/PPEA

Wagner Fonseca Marcilio Junior - IFFluminense

João Amaro Machado dos Santos - IFFluminense

RESUMO

A necessidade de produzir energia a partir de fontes renováveis ganhou importância nos últimos anos. O oceano apresenta um potencial energético que justifica estudos em busca da conversão da energia presente nele em energia elétrica. Uma das fontes oceânicas que se destaca são as ondas. Neste trabalho, os ímãs utilizados foram testados e avaliados antes de serem instalados. Um protótipo preliminar foi pensado, simulado (por Análise de Elementos Finitos) e montado para entender a dinâmica de um gerador linear. O protótipo final passou pelas mesmas etapas e no final foi possível verificar seu comportamento em diferentes frequências de translação.

Palavras chave: Ondas. Oceano. Energia. Gerador Linear.

ABSTRACT

The need to produce energy from renewable sources has gained importance in recent years. The ocean presents an energetic potential that justifies studies in search of the conversion of the energy present in it into electric energy. One of the oceanic sources that stands out is the waves. In this work, the magnets used were tested and evaluated before being installed. A preliminary prototype was designed, simulated (using Finite Element Analysis) and assembled to understand the dynamics of a linear generator. The final prototype passed through the same steps and in the end it was possible to verify its behavior in different translation frequencies.

Keywords: *Waves. Ocean. Energy. Linear Generator.*

1. INTRODUÇÃO

O oceano é uma gigantesca fonte de energia renovável que abrange cerca de três quartos da superfície da Terra e a energia pode ser extraída das ondas de muitas formas. Ondas oceânicas têm alta densidade de potência em comparação com a energia solar ou eólica e estão disponíveis. A extração de sua energia também é favorável ao meio ambiente (FARROK *et al*., 2016). Gerar energia com fontes renováveis não é uma tarefa tão simples, pois demanda diversos tipos de tecnologias, o que pode agregar muito custo ao sistema. Por este motivo, investir em pesquisa nesta área pode ser uma alternativa para viabilização econômica (WESCHENFELDER *et al*., 2012).

A conversão de energia através de geradores é um componente essencial da sociedade moderna. Com a introdução da conversão da energia elétrica a partir de novas fontes e o aumento do uso de motores elétricos na indústria, é provável que o desenvolvimento de máquinas elétricas de médio e grande porte tenda a crescer (HULTMAN e LEIJON, 2014). A energia das ondas pode ter o potencial de aliviar a situação atual de demanda energética e da crise de poluição ambiental.

Nos dias atuais, com a atenção global sendo atraída pela mudança climática e o aumento do nível de CO2, o foco na geração de eletricidade a partir de fontes renováveis certamente é uma importante área de pesquisa. Entre as opções emergentes de geração de energia elétrica a partir das renováveis, a energia presente nos oceanos é uma das mais promissoras (GAO *et al*., 2016). Em escala global, as fontes de energia dos oceanos têm os seguintes potenciais: marés com 800 TWh por ano; gradiente de salinidade com 2000 TWh por ano; ondas estão entre 8.000 e 80.000 TWh por ano e as fontes térmicas entre 10.000 e 87.600 TWh por ano, cujo potencial total é significativamente maior do que a demanda global de eletricidade de 16.000 TWh por ano (KHAN *et al*., 2017).

O gerador proposto neste trabalho é do tipo linear com ímãs permanentes (*Permanent Magnet Linear Generator* - PMLG) e, segundo Huang *et al*. (2018), devido ao acoplamento direto entre o movimento das ondas e a parte geradora, há vários estudos focados em projetos deste tipo de gerador para conversores de energia das ondas (*Wave Energy Converters* - WECs). Faiz e Nematsaberi (2017) levantam a questão que interfaces mecânicas, tais como caixas de engrenagens, sistemas hidráulicos ou pneumáticos aumentam a complexidade do sistema e levam a mais procedimentos de manutenção, menor eficiência e baixa confiabilidade. O conversor que utiliza um gerador linear resolve este problema pelo fato de simplificar a tomada de força (*power take-off* - PTO) do sistema. Numa tomada de força por acionamento direto (*direct drive*), o gerador linear é acoplado diretamente a uma boia flutuante ou via conexão mecânica simples.

Cunha *et al*. (2017), após conclusão do seu trabalho, ressaltaram que a extração de energia das ondas por meio de um gerador linear acoplado a um conversor do tipo *Point Absorber* é viável. Seu gerador linear com ímãs permanentes mostrou-se viável na geração de energia elétrica. Joubert *et al.* (2012), verificaram algumas topologias semelhantes à apresentada neste trabalho na tentativa de encontrar melhorias, baseando-se no trabalho de Schutte (2011) que investigou um projeto onde os ímãs eram fixos no translador. Após testes de seu protótipo, Schutte concluiu que este tipo de gerador tem sua construção mais fácil que outros tipos de geradores lineares e sua eficiência atingiu valores aceitáveis.

Com base no trabalho de Schutte (2011) e no trabalho executado por Cunha (2017), um protótipo de gerador linear foi construído para ser aplicado em um conversor de energia das ondas do tipo *Point Absorber*.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Visão Geral

Uma pesquisa bibliográfica foi realizada na base de dados do IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers, IEEE-Xplore*) para o termo "*linear generator*" em publicações dos anos 2018 e 2019. Foram encontrados 53 artigos cujas palavras chave mais comuns foram: Máquinas Lineares; Geração de Energia das Ondas; Geradores de Ímãs Permanentes; Análise de Elementos Finitos; e Geradores Elétricos. O autor que mais publicou neste período foi Omar Farrok com 10 artigos. A maioria dos artigos (64%) estava diretamente ligada à conversão de energia das ondas, fato que reforça a aplicabilidade do gerador linear na geração de eletricidade a partir das ondas do mar.

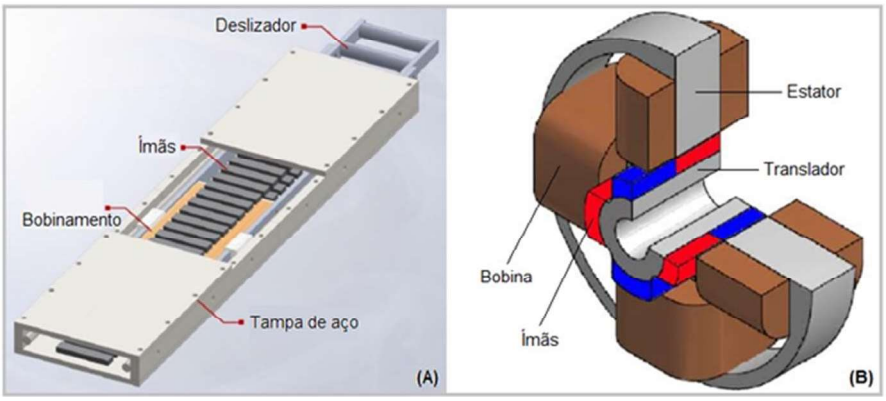
2.2. Configuração de um de gerador linear

Faiad e Gowaid (2018) fizeram uma revisão com foco na implantação de geradores lineares, uma vez que eles provaram ser adequados para a conversão de energia das ondas. Esses geradores foram comparados em termos de configuração geral do sistema, distribuição do fluxo magnético e tipo de núcleo. O conceito básico de um gerador linear é ter um translador (o que seria o rotor em uma máquina rotativa) conectado diretamente a uma boia, no qual os ímãs são montados com polaridades alternadas. A outra parte é um estator contendo enrolamentos e montado em uma estrutura

relativamente estacionária, podendo ser fixada no fundo do mar. À medida que a boia oscila, uma corrente elétrica é induzida no estator (DREW *et al*., 2009).

Em termos de estruturas, existem duas: plana e tubular. Figura 01-A e 01B respectivamente.

Figura 01 – Estrutura plana e estrutura tubular de um gerador linear



Fontes: Schutte, 2011. Wahyudie, 2018. Adaptadas pelos autores

Quanto à instalação dos ímãs permanentes, ela pode acontecer tanto no estator quanto no translador. Faiad e Gowaid (2018) defendem que ímãs montados no translador podem trazer maior complexidade ao projeto, enquanto que ao instalar os ímãs e as bobina no estator, o translador passa a conter apenas ferro, reduzindo assim sua massa. Em um gerador linear de ímãs permanentes, o fluxo magnético pode se distribuir de forma transversal ou longitudinal. Na máquina de fluxo transversal, as bobinas do estator são colocadas na direção transversal ao comprimento axial.

2.3. Topologias e estudos recentes

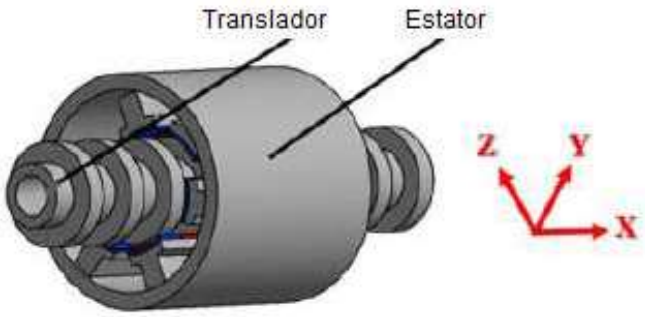
Dos 53 trabalhos verificados após pesquisa bibliográfica, 29 estavam relacionados com a estrutura tubular e 21 com a plana. Alguns trabalhos ganham destaque pelas suas inovações.

Molla e Farrok (2019) ressaltam que os geradores lineares tradicionais para geração de eletricidade a partir da energia das ondas oceânicas são feitos de núcleo de aço de grau comum que possui elevada perda no núcleo em termos de potência dissipada. A minimização das perdas no núcleo foi proposta usando núcleos magnéticos de alto grau com um aço composto por 3,3% de Silício e 0,9% de Alumínio. Uma simulação foi obtida considerando um núcleo de aço DI-MAX HF-10X e o núcleo de ferro convencional. A partir do resultado da simulação, verificou-se que o gerador linear feito com DI-MAX HF-10X possui menor perda magnética quando comparado com o núcleo de ferro convencional. O núcleo proposto obteve uma perda de 0,4412 W e o convencional 1,3295 W, a

potência dissipada no núcleo teve uma redução de 66,8%. O DI-MAX HF-10X é um aço elétrico não orientado totalmente processado, projetado para uso em motores de alta velocidade, motores de tração, geradores de aeronaves e outros equipamentos rotativos operando em frequências acima de 60 Hz.

Raihan *et al*. (2018) propuseram o desenvolvimento e teste de um novo gerador linear tubular utilizando uma máquina híbrida de Vernier (Figura 02) que é conhecida por sua estrutura de conversão simples e acoplamento magnético próprio, tornando-a forte candidata a aplicações de baixa velocidade e aplicações de forças elevadas. Como a bobina da armadura e os ímãs são montados no estator, as versões lineares desta máquina são atraentes para sistemas de grande amplitude. Essa variante cilíndrica da configuração de duas faces foi desenvolvida para um fluxo tridimensional com a ajuda da análise de elementos finitos.

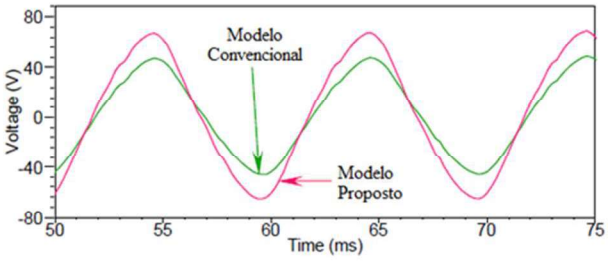
Figura 02 – Modelo híbrido



Fonte: Raihan *et al*. (2018). Adaptada pelos autores

Bashir e Farrok (2019), utilizando o software de simulação ANSYS/Maxwell, buscaram uma alternativa para o material usado no enrolamento do gerador linear com a intenção de obter ganhos na geração de energia elétrica. A ideia foi substituir o cobre das bobinas por material supercondutor YBa2Cu3O7, conhecido como YBCO. Para esta proposta foi usado um gerador linear de ímãs permanentes por comutação de fluxo, onde o modelo convencional foi comparado com o modelo proposto. Os resultados da simulação mostraram que o enrolamento de cobre gerou uma tensão mais baixa e o valor máximo da perda no cobre atingiu 7 W devido à queda de tensão na resistência interna do enrolamento de cobre. Usando o YBCO, a perda no cobre foi evitada e 30% a mais de potência elétrica foi gerada para uma mesma carga. A comparação foi feita utilizando as mesmas propriedades, tais como: número de espiras no enrolamento, mesmo núcleo de aço magnético e os mesmos ímãs permanentes de Neodímio-Ferro-Boro. A Figura 03 compara as tensões nos terminais das bobinas.

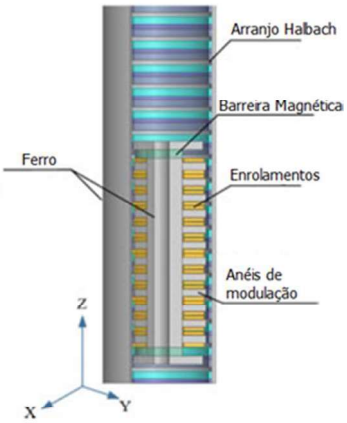
Figura 03 – Tensão na bobina para os modelos convencional e proposto



Fonte: Bashir e Farrok (2019). Adaptada pelos autores

Xia *et al*. (2018) simularam e construíram um protótipo de gerador linear com topologia tubular usando tecnologia *field-modulated* e uma matriz magnética do tipo Quasi-Halbach (Figura 04). O arranjo de Halbach é uma combinação de ímãs permanentes que aumenta o campo magnético em um lado deste arranjo enquanto reduz o campo para próximo de zero do outro lado. Este tipo de montagem utilizada pelos autores pode superar desvantagens como peso da estrutura e ineficiência causada por ondas oceânicas de baixa velocidade. Durante testes do protótipo, eles concluíram que o modelo proposto obteve melhores resultados tais como distribuição de forças e tensão produzida quando comparado a um gerador tubular convencional.

Figura 04 – Estrutura do modelo proposto

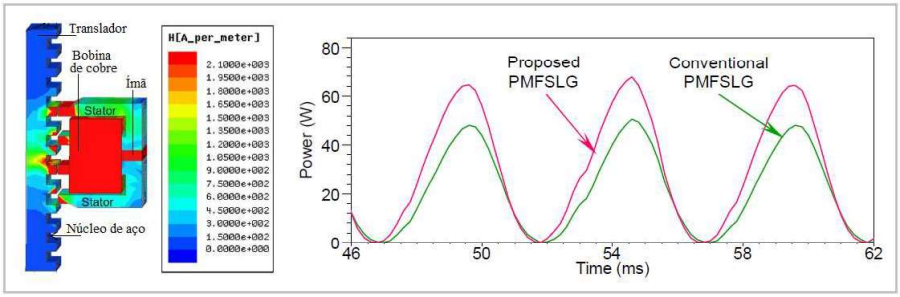


Fonte: Xia *et al*. (2018). Adaptada pelos autores

Bashir *et al*. (2018) perceberam que durante a geração de energia elétrica, a partir das ondas oceânicas e através de geradores lineares de ímãs permanentes, há um aumento de temperatura no núcleo do translador e do estator. Este fenômeno afeta gravemente o desempenho dos ímãs permanentes, causando desmagnetização e prejudicando a geração de energia elétrica nestes dispositivos. O trabalho investigou o efeito do aumento da temperatura nos ímãs convencionais de

NdFeB e propôs um circuito magnético com o recém desenvolvido ímã de NeFeB N28EH. Sob uma temperatura de 60 ºC, o ímã N35M apresenta uma densidade de fluxo magnético remanescente de 1,18 T e intensidade de campo de -1199 kA/m. Já o ímã de NeFeB N28EH, sob mesma temperatura, 1,05 T e -1750 kA/m. Utilizando o software ANSYS / Maxwell para simulação, os autores verificaram que o uso do N28EH pode gerar mais eletricidade, está menos sujeito à desmagnetização e pode fornecer mais potência de saída em temperaturas mais elevadas (Figura 05).

Figura 05 – Intensidade de campo e curvas de tensão



Fonte: Bashir *et al*. (2018). Adaptada pelos autores

Todos os 53 trabalhos avaliados tiveram pontos importantes em suas avaliações, respeitando suas particularidades, objetivos e aplicações. A topologia originalmente proposta por Schutte (2011) - para acionamento a partir de um motor sem pistão - não apareceu integralmente em nenhum dos artigos pesquisados, sendo retomada neste trabalho para nova aplicação, acionamento a partir de ondas oceânicas.

3. MATERIAL E MÉTODO

3.1. Material

No estudo em questão foram utilizados os materiais e equipamentos abaixo:

- Oito ímãs do tipo Nd2Fe14B de grade N35 e dimensões 20mm x 20mm x 10mm;
- Lâminas de transformadores de baixa potência;
- Estrutura de motores de ventiladores;
- Madeira;
- Parafusos;
- Torno mecânico;

- Esmerilhadeira;
- Osciloscópio Tektronix TBS 1102B;
- Multímetro Fluke 87 III;
- Magnetômetro R. B. Annis;
- Software Maxwell;
- Software SolidWorks;
- Software Excel;

3.2. Método

Dois protótipos foram trabalhados por meio de simulação através da Análise de Elementos Finitos e tiveram suas montagens executadas nas dependências do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé. Ambos foram testados e comparados com a simulação realizada previamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

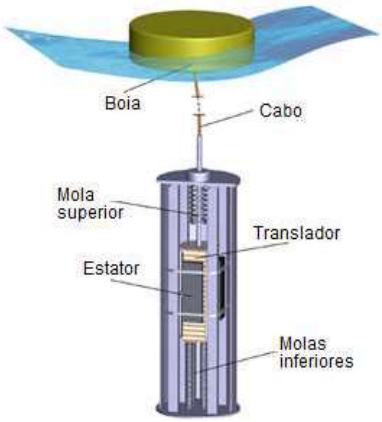
4.1. O Conversor de Energia das Ondas do tipo *Point Absorber*

A ideia da construção de um protótipo de gerador linear parte do princípio da montagem de um conversor de energia das ondas do tipo *Point Absorber*. Cunha *et al*. (2017) realizaram um estudo da viabilidade da utilização de uma máquina de fluxo transversal linear como parte da estrutura do conversor de energia das ondas do tipo *Point Absorber* e concluíram que o gerador linear de fluxo transversal com a topologia de ímãs permanentes mostrou-se viável na geração de energia elétrica. Martins e Moreira (2018a) avaliaram requisitos para montagem de um protótipo de conversor de energia das ondas do tipo *Point Absorber* e concluíram que uma simulação computacional através da Análise de Elementos Finitos seria de grande importância antes de se iniciar a montagem de um protótipo, assim como feito por Farrok *et al*. (2017). Também perceberam que o circuito magnético do gerador é fator limitante na quantidade de eletricidade gerada e, diante do que foi analisado, encontraram sustentação para a montagem de um protótipo de gerador linear, devido à obtenção de informações atualizadas e de relevância para o projeto atual. Martins e Moreira (2018b) fizeram uma atualização da tecnologia utilizada e variáveis para se considerar na construção e instalação de geradores do tipo *Point Absorbers*. Além de terem focado em trabalhos publicados nos anos de 2017

e 2018, eles concluíram que os dados levantados poderão reduzir o custo de montagem e que serão de grande relevância por já terem sido testados por outros pesquisadores.

Hultman e Leijon (2014) apresentaram um modelo simplificado deste WEC produzido pela Universidade de Uppsala (Figura 06), consistindo em uma boia flutuante acoplada diretamente por um cabo ao eixo do translador. O gerador é colocado no fundo do mar e a tensão no cabo é mantida por molas conectadas na parte inferior do eixo. O movimento da boia é transferido para o translador de forma recíproca e linear. A mola no topo do gerador limita seu movimento. O translador possui ímãs permanentes montados na sua superfície, que induzem uma tensão alternada nos enrolamentos do estator. Devido à velocidade variável do translador, a tensão varia em amplitude e frequência. Estes mesmos autores sugerem que em todos os casos possíveis, deve-se trabalhar com a retificação desta tensão.

Figura 06 – Modelo simplificado de um WEC do tipo *Point Absorber*



Fonte: Hultman e Leijon, 2014. Adaptada pelos autores

4.2. Materiais Magnéticos

Segundo Quevedo (1977), os materiais magnéticos se dividem em três grupos: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos. Ao primeiro grupo pertencem as substâncias que, quando colocadas em presença de um campo magnético, criam um pequeno campo próprio no sentido de enfraquecer o campo original; este efeito é fraco e muitas vezes imperceptível; a esta classe pertence o cobre, a prata e o zinco. Os materiais paramagnéticos são aqueles que criam um pequeno campo próprio no sentido de reforçar o campo original; a esta classe pertence o alumínio e o manganês; este efeito é também imperceptível aos nossos sentidos e, para a engenharia, tanto os diamagnéticos como os paramagnéticos são considerados isentos de propriedades magnéticas. Os materiais pertencentes ao

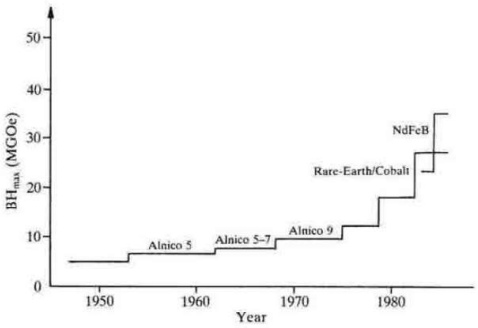
grupo dos ferromagnéticos, quando na presença de um campo magnético, criam um forte campo próprio sempre favorável ao campo original e também possuem elevada suscetibilidade e permeabilidade. A esta classe pertence o ferro, o níquel e o cobalto. Para o estator e o translador do protótipo final deste trabalho foram reaproveitados material de motores de ventiladores compostos por liga ferromagnética aço-silício. Atualmente, o uso de ímãs permanentes com alto produto energético, em substituição aos enrolamentos de campo em máquinas elétricas, tem aumentado consideravelmente. Esta tendência deve-se à necessidade de sistemas de campo baratos e confiáveis (WESCHENFELDER *et al*., 2012).

Miller (1989) afirmou que a indústria de ímãs permanentes tem sustentado um contínuo aprimoramento das características destes materiais, Figura 07. No eixo vertical temos a energia armazenada em um ímã, também conhecida como produto energético máximo (BH_{max}) e tipicamente medido em Mega-Gauss Oersteds (MGOe) no sistema CGS. Um MGOe corresponde a 7957,7 J/m3. Kraus e Carver (1981) afirmam que o produto BH_{max} é uma quantidade importante para um imã permanente. É, provavelmente, o melhor critério para julgar a qualidade de um material magnético permanente.

Os ímãs de NdFeB têm atraído interesses contínuos nos campos tecnológicos e científicos por causa de suas propriedades magnéticas superiores. No entanto, as aplicações destes ímãs foram prejudicadas, especialmente, em projetos de orçamento baixo pelo seu custo relativamente alto. A proporção de Nd e/ou Pr corresponde a mais de 70% da massa do conteúdo total dos ímãs de terras raras do tipo NdFeB. Estes dois elementos químicos, Nd e Pr, representavam quase 90% do custo das matérias primas dos ímãs (LI *et al*., 2015).

O uso do NdFeB ainda se mantém presente por ele possuir a maior energia de todos os ímãs comercialmente disponíveis. Ímãs de cerâmica (ferrita) também têm sido constantemente melhorados.

Figura 07 – Desenvolvimento dos materiais de ímãs permanentes em termos de máxima energia produzida



Fonte: MILLER, 1989

A alta remanência (B_r) e a coercividade (H_c) do NdFeB permitem reduções físicas nas máquinas elétricas em comparação com as máquinas que usam ímãs de ferrita (cerâmica). No entanto, os ímãs cerâmicos são consideravelmente mais baratos. Tanto os ímãs de cerâmica quanto os de NdFeB são sensíveis à temperatura e um especial cuidados deve ser tomado em projetos onde a temperatura esteja acima de 100 °C. Para aplicações em temperaturas muito altas, deve-se usar imãs de Alnico ou de terras raras/cobalto, por exemplo, o ímã 2:17 cobalto-samário (Sm2Co17) que pode ser usado até 200 °C. O NdFeB é produzido por um processo de moinho e sinterização ou por um processo de fusão e fundição semelhante ao utilizado para ligas amorfas. Para baixo custo, ímãs de ferrita ou cerâmica são a escolha universal. Esta classe de materiais magnéticos tem sido progressivamente melhorada com o aumento de sua remanência (MILLER, 1989). As características de temperatura dos ímãs de ferrite podem ser adaptadas aos requisitos da aplicação, de modo que o desempenho máximo seja obtido na temperatura normal de operação, que pode ser de até 100 °C. Um breve resumo das propriedades dos ímãs está na Tabela 01. Mais detalhes podem ser obtidos nas folhas de dados dos fornecedores. Dados e medições específicas são muitas vezes feitos por órgãos de pesquisa e desenvolvimento de ímãs permanentes.

Tabela 01 – Propriedades dos ímãs

Propriedade	Unidades	Alnico 5-7	Cerâmica	Sm2Co17	NdFeB
B_r	T	1.35	0.405	1.06	1.12
$\mu_0 H_c$	T	0.074	0.37	0.94	1.06
$(BH)_{máx}$	MGOe	7.5	3.84	26.0	30.0

Fonte: MILLER, 1989. Adaptada pelos autores

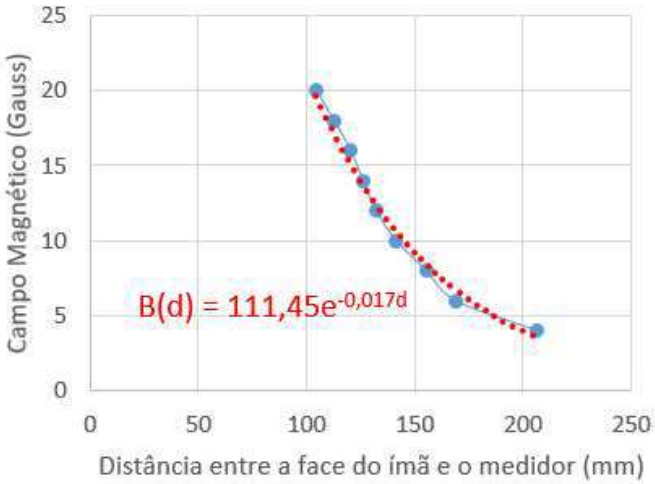
Os ímãs utilizados neste projeto foram do tipo Nd2Fe14B de grade N35 e dimensões 20mm x 20mm x 10mm. Com massa de 30g, revestimento niquelado, temperatura máxima de trabalho de 80ºC e uma força de tração de 12,5Kg segundo o fabricante, eles apresentam uma ótima relação indução/massa. Com a intenção de obter uma referência acerca do seu campo magnético a uma determinada distância, foram realizadas medições com um magnetômetro da R. B. Annis com fundo de escala de 20 Gauss (Figura 08).

Figura 08 – Medição realizada

Fonte: Autores

Na Figura 08 pode ser vista a máxima deflexão do ponteiro a uma distância aproximada de 108mm. À medida que o medidor se afasta do ímã, a intensidade do campo magnético diminui. Nove pontos na escala graduada foram testados e, com a ajuda do software Excel, a curva do Campo Magnético x Distância foi criada (Figura 09).

Figura 09 - Curva do Campo Magnético x Distância



Fonte: Autores

A curva pontilhada é a aproximação exponencial cuja função B(d) é apresentada nesta mesma figura. Se quisermos inferir o campo magnético na superfície do ímã, ou seja, quando a distância ao medidor for igual a zero, encontraremos um campo magnético de 111,45 Gauss ou 11,14 mTesla. Devido às limitações de escala do medidor, essa inferência se fez necessária. Importante ressaltar que este procedimento serviu apenas como referência, pois o medidor estava com a calibração vencida e a

confiabilidade da medição pode ter sido comprometida por este motivo, sem falar dos erros inerentes à medição.

4.3. As Leis de Maxwell

Sabe-se que um condutor percorrido por uma corrente elétrica produz um campo magnético. Segundo Kraus e Carver (1981), por volta de 1831, Michael Faraday e Joseph Henry descobriram de formas independentes que o efeito inverso também é possível. Um campo magnético pode produzir uma corrente em um circuito fechado desde que o fluxo magnético esteja variando.

Segundo Halliday *et al*. (1993), Maxwell levou grande parte de sua vida estabelecendo uma base teórica para as descobertas experimentais de Faraday e conseguiu definir quatro equações básicas do eletromagnetismo, Equações (1), (2), (3) e (4). A Equação (1) é conhecida como Lei de Gauss da eletricidade e apresentada sob a forma de integral de uma superfície fechada do campo elétrico (E). Ela relaciona o fluxo do campo elétrico (Φ_E) no interior de uma superfície gaussiana com a carga (q) no interior dessa mesma superfície. $\epsilon 0$ é a constante de permissividade.

(1)

$$\phi_E = \oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$$

A Equação (2) é conhecida como Lei de Gauss do magnetismo e afirma que o fluxo magnético (Φ_B) através de qualquer superfície gaussiana fechada deve ser zero. É apresentada sob a forma de integral de uma superfície fechada do campo magnético (B).

(2)

$$\phi_B = \oint B \cdot dA = 0$$

A Equação (3) é conhecida como Lei de Faraday e é apresentada na forma de integral de linha em torno de uma curva fechada, onde um campo magnético variável induz um campo elétrico.

(3)

$$\oint E \cdot ds = \frac{-d\phi_B}{dt}$$

A relação quantitativa entre a força eletromotriz induzida (fem) em uma bobina e o campo magnético que produz essa fem é dada pela Lei de Faraday (KRAUS e CARVER, 1981).

A Equação (4) é conhecida como Lei de Ampère-Maxwell e é apresentada na forma de integral de linha em torno de uma curva fechada, onde um campo magnético pode ser produzido por um campo elétrico variável, por uma corrente ou ambos.

(4)

$$\oint B \cdot ds = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} + \mu_0 i$$

Faraday ainda postulou que, em qualquer percurso fechado estacionário, surge uma fem sempre que, na área limitada por este percurso, exista variação do campo magnético no tempo (QUEVEDO, 1977). Equação (5).

(5)

$$fem = \frac{-d\phi_B}{dt} = \frac{-d}{dt} \oint B \cdot ds$$

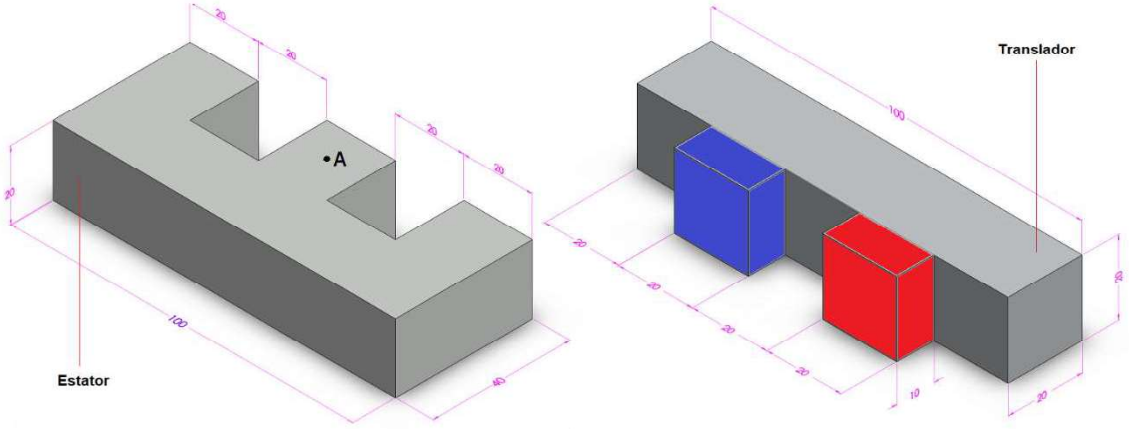
4.4. Protótipos e testes

4.4.1. Simulação e testes com o primeiro protótipo

Para verificar e analisar a dinâmica da geração de energia elétrica a partir de movimentos de translação de um gerador linear, um protótipo de construção mais simples foi pensado. Através da Análise de Elementos Finitos com o *software* Maxwell foi possível simular este dispositivo e, antes mesmo da sua construção, houve a possibilidade de modificar e testa-lo virtualmente. Essas modificações foram importantes porque conseguimos conciliar materiais disponíveis com valores de tensão induzida na bobina.

A Figura 10 representa as duas partes metálicas projetadas para este protótipo, na parte que corresponde ao translador há dois ímãs instalados com polaridades alternadas e todas as dimensões necessárias à construção estão presentes nesta figura, em milímetros. O ponto A é o local de instalação do carretel da bobina.

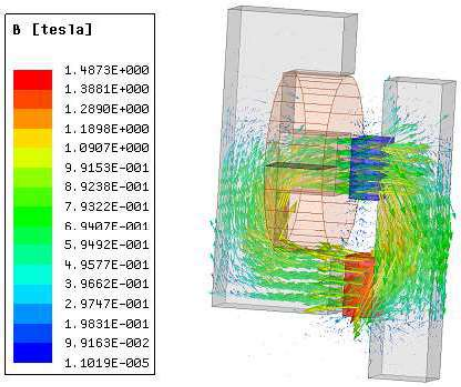
Figura 10 – Partes do estator e do translador



Fonte: Autores

O projeto foi submetido à simulação e na Figura 11 pode ser visto o comportamento esperado do campo magnético quando as faces expostas dos ímãs estão distantes 5 mm do estator.

Figura 11 – Comportamento do campo magnético

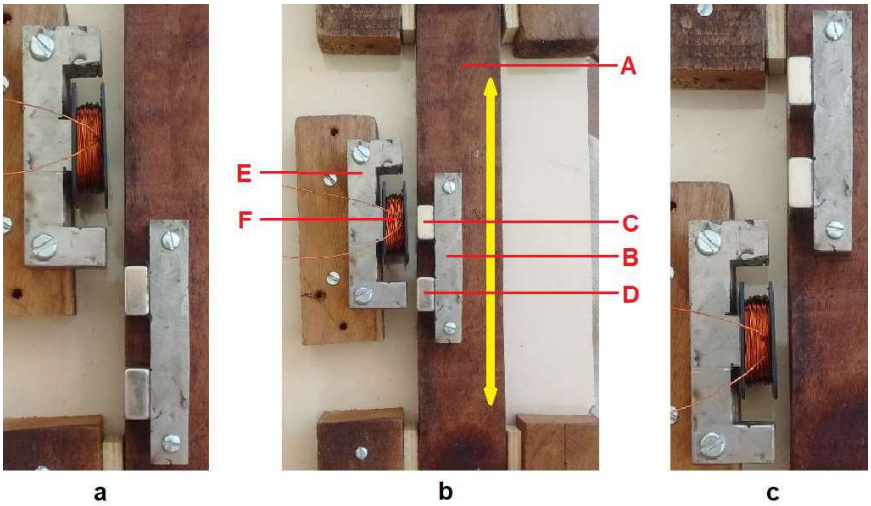


Fonte: Autores

Os parâmetros utilizados no software Maxwell foram: *iron* para as partes ferromagnéticas, NdFe35 para os ímãs e *copper* para a composição da bobina. Todos da biblioteca padrão do *software*.

Após simulações o protótipo da Figura 12 foi construído.

Figura 12 – Primeiro protótipo

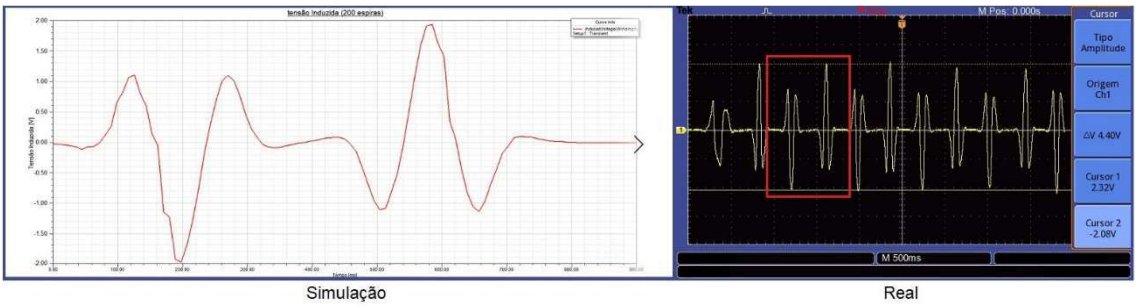


Fonte: Autores

A Figura 12b demonstra a estrutura do primeiro protótipo onde o translador é representado por A. As partes B, C e D pertencem a este translador e as demais partes ao estator. Através das Figuras 12a e 12c é possível identificar os dois extremos do movimento de translação. As partes B e E foram confeccionadas com sobreposição de cortes de lâminas retiradas de transformadores de baixa potência. F é uma bobina de fio de cobre esmaltado enrolada em um carretel plástico, C e D são ímãs NdFeB grau N35 montados com polaridades alternadas. A distância utilizada inicialmente entre a face de um dos ímãs e a parte E foi de 5 mm. Um ciclo completo de translação corresponde a um deslocamento total de 400 mm, 200 mm de descida e 200 mm de subida. Grande parte da estrutura deste gerador foi construída em madeira para evitar a interação com o circuito magnético.

A Figura 13 mostra as formas de onda para a tensão induzida numa bobina de 200 espiras de fio de cobre esmaltado com bitola 26 AWG e para uma frequência aproximada de 1,2 Hz (0,48 m/s). A figura da esquerda (Simulação), cópia da tela do *software*, representa um ciclo de translação com uma amplitude aproximada de 4,00 Vpp. Já a figura da direita (Real), cópia da tela do osciloscópio, apresenta vários ciclos gerados com a translação vertical do protótipo, onde uma amplitude de 4,40 V pico a pico (Vpp) foi alcançada. Fazendo uma comparação entre o real e o simulado neste caso, encontrou-se um coeficiente de variação de 10%.

Figura 13 – Formas de onda da tensão induzida, simulada e real



Fonte: Autores

Alguns testes foram realizados com este protótipo, tanto na simulação quanto na prática. Diferentes quantidades de espiras foram testadas para uma frequência de translação aproximada de 1,2 Hz. Os resultados podem ser vistos na Tabela 02.

Tabela 02 – Tensões induzidas em diferentes espiras para f = 1,2 Hz

Quantidade de espiras (26AWG)	Tensão induzida em Vpp (Simulação)	Tensão induzida em Vpp (Real)	Coeficiente de Variação
20	0,38	0,46	21%
40	0,80	0,92	15%
80	1,60	1,74	9%
200	4,00	4,40	10%

Fonte: Autores

Colocando o protótipo para transladar numa frequência aproximada de 2,2 Hz (0,88 m/s) com bobinas de 20, 40, 80 e 200 espiras de fio 26 AWG, encontrou-se 0,66 Vpp, 1,42 Vpp, 2,96 Vpp e 7,12 Vpp respectivamente. Quando a distância entre o ímã e o estator foi reduzida de 5 mm para 3 mm foi possível medir na bobina de 200 espiras uma tensão de 6,40Vpp para a frequência de 1,2 Hz e 11,00Vpp para 2,2 Hz.

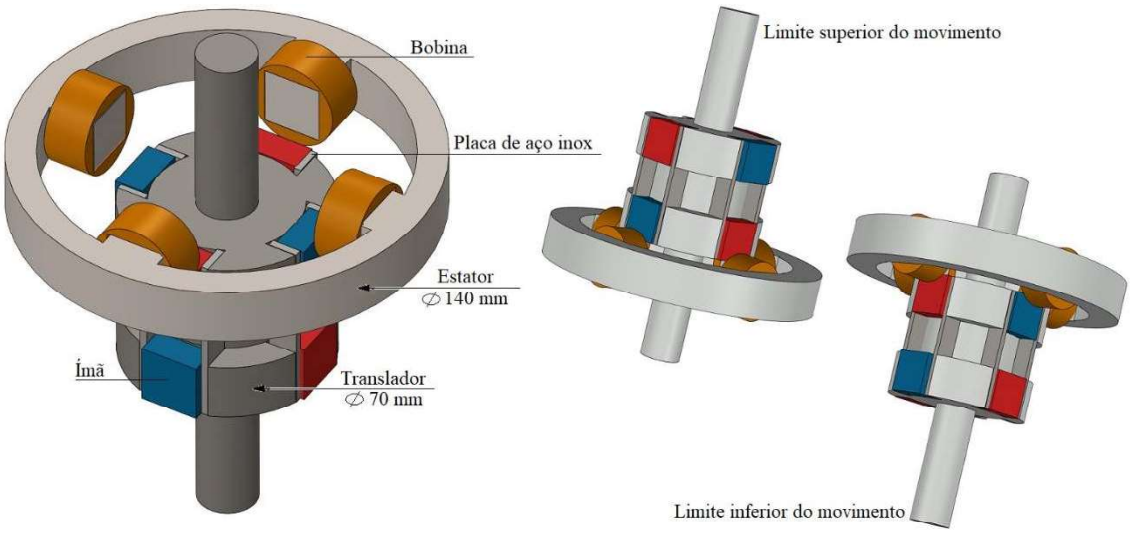
4.4.2. Simulação e testes com o protótipo final

Este modelo inclui algumas modificações em relação aos modelos propostos e realizados por Schutte (2011) e Cunha *et al*. (2017). A principal modificação é o afastamento de um ímã em relação ao outro que se encontra verticalmente posicionado. O afastamento foi de 20 mm, ou seja, neste espaço deixado caberia exatamente outro ímã. Um ciclo completo de translação corresponde a um deslocamento total de 160 mm, 80 mm de descida e 80 mm de subida. A simulação através da Análise

de Elementos Finitos permitiu uma previsibilidade de resultados antes mesmo da montagem deste protótipo final.

A Figura 14 representa o conjunto estator/translador, com algumas informações, pensado e desenvolvido após conclusões de simulação. Também é possível visualizar os limites superior e inferior do movimento de translação. Na parte que corresponde ao translador há oito ímãs instalados com polaridades alternadas e placas de aço inox nas laterais de cada par de ímãs. Tanto o estator quanto o translador foram confeccionados com material reaproveitado de motores de ventiladores, compostos por liga ferromagnética aço-silício. Este gerador linear de ímãs permanentes monofásico ainda possui quatro bobinas de fio de cobre, 26 AWG, com 200 espiras cada, ligadas em série. Para fixação das partes foram usadas peças plásticas e resina Epóxi.

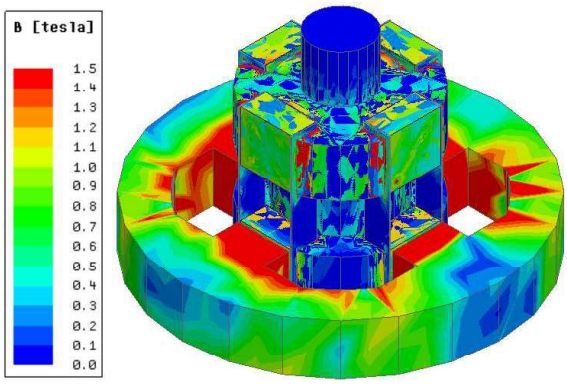
Figura 14 – Conjunto Estator/Translador



Fonte: Autores

O projeto foi submetido à simulação e na Figura 15 pode ser vista a densidade de fluxo magnético B [Tesla] na máquina. Os pontos de maior intensidade são os locais de instalação das bobinas. O *software* utilizado não permite a simulação, em regime transiente, para corpos cilíndricos. As partes que deveriam ser cilíndricas foram simuladas com base em poliedros regulares de 24 segmentos.

Figura 15 – Densidade de fluxo magnético

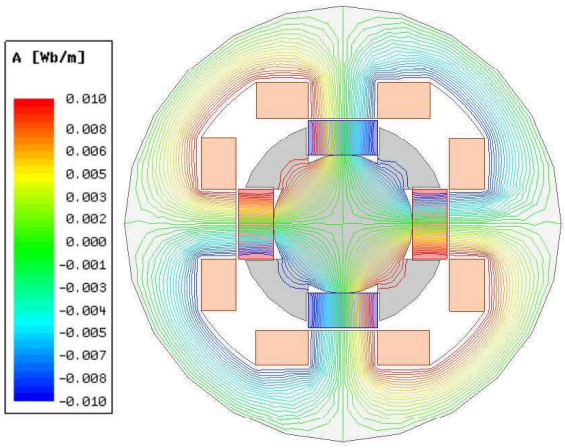


Fonte: Autores

Os parâmetros utilizados no software foram: *iron* para as partes ferromagnéticas, NdFe35 para os ímãs, *copper* para a composição da bobina e *steel_stainless* para as placas nas laterais dos ímãs. Todos da biblioteca padrão do software.

Já na Figura 16 é possível visualizar as linhas de fluxo magnético A [Wb/m] para uma vista superior do protótipo. A figura corresponde ao exato momento em que os ímãs superiores se encontram alinhados com o estator.

Figura 16 – Linhas de fluxo magnético no conjunto estator/translador



Fonte: Autores

A simulação em regime transitório exige uma carga de processamento bem elevada. Dependendo da máquina que esteja rodando o *software*, a simulação pode levar horas ou até mesmo travamentos podem acontecer. Portanto, em simulações complexas, se faz necessário o uso de máquinas com excelente capacidade de trabalho.

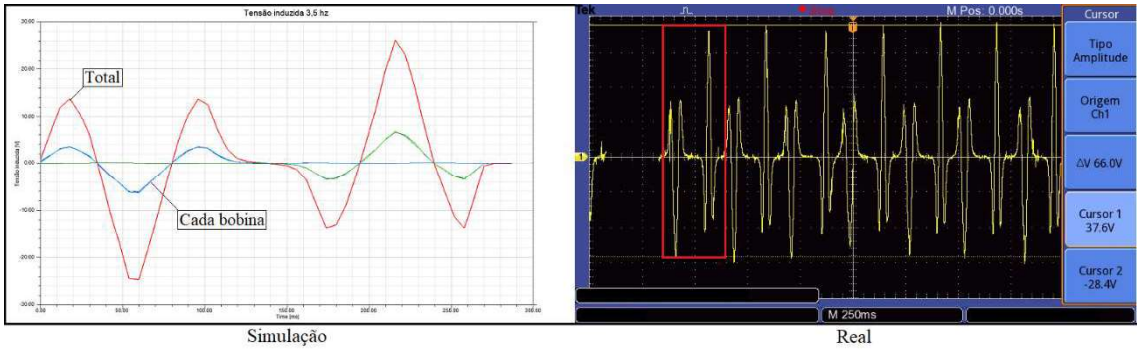
A Figura 17 mostra diferentes vistas do protótipo já construído.

Figura 17 – Protótipo final do gerador linear

Fonte: Autores

A Figura 18 mostra as formas de onda da tensão induzida para uma frequência aproximada de 3,5 Hz. A figura da esquerda (Simulação), cópia da tela do *software*, representa um ciclo de translação com uma amplitude aproximada de 52 Vpp. Já a figura da direita (Real), cópia da tela do osciloscópio, apresenta vários ciclos gerados onde uma amplitude de 66 Vpp foi alcançada. Fazendo uma comparação entre o simulado e o real, encontramos um coeficiente de variação de 27% para esta situação.

Figura 18 – Formas de onda da tensão induzida, simulada e real



Fonte: Autores

O gerador linear foi testado com três diferentes frequências de translação e os resultados podem ser verificados na Tabela 03. Como carga foi utilizado um resistor com substrato de Óxido de Berílio devido a sua característica de baixa reatância.

Tabela 03 – Tensão induzida no conjunto de bobinas

		Sem carga		Com carga de 50 Ohms	
Frequência de translação (Hz)	Velocidade de translação (m/s)	Tensão induzida nas 4 bobinas (Vpp)	Tensão induzida nas 4 bobinas (VRMS)	Tensão induzida nas 4 bobinas (Vpp)	Tensão induzida nas 4 bobinas (VRMS)
1,5	0,24	38	8,1	26	6,1
2,5	0,40	44	9,4	35	7,7
3,5	0,56	66	13,1	54	10,4

Fonte: Autores

Com os dados da Tabela 03 e o conceito da Equação (5) é possível verificar que, à medida que a variação do fluxo aumenta (frequência aumenta), a tensão induzida nas bobinas também aumenta. A tensão induzida em cada bobina corresponde a ¼ da tensão total gerada. Quando uma carga é utilizada, já é esperado que a tensão gerada pelo equipamento tende a redução.

Quando se compara os valores encontrados durante simulação aos valores medidos com o auxílio do osciloscópio, verificamos diferenças significativas com base nos coeficientes de variação, Tabela 04. Estes coeficientes são relativamente maiores que os encontrados no primeiro protótipo devido à quantidade de variáveis envolvidas em cada projeto. Em ambos os casos, a tensão gerada esteve maior que a simulada.

Tabela 04 – Comparação entre simulação e real (sem carga)

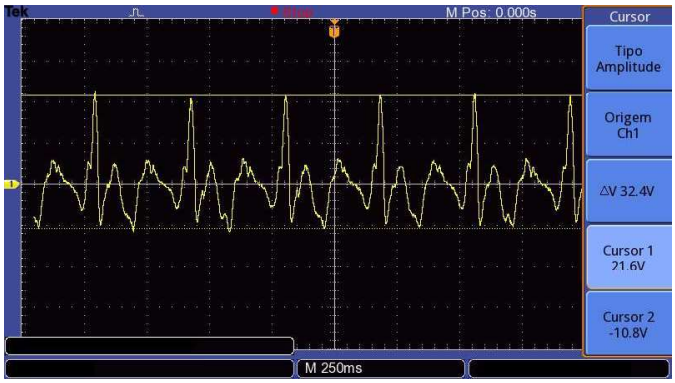
Frequência de translação (Hz)	Tensão total induzida em Vpp (Simulação)	Tensão total induzida em Vpp (Real)	Coeficiente de Variação
1,5	26	38	46%
2,5	35	44	26%
3,5	52	66	27%

Fonte: Autores

Uma das dificuldades encontrada na construção deste protótipo é o perfeito alinhamento entre translador e estator. Na Figura 19 pode ser vista a forma de onda da tensão gerada quando o desalinhamento estava presente, neste caso o translador tocava o estator tanto na descida quanto na subida gerando uma forma de onda ruidosa quando comparada com a Figura 18. Um outro fato é o deslocamento do translador menor que 80 mm, isto é, os ímãs não saiam completamente da direção do estator. Sem falar que o deslocamento não estava simétrico, condição que pode ser percebida na mesma Figura 19 pela falta de simetria da forma de onda. Este teste foi realizado para uma frequência de 2,5 Hz (sem carga) e alcançou uma tensão de 32 Vpp (7,4 V_{RMS}). Quando comparado com a mesma

frequência de translação da Tabela 03, podemos notar uma perda de 21,3% na tensão rms gerada devido ao problema existente.

Figura 19 – Forma de onda com gerador desalinhado



Fonte: Autores

5. CONCLUSÃO

O Gerador Linear tem sido parte fundamental em projetos recentes de Conversores de Energia das Ondas e isto foi comprovado com o levantamento realizado na base do IEEE. A estrutura tubular se demonstrou mais presente nos trabalhos em diferentes países. As simulações através da Análise de Elementos Finitos, tanto no primeiro protótipo quanto no protótipo final, foram de grande importância para a aprendizagem e montagem dos equipamentos. O primeiro protótipo, por ser mais simples e ter menor quantidade de variáveis envolvidas, teve um baixo coeficiente de variação para as tensões geradas quando comparados valores de simulações e testes.

O protótipo final foi idealizado e montado com reaproveitamento de material reciclável, logo não foi possível realizar uma comparação plena com os trabalhos de Schutte (2011) e Cunha *et al.* (2017). Schutte utilizou oito ímãs de NdFeB N40 de volume seis vezes maior e realizou seu teste com uma frequência de translação de 10 Hz, frequência esta não suportada pelo protótipo deste trabalho. Já Cunha *et al.*, realizaram uma montagem semelhante, com oito ímãs do mesmo modelo, e concluiram que para uma rotação de 160 rpm do translador gerou uma tensão de pico de 48,5 V. Essa rotação corresponde a uma frequência de 5,3 Hz da forma de onda da tensão gerada. Apesar de não ter ocorrido testes nesta mesma frequência, estes dados comprovam um ganho significativo de energia produzida no atual gerador. Sob o ponto de vista qualitativo, Cunha *et al.* perceberam uma presença maior de

harmônicos, assim como falta de simetria devido a sua topologia (algo próximo à Figura 19). Essa característica não esteve tão presente na tensão gerada da Figura 18.

O gerador linear do protótipo final se demonstrou adequado para a utilização em um WEC do tipo *Point Absorber*. Um desafio percebido durante a montagem seria o encapsulamento mecânico projetado para manter o gerador íntegro em alto mar. A vedação do equipamento para evitar o contato com a água ou até mesmo o efeito salino terá grande importância numa geração contínua e ininterrupta de energia por esta máquina.

A forma de onda gerada pelo protótipo final aqui descrito, sob o ponto de vista qualitativo, possui conteúdo harmônico. Essa característica decorre da topologia utilizada. Para continuidade do trabalho, sugere-se uma retificação da tensão gerada, assim como em Hultman e Leijon (2014). Testes com diferentes cargas poderão ser realizados para verificar a potência entregue pelo gerador, respeitando seus limites construtivos. Perdas no cobre também poderão ser mensuradas durante estes testes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BASHIR, S. Md.; FARROK, O.; ISLAM, R. Md.; ZHU, J. N28EH Permanent Magnet Based Linear Generator to Prevent Demagnetization During Oceanic Wave Energy Conversion. In: 2018 21st International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2018, Jeju, Korea. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 15 mai. 2019.

BASHIR, S. Md.; FARROK, O. Yttrium Barium Copper Oxide Superconductor Used in a Linear Generator for High Power Generation from the Oceanic Wave. In: 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 14 mai. 2019.

CUNHA, I. P. C.; MOREIRA, M. A. C.; SANTOS, R. C.; SANTOS, J. A. M. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 19, n. 2, 2017.

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Power and Energy**, vol. 223, 2009.

FAIZ, J. & NEMATSABERI, A. Linear electrical generator topologies for direct-drive marine wave energy conversion - an overview. **IET Renewable Power Generation**, vol. 11, no. 9, 2017.

FAIAD, A. A. & GOWAID, I. A. Linear generator technologies for wave energy conversion applications: A review. IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 12 mai. 2019.

FARROK, O.; ISLAM, Md. R.; SHEIKH, Md. R. I.; GUO, Y.; ZHU, J.; XU, W. A Novel Superconducting Magnet Excited Linear Generator for Wave Energy Conversion System. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 26, no. 7, 2016.

FARROK, O.; ISLAM, Md. R.; SHEIKH, Md. R. I.; GUO, Y.; ZHU, J. G. A Split Translator Secondary Stator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, vol. 65, no. 9, 2017.

GAO, Y.; SHAO, S.; ZOU, H.; TANG, M.; XU, H.; TIAN, C. A fully floating system for a wave energy converter with direct-driven linear generator. **Energy**, vol. 95, 2016.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física 3**. Brasil: LTC Editora, 1993. 350 p.

HUANG, L.; CHEN, M.; WANG, L.; YUE, F.; GUO, R.; FU, X. Analysis of a Hybrid Field-Modulated Linear Generator For Wave Energy Conversion. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 28, no. 3, 2018.

HULTMAN, E.; LEIJON, M. A cable feeder tool for robotized cable winding. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, vol. 30, 2014.

JOUBERT, L. H.; SCHUTTE, J.; STRAUSS, J. M.; DOBSON, R. T. Design Optimisation of a Transverse Flux, Short Stroke, Linear Generator. IEEE, 2012. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 10 mai. 2019.

KHAN, N.; KALAIR, A.; ABAS, N.; HAIDER, A. Review of ocean tidal, wave and thermal energy technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, vol. 72, 2017.

KRAUS, J. D. & CARVER, K. R. **Electromagnetics**. Japão: Mcgraw Hill Kogakusha Ltd., 1981. 828p.

LI, W.; LI, A.; FENG, H.; HUANG, S.; WANG, J.; ZHU, MINGGANG. The Study on Grain-Boundary Microstructure of Sintered (Ce, Nd)–Fe–B Magnets. **IEEE Transactions on Magnetics**, vol. 51, no. 11, 2015.

MARTINS, E. B. S.; MOREIRA, M. A. C. Avaliação de requisitos para montagem de um protótipo de conversor de energia das ondas do tipo point absorber. In: 11º SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, 2018a, Porto Alegre. **Anais eletrônicos...** Disponível em: http://www.abes-rs.uni5.net/centraldeeventos/_arqTrabalhos/trab_2_5585_20180803181326.pdf . Acesso em: 15 mar. 2019.

_____. Conversão de energia das ondas: uma atualização da tecnologia utilizada e variáveis consideradas para a construção e instalação de geradores do tipo Point Absorbers. In: XIV CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO & V INOVARSE, 2018b, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Disponível em: < http://sistema.inovarse.org/Anais/download/580 >. Acesso em 10 mar. 2019.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Reino Unido: Oxford University Press, 1989. 207p.

MOLLA, S.; FARROK, O. Use of High Flux Density Ferromagnetic Cores in Linear Generators for Oceanic Wave Energy Conversion. In: 2019 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE), 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 11 abr. 2019.

QUEVEDO, C. P. **Eletromagnetismo**. Brasil: McGraw-Hill do Brasil LTDA, 1977. 355p.

RAIHAN, M. A. H.; BAKER, N. J.; SMITH, K. J.; ALMORAYA, A. A. Development and Testing of a Novel Cylindrical Permanent Magnet Linear Generator. IEEE, 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 11 mai. 2019.

SCHUTTE, J. **Optimisation of a transverse flux linear PM generator using 3D Finite Element Analysis**. Stellenbosch – África do Sul, 100p., 2011. Dissertação (Mestrado) - Stellenbosch University.

WAHYUDIE, A.; SUSILO, T. B.; JEHANGIR, S. S. Design of A 100 W Mini Permanent Magnet Linear Generator for Wave Energy Converter System. In: 2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA), 2018. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org> Acesso em: 05 abr. 2019.

WESCHENFELDER, F.; PAULETTI, P.; BITTENCOURT, S. D.; PELEGRINI, L.; ITO, D. K.; SCHAEFFER, L. Situação atual e perspectivas da produção de ímãs permanentes e reservas de terras raras: brasil × mundo. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, vol. 9, no. 4, 2012.

XIA, T.; Yu, H.; GUO, R.; LIU, X. Research on the Field-Modulated Tubular Linear Generator With Quasi-Halbach Magnetization for Ocean Wave Energy Conversion. **IEEE Transactions on Applied Superconductivity**, vol. 28, no. 3, 2018.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS DA DISSERTAÇÃO

DEAN, R. G.; DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. USA: World Scientific, 1991. 353 p.

ALRABGHI, A.; TIWARI, A. State of the art in simulation-based optimisation for maintenance systems. **Computers & Industrial Engineering**, vol. 82, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Artigo Científico publicado no XIV Congresso Nacional de Excelência em Gestão & V INOVARSE. Rio de Janeiro, 2018.

TÍTULO: CONVERSÃO DE ENERGIA DAS ONDAS: UMA ATUALIZAÇÃO DA TECNOLOGIA UTILIZADA E VARIÁVEIS CONSIDERADAS PARA A CONSTRUÇÃO E INSTALAÇÃO DE GERADORES DO TIPO *POINT ABSORBERS.*

APÊNDICE 2: Artigo Científico publicado no 11º Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental. Porto Alegre, 2018.

TÍTULO: AVALIAÇÃO DE REQUISITOS PARA MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO *POINT ABSORBER*.

CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO
ISSN 1984-9354
&
INOVARSE

Wave energy conversion: an update of the used technology and variables considered for the construction and installation of Point Absorbers generators.

Eduardo Beline da Silva Martins
eduardobeline@iff.edu.br

Marcos Antonio Cruz Moreira
macruz@iff.edu.br

In the search of the use of clean and renewable energy for the environmental sustainability, the sea waves gain the importance due to present a potential still little explored in world scale. The study carried out in this work will serve as the basis for the construction of a prototype of a Point Absorber wave energy converter, with the potential to innovate technologically in the field of electric energy generation from wave energy. We have seen here which resources were used by experts around the world and what variables were considered for the construction of this equipment in the last year.

Keywords: Energy, Waves, Environment, Sustainability, Maintenance.

CONGRESSO NACIONAL DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO
ISSN 1984-9354
&
INOVARSE

Conversão de energia das ondas: uma atualização da tecnologia utilizada e variáveis consideradas para a construção e instalação de geradores do tipo Point Absorbers.

Área Temática: 3. GESTÃO AMBIENTAL & SUSTENTABILIDADE

Eduardo Beline da Silva Martins
eduardobeline@iff.edu.br

Marcos Antonio Cruz Moreira
macruz@iff.edu.br

Em busca da utilização de energia limpa e renovável para a sustentabilidade ambiental, as ondas do mar ganham importância por apresentarem um potencial ainda pouco explorado em escala mundial. O estudo realizado neste trabalho servirá de base para a construção de um protótipo de um Conversor de Energia das Ondas do tipo Point Absorber, com potencial para inovar tecnologicamente no campo da geração de energia elétrica a partir da energia das ondas. Vimos aqui quais recursos foram utilizados por especialistas em várias partes do mundo e quais variáveis foram consideradas para construção deste equipamento no último ano.

Palavras-chave: Energia, Ondas, Meio Ambiente, Sustentabilidade, Manutenção.

1. INTRODUÇÃO

Visando um consumo de energia limpa e sustentável numa localidade caracterizada pela cultura do hidrocarboneto, os conceitos aqui levantados serão aplicados à região norte fluminense seriamente modificada pelo processo de implantação da indústria do petróleo, que, por sua vez, se impôs ao modelo de produção do cultivo da cana-de-açúcar (LOUREIRO *et al.*, 2014). Segundo dados levantados por Fleming (2012) sobre o potencial teórico de energia de ondas para o litoral brasileiro, o litoral fluminense é o que apresenta o maior potencial total de energia na ordem de 11,82GW, correspondente a 13% do potencial total brasileiro.

Ao realizar uma projeção de consumo de energia primária mundial para o ano de 2035, estima-se que o consumo primário de energia brasileira será 33% superior, quando comparado com 2011. Nesse cenário, o petróleo nas suas formas de óleo e gás participará com 50,5% da oferta (WASSERMAN *et al.*, 2017).

Uma série de tecnologias emergentes possuem escala de utilização e podem oferecer significativo potencial, como: energia solar concentrada, vento *offshore*, geotérmica e marinha. Esta última ainda permanece subexplorada em escala mundial e tem a Coréia do Sul como o país que mais a utiliza (EY, 2018).

O potencial global da energia oceânica é estimado em 337 GW; mais de 885 TWh de eletricidade podem ser gerados a partir desse potencial anualmente (MELIKOGLU, 2018). Em escala global, as fontes de energia dos oceanos têm os seguintes potenciais: marés com 800 TWh por ano; gradiente de salinidade com 2000 TWh por ano; ondas estão entre 8.000 e 80.000 TWh por ano e as fontes térmicas entre 10.000 e 87.600 TWh por ano, cujo potencial total é significativamente maior do que a demanda global de eletricidade de 16.000 TWh por ano (KHAN *et al*., 2017). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se que, se implantadas em todo o mundo, as tecnologias oceânicas poderiam atender à atual demanda mundial de eletricidade. Embora muitas tecnologias e dispositivos tenham sido demonstrados por meio de projetos piloto, a produção em nível de comercialização é lenta devido a custos relativamente altos, sem falar nas preocupações com questões ambientais em águas costeiras, como os riscos para mamíferos marinhos e habitats (IEA, 2018).

Segundo Cunha *et al.* (2017) a energia das ondas é captada por dispositivos chamados de forma genérica de Conversores de Energia das Ondas - WEC (*Wave Energy Converters*). Há divergências sobre o melhor método de extração de energia das ondas (DREW *et al.*, 2009), onde pesquisas como a de Ayob *et al*. (2018) apontam o *Point Absorber* como

alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção da onda quando comparado a outro WEC.

Realizou-se uma revisão bibliográfica em bases de dados científicas para verificar possíveis ferramentas, materiais construtivos, métodos e recursos utilizados, no último ano, para construção de um conversor do tipo *Point Absorber*. Artigos nacionais e internacionais publicados recentemente e analisados poderão colaborar para o projeto de um protótipo do conversor citado.

2. OBJETIVO

Identificar a partir de estudos recentes, no cenário mundial, tendências tecnológicas acerca do Conversor de Energia das Ondas do tipo *Point Absorber*.

3. MÉTODO

Uma pesquisa exploratória e bibliográfica foi realizada com a finalidade de se elaborar a concepção de aspectos relevantes para a construção de um conversor do tipo *Point Absorber*. Apresentam-se também resultados de estudos realizados anteriormente e que estão relacionados com esta proposta, não com a finalidade de esgotar o conteúdo e debatê-lo, mas com o intuito de clarificar o tema em questão para o adequado entendimento de seus resultados. Nesta fase a pesquisa foi feita em bases científicas com artigos nacionais e internacionais atualizados.

4. RESULTADOS

4.1 SITUAÇÕES ATUAL E FUTURA DA GERAÇÃO A PARTIR DA ENERGIA DAS ONDAS

Análises detalhadas mostraram que o potencial global anual de diferentes fontes de energia oceânica é significativamente maior do que nossa demanda global anual de eletricidade. Como resultado, muitos países pretendem utilizar fontes de energia oceânica para geração de energia elétrica. No entanto, isso não é possível em larga escala porque a maioria das tecnologias de energia oceânica ainda está em desenvolvimento e há muitos problemas

econômicos, técnicos e ambientais a serem resolvidos, justificando a pesquisa e o desenvolvimento em engenharia de energia oceânica fomentados pelos governos e pelo setor privado em todo o mundo. Assim podemos usar essas fontes de energia renováveis, confiáveis e limpas para suprir nossa crescente demanda global por eletricidade, concomitantemente à busca de um futuro sustentável (MELIKOGLU, 2018).

- Capacidade atual de geração de eletricidade: A Tabela 1 apresenta a geração de energia elétrica global a partir da energia das ondas e marés entre os anos de 2012 e 2015.

Tabela 1 – Geração de energia elétrica a partir de ondas e marés em diferentes regiões do Mundo

Regiões do Mundo	Geração de eletricidade a partir de ondas e marés, Bilhão de KWh			
	2012	2013	2014	2015
Africa	0	0	0	0
Asia & Oceania	(s)	0.5	0.5	0.5
Central & South America	0	0	0	0
Eurasia	0	0	0	0
Europe	0.5	0.4	0.5	0.5
Middle East	0	0	0	0
North America	(s)	(s)	(s)	(s)
World	0.5	0.9	1	1

(s) Muito pequeno, desconsiderado.

Fonte: EIA, 2018. Adaptada pelos autores

Como pode ser visto, segundo a agência americana (EIA), a América do Sul não possui registro de geração de energia elétrica oriunda de ondas e marés. Porém em 2012, o projeto denominado Usina de Ondas e desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) na Universidade Federal do Rio de Janeiro funcionou experimentalmente no Porto do Pecém no estado do Ceará e tinha capacidade de produzir 100MW de potência (COPPE, 2018).

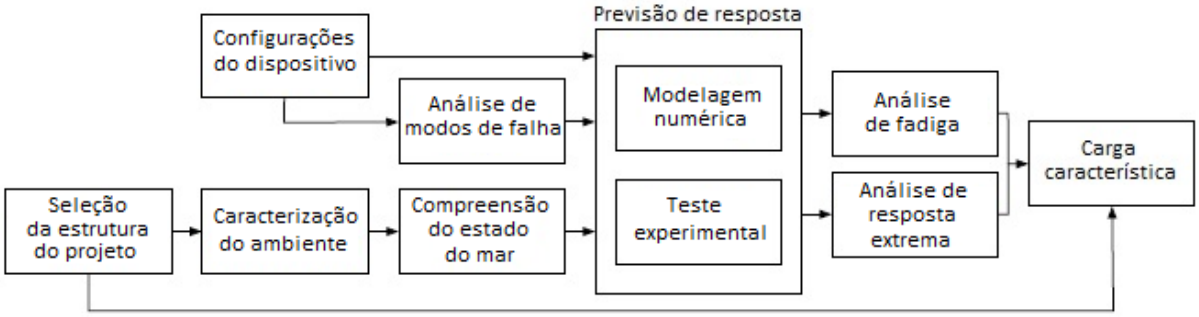
- O futuro da geração a partir da energia das ondas: os custos dos conversores de energia das ondas são muito altos quando comparados a outras tecnologias renováveis, e essa é uma das maiores desvantagens diante da comercialização desses novos dispositivos (CONTESTABILE *et al.*, 2017). A vida útil dos sistemas conversores de energia das ondas deve ser melhorada; especialmente, a vida útil das formas de ancoragem e cabos elétricos usados nesses sistemas. Além disso, problemas relacionados à fadiga e à bioincrustação marinha devem ser resolvidos (YANG *et al.*, 2017).

4.2 CONFIABILIDADE E OPERACIONALIDADE DO EQUIPAMENTO

As condições de operação de um WEC são muito severas. O equipamento deve ser projetado para funcionar eficientemente em ambientes marítimos um tanto hostis. Isto representa um problema de engenharia desafiador, compreendendo análise sistemática do modo de falha, caracterização ambiental, modelagem, teste experimental, fadiga e análise de resposta extrema (COE *et al.*, 2018).

Para auxiliar na construção de um WEC, um diagrama de fluxo de trabalho generalizado é mostrado na Figura 1. Este diagrama ilustra as principais etapas na determinação das cargas características de um Conversor de Energia das Ondas. Estas cargas podem ser avaliadas em relação às capacidades estruturais.

Figura 1 – Fluxo de trabalho generalizado para o projeto de um WEC



Fonte: COE, 2018. Adaptada pelos autores

Cada bloco foi esclarecido por Coe *et al.* (2018) da seguinte forma:

- Configurações do dispositivo: Essas configurações visam reduzir possíveis danos aos dispositivos durante situações extremas do mar. Nesta etapa foi mencionada a norma IEC TS 62600-2:2016 da Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC) que fornece os requisitos essenciais de projeto para garantir a integridade da engenharia dos conversores de energia de ondas, marés e outros. Padroniza um nível adequado de proteção contra danos que podem levar a falhas dos elementos estruturais, fundação, amarração e âncoras e flutuabilidade do dispositivo (IEC, 2018).

- Análise de modos de falha: Para esta etapa, utiliza-se metodologias específicas para identificar possíveis modos de falha em um sistema de engenharia, além de estimar cronogramas de manutenção.

- Estrutura do projeto: Uma área de interesse para o projeto de um WEC é verificar quais casos devem ser avaliados para determinar as cargas de projeto e, consequentemente, como as respostas previstas nesses casos devem ser interpretadas para produzir uma carga característica.

- Caracterização do ambiente: Caracterizar o ambiente de implementação de um dispositivo WEC representa uma etapa crucial na sua construção. Uma série de fatores se combinam para tornar o oceano um ambiente desafiador sob o ponto de vista da engenharia.

- Compreensão do estado do mar: Uma vez definida a estrutura do projeto, precisamos conhecer o comportamento das ondas para permitir a previsão de resposta por meio de testes experimentais e modelagem. Nesta etapa devemos identificar padrões de ondas aos quais nosso conversor será submetido.

- Modelagem numérica: A utilização de *softwares* simuladores ganha importância nesta etapa. São ferramentas importantes que podem ajudar um projetista a avaliar a importância relativa de diferentes fenômenos físicos para seu dispositivo, proporcionando uma análise apropriada.

- Teste experimental: Permite uma avaliação importante sobre o estágio de desenvolvimento da tecnologia. Sugere-se que o teste de funcionamento do WEC, feito inicialmente, seja realizado em pequena escala ($1/100 < \lambda < 1/25$) e durante a etapa de validação do projeto em escala média ($1/25 < \lambda < 1/10$), onde λ é o tamanho real. Trabalhar em uma escala menor permite que condições marítimas extremas sejam produzidas em tanques artificiais de ondas (HOLMES, 2009; ITTC, 2011 *apud* COE *et al.*, 2018).

- Fadiga: Durante seu ciclo de trabalho, um WEC poderá ser submetido a cargas extremas que poderão ocasionar danos estruturais e comprometer a vida útil projetada. Estes danos podem ser cumulativos e, eventualmente, levam a falhas estruturais.

- Análise de resposta extrema: Pode-se fazer uma análise estatística específica para sistemas marinhos a fim de encontrar as cargas do projeto. Devemos considerar a estrutura de projeto adotada e todas as condições de mar possíveis.

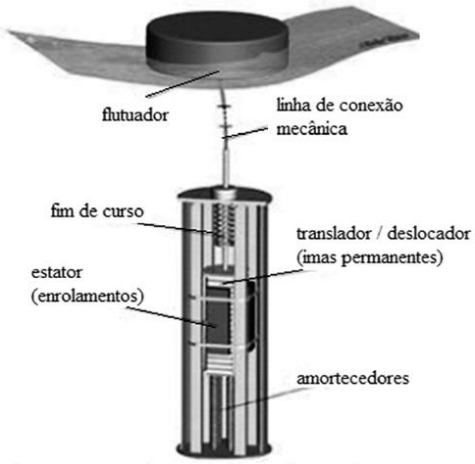
4.3 ESTRUTURA DO GERADOR

4.3.1 O CONVERSOR TIPO *POINT ABSORBER*

Em seu trabalho, Cunha *et al.* (2017) expõem um modelo simples e autêntico de um conversor *Point Absorber*, a Figura 2 mostra o princípio de funcionamento dessa instalação que consiste em um flutuador que se move de acordo com o movimento das ondas, sendo ligado a um sistema fixo, que possui a função de extrair parte da energia das ondas e converter em eletricidade.

O *Point Absorber* tem a capacidade de absorver energia em todas as direções através de seus movimentos na superfície da água. A energia do oceano é então convertida por sistemas mecânicos e/ou hidráulicos em movimento linear ou angular para deslocamento de geradores elétricos. Por sua característica original de movimento linear, é possível e conveniente o uso de um gerador linear para produção de energia elétrica, em vez de geradores rotativos convencionais (CUNHA *et al*., 2017).

Figura 2 – Esquema do WEC Point Absorber



Fonte: CUNHA *et al*., 2017

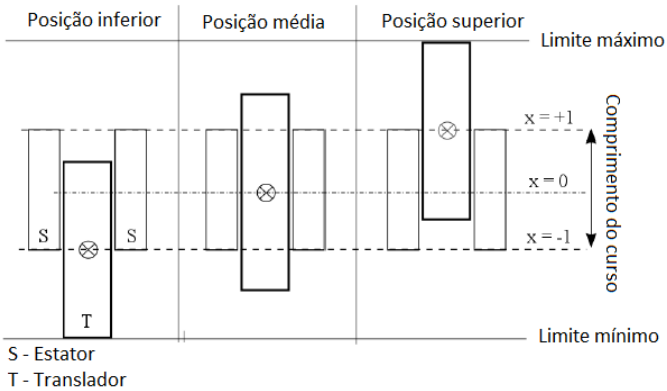
4.3.2 POSICIONAMENTO RELATIVO ENTRE O ESTATOR E O TRANSLADOR

Muitos conceitos diferentes para extração de energia das ondas estão sendo estudados e avaliados, como capturar melhor a energia das ondas do oceano e como converter essa energia para a eletricidade. Frost *et al.* (2017) consideraram um WEC do tipo *Point Absorber* com uma boia conectada a um gerador de ímã permanente linear. A boia é pequena quando comparada ao comprimento de onda, e pode capturar energia de qualquer direção de onda.

Devido a velocidade lenta e altamente variável em direções alternadas, a energia captada pelo equipamento não pode ser conectada a nenhum gerador rotativo convencional

sem adicionar uma etapa intermediária de conversão, o que aumentará a complexidade do sistema e as perdas. Um gerador linear pode aproveitar melhor o movimento da onda e, portanto, geradores lineares são usados em vários conversores diferentes de energia das ondas (OZKOP & ALTAS, 2017). Um ponto negativo dos geradores lineares é a posição relativa entre estator e translador, que pode ocorrer de forma prejudicial dependendo do projeto (PRADO & POLINDER, 2013 *apud* FROST *et al.*, 2017). A transferência de energia do translador para o estator ocorre quando o translador e o estator se sobrepõem, Figura 3. A fração do estator que momentaneamente é coberta pelo translador é denotada sobreposição relativa do estator ou área ativa relativa A_{frac} e é 1 quando o estator tem sobreposição total com o translador ou 0 quando o translador está completamente fora do estator.

Figura 3 – Posições relativas entre estator e translador. Na posição central, o estator é totalmente sobreposto pelo translador ($A_{frac} = 1$), e quando o translador está na sua posição inferior ou superior, o estator não é completamente sobreposto ($A_{frac} < 1$).



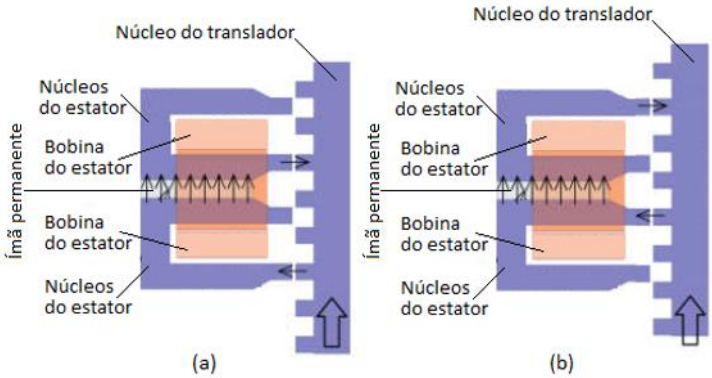
Fonte: FROST *et al.*, 2018. Adaptada pelos autores

Considerando uma potência elétrica (P_e) gerada, Frost *et al*. (2017), em seus testes, dizem que a teoria sugere uma relação quadrática entre P_e e A_{frac}, ou seja, P_e é proporcional a A_{frac}^2 se forem feitas simplificações e suposições. Essa dedução teórica se baseia no pressuposto de que a indutância do gerador não muda com A_{frac}, o que foi confirmado através de medições. Já no estudo experimental, concluiu-se que essa relação está entre uma proporção linear e uma proporção cúbica.

4.3.3 GERADOR LINEAR DE ÍMÃS PERMANENTES COM COMUTAÇÃO DE FLUXO (FSPMLG)

Quase todos os geradores lineares de ímã permanente com comutação de fluxo (FSPMLGs) contêm um translador pesado e sólido devido às suas limitações de projeto para geração de eletricidade a partir das ondas oceânicas (FARROK *et al*, 2017). Estes mesmos autores, a partir de um modelo dinâmico da onda oceânica, perceberam que o translador com menor massa poderia gerar eletricidade de forma mais efetiva. Para analisar o desempenho e verificar a viabilidade deste novo projeto proposto, precisa-se entender o funcionamento magnético do modelo convencional passível de melhoria que pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Modelo convencional. (a) Posição do translador em um determinado momento. (b) Posição do translador após alguns instantes.



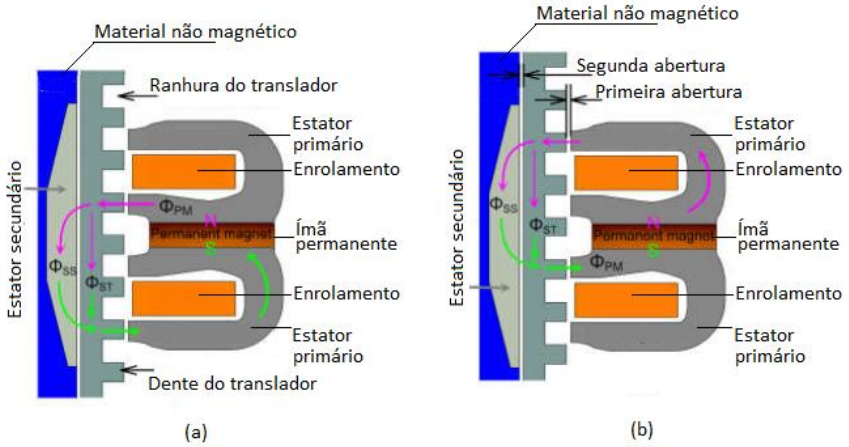
Fonte: FARROK *et al.*, 2017. Adaptada pelos autores

As direções das linhas de fluxo magnético são mostradas nas Figuras 4(a) e 4(b), através das setas, para duas posições diferentes do translador. Observa-se que, as linhas de fluxo percorrem na direção oposta no núcleo do estator para duas posições diferentes. Por outro lado, a posição vertical do translador muda devido à onda, mudando então a direção das linhas de fluxo. Portanto, a direção das linhas de fluxo muda ao redor das bobinas do estator com o tempo gerando energia elétrica (FARROK *et al*, 2017).

Uma melhoria foi proposta para o circuito magnético do FSPMLG convencional, onde a estrutura de aço do translador foi modificada com material não magnético e mais leve para simulações numéricas com o método de elementos finitos. Ímãs permanentes de NdFeB (Neodímio - Ferro - Boro) foram usados nesta simulação, com uma coercitividade magnética, $H_c = -837{,}5$ kA/m; remanência $B_{rem} = 1{,}129$ T; e permeabilidade relativa de $\mu_r = 1{,}045$ para produzir o fluxo magnético. As bobinas de enrolamento foram feitas de condutores de cobre e chapas de ferro-silício foram empregadas para construir os núcleos do estator e do translador.

Na Figura 5 podemos ver o gerador proposto em dois momentos diferentes.

Figura 5 – Modelo proposto. (a) Posição do translador em um determinado momento. (b) Posição do translador após alguns instantes.



Fonte: FARROK *et al.*, 2017. Adaptada pelos autores

Ao contrário do modelo convencional, o fluxo magnético total, Φ_{PM}, proveniente do estator primário, não retorna ao estator através do translador. Pelo contrário, uma parte do fluxo magnético total, Φ_{SS}, passa através do estator secundário e o resto do fluxo magnético, Φ_{ST}, percorre o translador. A cor azul representa material não magnético para limitação do fluxo. A principal diferença entre o modelo convencional e o proposto é que, a comutação do fluxo magnético ocorre apenas no núcleo do estator primário e não no núcleo do estator secundário.

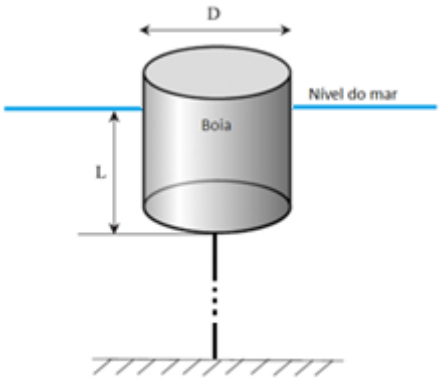
4.4 OTIMIZAÇÃO DA GEOMETRIA DA BOIA

Em seu trabalho, Henry *et al.* (2018), levantam uma questão importante quando estamos trabalhando com este tipo de conversor. Se a frequência natural do WEC é igual à frequência da onda, a captura de energia do conversor será maximizada. Na realidade, isso é bastante difícil de alcançar com boias (flutuadores) porque elas tendem a ter uma frequência natural muito alta, devido a sua alta rigidez e baixa massa adicionada. No caso do *Point Absorber*, a geometria da boia deve ser otimizada para o sistema oscilar na faixa de frequências de ondas predominantes no mar, permitindo máximas amplitudes de movimento possíveis para produzir mais potência (SHADMAN *et al*, 2018). Como o movimento do conversor é restrito e o fator de captura da energia também tem relação com a força da onda, há um contraste com a visão predominante da conversão de energia das ondas que negligencia a magnitude da força das ondas em favor da manutenção do estado de ressonância (HENRY *et al.*, 2018).

No trabalho realizado por Shadman *et al*.,(2018), um processo de otimização da boia é proposto para maximizar a potência absorvida pelo WEC e a largura de banda dessa absorção, proporcionando um período natural próximo aos períodos de ondas predominantes no local do mar. Este processo pode ser aplicado a diferentes tipos de WEC (SHADMAN *et al*, 2018).

Considerou-se uma boia de formato cilíndrico, com diâmetro D e parte submersa L (Figura 6).

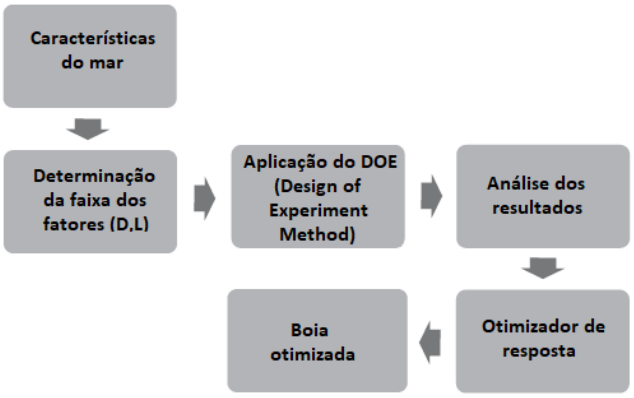
Figura 6 – Boia cilíndrica de diâmetro D e parte submersa L



Fonte: Autores

Na Figura 7 podemos entender como esse processo foi pensado.

Figura 7 – Processo de otimização da geometria da boia



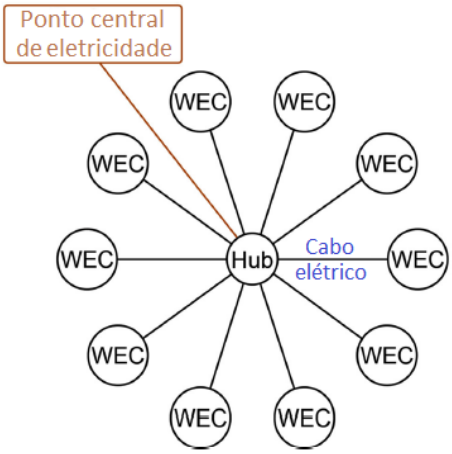
Fonte: SHADMAN *et al.*, 2018. Adaptada pelos autores

Projetar um dispositivo que auxilie o WEC estar ressonante com a onda é mais vantajoso que investir numa adaptação do conversor a uma determinada localidade.

4.5 CABOS DE TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Pensando mais adiante, uma matriz de WECs poderá ser montada, ou seja, vários conversores gerando energia elétrica ao mesmo tempo. Para isso se faz necessário uma quantidade maior de cabos elétricos para levar essa energia a um ponto central, *Hub* (Figura 8).

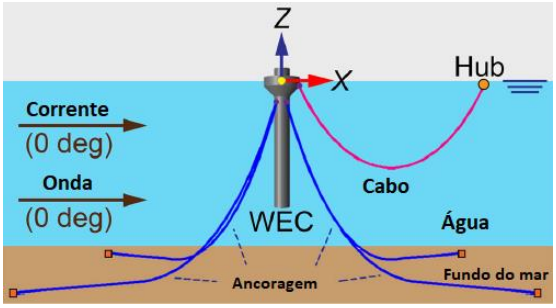
Figura 8 – Arranjo de WECs



Fonte: YANG *et al.*, 2018. Adaptada pelos autores

Analisar as características dinâmicas que estes cabos estão submetidos e estimar a vida útil deles no ambiente marinho se torna importante num projeto mais avançado com WECs. O cabo está sujeito a movimentação, tensionamento devido às conexões em ambas as pontas, cargas de ondas e correntes marinhas devido ao fato de estarem submersos (YANG *et al.*, 2018). Figura 9.

Figura 9 – Instalação de um WEC



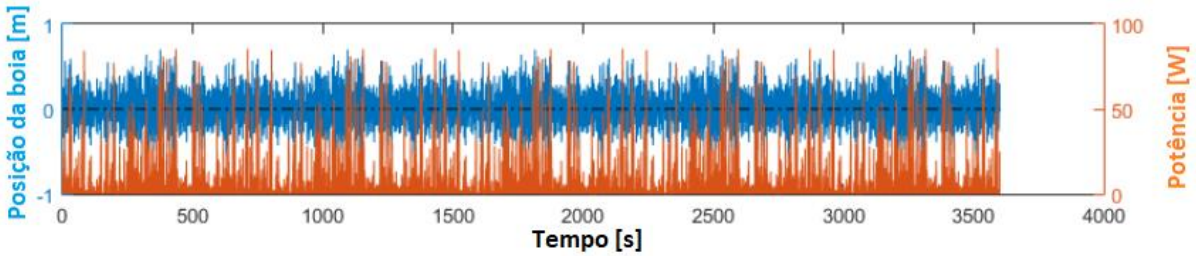
Fonte: YANG *et al.*, 2018. Adaptada pelos autores

4.6 POSSIBILIDADE DE UM SISTEMA HÍBRIDO DE GERAÇÃO

Com intuito de criar um sistema de geração de energia de pequeno porte para carregar uma bateria de 12V, Ayob *et al*. (2018) compararam três tipos de geração: *Oscillating Water Column* (OWC), *Point Absorber* e painel fotovoltaico. Os dois primeiros são modelos de WECs e extraem energia do mar e o terceiro do sol. Os resultados indicaram que o OWC era muito pequeno para a tarefa e não produziu energia suficiente. Por outro lado, os resultados mostraram que um sistema híbrido composto por um pequeno *Point Absorber* combinado com um sistema de energia solar foi suficiente para aquela demanda. Ambos se complementam, já que o *Point Absorber* produz energia suficiente por si só durante o inverno (e pouca no verão), enquanto o painel solar produz energia suficiente no verão (e pouca no inverno) (AYOB *et al*., 2018).

No teste de funcionamento de um *Point Absorber* cujo translador (eixo) está acoplado numa boia circular de 0,35m de diâmetro, 20kg e deslocamento vertical de 0,20m, observou-se um comportamento que pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 – Potência instantânea e posição da boia durante o teste



Fonte: AYOB *et al.*, 2018 adaptada pelos autores

Fazendo uma análise simples da Figura 10 podemos perceber que a potência instantânea média está abaixo dos 50 Watts. Um valor não muito interessante quando pensamos em carga elétricas do cotidiano, porém, para carga de uma bateria de 12V, demonstrou-se atrativa.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

As fontes de energia são a base para a sobrevivência humana. Certos recursos energéticos fósseis, como o petróleo, o gás natural e o carvão, são limitados e diminuirão no futuro. Além disso, o uso excessivo de energia fóssil convencional levará a uma grave poluição ambiental (WAN *et al.*, 2018). O oceano é uma rica fonte de recursos naturais renováveis e não renováveis, que proporcionaram inúmeros benefícios econômicos, sociais e

culturais ao longo da história e proporcionam grandes oportunidades para provisões futuras de benefícios (KLINGER *et al*. 2018). Para o enfrentamento das crises energéticas e da poluição ambiental, teremos que nos concentrar na exploração e utilização de fontes renováveis de energia. Existem várias fontes de energia abundantes e renováveis nos oceanos, como a energia das ondas discutida neste artigo. Uma exploração racional da energia das ondas poderá aliviar as crises energéticas e os problemas de poluição ambiental. Por essa razão, pesquisadores de várias partes do mundo realizam pesquisas sobre energia das ondas (WAN *et al.*, 2018).

Considerando as situações atual e futura da geração de energia a partir das ondas, existe um imenso potencial energético nos oceanos. A análise das bases científicas mostrou que nos oceanos encontramos diferentes fontes de energia com diferentes potenciais. No entanto, a revisão feita aqui também mostrou claramente que existem diferenças significativas entre as estimativas dos recursos energéticos dos oceanos na literatura publicada. Melikoglu (2018) sugere que um mapa ou banco de dados de potencial de recursos de energia oceânica global atualizado deve ser preparado pelas autoridades para evitar futuras incertezas. Em seu artigo, Melikoglu (2018), realça que a EIA informou que a capacidade total de energia das marés e das ondas no Mundo no ano de 2014 era de aproximadamente 2.730 MW. No entanto, este valor é maior que a capacidade global de energia oceânica relatada pela IEA para o mesmo ano, 530 MW. Pela dificuldade de se encontrar uma informação atualizada na literatura, o valor considerado deve ser aquele compreendido entre a capacidade relatada pela IEA e a relatada pela EIA.

Muitos países pretendem utilizar fontes de energia oceânicas para suprir sua crescente demanda de energia de maneira sustentável. No entanto, a maioria das tecnologias para explorar o poder dos oceanos ainda está em um estágio inicial de desenvolvimento e até mesmo as mais avançadas tecnologias de maré e ondas oceânicas ainda encontram problemas e obstáculos substanciais que podem ser superados com inovação, pesquisa e desenvolvimento (MELIKOGLU, 2018). É sabido que barragen de maré é uma tecnologia comprovada e testada; no entanto, seu uso é limitado devido a poucos lugares no mundo possuírem variação de maré necessária para uma vantajosa conversão de energia. Pesquisas sobre impactos ambientais dos dispositivos de energia renovável marinha ainda não podem ser feitas de forma completa porque esses dispositivos devem ser bem definidos e testados nos ambientes marinhos (ZANGIABADI *et al*., 2017). Espera-se que esses problemas sejam resolvidos e que a energia oceânica forneça uma quantidade significativa de eletricidade à nossa economia global. Pesquisa e desenvolvimento em engenharia de energia oceânica

devem ser fomentados por nações com acesso a essas fontes de energia renováveis, confiáveis e limpas.

Sobre a confiabilidade e operacionalidade do equipamento, foi apresentado um fluxo genérico de trabalho para o projeto de um WEC que nos permite avaliar a operacionalidade do equipamento de várias formas, bem como auxiliar aqueles que buscam definir especificações técnicas e padrões (COE *et al.*, 2017). Uma vez operacional, devemos pensar na manutenção do equipamento. A Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) é uma maneira econômica de manter sistemas complexos. A manutenção programada é parte vital do gerenciamento de ativos em sistemas de energia. Como as estratégias de manutenção têm efeito direto no custo de operação, um plano de manutenção adequado gerenciaria adequadamente o funcionamento das máquinas. Por outro lado, do ponto de vista da confiabilidade do sistema, a ação de manutenção seria crucial, porque o processo de deterioração gradual dos elementos de um sistema resultaria em perda de cargas e altos custos de substituição (MOSLEMI *et al.*, 2017). A RCM é um método de análise sistemática para o planejamento da manutenção preventiva no campo da gestão de equipamentos. Para garantir a implementação bem-sucedida deste método, ele precisa não apenas de uma teoria, mas também de ferramentas técnicas eficazes e convenientes. A identificação de itens significativos de manutenção é uma das principais fases da RCM, trata-se de uma triagem em que o número de itens para análise é reduzido, pois a maioria deles não tem influência direta no sistema geral (TANG *et al*., 2017).

Como o modelo de WEC que pretendemos construir é do tipo *Point Absorber* e este será com ímãs permanentes, uma simulação computacional será de grande importância antes de iniciarmos a montagem do protótipo. Farrok *et al.* (2017), propuseram modificações no circuito magnético de um FSPMLG de forma que a estrutura de aço do translador foi modificada com material não magnético e mais leve, o que além de reduzir o peso da estrutura, permitiu a geração de mais eletricidade, conforme simulações numéricas com o método de elementos finitos. A massa do novo translador foi 21,82% menor que a do convencional e a eficiência do gerador proposto foi de 5,86% maior do que o convencional sob as mesmas condições de onda.

Foi verificado também que o curso do translador em relação ao estator tem papel importante na geração de eletricidade. Segundo Frost *et al*. (2017), para fins práticos, podemos considerar uma relação quadrática entre a sobreposição relativa do estator e a potência elétrica gerada.

Notou-se também que investimentos em pesquisa acerca do conversor do tipo *Point Absorber* ainda são pequenos, mesmo quando consideramos o cenário global. Neto (2017) relatou teste realizado entre três máquinas lineares diferentes para aplicação em conversores de ondas: LFPM - Gerador de Ímã Permanente e Fluxo Longitudinal, Geradores Síncronos Tubulares de Ímãs Permanentes e Núcleo de Ar e TFPM – Gerador de Ímã Permanente e Fluxo Transverso. No teste foi constatado que o TFPM tem o menor tamanho e peso para uma mesma potência nominal e garante maior densidade de potência. Logo, uma Máquina de Fluxo Transversal (Gerador Linear) acoplada a um conversor do tipo Point Absorber é viável (CUNHA *et al*., 2017).

Em Shadman *et al*. (2018), percebemos que se quisermos construir um ou mais WECs que possam ser movidos de localidade, talvez a modificação do projeto ficaria inviável. Para isso podemos investir no projeto das boias para que um WEC possa trabalhar de forma adaptada e eficiente em diferentes condições de mar.

Tão importante quanto gerar energia é transportá-la até o consumidor, utilizar um cabo elétrico que seja resistente às condições de mar e ao mesmo tempo financeiramente viável será objeto de estudo futuro quando seu uso se tornar necessário. A metodologia desenvolvida por Yang *et al.* (2018) permite a investigação de um cabo relativamente curto e suspenso livremente na água para um sistema WEC. Devido à sua flexibilidade e características dinâmicas, o cabo que vamos utilizar é único em comparação com os cabos de alimentação subaquáticos tradicionais.

No espaço ocupado pelos oceanos, podemos encontrar vários tipos de energias disponíveis: maré, onda, temperatura e gradientes de salinidade (MELIKOGLU, 2018). Em áreas consumidoras próximas ao mar também encontramos energias solar e do vendo em abundância. Por que não pensarmos como Ayob *et al.* (2018) e considerarmos fontes híbridas de energia para atender determinada demanda? Seu trabalho foi categórico em dizer que é viável trabalharmos com diferentes fontes, principalmente por se tratar de energia limpa e renovável.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Problemas ambientais associados a emissões de combustíveis fósseis, juntamente com oferta limitada, preços voláteis e segurança energética, levaram os países desenvolvidos e em desenvolvimento a encontrar fontes de energia mais confiáveis e sustentáveis. Fontes

renováveis de energia, sendo abundantes, inesgotáveis, mais limpas e prontamente disponíveis, emergem de forma promissora (AGATON & KARL, 2018). Em algum momento teremos que pensar como será nossa transição energética. Questões técnicas serão levantadas e haverá debates acerca dos instrumentos políticos mais adequados. Porém, não há dúvida de que a questão do custo será uma das mais cruciais no decorrer de um projeto de tão longo prazo (UNNERSTALL, 2017).

Diante do que foi analisado neste artigo, encontra-se sustentação para a construção de um protótipo do tipo *Point Absorber*, a pesquisa realizada obteve informações atualizadas que serão de grande relevância para o projeto. Os dados permitirão reduzir o custo de montagem e selecionar tecnologias atuais já testadas por outros pesquisadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGATON, C. B.; KARL, H. A real options approach to renewable electricity generation in the Philippines. **Energy, Sustainability and Society**, Bochum-Germany, v. 8, n. 1, 2018.

AYOB, M. N.; CASTELLUCCI, V.; GÖTEMAN, M.; WIDÉN, J.; ABRAHAMSSON, J.; ENGSTRÖM, J.; WATERS, R. Small-Scale Renewable Energy Converters for Battery Charging. **Journal of Marine Science and Engineering**, Uppsala-Sweden, v. 6, n. 26, 2018.

COE, R. G.; YU, Y.-H.; RIJ, J. A Survey of WEC Reliability, Survival and Design Practices. **Energies**, Albuquerque-USA, v. 11, n. 4, 2018.

CONTESTABILE, P.; IUPPA, C.; LAURO, E. D.; CAVALLARO, L.; ANDERSEN, T. L.; VICINANZA, D. Wave loadings acting on innovative rubble mound breakwater for overtopping wave energy conversion. **Coastal Engineering**, Aversa-Italy, v. 122, 2017.

COPPE. **A energia que vem do mar - Usina de Ondas**. Disponível em: <http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br>. Acesso em: 15 abr. 2018.

CUNHA, I. P. C.; MOREIRA, M. A. C.; SANTOS, R. C.; SANTOS, J. A. M. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da

Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 19, n.2, 2017.

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Journal of Power and Energy**, Bath-UK, v. 223, 2009.

EIA. **International Energy Statistics**. Disponível em: < https://www.eia.gov/beta>. Acesso em: 05 abr. 2018.

EY. **Renewable Energy Country Attractiveness Index**. Disponível em: <http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/RECAI-45-September-15-LR/$FILE/RECAI_45_Sept_15_LR.pdf>. Acesso em: 03 abr. 2018.

FARROK, O.; ISLAM, R.; SHEIKH, R. I.; GUO, Y.; ZHU, J. A Split Translator Secondary Stator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. **IEEE**, Dhaka-Bangladesh, 2017.

FLEMING, F. P. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil**. 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

FROST, A. E.; ULVGÅRD, L.; SJÖKVIST, L.; ERIKSSON, S.; LEIJON, M. Partial Stator Overlap in a Linear Generator for Wave Power: An Experimental Study. **Journal of Marine Science and Engineering**, Uppsala-Sweden, v. 4, n. 53. 2017.

HENRY, A.; FOLLEY, M.; WHITTAKER, T. A conceptual model of the hydrodynamics of an oscillating wave surge converter. **Renewable Energy**, Dublin-Ireland, v. 118, 2018.

IEA. **Monitoring effects of ocean technologies on marine life**. Disponível em: <https://www.iea.org/tcp/renewables/oes/>. Acesso em: 05 abr. 2018.

IEC. **IEC TS 62600-2:2016**. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/preview/info_iec62600-2%7Bed1.0%7Den.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

KHAN, N.; KALAIR, A.; ABAS, N.; HAIDER, A. Review of ocean tidal, wave and thermal energy Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Islamabad-Pakistan, v. 72, 2017.

KLINGER, D. H.; EIKESET, A. M.; DAVÍðSDÓTTIR, B.; WINTER, A. M.; WATSON, J. R. The mechanics of blue growth: Management of oceanic natural resource use with multiple, interacting sectors. **Marine Policy**, Princeton-USA, v. 87, 2018.

LOUREIRO, W. L. M.; NETO, J. V.; NETO, R. S.; BARROS, S. R. S. A Indústria do Petróleo em Macaé: características e impactos socioeconômicos sob a ótica do desenvolvimento sustentável. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v.16, n.2, 2014.

MELIKOGLU, M. Current status and future of ocean energy sources: A global review. **Ocean Engineering**, Kocaeli-Turkey, v. 148, 2018.

MOSLEMI, N.; KAZEMI, M.; ABEDI, S. M.; AZAD, H. K.; JAFARIAN, M. Mode-based reliability centered maintenance in transmission system. **Electrical Energy Systems**, Tehran-Iran, v. 27, n. 4, 2017

NETO, S. A. **Análise, seleção e dimensionamento de sistema mecânico para transmissão de potência em um conversor de energia de ondas oceânicas**. 2017. 201 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro.

OZKOP, E.; ALTAS, I. H. Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Trabzon-Turkey, v. 67, 2017.

SHADMAN, M.; ESTEFEN, S. F.; RODRIGUEZ, C. A.; NOGUEIRA, I. C. M. A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter. **Renewable Energy**, Rio de Janeiro, v. 115, 2018

TANG, Y.; LIU, Q.; JING, J.; YANG, Y.; ZOU, Z. A framework for identification of maintenance significant items in reliability centered maintenance. **Energy**, Chengdu-China v. 118, 2017.

UNNERSTALL. T. How expensive is an energy transition? A lesson from the German Energiewende. **Energy, Sustainability and Society**, Stockstadt-Germany, v. 7, n. 38, 2017.

WAN, Y.; FAN, C.; DAI, Y.; LI, L.; SUN, W.; ZHOU, P.; QU, X. Assessment of the Joint Development Potential of Wave and Wind Energy in the South China Sea. **Energies**, Qingdao-China; v. 11, 2018.

WASSERMAN, J. C.; MACCHIA, E.; HALL, J.; ZOTES, L. P. Sustentabilidade na indústria do petróleo – uma análise financeira comparativa de empresas integradas e verticalizadas. **Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 12, n. 2, 2017.

YANG, S.; RINGSBERG, J. W.; JOHNSON, E.; HU, Z. Biofouling on mooring lines and power cables used in wave energy converter systems - Analysis of fatigue life and energy performance. **Applied Ocean Research**, Gothenburg-Sweden, v. 65, 2017.

YANG, S. RINGSBERG, J. W.; JOHNSON, E. Parametric study of the dynamic motions and mechanical characteristics of power cables for wave energy converters. **Journal of Marine Science and Technology**, Gothenburg-Sweden, v. 23, n. 1, 2018.

ZANGIABADI, E.; MASTERS, I.; WILLIAMS, A. J.; CROFT, T. N.; MALKI, R.; EDMUNDS, M.; JONES, A. M.; HORSFALL, I. Computational prediction of pressure change in the vicinity of tidal stream turbines and the consequences for fish survival rate. **Renewable Energy**, Swansea-UK, v. 101, 2017.

AVALIAÇÃO DE REQUISITOS PARA MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE CONVERSOR DE ENERGIA DAS ONDAS DO TIPO *POINT ABSORBER*

Eduardo Beline da Silva Martins – eduardo.beline@iff.edu.br
Instituto Federal Fluminense
Rodovia Amaral Peixoto, km 164, Imboassica, Macaé-RJ. 27932-050.

Marcos Antonio Cruz Moreira - macruz@iff.edu.br
Instituto Federal Fluminense

Resumo**:** *Na procura por fontes alternativas de energia para suprir não somente a demanda crescente, como também a substituição de fontes poluidoras, temos o Brasil que, num contexto atualizado, tem sua importância por ocupar a terceira posição das Américas na produção de eletricidade. As ondas do mar como fonte de energia são vistas com interesse por não estarem presentes na matriz elétrica brasileira e apresentarem um potencial ainda pouco explorado mesmo em escala mundial. Este trabalho realizou uma atualização dos cenários energéticos mundial e brasileiro, assim como um estudo acerca do comportamento das ondas na Região dos Lagos – RJ, encontrando uma altura anual média de onda de 2,37m e um período de 9,42s. Avaliou-se requisitos necessários para se construir um protótipo de um Conversor de Energia das Ondas do tipo Point Absorber, podendo contribuir para o objetivo de tornar economicamente viável a produção de energia elétrica a partir das ondas marítimas.*

Palavras-chave: *Onda. Energias Alternativas. Meio Ambiente. Oceano.*

EVALUATION OF REQUIREMENTS FOR ASSEMBLY OF A POINT ABSORBER WAVE ENERGY CONVERTER PROTOTYPE

Abstract: *In the search for alternative sources of energy to supply not only the growing demand, but also the substitution of polluting sources, there is Brazil, which in an updated context has its importance because it occupies the third position of the Americas in the production of electricity. The waves of the sea as an energy source are seen with interest because they are not present in the brazilian electrical matrix and present a potential, still little explored even on a world scale. This work carried out an update of the global and brazilian energy scenarios, as well as a study about the behavior of the waves in Região dos Lagos - RJ, reaching an annual wave height average of 2.37m and a period of 9.42s. It was evaluated the necessary requirements to build a prototype of a Point Absorber Wave Energy Converter, and could contribute to the objective of making feasible the production of electric energy from sea waves.*

Keywords: *Waves. Alternative Energies. Environment. Ocean.*

1. INTRODUÇÃO

A redução na disponibilidade de recursos naturais, a poluição da água, do ar e dos solos, são alguns exemplos de efeitos gerados pela crescente demanda de energia. A busca por energia limpa e renovável vai ao encontro da sustentabilidade ambiental, que trata da utilização do meio ambiente, dando oportunidade dele se regenerar, encontrando formas de substituir a ocupação ambiental por meios renováveis (ROSA & VILLAS-BOAS, 2016).

Ao realizar uma projeção de consumo de energia primária mundial para o ano de 2035, estima-se que o consumo primário de energia brasileira será 33% superior em 2035, quando comparado com 2011. Nesse cenário, o petróleo nas suas formas de óleo e gás participará com 50,5% da oferta (WASSERMAN *et al*., 2017). Segundo dados levantados por Fleming (2012) sobre o potencial teórico de energia de ondas para o litoral brasileiro, o litoral fluminense é o que apresenta o maior potencial total de energia na ordem de 11,82GW, correspondente a 13% do potencial total brasileiro. O protótipo em questão irá considerar características naturais de uma região que até então foi seriamente modificada pelo processo de implantação da indústria do petróleo (LOUREIRO *et al*., 2014).

Uma série de tecnologias emergentes possuem escala de utilização e podem oferecer significativo potencial, como: energia solar concentrada, vento *offshore*, geotérmica e marinha. Esta última ainda permanece subexplorada em escala mundial e tem a Coréia do Sul como o país que mais a utiliza (EY, 2018).

O potencial global da energia oceânica é estimado em 337 GW; mais de 885 TWh de eletricidade podem ser gerados a partir desse potencial anualmente (MELIKOGLU, 2018). Em escala global, as fontes de energia dos oceanos têm os seguintes potenciais: marés com 800 TWh por ano; gradiente de salinidade com 2000 TWh por ano; ondas estão entre 8.000 e 80.000 TWh por ano e as fontes térmicas entre 10.000 e 87.600 TWh por ano, cujo potencial total é significativamente maior do que a demanda global de eletricidade de 16.000 TWh por ano (KHAN *et al*., 2017). De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), estima-se que, se implantadas em todo o mundo, as tecnologias oceânicas poderiam atender à atual demanda mundial de eletricidade. Embora muitas tecnologias e dispositivos tenham sido demonstrados por meio de projetos piloto, a produção em nível de

comercialização é lenta devido a custos relativamente altos, sem falar nas preocupações com questões ambientais em águas costeiras, como os riscos para mamíferos marinhos e habitats (IEA, 2018).

Segundo Cunha *et al*. (2017) a energia das ondas é captada por dispositivos chamados de forma genérica de Conversores de Energia das Ondas - WEC (*Wave Energy Converters*). Há divergências sobre o melhor método de extração de energia das ondas (DREW *et al*., 2009), onde pesquisas como a de Ayob *et al*. (2018) apontam o *Point Absorber* como alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção da onda quando comparado a outro WEC.

Realizou-se uma pesquisa na base de dados da EIA (*US Energy Information Administration*) para visualizar, de forma geral, a geração de eletricidade. Também foi realizado um levantamento de dados no PNBoia (Programa Nacional de Boias) para determinar o comportamento das ondas na Região dos Lagos – RJ e feita uma revisão bibliográfica em bases de dados científicas para verificar possíveis ferramentas, materiais construtivos, métodos e recursos utilizados, recentemente, para construção de um protótipo de conversor do tipo *Point Absorber*.

2. METODOLOGIA

Realizado tratamento de dados levantados no sítio da EIA acerca da geração de eletricidade a partir de diferentes fontes, inclusive energia das ondas. Agência que por sua vez coleta, analisa e dissemina informações energéticas independentes e imparciais para promover políticas sólidas, mercados eficientes e compreensão pública da energia e sua interação com a economia e o meio ambiente (EIA, 2018). Também foi realizado tratamento de dados baixados no sítio brasileiro do GOOS (*Global Ocean Observing System*) para a boia da cidade de Cabo Frio – RJ, a fim de compreender o padrão de ondas local que dará embasamento à construção do protótipo.

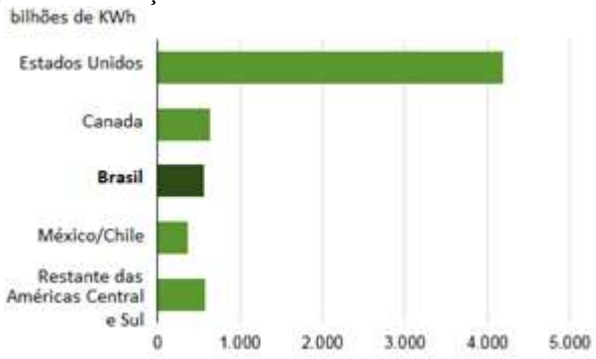
Uma pesquisa exploratória e bibliográfica foi realizada com a finalidade de se elaborar a concepção de aspectos relevantes para a construção do protótipo de conversor do tipo *Point Absorber*, onde foi observado resultados de estudos realizados anteriormente e que estão relacionados com esta proposta, não com a finalidade de esgotar o conteúdo e debatê-lo, mas com o intuito de clarificar o tema em questão para o adequado entendimento de seus resultados. Nesta fase a pesquisa foi feita em bases científicas com artigos nacionais e internacionais atualizados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Visão geral da geração de eletricidade

O Brasil ocupa o terceiro lugar das Américas em geração de eletricidade, atrás apenas dos Estados Unidos e do Canada. Em 2016, o Brasil tinha uma capacidade de geração instalada de 137GW e gerou 560 bilhões de KWh de eletricidade (Figura 1). A maior parte da capacidade de geração do Brasil está localizada na Bacia Amazônica, ao extremo norte da maioria dos centros urbanos localizados no Sudeste. Essa distância contribui para a complexidade do sistema brasileiro de transmissão e distribuição (EIA, 2018).

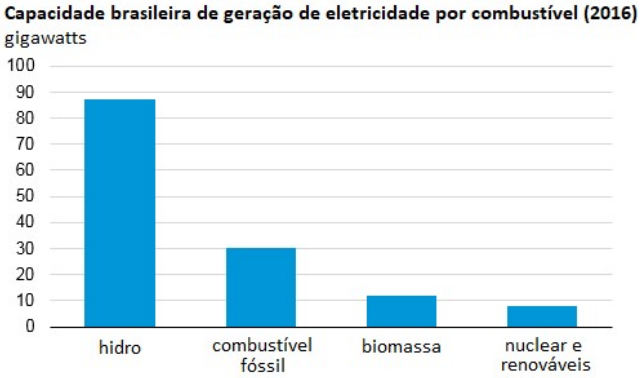
Figura 1 – Geração de eletricidade nas Américas em 2016



Fonte: EIA, 2018. Adaptada pelos autores

A hidroeletricidade representa a maior parte da capacidade de geração do Brasil (87 GW), sendo o restante fornecido por fontes de combustível fóssil (30 GW), biomassa (12 GW) e pequenas quantidades de energia eólica e nuclear (Figura 2). O Brasil é o segundo maior produtor de energia hidrelétrica do mundo, atrás apenas da China, e a energia hidrelétrica responde atualmente por mais de 70% da geração de eletricidade no país.

Figura 2 – Geração de eletricidade por combustível no Brasil



Fonte: EIA, 2018. Adaptada pelos autores

Os combustíveis fósseis são a segunda maior fonte de eletricidade no Brasil e o gás natural é o principal deles, representando mais da metade da capacidade brasileira dos fósseis, o restante é carvão. Possuímos duas usinas nucleares, Angra 1 com 640 MW e Angra 2 com 1.350 MW (EIA, 2018). O Brasil planeja aumentar a participação das energias renováveis não-hidro em sua matriz de geração, para isso, em 2015 lançou o Programa de Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD) cujo objetivo é estimular a geração de energia pelos próprios consumidores (residencial, comercial, industrial e rural) com base em fontes renováveis, em especial a fotovoltaica. Há potencial para a instalação de 23,5 GW até 2030 (MME, 2015).

O oceano é uma das fontes renováveis de energia que pode suprir parte das necessidades mundiais e, assim, reduzir a taxa de consumo de combustíveis fósseis e outros recursos não renováveis. A crescente necessidade de energia, a escassez de recursos fósseis e a poluição ambiental causada pelos combustíveis fósseis, juntamente com os impactos do aquecimento global na vida humana, chamaram a atenção para os recursos energéticos renováveis. A energia das ondas oceânicas é uma das formas mais limpas de energia renovável e pode ser convertida em eletricidade ou outras formas de energia utilizável

(ALAMIAN *et al*., 2014). Uma das fontes de energia mais abundantes no mundo é a energia das ondas marinhas. De longe, ela mostrou ser uma energia limpa, renovável e previsível, aumentando seu potencial para competir com as fontes de energias não renováveis (MUSTAPA *et al*., 2017).

Os dispositivos de conversão de energia das ondas podem ser usados em locais próximos ou distantes da costa. Uma quantidade de protótipos de conversor de energia das ondas está sendo desenvolvida em todo o mundo devido ao crescente interesse na energia das ondas oceânicas (MELIKOGLU, 2018). Basicamente, a conversão de energia das ondas consiste em duas etapas: primeiro, a energia das ondas é convertida em energia mecânica e, em seguida, a energia mecânica é convertida em energia elétrica por meio de geradores (KIM *et al*., 2017). Muitos pesquisadores propuseram numerosos dispositivos e avaliaram sua viabilidade por meio de análise teórica, testes de modelos em laboratório e testes de protótipos em ambiente marítimo real (DREW *et al*., 2009).

Apesar de todo o potencial visto e o movimento dos pesquisadores ao redor do mundo, podemos verificar na Tabela 1 a geração de energia elétrica global a partir da energia das ondas e marés entre os anos de 2012 e 2015.

Tabela 1 – Geração de energia elétrica a partir de ondas e marés em diferentes regiões do Mundo

Regiões do Mundo	Geração de eletricidade a partir de ondas e marés, Bilhão de KWh			
	2012	2013	2014	2015
Africa	0	0	0	0
Asia & Oceania	(s)	0,5	0,5	0,5
Central & South America	0	0	0	0
Eurasia	0	0	0	0
Europe	0,5	0,4	0,5	0,5
Middle East	0	0	0	0
North America	(s)	(s)	(s)	(s)
World	0,5	0,9	1	1

(s) Muito pequeno, desconsiderado.

Fonte: EIA, 2018. Adaptada pelos autores

Como pode ser visto, segundo a agência americana (EIA), a América do Sul não possui registro de geração de energia elétrica oriunda de ondas e marés. Porém em 2012, o projeto denominado Usina de Ondas e desenvolvido pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE) na Universidade Federal do Rio de Janeiro funcionou experimentalmente no Porto do Pecém no estado do Ceará e tinha capacidade de produzir 100MW de potência (COPPE, 2018).

3.2. Avaliação do comportamento das ondas na região de Cabo Frio

Ondas superficiais são geradas nos oceanos devido à interação dos ventos com a superfície da água. Quando eles sopram paralelamente à superfície, transferem energia cinética para o mar e uma parte desta energia gera as ondas. A quantidade de energia transferida do vento para a superfície do mar depende da intensidade deste vento, do seu tempo de atuação e da área sobre a qual está atuando, a chamada pista. Sendo assim, quanto maior a velocidade, o tempo e a pista, maior será a onda resultante. No entanto, para cada situação existem dimensões máximas que a onda pode atingir, ou seja, as ondas não crescem indefinidamente (TRUJILLO & THURMAN, 2011).

Depois de geradas, as ondas se propagam até encontrar um local de dissipação de energia, como uma praia (FLEMING, 2012). De fato, as ondas são mais que uma forma de energia solar concentrada, já que são geradas pelo movimento dos ventos que, por sua vez, são gerados pelo

aquecimento desigual da superfície terrestre. A maior parte das ondas é gerada em regiões de tempestade, onde os ventos em geral são mais fortes e a superfície do mar se torna caótica (PLAMER *et al*., 2017). A energia total em uma onda, conforme (Dean & Dalrymple, 1991), é a combinação da energia potencial, devido ao deslocamento vertical da superfície da água, com a energia cinética, devido ao movimento oscilatório da onda, e é expressa pela Equação (1).

$$E_T = E_C + E_P = \frac{\rho g H^2}{8} \tag{1}$$

Onde o valor médio de energia potencial da onda é representado pela Equação (2).

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{16} \tag{2}$$

A energia cinética contida no campo de ondas está relacionada ao movimento e é representada pela Equação (3).

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{3}$$

Como característica de um sistema conservativo, demonstra-se que a energia cinética tem o mesmo valor da energia potencial (OSTRITZ, 2012). Equação (4).

$$E_c = \frac{\rho g H^2}{16} \tag{4}$$

Sendo: m a massa de fluido deslocada (kg), v a velocidade de deslocamento (m/s), ρ a massa específica da água do mar (kg/m^3), g aceleração gravitacional (m/s^2), H a altura da onda (m), E_C a energia cinética (J) e E_P a energia potencial (J).

O Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil coordena o Programa Nacional de Boias (PNBoia), cujo objetivo geral é disponibilizar, em tempo quase-real, à comunidade de interessados, dados meteorológicos e oceanográficos obtidos nas áreas oceânicas de interesse do Brasil. Já os objetivos específicos se apresentam como: Implantar uma rede de boias de deriva rastreadas por satélites, implantar uma rede de boias fundeadas rastreadas por satélites e implantar um sistema de recepção, processamento e divulgação dos dados (GOOS-BRASIL, 2018). Cada boia trabalha com medições horárias 24 horas por dia e pode medir variáveis como altura da onda, período da onda, direção da onda, direção do vento, temperatura do ar etc.

Para compreender o padrão das ondas na Região dos Lagos – RJ, dados brutos foram baixados do sítio do GOOS e tratados. Em um mês podem existir até 744 medições disponíveis, se considerarmos que todas as medições foram validadas. Para o ano de 2017 calculamos o valor médio mensal da altura da onda (Hs) e do período da onda (Tp) que podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios para o ano de 2017

Meses de 2017	Altura Hs (m)	Período Tp (s)
Janeiro	1,69	7,65
Fevereiro	1,55	7,85
Março	1,89	9,72
Abril	2,03	9,84
Maio	2,28	10,86
Junho	1,84	9,68
Julho	1,88	9,38
Agosto	2,18	9,70
Setembro	2,26	9,04
Outubro	3,06	9,25
Novembro	3,59	9,76
Dezembro	4,13	10,26
ANUAL	2,37	9,42

Fonte: Autores

Percebe-se que a altura média da onda para 2017 teve variações entre 1,55 e 4,13 metros, enquanto o período variou entre 7,65 e 10,86 segundos. Considerando a Equação (1), podemos dizer que o mês de dezembro foi o mais energético por apresentar a maior altura média, acompanhado de novembro e outubro. Já o valor médio anual de *Hs* foi de 2,37m e de *Tp* 9,42s. Com os valores de altura e período conhecidos, podemos trabalhar o projeto do conversor de forma mais clara e objetiva.

3.3. Gerador linear de ímãs permanentes

Diversas soluções têm surgido para o aproveitamento da energia das ondas, porém, atualmente, nenhuma delas ocupa uma posição consolidada do ponto de vista comercial. Devido às características do local de instalação serem muito particulares, é esperado que diferentes princípios de conversão de energia das ondas sejam utilizados no desenvolvimento dos conversores (SEIBT *et al.*, 2017).

Segundo Iahnke *et al.* (2009), os dispositivos para a conversão da energia das ondas do mar em energia elétrica podem ser classificados tanto pela sua localização quanto pelo seu princípio de funcionamento, da seguinte forma:

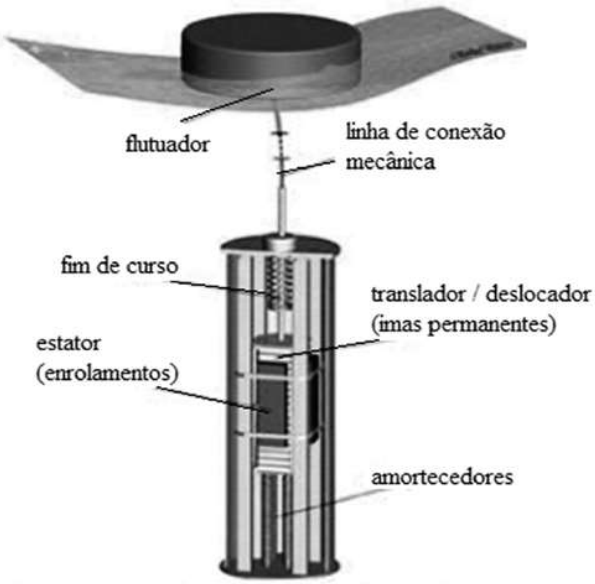
- Classificação de acordo com a localização. Dispositivos costeiros (*onshore*), dispositivos próximos da costa (*nearshore*) e dispositivos afastados da costa (*offshore*).

- Classificação de acordo com o princípio de funcionamento. Coluna de água oscilante, corpos oscilantes e dispositivos de galgamento (*Overtopping Device*).

O dispositivo pretendido para o protótipo é do tipo corpo oscilante com absorção pontual (*Point Absorber*). Cunha *et al*. (2017) expõem um modelo simples e autêntico de um conversor *Point Absorber*, a Figura 3 mostra o princípio de funcionamento dessa instalação que consiste em um flutuador que se move de acordo com o movimento das ondas, sendo ligado a um sistema fixo, que possui a função de extrair parte da energia das ondas e converter em eletricidade.

O *Point Absorber* tem a capacidade de absorver energia em todas as direções através de seus movimentos na superfície da água. Por sua característica original de movimento linear, é possível e conveniente o uso de um gerador linear para produção de energia elétrica, em vez de geradores rotativos convencionais (CUNHA *et al*., 2017). Um gerador linear pode aproveitar melhor o movimento da onda e, portanto, geradores lineares são usados em vários conversores diferentes de energia das ondas (OZKOP & ALTAS, 2017).

Figura 3 – Esquema do WEC *Point Absorber*



Fonte: CUNHA *et al*., 2017

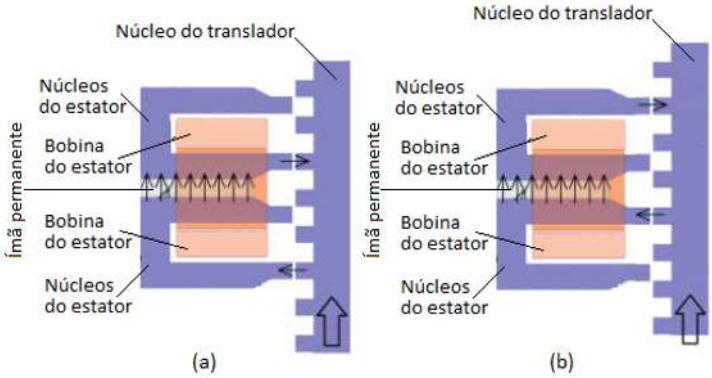
O princípio de funcionamento de um gerador linear é exatamente igual ao de um gerador convencional. A única diferença consiste na forma como se estabelece o movimento relativo entre as bobinas de cada fase e o sistema de excitação, sendo, neste caso, um movimento linear (BOLDEA & NASAR, 1997). A parte fixa dos geradores lineares é chamada de estator e a parte móvel é chamada de translador (Figura 3). Os geradores lineares costumam ser classificados quanto: à sua geometria, usualmente, plana ou tubular; ao material do seu núcleo, ferromagnético ou não (núcleo de ar); a direção das linhas de fluxo magnético, que costuma ser longitudinal ou transversal; a quantidade de lados, normalmente simples (um lado) ou duplo (dois lados) (CORDOVIL, 2013).

Segundo Okuyama & Assano (2013), um gerador linear de ímãs permanentes é fundamentalmente composto por um eixo no qual são acoplados ímãs permanentes (indutor) e por bobinas alojadas num núcleo ferromagnético que envolve o conjunto de ímãs, formando um acoplamento magnético (induzido). A geração de energia se dá quando o conjunto de ímãs permanentes se move no interior de uma bobina de enrolamento. Este movimento alternativo modifica o fluxo magnético que passa pelo indutor e esta alteração nas condições do campo magnético induz um fluxo de corrente elétrica nos fios do enrolamento da bobina.

3.4. Melhorias para o circuito magnético de um gerador linear de ímãs permanentes

O estudo realizado por Farrok *et al.* (2017) se refere a um gerador linear de ímã permanente com comutação de fluxo (FSPMLG), onde quase todos geradores deste tipo contêm um translador pesado e sólido devido às suas limitações de projeto para geração de eletricidade a partir das ondas oceânicas. Estes mesmos autores, a partir de um modelo dinâmico de onda oceânica, perceberam que o translador com menor massa poderia gerar eletricidade de forma mais efetiva. Para analisar o desempenho e verificar a viabilidade deste novo projeto proposto, precisa-se entender o funcionamento magnético do modelo convencional passível de melhoria que pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Modelo convencional. (a) Posição do translador em um determinado momento. (b) Posição do translador após alguns instantes.

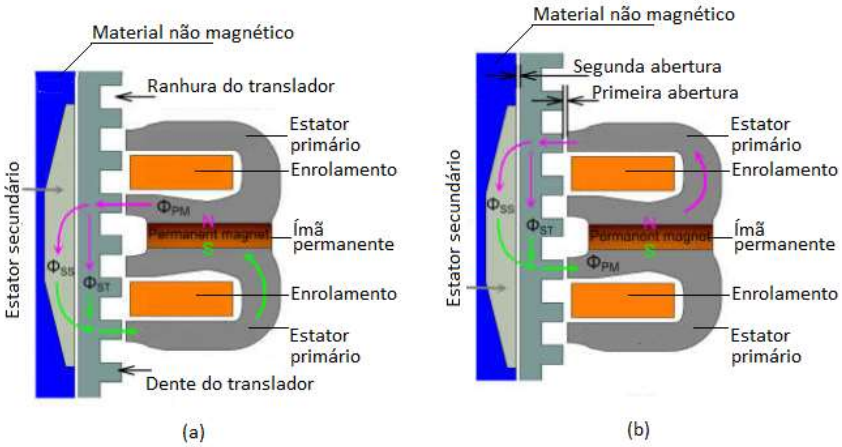


Fonte: FARROK *et al*., 2017. Adaptada pelos autores

As direções das linhas de fluxo magnético são mostradas nas Figuras 4(a) e 4(b), através das setas, para duas posições diferentes do translador. Observa-se que, as linhas de fluxo percorrem na direção oposta no núcleo do estator para duas posições diferentes. Por outro lado, a posição vertical do translador muda devido à onda, mudando então a direção das linhas de fluxo. Portanto, a direção das linhas de fluxo muda ao redor das bobinas do estator com o tempo gerando energia elétrica (FARROK *et al*, 2017).

Uma melhoria foi proposta para o circuito magnético do FSPMLG convencional, onde a estrutura de aço do translador foi modificada com material não magnético e mais leve, para simulações numéricas com o método de elementos finitos. Na Figura 5 podemos ver o gerador proposto em dois momentos diferentes.

Figura 5 – Modelo proposto. (a) Posição do translador em um determinado momento. (b) Posição do translador após alguns instantes.



Fonte: FARROK *et al*., 2017. Adaptada pelos autores

Ao contrário do modelo convencional, o fluxo magnético total, Φ_{PM}, proveniente do estator primário, não retorna ao estator através do translador. Pelo contrário, uma parte do fluxo magnético total, Φ_{SS}, passa através do estator secundário e o resto do fluxo magnético, Φ_{ST}, percorre o translador. A cor azul representa material não magnético para limitação do fluxo. A principal diferença entre o

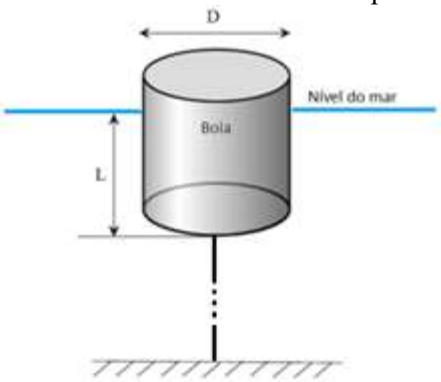
modelo convencional e o proposto é que, a comutação do fluxo magnético ocorre apenas no núcleo do estator primário e não no núcleo do estator secundário.

3.5. Otimização da geometria da boia para o gerador *Point Absorber*

Henry *et al.* (2018) levantam uma questão importante quando estamos trabalhando com este tipo de conversor. Se a frequência natural do WEC é igual à frequência da onda, a captura de energia do conversor será maximizada. Na realidade, isso é bastante difícil de alcançar com boias (flutuadores) porque elas tendem a ter uma frequência natural muito alta, devido a sua alta rigidez e baixa massa adicionada. No caso do *Point Absorber*, a geometria da boia deve ser otimizada para o sistema oscilar na faixa de frequências de ondas predominantes no mar, permitindo máximas amplitudes de movimento possíveis para produzir mais potência (SHADMAN *et al*, 2018). Como o movimento do conversor é restrito e o fator de captura da energia também tem relação com a força da onda, há um contraste com a visão predominante da conversão de energia das ondas que negligencia a magnitude da força das ondas em favor da manutenção do estado de ressonância (HENRY *et al*., 2018).

No trabalho realizado por Shadman *et al*.,(2018), um processo de otimização da boia é proposto para maximizar a potência absorvida pelo WEC e a largura de banda dessa absorção, proporcionando um período natural próximo aos períodos de ondas predominantes no local do mar. Este processo pode ser aplicado a diferentes tipos de WEC (SHADMAN *et al*, 2018). Considerou-se uma boia de formato cilíndrico, com diâmetro D e parte submersa L (Figura 6).

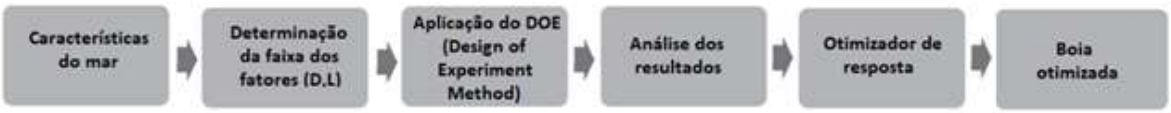
Figura 6 – Boia cilíndrica de diâmetro D e parte submersa L



Fonte: Autores

Na Figura 7 podemos entender como esse processo foi pensado.

Figura 7 – Processo de otimização da geometria da boia



Fonte: SHADMAN *et al*., 2018. Adaptada pelos autores

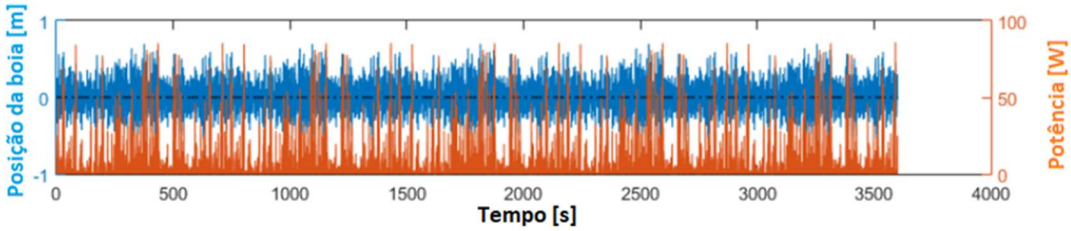
Projetar um dispositivo que auxilie o WEC estar ressonante com a onda é mais vantajoso que investir numa adaptação do conversor a uma determinada localidade.

3.6. Possibilidade de um sistema híbrido de geração

Com intuito de criar um sistema de geração de energia de pequeno porte para carregar uma bateria de 12V, Ayob *et al*. (2018) compararam três tipos de geração: *Oscillating Water Column (OWC), Point Absorber* e painel fotovoltaico. Os dois primeiros são modelos de WECs e extraem energia do mar e o terceiro do sol. Os resultados indicaram que o OWC era muito pequeno para a tarefa e não produziu energia suficiente. Por outro lado, os resultados mostraram que um sistema híbrido composto por um pequeno *Point Absorber* combinado com um sistema de energia solar foi suficiente para aquela demanda. Ambos se complementam, já que o *Point Absorber* produz energia suficiente por si só durante o inverno (e pouca no verão), enquanto o painel solar produz energia suficiente no verão (e pouca no inverno) (AYOB *et al*., 2018).

No teste de funcionamento de um *Point Absorber* cujo translador (eixo) está acoplado numa boia circular de 0,35m de diâmetro, 20kg e deslocamento vertical de 0,20m, observou-se um comportamento que pode ser visto na Figura 8.

Figura 8 – Potência instantânea e posição da boia durante o teste



Fonte: AYOB *et al*., 2018. Adaptada pelos autores

Fazendo uma análise simples da Figura 8 podemos perceber que a potência instantânea média está abaixo dos 50 Watts. Um valor não muito interessante quando pensamos em carga elétricas do cotidiano, porém, para carga de uma bateria de 12V, demonstrou-se atrativa.

4. CONCLUSÕES

Para o enfrentamento das crises energéticas e da poluição ambiental, teremos que nos concentrar na exploração e utilização de fontes renováveis de energia. Existem várias fontes abundantes e renováveis nos oceanos, tal como a energia das ondas discutida neste artigo. Uma exploração racional da energia das ondas poderá aliviar as crises energéticas e os problemas de poluição ambiental. Por essa razão, pesquisadores de várias partes do mundo realizam pesquisas sobre essa forma de energia (WAN *et al*., 2018). Pesquisas sobre impactos ambientais dos dispositivos de energia renovável marinha ainda não podem ser feitas de forma completa porque esses dispositivos devem ser bem definidos e testados nos ambientes marinhos (ZANGIABADI *et al*., 2017).

Em algum momento teremos que pensar como será nossa transição energética. Questões técnicas serão levantadas e haverá debates acerca dos instrumentos políticos mais adequados. Porém, não há dúvida de que a questão do custo será uma das mais cruciais no decorrer de um projeto de tão longo prazo (UNNERSTALL, 2017).

Como o protótipo a ser montado é do tipo *Point Absorber* com ímãs permanentes, uma simulação computacional será de grande importância antes de iniciarmos a montagem do protótipo, assim como feito por Farrok *et al.* (2017). O circuito magnético do gerador é fator limitante na quantidade de eletricidade gerada.

Diante do que foi analisado neste artigo, encontra-se sustentação para a montagem de um protótipo do tipo *Point Absorber*, a pesquisa realizada obteve informações atualizadas que serão

relevantes para o projeto. Tecnologias atuais já testadas por outros pesquisadores poderão ser utilizadas, assim como dados levantados vão colaborar para uma montagem adequada do dispositivo.

REFERÊNCIAS

ALAMIAN, R.; SHAFAGHAT, R.; MIRI, S. J.; YAZDANSHENAS, N.; SHAKERI, M. Evaluation of technologies for harvesting wave energy in Caspian Sea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** v. 32, p. 468-476, 2014.

AYOB, M. N.; CASTELLUCCI, V.; GÖTEMAN, M.; WIDÉN, J.; ABRAHAMSSON, J.; ENGSTRÖM, J.; WATERS, R. Small-Scale Renewable Energy Converters for Battery Charging. **Marine Science and Engineering**, Uppsala-Sweden, v. 6, 2018.

BOLDEA, I.; NASAR, Syed A. **Linear Electric Actuators and Generators**. USA: Cambridge University Press, 1997. 248 p.

COPPE. **A energia que vem do mar - Usina de Ondas**. Disponível em: < http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br>. Acesso em: 15 abr. 2018.

CORDOVIL, P. T. C. **O gerador linear de magnetos permanentes aplicado à recuperação de energia das ondas**. Lisboa-Portugal, 111 p., 2013. Dissertação (Mestrado) - Instituto Superior Técnico de Lisboa.

CUNHA, I. P. C.; MOREIRA, M. A. C.; SANTOS, R. C.; SANTOS, J. A. M. Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 19, n. 2, p. 77-98, 2017.

DEAN, R. G., DALRYMPLE, R. A. **Water wave mechanics for engineers and scientists**. USA: World Scientific, 1991. 353 p.

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA, M. N. A review of wave energy converter technology. **Power and Energy**, Bath-UK, v. 223, p. 887-902, 2009.

EY (Ernest & Young). **RECAI: Renewable Energy Country Attractiveness Index**. Disponível em: < http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/RECAI-45-September-15-LR/$FILE/RECAI_45_Sept_15_LR.pdf >. Acesso em: 5 abr. 2018.

EIA (US Energy Information Administration). **International energy statistics**. Disponível em: < https://www.eia.gov/beta /international/>. Acesso em: 10 abr. 2018.

FARROK, O.; ISLAM, R.; SHEIKH, R. I.; GUO, Y.; ZHU, J. A Split Translator Secondary Stator Permanent Magnet Linear Generator for Oceanic Wave Energy Conversion. **IEEE**, 2017.

FLEMING, F. P. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil**. Rio de Janeiro, 100p., 2012. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

GOOS-BRASIL. **Programa Nacional de Boias**. Disponível em: http://www.goosbrasil.org/pnboia/. Acesso em: 20 abr. 2018.

HENRY, A.; FOLLEY, M.; WHITTAKER, T. A conceptual model of the hydrodynamics of an oscillating wave surge converter. **Renewable Energy**, v. 118, p. 965-972, 2018.

IAHNKE, S. L. P.; GOMES, M. N.; ISOLDI, L. A.; ROCHA, L. A. O. Energia das ondas do mar: Modelagem computacional de um dispositivo de galgamento. **Revista Vetor**, Rio Grande, v. 19, n. 2, p. 20-36, 2009.

IEA (International Energy Agency). **Ocean Energy Systems (OES TCP)**. Disponível em: < https://www.iea.org/tcp/renewables/oes/ >. Acesso em: 07 abr. 2018.

KHAN, N.; KALAIR, A.; ABAS, N.; HAIDER, A. Review of ocean tidal, wave and thermal energy Technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Islamabad-Pakistan, v. 72, 590-604, 2017.

KIM, J.; KOH, H. J.; CHO, I. H.; KIM, M. H.; KWEON, H. M. Experimental study of wave energy extraction by a dual-buoy heaving system. **International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering**, v. 9, p. 25-34, 2017.

LOUREIRO, W. L. M.; NETO, J. V.; NETO, R. S.; BARROS, S. R. S. A Indústria do Petróleo em Macaé: características e impactos socioeconômicos sob a ótica do desenvolvimento sustentável. **Revista Vértices**, Campos dos Goytacazes, v. 16, n. 2, p. 189-220, 2014.

MELIKOGLU, M. Current status and future of ocean energy sources: A global review. **Ocean Engineering**, Gebze-Turkey, v. 148, p. 563-573, 2018.

MME (Ministério de Minas e Energia). **Energia solar fotovoltaica**. Disponível em: < http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticas/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/energia-solar-fotovoltaica-cresceu-quase-30-no-mundo-em-2014>. Acesso em: 20 abr. 2018.

MUSTAPA, M. A.; YAAKOB, O. B.; AHMED, Y. M.; RHEEM, C.; KOH, K. K.; ADNAN, F. A. Wave energy device and breakwater integration: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 77, p. 43-58, 2017.

OKUYAMA, M. O.; ASSANO, R. **Projeto de gerador elétrico linear para aproveitamento da energia de ondas marítimas**. São Paulo, 125 p., 2013. Monografia - Universidade de São Paulo.

OSTRITZ, F.F. **Estimativa do Potencial Energético Gerado por Ondas na Costa do Brasil com ênfase no estado do Ceará**. Rio de Janeiro, 58 p., 2012. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

OZKOP, E.; ALTAS, I. H. Control, power and electrical components in wave energy conversion systems: A review of the technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Trabzon-Turkey, v. 67, p. 106-115, 2017.

PLAMER, C. B.; LIMA, Y. T. B.; ISOLDI, L. A.; SANTOS, E. D.; ROCHA, L. A. O.; GOMES, M. N. Modelagem computacional e método constructal design aplicados a um conversor de energia das ondas do mar do tipo coluna de água oscilante (CAO) analisando a influência em seu desempenho da variação

da razão entre o volume de entrada e o volume total da câmara hidropneumática. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 507-526, 2017.

ROSA, A. R.; VILLAS-BOAS, V. Estudo de Adequações em um Aeroporto Regional para Alcançar a Eficiência Energética de Forma Renovável. **Revista Scientia Cum Industria**, Caxias do Sul, v. 4, n. 1, p. 21-31, 2016.

SEIBT, F. M.; ROCHA, L. A. O.; SANTOS, E. D.; ISOLDI, L. A. Estudo numérico do efeito da variação conjunta do comprimento e da altura relativa de um conversor de energia das ondas tipo placa horizontal submersa. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, Curitiba, v. 6, n. 3, p. 586-605, 2017.

SHADMAN, M.; ESTEFEN, S. F.; RODRIGUEZ, C. A.; NOGUEIRA, I. C. M. A geometrical optimization method applied to a heaving point absorber wave energy converter. **Renewable Energy**, Rio de Janeiro, v. 115, p. 533-546, 2018.

TRUJILLO, A. P. & THURMAN, H. V. **Essentials of Oceanography**. USA: Prentice Hall, 2011. 551p.

UNNERSTALL. T. How expensive is an energy transition? A lesson from the German Energiewende. **Energy, Sustainability and Society**, Stockstadt-Germany, v. 7, 2017.

WAN, Y.; FAN, C.; DAI, Y.; LI, L.; SUN, W.; ZHOU, P.; QU, X. Assessment of the Joint Development Potential of Wave and Wind Energy in the South China Sea. **Energies**, Qingdao-China, v. 11, 2018.

WASSERMAN, J. C.; MACCHIA, E.; HALL, J.; ZOTES, L. P. Sustentabilidade na indústria do petróleo – uma análise financeira comparativa de empresas integradas e verticalizadas. **Revista Eletrônica Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 12, n. 2, p. 228-237, 2017.

ZANGIABADI, E.; MASTERS, I.; WILLIAMS, A. J.; CROFT, T. N.; MALKI, R.; EDMUNDS, M.; JONES, A. M.; HORSFALL, I. Computational prediction of pressure change in the vicinity of tidal stream turbines and the consequences for fish survival rate. **Renewable Energy**, UK, v. 101, p. 1141-1156, 2017.