

Estudo da Viabilidade de Utilização de uma Máquina de Fluxo Transversal Linear como parte da Estrutura do Conversor de Energia das Ondas Point Absorber

Feasibility Study for Using a Linear Transverse Flux Machine as part of the Structure of Point Absorber Wave Energy Converter

Ilana Pereira da Costa Cunha*
Marcos Antonio Cruz Moreira**
Robson da Cunha Santos***
João Amaro Machado dos Santos****

Trata-se de um estudo de viabilidade de geração de energia das ondas por meio de uma Máquina de Fluxo Transversal ligada a um dispositivo de conversão de energia das ondas, conhecido como Point Absorber. O artigo contém revisão bibliográfica referente ao tema e análise de dados obtidos por meio de um protótipo construído em laboratório. Com base nos resultados, conclui-se que esta utilização é viável.

This is a feasibility study for the generation of wave energy by means of a transverse flux machine connected to a device for converting wave energy known as Point Absorber. The article contains literature review on the topic and analysis of data obtained by means of a prototype built in the laboratory. Based on the results, the study concludes that this use is feasible.

Palavras-chave: Energia elétrica. Gerador. Fontes renováveis.

Key words: Electric energy. Generator. Renewables.

1 Introdução

A demanda por energia elétrica é uma variável que tende a aumentar a cada ano. As constantes discussões a respeito da relação geração de energia e mudanças climáticas evidenciam a necessidade de investimento em novas tecnologias de geração de energia por fontes renováveis (ELLABBAN et al., 2014).

* Mestra (Stricto Sensu) em Engenharia Ambiental pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) *campus* Macaé. Professora dos cursos de Engenharia de Produção, Engenharia Civil e de Administração, na Faculdade Cenequista de Rio das Ostras (FACRO) – Rio das Ostras/RJ - Brasil. E-mail: ilanaccunha@gmail.com.

** Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Professor Titular do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) *campus* Macaé - Macaé/RJ - Brasil. E-mail: macruz@iff.edu.br.

*** Doutorado em andamento em Engenharia Civil área Petróleo e Gás COPPE/RJ. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) *campus* Macaé, Coordenador do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estácio de Sá, professor do curso de Sistema de Informação e Engenharia de Petróleo da Universidade Estácio de Sá - Cabo Frio/RJ - Brasil. E-mail: profrobsons@yahoo.com.br.

**** Pós-Graduação Lato Sensu em Segurança do Trabalho - IBE/FACEL. Servidor Técnico-Administrativo do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense (IFFluminense) *campus* São João da Barra/RJ - Brasil. E-mail: j.j.james@hotmail.com.

No Brasil, o tipo de energia gerada por fonte renovável que está menos madura no momento é a energia oceânica (EY, 2014), que pode ser proveniente da diferença de marés, dos gradientes de temperatura ou das ondas do mar. O presente trabalho tem seu foco nesta última modalidade.

O potencial para geração de eletricidade a partir das ondas do oceano é considerável, uma vez que o oceano abriga recursos enormes de energia renovável. O aproveitamento da energia do oceano é um passo muito importante na diversificação das fontes de energia renovável (DREW et al., 2009).

As ondas concentram grande parte de energia, mas são, em sua maioria, inexploradas. A pesquisa nessa área é relativamente imatura em comparação com outras tecnologias de energia renovável (KAVANAGH, 2012). A energia das ondas é captada por dispositivos chamados de forma genérica de Conversores de Energia das Ondas - *WEC (Wave Energy Converter)*. Há divergências sobre o melhor método de extração de energia das ondas (DREW et al., 2009). Não obstante, este trabalho está baseado em pesquisas (FALNES, 2007; FALCÃO, 2010; KAVANAGH, 2012) que apontam o *Point Absorber* (Sistema Oscilante de Simetria Axial) como alternativa viável e interessante, sob o ponto de vista da capacidade de absorver energia incidente a partir de qualquer direção, quando comparado a outros *WECs*.

Estima-se que o potencial mundial de geração de energia das ondas é em média de 2 terawatts (PELC; FUJITA, 2002; DREW et al., 2009), número considerável que justifica a exploração desta fonte de geração.

O objetivo desta pesquisa foi investigar o acionamento de um Gerador Linear de Fluxo Transversal a partir de um dispositivo *Point Absorber*. Para tanto foram construídos protótipo da máquina elétrica e equipamento mecânico de acionamento que reproduz o deslocamento vertical linear de um *Point Absorber*.

2 Revisão de Literatura

2.1 Ondas

Ondas são manifestações de forças agindo em um fluido tendendo a deformá-lo. (PIUMBINI, 2009). Portanto, elas necessitam de algum tipo de força para que ocorra a sua formação na superfície do fluido. Essas forças podem ocorrer mediante a ação do vento ou por uma massa impactando a água, por exemplo (PIUMBINI, 2009). As ondas superficiais mais familiares são aquelas que são geradas na interface entre o oceano e a atmosfera, cujo principal agente formador é o vento atuante na superfície do oceano (OSTRITZ, 2012).

As características das ondas geradas pelo vento dependem primeiramente da intensidade do vento, do comprimento da pista, também conhecido como *fetch* (distância

horizontal sobre a qual o vento atua), e da duração do vento (PIUMBINI, 2009). Porém, também são afetadas por outros fatores como, por exemplo, largura da pista, diferença de temperatura entre o ar e a água, variações de tempo e espaço no campo de vento durante a geração da onda, profundidade da água e condições do fundo.

A Figura 1 ilustra o perfil vertical de duas ondas sucessivas, para compreensão dos principais parâmetros das ondas.

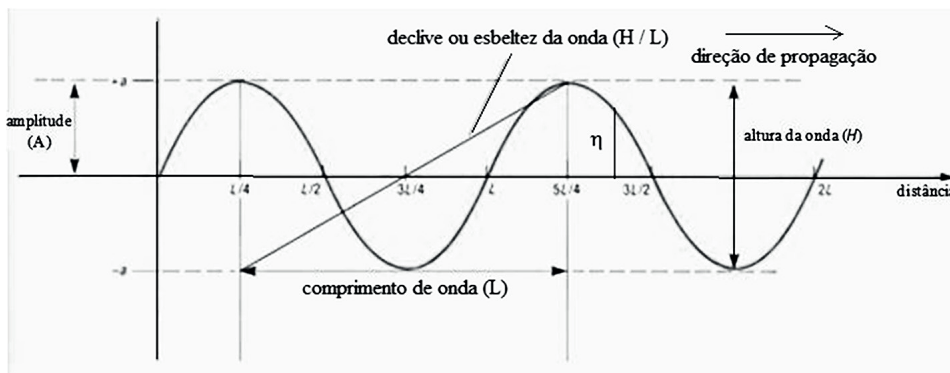


Figura 1: Parâmetros das ondas

Fonte: Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa, adaptação dos autores

Os parâmetros mais importantes são:

H - altura de onda; ou seja, a distância entre a crista e a parte mais baixa (cavado)

A - amplitude; ou seja, distância entre os extremos e o nível médio, equivalente à metade da altura

L - comprimento de onda; a distância entre duas cristas ou 2 cavados consecutivos

h - elevação da superfície em relação ao nível médio do mar

H / L: esbeltez da onda – razão H/L

T - período; intervalo de tempo que duas cristas ou 2 cavados demoram para passar em um ponto fixo

f - frequência; número de cristas ou cavados que passam em um ponto fixo em um segundo

K - número de ondas

ω - frequência angular

d - profundidade local

g - aceleração da gravidade

ρ - densidade da água.

Segundo Ostritz (2012), uma onda progressiva pode ser definida por uma variável espacial x e uma variável temporal t . A combinação entre tais variáveis é chamada de

fase (ϕ). Apresentados cada um dos parâmetros individualmente, será mostrado um conjunto de equações que permitem estimar a energia contida no espectro, bem como o fluxo da mesma.

$$\phi = kx - \omega t \quad (1)$$

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

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (3)$$

A velocidade de propagação de uma onda é apresentada por:

$$C = \sqrt{\frac{g}{L} \tanh \frac{2\pi d}{L}} \quad (4)$$

2.2 Energia das Ondas

Estudo do IEAPM (Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira) utilizou a modelagem computacional para monitorar o comportamento das ondas no Brasil, valendo-se dos dados gerados por cinco ondógrafos no período de 10 anos, cada um em uma região diferente do país. Os resultados obtidos da pesquisa encontram-se a seguir.

Tabela 1: Características de ondas nas regiões do Brasil

| | latitude | longitude | Hs (m) | | | número de tempestades | duração média (horas) | |
|----------|----------|-----------|--------|------------|--------|-----------------------|-----------------------|----------|
| | | | média | σ^2 | máxima | | tempestade | calmaria |
| sul | 32°S | 047°W | 2,1 | 0,8 | 7,8 | 649 | 74 | 70 |
| sudeste | 25°S | 044°W | 1,6 | 0,4 | 5,8 | 395 | 34 | 106 |
| leste | 22°S | 037°W | 1,8 | 0,3 | 4,8 | 521 | 50 | 92 |
| nordeste | 10°S | 033°W | 1,9 | 0,2 | 3,9 | 394 | 57 | 82 |
| norte | 01°N | 039°W | 1,7 | 0,1 | 3,3 | 349 | 35 | 237 |

Fonte: CANDELLA et al. (2008)

Os resultados mostram que a região Sul apresenta maior potencial de energia associada às ondas. A região Sudeste apresenta menor altura média, o que indica que há, em certa proporção, períodos de tempestade e de calmaria com pouca agitação. A conclusão chegada nesse estudo foi que a tendência na costa brasileira é que a intensidade das tempestades seja crescente da direção sul para norte. Porém, apresenta contribuição de agitação do mar nas ondas do Nordeste (CANDELLA et al., 2008). Em outros estudos com participação do mesmo autor, foram analisadas as ondas da região sul da

cidade de Arraial do Cabo, que permitiram os resultados de algumas características interessantes como, por exemplo, a altura média das ondas, que na maior parte do tempo variou entre 100 e 200 cm em períodos de 11 a 13 segundos. Um segundo pico de energia veio de ESE a SSE com períodos predominando entre 7 e 9 segundos (PEREIRA; CANDELLA; CARVALHO, 2000).

A energia contida nas ondas pode ser dividida em duas partes: Energia Potencial Gravitacional e Energia Cinética.

2.2.1 Energia Potencial Gravitacional

Ocorre devido ao deslocamento de massa a partir de uma posição de equilíbrio contra o campo gravitacional. Quando a água está em repouso, a quantidade de energia potencial é mínima. Considerando uma pequena coluna de água, a energia potencial por unidade de área de uma onda senoidal é dada por

$$d(E_p) = d_m g z d(E_p) = d_m g z \quad (5)$$

Onde g é a aceleração da gravidade, d_m é a massa diferencial por unidade de largura e z é a altura do centro de gravidade da massa, expressos por

$$z = \frac{h+\eta}{2} \quad (6)$$

$$d_m = \rho(h + \eta) dx \quad (7)$$

em ambas as expressões, h e η representam a profundidade local e a elevação da superfície do mar (OSTRITZ, 2012) como mostra a Figura 2.

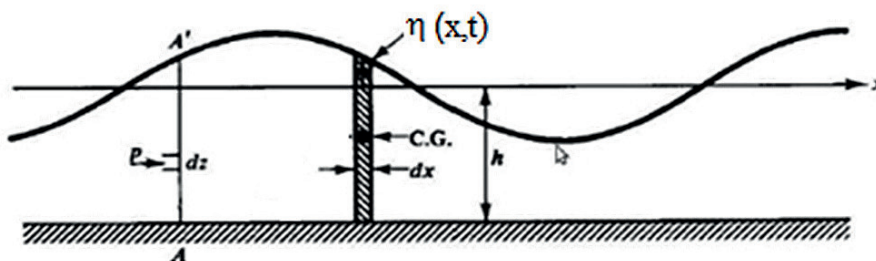


Figura 2: Esquema de onda – energia potencial

Fonte: Dean e Dalrymple apud Ostritz (2012). Adaptação dos autores

O valor médio da energia potencial de uma onda, obtida a partir da integração de dE_p ao longo do comprimento L é dado por

$$E_p = \frac{\rho g H^2}{16} E_p = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (8)$$

2.2.2 Energia Cinética

A energia cinética contida no campo de ondas está relacionada ao movimento, ou seja, ao deslocamento de partículas devido à passagem consecutiva de cristas e cavados. A equação da energia cinética é

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 E_c = \frac{1}{2} m v^2 \quad (9)$$

onde v é a velocidade de deslocamento e m é a massa de fluido deslocada.

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

$$E_c = \frac{\rho g H^2}{16} E_c = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (10)$$

Dessa forma a energia total de um campo de ondas é resultado da soma de ambas as energias (equações 8 e 10), proporcionais ao quadrado da altura, resultando em

$$E_T = \frac{\rho g H^2}{8} E_T = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (11)$$

Uma das vantagens da geração de energia das ondas é que estas são capazes de viajar grandes distâncias com pouca perda de energia, além do fato de que elas podem gerar potência em até 90% do tempo, em comparação com 20-30% para energia solar ou eólica (DREW et al., 2009).

2.3 Dispositivos de extração da energia das ondas

Para extração da energia das ondas, é necessário que elas passem por um dos dispositivos conversores de energia das ondas, conhecidos como *WEC (Wave Energy Converter)*. Esses dispositivos transformam a energia potencial e/ou cinética presentes de uma forma dispersa em uma forma de energia mecânica adequada ao acionamento de geradores elétricos. De acordo com uma classificação abrangente proposta por Cunha e Onofrei (2010), do Instituto Nacional de Propriedade Industrial de Portugal, os conversores mais utilizados são:

- Atenuadores – dispositivos flutuantes alinhados perpendicularmente em relação à frente de onda, flutuando e captando a energia quando são atravessados, efetuando um movimento progressivo ao longo do seu comprimento;
- Sistemas Oscilantes de Simetria Axial, também conhecido como *Point Absorbers* – dispositivos flutuantes que absorvem energia proveniente de qualquer direção de uma onda, possuindo a capacidade de absorver energia de uma área maior que suas próprias dimensões;
- Conversores Oscilantes de Translação das Ondas – dispositivos fixos submersos que possuem a parte coletora próximo da superfície e, portanto, aproveitam a energia criada por vagas de ondas e pelo movimento da massa de água associado, por meio de um braço oscilatório de movimento pendular invertido;
- Coluna de Água Oscilante – estruturas parcialmente submersas, em forma de câmara, que permitem que uma coluna de água oscile, subindo e descendo por movimento das ondas, promovendo a compressão e descompressão do ar contido na câmara;
- Dispositivos de Galgamento – utiliza o galgamento da onda por uma estrutura semissubmersa em formato de rampa, que tem a função de elevar a água do mar e capturá-la em um reservatório. Após isso, a água retorna ao mar acionando uma turbina;
- Dispositivos Submersos de Diferença de Pressão – dispositivos submersos e fixos no leito marinho. A passagem das ondas provoca pressão diferencial nele, correspondendo a um movimento tipo pistão de um sistema hidráulico para gerar eletricidade.

2.3.1 Point Absorber

Entre os diferentes tipos de WECs, o *Point Absorber* foi o dispositivo escolhido para ser utilizado no presente trabalho, pois o mesmo apresenta uma tecnologia simples e robusta, com transmissão direta de energia. Tal tecnologia também se mostrou mais eficiente e vantajosa na conversão do movimento de oscilação de baixa velocidade das ondas, além de liberar emissões-zero de gases poluentes para atmosfera (PASTOR; LIU, 2014).

O *Point Absorber* é um dispositivo que possui pequenas dimensões relativas ao comprimento de onda incidente, fato que permite que o mesmo capte a energia das ondas provenientes de qualquer direção (DREW et al., 2009).

Ao se comparar o *Point Absorber* com os demais tipos de WECs, ele se mostra mais adequado, pois é relativamente pequeno em tamanho e pode ser usado em diferentes profundidades de água, fato que torna esse sistema ideal para instalar a fonte de geração

de energia relativamente próxima do local onde ela é consumida ou conectada ao sistema de distribuição (PASTOR; LIU, 2014). Desse modo, pode ser usado na maioria dos estados do mar, possibilitando a instalação em águas rasas (*nearshore*) ou profundas (*offshore*) (HOLMBERG et al., 2011).

2.3.2 Funcionamento

A Figura 3 mostra o princípio de funcionamento dessa instalação. O *WEC Point Absorber* 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 (HOLMBERG et al., 2011).

O *Point Absorber*, por sua construção, tem a altura total variável e é montado no fundo do mar. 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 condução de geradores elétricos (CZECH; BAUER, 2012). Por sua característica original de movimento linear, é possível e conveniente o uso de um gerador linear para produção de energia elétrica, em vez dos geradores rotativos convencionais (CUNHA; ONOFREI; 2010), fato que será explorado nos próximos tópicos.

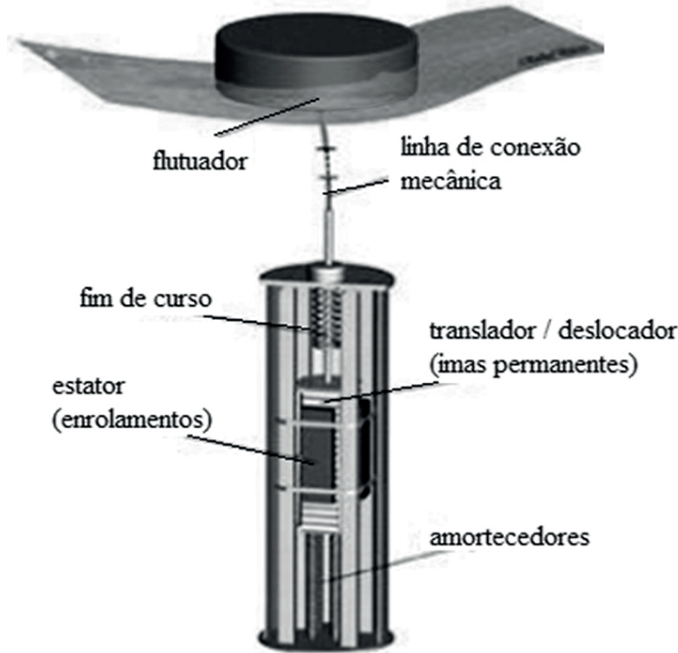


Figura 3: Esquema do *WEC Point Absorber*

Fonte: Seabased (2014). Adaptação dos autores

2.3.3 Point Absorbers no Mundo

Há *WECs Point Absorber* em testes em diversos lugares do mundo. Neste tópico serão citados alguns exemplos.

Seabased, em Uppsala, Suécia - Os dispositivos possuem de 1 a 1,5 metro de diâmetro e pesam cerca de 5 toneladas (HOLMBERG et al., 2011). Esse sistema produz eletricidade a partir do acoplamento direto de gerador linear.

Wavebob, na Irlanda - O dispositivo foi instalado em águas profundas (Baía de Galway), em local próximo de plataformas *offshore*. É um dispositivo maior (seu tamanho varia de 10 a 25 metros), mais pesado e seguro, que possui grande potência e sua expectativa de vida é de 25 anos ou mais. É mais adequado para ondas largas. Produz eletricidade a partir de sistema hidráulico acoplado a gerador rotativo (HOLMBERG et al., 2011).

PowerBuoys - Dispositivos foram construídos e testados pela *Ocean Power Technologies* a cerca de 2 a 3 milhas da costa do Oregon (EUA). Consistem em estrutura flexível amarrada à boia que se eleva e cai sobre uma segunda estrutura submersa, frouxamente ancorada, mas não fixada no leito marinho. A energia é convertida através de acoplamento mecânico, que transforma movimento linear em rotativo, e de gerador convencional (rotativo) (HOLMBERG et al., 2011).

Conversor Hiperbárico, Pecém/CE, Brasil - A proposta desse conversor baseia-se na pressurização da água em uma câmara a partir do movimento das ondas. O jato de água pressurizada na saída da câmara é usado para acionar uma turbina hidráulica rotativa do tipo Pelton (GARCIA-ROSA et al., 2014). O projeto foi descontinuado em 2014, com objetivo de ser remodelado para uso mais próximo da costa (*nearshore*) com custo menor (UNIDO, 2017).

2.4 Tipos de Geradores

Na geração de energia elétrica, o tipo de máquina mais utilizada é o gerador síncrono. Os geradores assíncronos (geradores de indução) têm sido usados na geração eólica, por questões de robustez, e da facilidade de escalonamento de instalações operacionais a partir de protótipos baseados em máquinas menores – o modelo dinamarquês. Essa escalabilidade não é imediata no caso de geração a partir de energia das ondas (FALCÃO, 2010). Por essa razão, as máquinas dedicadas à geração a partir de conversores de ondas se dividem primeiramente quanto à topologia (acionamento linear ou rotativo) e a partir dessa topologia, quanto à forma de geração, síncrona ou de indução.

2.4.1 Topologia Linear e Rotativa

A topologia linear é a princípio a mais facilmente ajustável ao elemento de acionamento que faz um movimento de deslocamento linear, como o *WEC Point Absorber* (KIM et al., 2013). O acionamento direto, que caracteriza esse caso, tem a vantagem de ter uma interface mecânica mais simplificada, reduzindo as perdas associadas a esse item. A eficiência elevada; a estrutura de simples fixação e a capacidade de conversão de ondas de baixa frequência são algumas de suas vantagens (AROF et al., 2004). A principal desvantagem é a presença de oscilações indesejáveis que podem variar a potência de saída, encurtar o tempo de vida da estrutura e aumentar o custo de manutenção. Tais oscilações são decorrentes da força de desbalanceamento entre a parte fixa (estator) e a parte móvel (translador) denominada usualmente de *cogging* (AROF et al., 2004).

As categorias de máquinas lineares, de acordo com Drew et al. (2009), são:

- geradores de fluxo longitudinal com ímãs permanentes;
- geradores de relutância variável com ímãs permanentes;
- geradores de fluxo transversal com ímãs permanentes e
- geradores tubulares com ímãs permanentes e núcleo de ar.

A topologia rotativa requer acoplamento mecânico ou hidráulico entre o *WEC* e o gerador, e também, de acordo com Drew et al. (2009), englobam as seguintes categorias:

- geradores de indução com dupla alimentação;
- geradores de indução gaiola de esquilo;
- geradores síncronos com ímãs permanentes e
- geradores síncronos com rotor bobinado.

Não obstante essas sejam as principais categorias, pesquisas recentes indicam que não existe um padrão tecnológico definitivo (BARROCA, 2012; KAVANAGH, 2012), e uma série de pesquisas investiga opções de refinamento das tecnologias referentes às máquinas lineares (GLIGA et al., 2011; ZOU et al., 2012; POPA et al., 2013).

Neste trabalho, testamos em laboratório uma topologia de máquina de fluxo transversal, proposta originariamente para acionadores sem pistão, também denominados de motores Stirling (COSIC, 2010; SCHUTTE, 2011).

2.4.2 Máquinas de Fluxo Transversal

Da mesma forma que outras máquinas elétricas de corrente alternada, a máquina de fluxo transversal (*Transverse Flux Machine - TFM*) pode ser monofásica ou trifásica, no que diz respeito ao número de fases usualmente empregado e também pode ter topologia linear ou rotativa. A Máquina de Fluxo Transversal é assim denominada, pois utiliza um circuito magnético no qual linhas de fluxo se dispõem no plano transversal à direção do movimento e à direção da circulação de corrente (HASSAN et al., 2015). Seu funcionamento se baseia no mesmo princípio de geração das máquinas elétricas rotativas, apresentando, porém, alguns aspectos funcionais específicos, tais como a possibilidade de dimensionar a densidade de fluxo magnético independente da densidade de corrente elétrica, o que significa que seus circuitos magnético e elétrico são independentes (BARROCA, 2012). Essa característica assegura concentração de fluxo magnético e alta densidade de potência, fatores adequados para geradores acionados a baixas velocidades, como é o caso do acionamento a partir de *Point Absorbers*. No entanto, produzem também fatores negativos como indutância de dispersão elevada, baixo fator de potência e processo de fabricação mais complexo (HASSAN et al., 2015).

Assim como os geradores rotativos convencionais, o gerador de fluxo transversal possui uma parte fixa (estator) e uma parte móvel (rotor ou seu equivalente, denominado *translador*, em uma máquina linear). Ímãs solidários ao rotor com polaridades alternadas contribuem para a produção de fluxo que varia no tempo à medida que a parte móvel se desloca, induzindo tensão nos enrolamentos acomodados no estator (Figura 4).

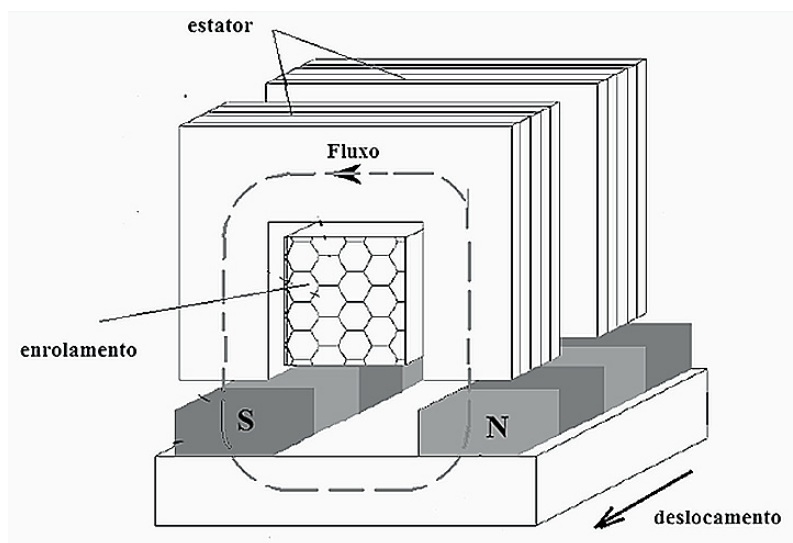


Figura 4: Máquina de Fluxo Transversal

Fonte: autores, 2015

3 Metodologia

O trabalho foi dividido em cinco fases, que estão descritas a seguir.

- 1ª Fase - Revisão de Literatura e elaboração da proposta;
- 2ª Fase - Simulação de algumas características em Elementos Finitos;
- 3ª Fase - Construção do protótipo;
- 4ª Fase - Testes de Geração;
- 5ª Fase - Relatório e Conclusões.

Como exposto anteriormente, a topologia TFM está associada a alguns problemas, tais como alto fluxo de dispersão e processo de fabricação complicado, portanto se torna interessante a construção do protótipo a partir de componentes de máquinas rotativas tradicionais (motor de indução com rotor gaiola de esquilo) com o emprego de ímãs permanentes enterrados no material ferromagnético do rotor. Não obstante, o projeto do ímã enterrado pode experimentar uma desvantagem chamada “curto-circuito” das linhas de fluxo (COSIC, 2010). Essas questões recomendam o uso de Análise de Elementos Finitos (FEA) para avaliar fluxo, densidade de fluxo magnético e nível de magnetismo saturação em material não linear. Isso foi feito utilizando o pacote de *software* Maxwell 16.0. Os resultados da simulação relativa a esses aspectos são apresentados na Figura 5. A quantidade física representada é a distribuição de permeabilidade relativa no interior de um material não linear (armadura de aço).

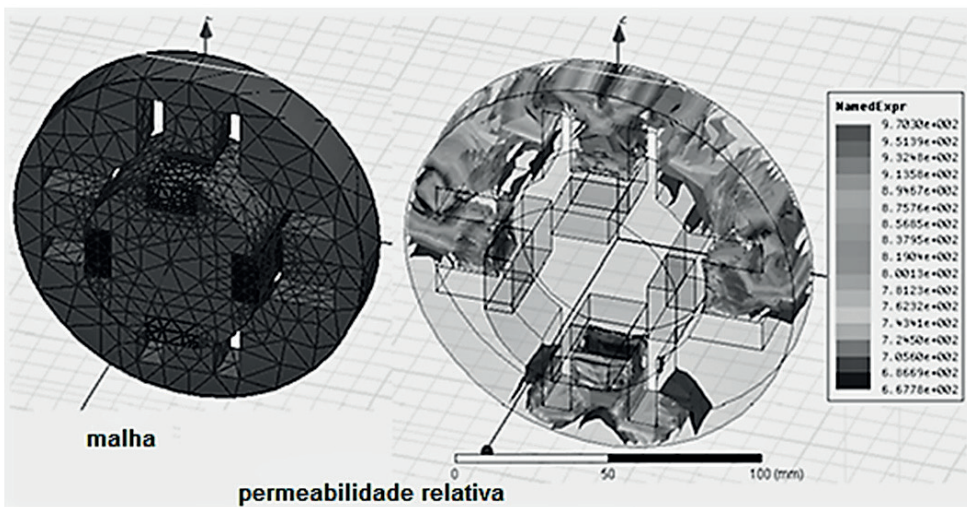


Figura 5: Simulação da distribuição de permeabilidade relativa

Fonte: Os autores (2013)

Os resultados preliminares da análise de FEA sugeriram que, não obstante as dificuldades apontadas anteriormente, a configuração proposta apresenta fluxo magnético razoável, atingindo as peças polares armadura na ordem de $2,2 \times 10^{-4}$ Wb, o que permitiu a construção do protótipo. O enrolamento foi implementado mediante inserção de quatro bobinas simétricas conectadas em série nas sapatas do estator, preenchendo-se as ranhuras adicionais não ocupadas com aço SAE 1020. Quatro pares de ímãs montados no rotor foram dispostos com polaridades invertidas radialmente. A Figura 6, a seguir, ilustra a fase inicial de construção do protótipo.

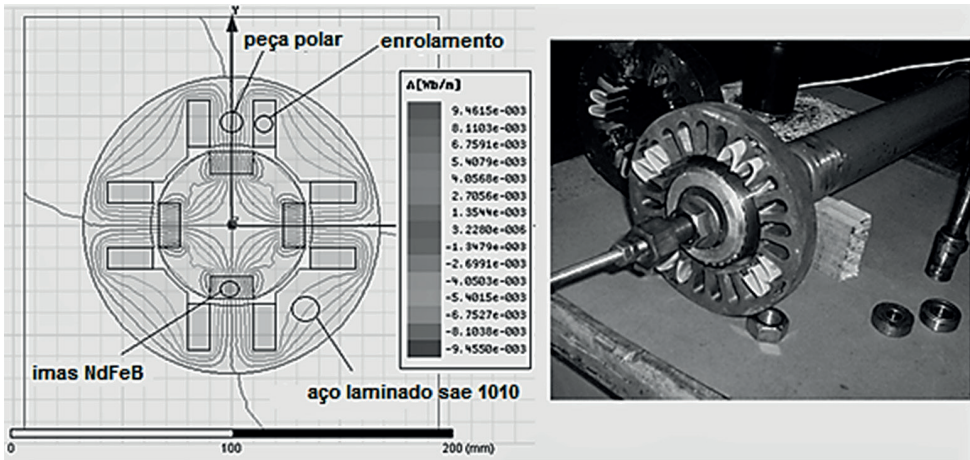


Figura 6: Simulação e fotografia da construção do gerador em fase inicial

Fonte: Os autores (2013)

4 Construção do Protótipo

O protótipo do gerador e seu mecanismo de acionamento foram construídos no laboratório de mecânica e soldagem do Instituto Federal Fluminense *campus* Macaé. A montagem do gerador foi feita a partir de materiais reaproveitados, que estão descritos nos tópicos a seguir.

4.1 Pistão

Para o atuador do gerador foi usado um amortecedor de automóvel reaproveitado. O amortecedor é um equipamento componente do sistema de suspensão do veículo. Ele é composto por dois elementos que trabalham em conjunto. Um reservatório armazena o óleo, e/ou gases específicos, e um elemento móvel que atua como um pistão, que se move quando o automóvel passa por depressões ou irregularidades na pista, fazendo com que o óleo contido no amortecedor se movimente pelos tubos de pressão

e reservatório. Na construção, o elemento do amortecedor que armazena o óleo foi perfurado a fim de retirar o óleo contido, para que o mesmo não produzisse resistência ao movimento no momento do acionamento.

4.2 Suporte

O suporte foi projetado para garantir a estabilidade lateral do gerador, alinhamento entre o elemento fixo que abriga o estator e o elemento móvel de deslocamento. Também tem a função de assegurar espaçamento de entreferro. O suporte foi construído a partir da fixação de barras à plataforma solidária ao estator.

4.3 Estator

No estator, foram acrescentados quatro enrolamentos ovais, que foram produzidos no laboratório a partir de fio esmaltado de cobre, de 0,5 mm de diâmetro. As bobinas possuem 200 espiras e dimensões de 30 mm x 10 mm.

4.4 Translador

O translador foi construído a partir da usinagem dos rotores dos motores gaiola de esquilo; foram feitas quatro ranhuras verticais no rotor, as quais receberam os ímãs enterrados, com polaridades invertidas, seguindo o esquema de polarização da Figura 7.

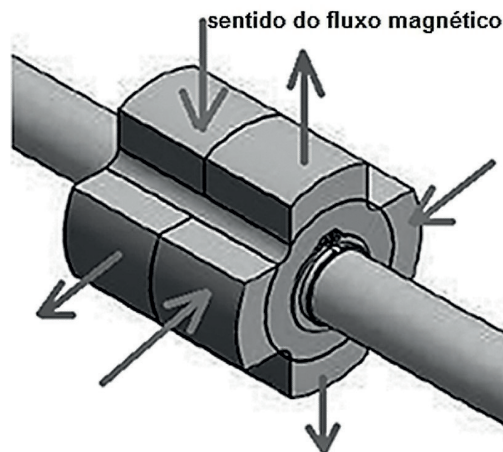


Figura 7: Esquema da posição dos ímãs do rotor

Fonte: Os autores (2014)

4.5 Estrutura Mecânica

Para formação da estrutura mecânica foram adicionados mancais, bielas, rolamentos e uma manivela; além de dois contrapesos paralelos soldados na estrutura de 0,3 kg cada um, usados com a finalidade de compensar o peso do conjunto de translação de aproximadamente 0,6 kg.

Um aspecto inovador na construção do protótipo foi o acréscimo de um mancal vertical na haste do pistão, para que o rotor gire 90° a cada meio-ciclo (considerando um ciclo igual a um movimento de entrada e saída do rotor em relação ao estator). Para melhor compreensão, analisa-se o comportamento de uma bobina quando eletrizada por um par de ímãs de polaridades opostas: o rotor corta as linhas do campo eletromagnético com dois ímãs (um com polo norte, outro com polo sul). Após meio-ciclo (quando o rotor corta o campo apenas uma vez, na descida do pistão), o rotor gira 90° na horizontal, no movimento de retorno, levando os dois ímãs que entraram frente à bobina de referência para a posição frontal à bobina lateral, e trazendo até a bobina de referência outro par de ímãs, com polaridades opostas aos ímãs que entraram inicialmente. Então, o rotor corta novamente o campo magnético e retorna à sua posição inicial na parte superior, deslocando-se no eixo vertical. Esse percurso foi feito com a intenção de aumentar a tensão induzida, o que foi efetivamente conseguido, conforme resultados verificados em laboratório.

4.6 O protótipo

A seguir, está ilustrado o protótipo em três figuras. A primeira retrata um desenho técnico, que ilustra a fase de formação do conceito (Figura 8). A segunda imagem retrata o protótipo em fase de construção (Figura 9) e a terceira figura (Figura 10) ilustra o protótipo depois de pronto, na fase de testes.

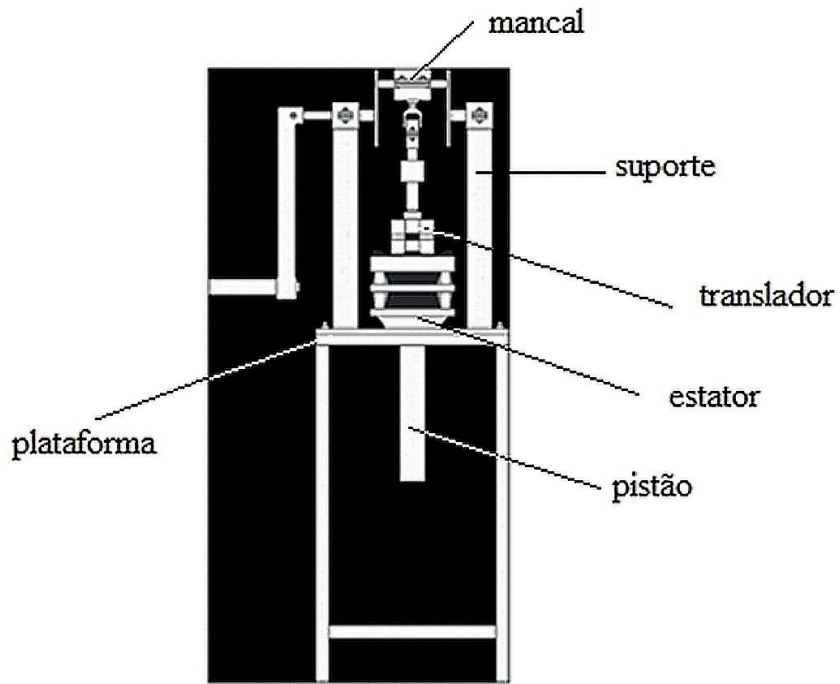


Figura 8: Desenho técnico do gerador

Fonte: Os autores (2014)

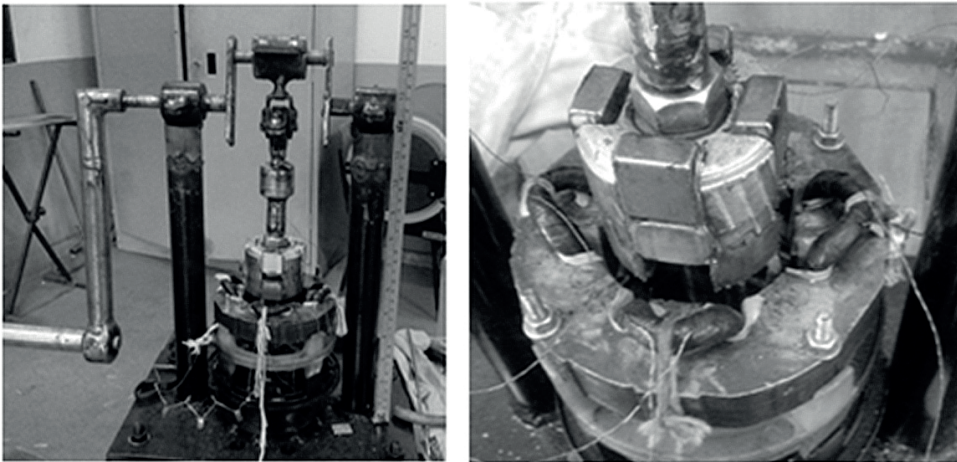


Figura 9: Fotos da fase de construção

Fonte: Os autores (2014)



Figura 10: Protótipo pronto

Fonte: Os autores (2014)

5 Resultados e Discussão

5.1 Testes de tensão

Foram realizados testes da intensidade de tensão gerada em cada uma das bobinas individualmente. Para isso, usou-se o *software* da National Instruments, LabView, associado à placa de aquisição de dados (DAQ). O LabView é um *software* de programação em blocos, que dependendo da programação pode ser usado como sistema de monitoramento e supervisão de determinadas variáveis. Para isso, é necessário que haja um dispositivo para aquisição de dados. Neste trabalho foi usada a placa da National Instruments NI USB 6009.

Cada bobina foi medida individualmente, alcançando resultados idênticos; portanto está registrado no presente trabalho o acompanhamento de apenas uma bobina.

No LabView foi feita uma programação que mostra o sinal analógico da tensão induzida, um *display* que exibe o valor da tensão instantânea a cada milissegundo e dois *displays* que exibem os valores analógicos máximos alcançados pela tensão, sendo em um *display* o máximo positivo e no outro o máximo negativo. As figuras 11 e 12, a seguir, ilustram o diagrama de blocos (programação) e o painel frontal (monitoramento), respectivamente:

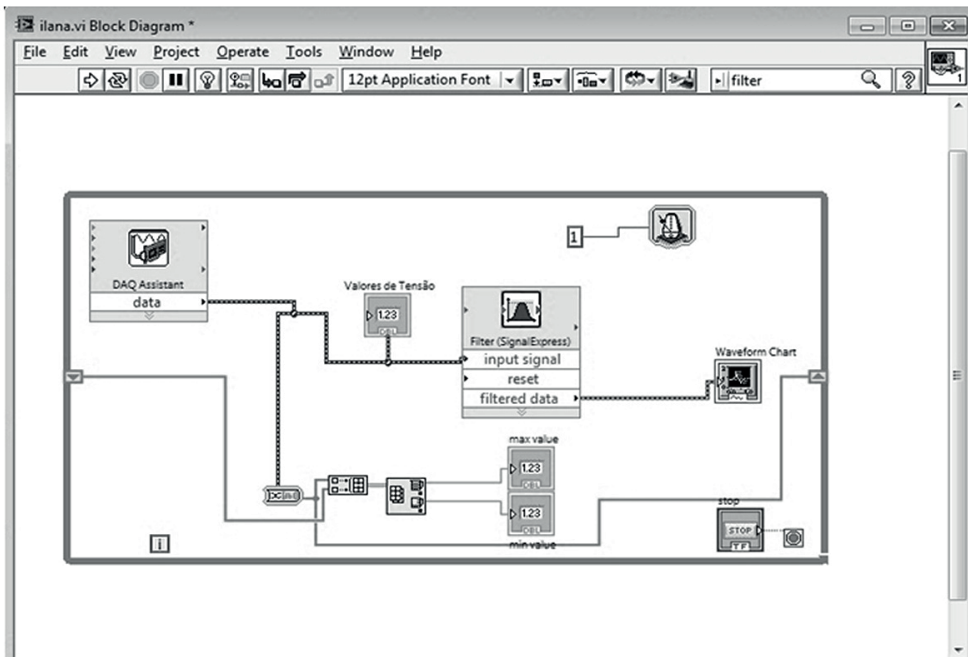


Figura 11: Diagrama de blocos do LabView

Fonte: Os autores (2014)

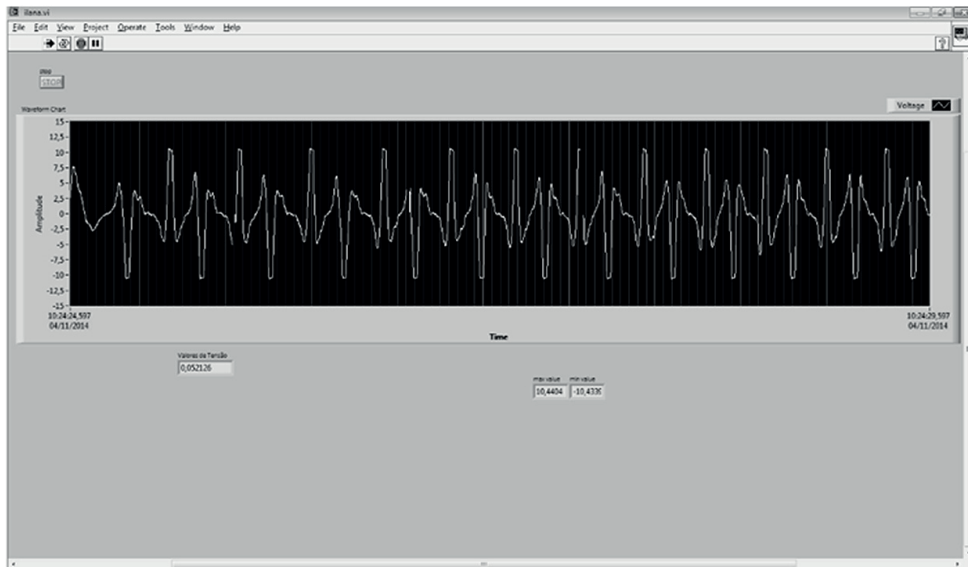


Figura 12: Diagrama Frontal do Labview

Fonte: Os autores (2014)

Na primeira rodada de testes de medição, observou-se que, a cada rotação do mecanismo acionador, o translador cortava o campo magnético em um ciclo completo, ou seja, duas vezes. Os valores alcançados encontram-se na Tabela 2, coluna 2 (1ª

medição) a seguir. Nesse ponto, percebeu-se que, por mais que a velocidade de rotação aumente, o valor máximo da tensão alcançada fica estacionário em uma determinada constante. Isso se deve à limitação de tensão da placa DAQ NI USB 6009, que realiza a leitura na faixa de +10V a -10V. Por essa razão, o teste foi recommençado com outro equipamento, o osciloscópio GW INSTEK GDS-1022 (Figura 14), que registrou os resultados exibidos na Tabela 2, coluna 3 (2ª medição).

Tabela 2: Resultados obtidos nas medições

| Rotações por minuto (rpm) | Pico de tensão induzida (V) | |
|---------------------------|-----------------------------|------------|
| | 1ª medição | 2ª medição |
| 120 | 8.2 | 8.8 |
| 140 | 10.4 | 10.8 |
| 164 | 10.4 | 12.9 |
| 172 | 10.4 | 13.1 |
| 200 | 10.4 | 15.0 |

Fonte: Os autores (2014)



Figura 13: Forma de onda no osciloscópio

Fonte: Os autores (2014)

A partir dos resultados, é possível calcular o valor aproximado de geração do equipamento com enrolamento completo (todas as bobinas conectadas em série). Para a velocidade média de rotação, multiplica-se o valor da tensão de pico pelo número de bobinas (Tabela 3).

Tabela 3: Cálculo de Média dos Resultados

| | |
|------------------------------------|------|
| Velocidade de Rotação (rpm) | 160 |
| Tensão de Pico (V) | 12.1 |
| Tensão para 4 bobinas em série (V) | 48.5 |

Fonte: Os autores (2014)

Conclui-se que, para uma média aproximada de 160 rotações por minuto, o protótipo da máquina de fluxo transversal linear gera cerca de 48.5 volts.

As limitações dos resultados, tanto do ponto de vista quantitativo (valores de tensão gerados – Tabelas 2 e 3) quanto do ponto de vista qualitativo (forma de onda da tensão gerada, com conteúdo harmônico – Figura 13) são decorrentes da construção do gerador. Essa construção, com reaproveitamento de peças já usinadas, resultou em um circuito magnético suficiente e satisfatório (Figura 6) para teste de geração, mas longe do ideal para geração de formas de onda de corrente alternada sem distorções.

Não obstante, o dispositivo mecânico conseguiu reproduzir adequadamente o movimento linear na direção vertical que se verifica em um conversor *Point Absorber*. Os enrolamentos desenvolvidos no estator funcionaram muito bem. Para futuros desenvolvimentos desse conceito, fazem-se necessários os seguintes passos: como ponto de partida, projeto inicial detalhado do circuito magnético; e, adicionalmente, acoplamento a um dispositivo mecânico capaz de desenvolver deslocamentos em larga faixa de oscilações (movimentações verticais por segundo).

6 Conclusões

Observando-se os resultados, pode-se concluir que a extração de energia das ondas por uma Máquina de Fluxo Transversal (Gerador Linear) acoplada a um conversor do tipo *Point Absorber* é viável. O gerador linear de fluxo transversal com a topologia de ímãs enterrados mostrou-se viável na geração de energia elétrica, confirmando os pontos levantados na revisão bibliográfica (concentração de fluxo magnético e alta densidade de potência). Apesar de a construção ser mais complexa que aquela de uma máquina rotativa convencional, justifica-se a tendência do emprego desse conjunto acionador-topologia, a saber, *Point Absorber*-Gerador de Fluxo Transversal, na geração de energia a partir das ondas do oceano.

Referências

AROF, H.; EID, A.M.; NOR, K.M. *Cogging Force Reduction Using Special Magnet Design for Tubular Permanent Magnet Linear Generators*. Malásia: University of Malaya, 2004.

BARROCA, T.N.P. *Dimensionamento de um gerador linear para o aproveitamento das ondas*. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) -Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, 2012.

CANDELLA, R. N.; LOMONACO, D. R.; MARQUES DA CRUZ, L. M.; FERREIRA, R. S. Análises Preliminares das Características Regionais das Ondas ao Longo da Costa Brasileira Através de Modelagem Numérica. In: CONGRESSO

BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA, Fortaleza, 3., 2008, CE.

COSIC, A. *Analysis of a Novel Transverse Flux Machine with a Tubular Cross-section for Free-Piston Energy Converter Application*. Doctoral (Thesis) - KTH School of a Electrical Engineering. Stockholm, Sweden, 2010.

CUNHA, J.F.; ONOFREI, R. *Energia Oceânica*. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. 2010. Disponível em: <http://www.marcaspatentes.pt/files/collections/pt_PT/1/300/302/EnergiaOceanica.pdf>. Acesso em: 13 set. 2013.

CZECH, B.; BAUER, P. Wave Energy Converter Concepts, Design Challenges and Classification. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, p. 4-16, June 2012.

DREW, B.; PLUMMER, A.R.; SAHINKAYA. A review of wave energy converter technology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A: Journal of Power and Energy*, v. 223, p. 887-902, Dec. 2009.

ELLABBAN, O.; HAITHAM, A.; BLAABJERG, F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 748-764, Nov. 2014.

EY. Ernest & Young. *RECAI: Renewable Energy Country Attractiveness Index*, v. 45, Sept 2015. Disponível em: <<http://www.ey.com/Publication/vwLUAssets/RECAI-45-September-2015/>>. Acesso em: 12 nov. 2015.

FALCÃO, A.F.O. Wave Energy utilization: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 899-918, 2010.

FALNES, J. A Review of Wave-Energy Extraction. *Marine Structures*, v. 20, October, p. 185-201, 2007.

GARCIA-ROSA, P.B.; CUNHA J.P.V.S.; LIZARRALDE, F.; ESTEFEN, S.F.; MACHADO, I.R.; WATANABE, E.H. Wave-to-Wire Model and Energy Storage Analysis of an Ocean Wave Energy Hyperbaric Converter. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, v. 39, n. 2, April 2014.

GLIGA, V.; POPA, D.; IANCU, V. Modular Tubular Transversal Flux Machine – Presentation and Progress Achievements. *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series*, n.35, 2011

HASSAN, I.; HUSAIN, T.; UDDIN, M.W.; SOZER, Y.; HUSAIN, I.; MULJADI, E. Analytical Modeling of a Novel Transverse Flux Machine for Direct Drive Wind Turbine Applications. In: *National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report*. Disponível em: <<http://www.nrel.gov/publications>>. Acesso em: out. 2015.

HOLMBERG, P.; ANDERSSON, M.; BOLUND, B.; STRANDANGER, K. Wave Power - Surveillance study of the development, *Elforsk rapport*, Stockholm, Sverige, v. 11, p. 02, 2011. Disponível em: <http://www.elforsk.se/Rapporter/?rid=11_02_>. Acesso em: mar. 2015.

KAVANAGH, D. *Capacity Value of Wave Energy in Ireland*. Thesis (Master of Engineering Science) - School of Electrical, Electronic and Communications Engineering. University College Dublin, 2012.

KIM, J.; KIM, J.Y.; PARK, J.B. Design and Optimization of a 8kW Linear Generator for a Direct-Drive Point Absorber. In: IEEE OCEANS'2013 CONFERENCE, 2013, San Diego. *Proceedings...* p.1-6.

LIU, C.T. Compact Model of a Slotless Tubular Linear Generator for Renewable Energy Performance Assessment. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 46, 2010.

MANUAL NI USB 6009. *Manual do Usuário*. National Instruments, 2011.

OSTRITZ, F.F. *Estimativa do Potencial Energético Gerado por Ondas na Costa do Brasil com ênfase no estado do Ceará*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE. UFRJ, Rio de Janeiro, 2012.

PASTOR J.; LIU Y. Power Absorption Modeling and Optimization of a Point Absorbing Wave Energy Converter Using Numerical Method. *Journal of Energy Resources Technology*, v.136, Jun. 2014. 021207-3.

PELC, R.; FUJITA, R. Renewable Energy from the Ocean. *Marine Policy*, v. 26, p. 471-479, 2002.

PEREIRA, J.; CANDELLA R.N.; CARVALHO, J.L.B. O Clima de Ondas na Costa Sul de Arraial do Cabo, RJ: Distribuição de Parâmetros de Onda. *Notas Técnicas da FACIMAR*, v. 4, p.1-9, 2000 (*atual Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology. BJAST*).

PIUMBINI, P.P. *Clima de Ondas de Gravidade e Estado de Agitação Marítima em Ambientes Marinhos no Espírito Santo*. 2009. Dissertação (Mestrado em Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, 2009.

POPA, D.; GLIGA, V.; SZABÓ, L. Theoretical and Experimental Study of a Modular Tubular Transverse Flux Reluctance Machine. *Progress In Electromagnetics Research*, v. 139, p.41-55, 2013.

SCHUTTE, J. *Optimisation of a Transverse Flux Linear PM Generator using 3D Finite Element Analysis*. Thesis (Master of Science in Engineering) - Faculty of Engineering, Stellenbosch University, South Africa, 2011.

UNIDO. *Observatório de Energias Renováveis para America Latina e Caribe*. Disponível em <<http://www.renenergyobservatory.org/br/single-news/ondomotriz.html>>, Acesso em: ago. 2017.

ZOU, J.; ZHAO, M.; WANG, Q. Development and Analysis of Tubular Transverse Flux Machine With Permanent-Magnet Excitation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 59, n. 5, May 2012.

Artigo recebido em: 11 jan. 2016
Aceito para publicação em: 4 set. 2017