

## **ENERGIA MAREMOTRIZ GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DAS ONDAS MARÍTIMAS**

RAFAEL FRANÇA MENDES<sup>1</sup>, RENAN FRANCISCO ALVES<sup>2</sup> e LUCAS RITTES FERNANDES DE CARVALHO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Engenheiro Mecânico, Universidade Paulista, UNIP, Santos-SP, rafa.francamendes@gmail.com;

<sup>2</sup>Engenheiro Mecânico, Universidade Paulista, UNIP, Santos-SP, renanf.alves1@gmail.com;

<sup>3</sup>Graduando em Eng. Mecânica, Universidade Paulista, UNIP, Santos-SP, lucasrittes@gmail.com;

Apresentado no  
Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC  
Palmas/TO – Brasil  
17 a 19 de setembro de 2019

**RESUMO:** O presente trabalho apresenta o estudo teórico e o projeto de um dispositivo para geração de energia elétrica a partir da energia maremotriz na região da Baixada Santista (litoral sul de São Paulo), com dimensionamento específico para operação em regiões costeiras que apresentem determinados aspectos de ondas e profundidade. Com base no dimensionamento do dispositivo, foi possível construir um protótipo em escala reduzida para demonstração da aplicabilidade e funcionalidade do projeto. Como característica construtiva e de funcionamento, foi utilizado o princípio de coluna de água oscilante (CAO), onde o movimento das águas oceânicas desloca uma determinada quantidade de ar (gerando um diferencial de pressão no interior do dispositivo) que por sua vez faz com que uma turbina do tipo Wells seja movimentada, produzindo energia mecânica (rotação). A turbina Wells é intitulada como uma turbina axial de perfil de pás simétrico que permite, independentemente do sentido de fluxo do ar, que a turbina sempre gire para o mesmo lado produzindo o torque necessário para a alimentação de um gerador elétrico e a posterior produção de energia elétrica. Os resultados obtidos a partir dos cálculos realizados foram satisfatórios e são promissores ao desenvolvimento de novas tecnologias para a geração de energias renováveis na região. Com base nas condições médias da região (dados de entrada para o projeto) foram obtidos valores significativos para o torque (333,94 N.m), rendimento da turbina wells (88,29%) e potência gerada (9191,72 Watts) demonstrando condições satisfatórias para a geração de energia elétrica.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia renovável, energia elétrica, energia maremotriz, turbina wells, coluna de água oscilante, ondas.

### **MAREMOTRY ENERGY GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY FROM THE SEA WAVES**

**ABSTRACT:** The present work presents the theoretical study and the design of a device for electric power generation from tidal power in the Baixada Santista region (south coast of São Paulo), with specific dimensioning for operation in coastal regions that present certain aspects of waves and depth. Based on the design of the device, it was possible to build a small scale prototype to demonstrate the applicability and functionality of the project. As a constructive and functional characteristic, the oscillating water column principle (OWC) was used, where the movement of the ocean waters displaces a certain amount of air (generating a pressure differential inside the device) which in turn causes A Wells type turbine is moved, producing mechanical energy (rotation). The Wells turbine is titled as an axial turbine with a symmetrical blade profile that allows, regardless of the direction of flow of the air, that the turbine always turns to the same side producing the necessary torque to feed an electric generator and the subsequent production of electricity. The results obtained from the calculations were satisfactory and are promising to the development of new technologies for the generation of renewable energies in the region. Based on the average conditions in the region (input data for the project), significant values were obtained for the torque (333,94 N.m), wells turbine

efficiency (88.29%) and power generated (9191,72 Watts), demonstrating satisfactory conditions for the generation of electric energy.

**KEYWORDS:** Electrical energy, tidal wave energy, sustainability, turbine wells, oscillating water column, waves.

## INTRODUÇÃO

Atualmente é recorrente a busca por novas tecnologias, no que diz respeito à geração de energia elétrica no mundo. Uma expressão necessária aos dias de hoje é energia renovável. Gerar energia elétrica a partir de uma fonte inesgotável é a necessidade. Descobrir novas tecnologias ou até mesmo aprimorar as já existentes é a tarefa de diversos engenheiros pelo mundo.

No Brasil, isso não é diferente, diversas pesquisas, estudos e investimentos na área vêm sendo realizados. Contudo, segundo o Ministério de Minas e Energia - MME (2016) a maior parte da geração de energia elétrica no território brasileiro (84,8%) ainda provém do recurso hidrelétrico, renovável, mas dependente de diversos fatores climáticos e até mesmo fatores sociais. Ainda segundo o Ministério de Minas e Energia (2016), é possível identificar a presença de fontes para geração de energia elétrica denominadas como “outras renováveis”, detentoras de apenas 2,4% da produção brasileira de energia elétrica. Dentro deste contexto, temos o modo de geração de energia a partir da utilização do movimento da água dos oceanos, provocada pelas marés (maremotriz), de grande potencial e pouca exploração.

Segundo Moraes (2007), o país detém uma extensão litorânea linear de 7367 km (cerca de 8500 km se considerarmos as reentrâncias do litoral). Litoral este que banha 463 municípios brasileiros, habitados por cerca de 46,9 milhões de habitantes (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2010). Com uma extensão litorânea tão vasta, a utilização destes recursos em prol da geração de energia elétrica apresenta um grande potencial a ser explorado. No entanto, devido à falta de investimento em pesquisas, não é o que acontece atualmente no Brasil onde temos somente um projeto nesses moldes em operação (implantado no porto de Pecém – Fortaleza), com capacidade instalada de 100 kW, segundo a Empresa de Pesquisa Energética - EPE (2016).

## MATERIAL E MÉTODOS

O projeto tem como propósito o estudo e dimensionamento da capacidade (em kW) de geração de energia elétrica a partir da energia maremotriz, uma fonte de energia renovável proveniente das ondas marítimas, na região da Baixada Santista (litoral sul de São Paulo). O mesmo será dimensionado para operação em regiões costeiras, utilizando-se da tecnologia de coluna de água oscilante (pouco explorada no Brasil), transformando o movimento oscilatório das ondas (energia cinética) em uma coluna de pressão (energia mecânica) e posterior geração de energia elétrica através de um gerador e/ou alternador. Também serão dimensionadas as características mecânicas e de funcionamento de uma turbina axial, essencial para a operação deste tipo de dispositivo.

O modelo elaborado neste trabalho tem como parâmetro de entrada a velocidade de propagação da onda no dispositivo CAO (Coluna de Água Oscilante), tendo como variáveis de saída a velocidade do ar que passa pela turbina acoplada ao dispositivo, potência, rendimento e o torque mecânico gerado por esta turbina. Desta forma, optou-se por dividir a análise em etapas.

Primeiramente determinou-se a velocidade de propagação das ondas baseando-se em modelos de ondas oceânicas e nas características do perfil de ondas encontradas na região da Baixada Santista, segundo o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). A segunda etapa consistiu em dimensionar a capacidade dos equipamentos para geração da energia elétrica (turbina do tipo Wells e gerador elétrico), assim como analisar o comportamento do escoamento do ar no interior do dispositivo, calcular intensidade da corrosão à qual o dispositivo estará submetido e posteriormente determinar a melhor maneira e/ou técnica de proteção.

Também foram levados em consideração alguns coeficientes pré-estabelecidos para o perfil NACA 0015, utilizado na turbina Wells. (AIRFOL TOOLS, 2017).

Profundidade do local (h) = 5 metros;

Altura das ondas (H) = 1 metro;

Período das ondas (T) = 8 segundo;

Massa específica da água do mar a 20°C ( $\rho_{\text{água}}$ ) = 1030 kg/m<sup>3</sup>;

Massa específica do ar a 20°C ( $\rho_{\text{ar}}$ ) = 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

Coeficiente de arrasto ( $C_D$ ) = 0,03260

Coeficiente de sustentação ( $C_L$ ) = 1,2328

Com base nas equações enumeradas no capítulo de revisão da literatura, foi possível a realização dos cálculos necessários ao dimensionamento do projeto e com isso, foram definidas as especificações do projeto:

- Método maremotriz utilizado:  
Coluna de Água Oscilante (CAO).
- Método de conversão de energia cinética para mecânica:  
Turbina Axial do tipo Wells;  
Perfil de pá NACA 0015;  
Ângulo de ataque ( $\alpha$ ) de 14°;
- Método de conversão de energia mecânica para elétrica:  
Alternador Elétrico Síncrono;  
Método de excitação: Brushless com bobina auxiliar;  
Marca: Weg;  
Modelo: GTA160AI14;  
Potência Elétrica Aparente: 7,5 kVA (cada);  
Potência Elétrica Ativa (Fator de Potência 0,8): 6 kW (cada);  
Potência Mecânica (Rendimento de 65,4%): 9,1 kW (cada);  
Rotação nominal: 1800 rpm.
- Material utilizado nos condutores de ar (interno do dispositivo maremotriz):  
Aço Carbono SAE 1020.
- Técnica de proteção anticorrosiva utilizada:  
Pintura com revestimento epóxi anticorrosivo para ambientes marítimos, conforme seguinte esquema de pintura:
  - Demão de Intergard 269 Vermelha – Espessura de Filme Seco: 40  $\mu\text{m}$ ;
  - Demão de Intersshield 300 Alumínio – Espessura de Filme Seco: 100  $\mu\text{m}$ ;
  - Demão de Intersshield 300 Alumínio – Espessura de Filme Seco: 100  $\mu\text{m}$ ;
  - Demão de Intersmooth 7465 HS SPC – Espessura de Filme Seco: 75  $\mu\text{m}$ ;
  - Anodos Galvânicos de Zinco (APCE 135).
- Método de bloqueio de fluxo em caso de emergências:  
Tipo: Válvula Borboleta de Alta performance (série RT DN40”, classe 150#);  
Características Construtivas: Disco Bi Excêntrico e Corpo Monobloco;  
Corpo: Aço inoxidável ASTM A-351 Gr.CF8M;  
Disco: Aço Inoxidável ASTM A-351 Gr. CF8;  
Sede: Politetrafl Uoretileno (PTFE);  
Haste: Aço Inoxidável ASTM A-246 Tp. 410.

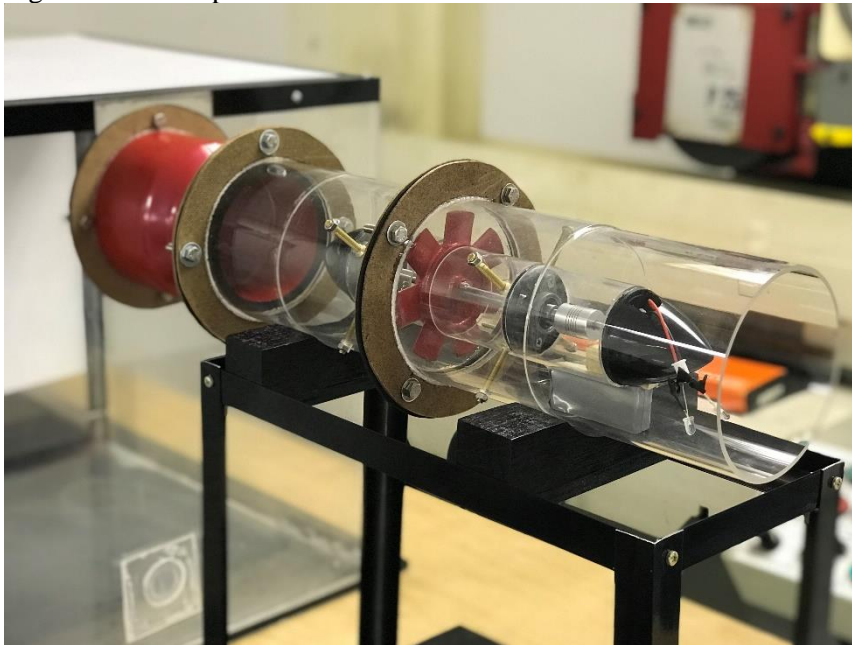
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas condições médias da região da Baixada Santista e parâmetros da turbina wells (perfil NACA 0015) foram obtidos valores significativos para o torque (333,94 N.m), rendimento da turbina wells (88,29%) e potência gerada (9191,72 Watts). A partir disso é possível afirmar que o projeto é capaz de fornecer energia mecânica suficiente para gerar energia elétrica a partir de um gerador e/ou alternador elétrico. Para isso foi escolhido o alternador elétrico da Weg (modelo GTA160AI14) com potência elétrica ativa de 6 kW (considerando o rendimento da máquina de 65,4%), segundo proposta técnica do fabricante. Esta potência é capaz de alimentar 410 metros

lineares nas duas pistas do entorno dos canais da cidade de Santos, onde são instalados 1 ponto de iluminação contendo uma lâmpada de LED de (236 Watts) a cada 16 metros de vias. As lâmpadas usadas como base de cálculo atendem as exigências da prefeitura de Santos onde foi estabelecido o contrato de manutenção e iluminação pública em vigor no começo de 2016. Ainda considerando a potência gerada pelo dispositivo projetado, a mesma é suficiente para alimentar cerca de 5 residências, levando-se em conta um consumo médio de 5,2 kW/h por residência, segundo a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2016).

Tendo em mãos o data sheet do equipamento, é necessário identificar alguns dados de funcionamento do mesmo. O torque de acionamento, torque de partida, rotação nominal, frequência e a potência são os principais itens a serem analisados. No que diz respeito ao torque para o acionamento do equipamento, é necessário um binário de 48,3 N.m. a uma potência de 9,1 kW. No entanto, quando se refere ao torque de partida, o fabricante sugere o acréscimo de um fator de correção ao valor do torque de acionamento, resultando em um binário de 86,94 N.m (considerando um fator corretivo de 1,8). Por fim, a rotação nominal do equipamento é de 1800 rpm e uma frequência de 60 Hertz.

Figura 1 – Protótipo Turbina Wells



Fonte: Autores, 2017.

Nos testes podemos constatar na prática, a efetividade de alguns conceitos e características destacadas na teoria. Como exemplo, podemos citar a rotação da turbina wells que ocorreu sempre para o mesmo lado (independente do sentido do fluxo de ar), ilustrando a característica do perfil simétrico NACA 0015 utilizado neste trabalho.

Os primeiros testes mostraram-se satisfatórios quanto à condição de escoamento do fluxo de ar na coluna oscilante e turbina, diferencial de pressão no dispositivo e rotação da turbina wells. Este último, atingindo valores de 144 rpm para um período de ondas de 0,5 segundos, o que aproximou-se satisfatoriamente da proporção esperada para a escala reduzida de 1:10 (190,6 rpm e período de 0,8 segundos).

Realizado o cálculo da velocidade com que as ondas propagam-se na direção do dispositivo, foi obtido o valor de 7 m/s. Porém, esta velocidade estava muito abaixo do necessário para o dispositivo funcionasse de forma eficaz. Tendo em vista que a Equação 6, correlaciona as variáveis do escoamento do ar no dispositivo é válido dizer que a vazão no dispositivo é constante, contando que sua área também seja constante. Então, foi considerada uma redução da área de saída do dispositivo, passando de 3,1416 m<sup>2</sup> na entrada (2 metros de diâmetro) para 0,7854 m<sup>2</sup> (1 metro de diâmetro), potencializando assim a velocidade de saída ou velocidade axial com que o ar chega à turbina. Trazendo tal condição para a construção do protótipo, foi instalada na saída do reservatório ou

simulador da condição de coluna de água oscilante, uma redução concêntrica de PVC para que fosse possível tentar se aproximar ao máximo a condição projetada descrita anteriormente.

Com o protótipo em fase de construção, tivemos também que criar algumas condições de contorno e/ou adaptações para que a simulação acontecesse o mais próximo possível do que foi previsto em cálculos. Um dos pontos a se destacar foi o de como reproduzir ondas com sua magnitude e características excêntricas em um ambiente limitado ao volume do reservatório utilizado. Com isso, chegamos à condição de instalarmos no reservatório, uma estrutura e/ou caixa hermética em substituição à tubulação de admissão submersa. Tal decisão, ao nosso ponto de vista, foi em função da melhor condição de pressão e vácuo que a caixa produziria em um ambiente de escala reduzida, o que o tornaria muito mais semelhante à condição real de movimento das ondas.

## **CONCLUSÃO**

O projeto foi idealizado a partir da recorrente preocupação a cerca da matriz energética brasileira e da recente crise de energia enfrentada pelo Brasil. Uma fonte de energia alternativa, limpa e renovável é de grande valia para um país em desenvolvimento e detentor de uma vasta extensão litorânea. Contudo, a exploração e o investimento em fontes maremotrizes ainda não é uma realidade para a geração de energia elétrica no Brasil.

A partir da capacidade demonstrada pelo dispositivo projetado neste trabalho, é factível a geração de energia elétrica, a partir da energia maremotriz, na região da Baixada Santista. O projeto é capaz de fornecer energia mecânica suficiente para gerar energia elétrica a partir de um gerador e/ou alternador elétrico com potência elétrica ativa de 6 kW (considerando o rendimento da máquina de 65,4%). Com a construção do protótipo em escala reduzida, foi possível demonstrar na prática (em determinada proporção), a efetividade do projeto desenvolvido a partir da energia maremotriz, uma fonte de energia renovável proveniente das ondas marítimas, na região da Baixada Santista (litoral sul de São Paulo).

## **AGRADECIMENTOS**

Nosso maior agradecimento aos Mestres Sérgio Inácio Ferreira, Wilson Roberto Nassar e Cyntia Matteucci, que dentro da sua bondade maior, decidiram orientar esses humildes e por que não eternos aprendizes, com seus conhecimentos e sabedoria, que a todo momento nos surpreende e nos faz sentirnos honrados em receber tão nobre lição de vida.

## **REFERÊNCIAS**

- AIRFOL TOOLS. Ferramentas para pesquisar, comparar e plotar aerofólios. Disponível em: <[airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il](http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il)> Acesso em: 23 de mai. 2017
- ASSY, T. M. Mecânica dos Fluidos: Fundamentos e Aplicações. 2. Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004.
- COLLINS, M., What Does a Prop Spinner Do. AOPA Flight Training magazine. USA, 2011.
- CPTEC/INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/cidades/tempo/>>. Acesso em: 06 de Jun. 2017.
- HENN, E.A.L. Máquinas de fluido. 3. ed. Santa Maria: UFSM, 2012.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Resenha Energética Brasileira. Brasília, 2016.
- RESENHA MENSAL DO MERCADO DE ENERGIA ELÉTRICA. Rio de Janeiro: EPE, 2016.
- SETOGUCHI, T. et al. A Modified Wells Turbine for Wave Energy Conversion. Renewable Energy, vol. 28, pp. 79-91. 2003.
- WEG. Características e Especificações de Geradores. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-curso-dt-5-caracteristicas-e-especificacoes-de-geradores-artigo-tecnico-portugues-br>>. Acesso em 18 de Mai. 2017.