

MODELAGEM MATEMÁTICA DE SISTEMAS OSCILATÓRIOS E APLICAÇÃO À PRODUÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA CONVERSÃO DE ENERGIA OCEÂNICA

Thaysa Ferreira Silva¹
Leonardo Pereira Dutra²
Prof. Ms. Alfredo Oliveira Assis³

¹ Instituto Federal de Goiás/Jataí/Engenharia Elétrica – Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica/PIBIC, thaysaeng@gmail.com

² Instituto Federal de Goiás/Jataí/Engenharia Elétrica – Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica/PIBIC, leonardopd94@hotmail.com

³ Instituto Federal de Goiás/Jataí/Áreas Acadêmicas – Programa Institucional de Bolsa de Iniciação Científica/PIBIC, alfredo.mat.ufg@gmail.com

Resumo

O presente trabalho propôs um estudo sobre os movimentos oscilatórios e os diferentes tipos de conversores de energia das ondas em energia elétrica. Primeiramente foi feito um estudo sobre o histórico da energia das ondas e um estudo dos conceitos que envolvem esse cenário, tais como: a classe dos dispositivos, os lugares de instalação e o princípio de funcionamento. A partir desse estudo, foi proposta uma modelagem matemática de um tipo específico de conversor, o AWS (Archimedes Wave Swing). Após o término da modelagem procuramos proporcionar meios para se escolher a melhor condição de operação possível, aumentar a proteção e reduzir o custo de construção desse dispositivo, já que a partir dos cálculos foi observado o alto custo necessário para a construção e manutenção do mesmo, a escassez de estudos de modelagem nessa área é um dos fatores que justifica esse tipo de energia ainda não ser economicamente viável. A partir disso, propõe-se que mais estudos sejam feitos na área para que esse tipo de energia se torne cada vez mais acessível e possa alcançar locais ainda não estudados, como aplicação desse tipo de produção de energia em água doce, patrimônio natural o qual nosso país é abundantemente agraciado.

Palavras-chave: AWS, Modelagem, Energia das Ondas.

Objetivos

Objetivo geral:

- Relacionar os estudos de modelagem matemática às técnicas de energias renováveis a partir do sistema AWS.

Objetivos específicos:

- Promover o estudo dos movimentos oscilatórios simples, amortecido e forçado;
- Fazer um levantamento dos principais tipos de conversores de energia oceânica em energia elétrica;

- Desenvolver o problema de oscilador forçado na perspectiva de conversores por colunas oscilantes.

Justificativa /Fundamentação Teórica

De acordo com [4], há um grande potencial energético nos oceanos. Com a crescente necessidade de energia, novos meios de produzi-la são necessários e os países que contém uma grande faixa costeira são os mais propícios para a produção de energia das ondas.

A energia das ondas é uma fonte de energia renovável que, actualmente, está longe de se encontrar verdadeiramente explorada. Ao longo dos últimos anos, vários projectos têm sido desenvolvidos sem que nenhuma tecnologia tenha a capacidade de se impor definitivamente, contribuindo para que não se verifique uma estabilização tecnológica.

Uma parte do desafio pertence à engenharia, pois é necessário encontrar soluções que sejam economicamente viáveis e seguras de converter este tipo de energia, tornando assim esta tecnologia útil para a sociedade. [1]

A produção desse tipo de energia sofre um paradoxo, pois ao mesmo tempo em que precisamos de regimes de ondas elevados corremos o risco de o dispositivo não resistir a tal impacto, o que faz com que muitas vezes nos períodos de maiores regimes de ondas o dispositivo não esteja em funcionamento, por ter sido retirado para manutenção. A conversão da energia das ondas ainda é um tema pouco estudado, o que é um dos fatores que justificam o alto custo de construção do dispositivo, da manutenção e de seu funcionamento.

Metodologia

Primeiramente, foi feita uma pesquisa bibliográfica para construirmos o histórico da energia das ondas e, em seguida, conceituarmos os diversos meios para se converter essa energia. Em um segundo momento, foi feito um estudo sobre equações diferenciais ordinárias aplicadas em movimentos oscilatórios, princípio de Arquimedes e ondas. Por fim, para a realização dos cálculos utilizou-se os softwares MatLab e Maple.

Modelagem Matemática do Dispositivo AWS

Calculando o empuxo:

$$E = V_c \rho_{(H_2O \text{ sal})} g \quad (1).$$

$$V_c = \pi r_c^2 h_c \quad (2).$$

Substituindo (2) em (1) temos:

$$E = \pi r_c^2 h_c \rho_{(H_2O \text{ sal})} g \quad (3).$$

O empuxo deve ser igual ao peso do cilindro para que ambos fiquem em equilíbrio:

$$E = P_C \quad (4).$$

Sabendo que o peso total do cilindro é a soma dos pesos dos ímãs permanentes da carcaça feita de aço e do ar pressurizado dentro do mesmo, temos:

$$P_C = P_{IM-PERM} + P_{CARC} + P_{AR} \quad (5).$$

Calculando o peso da carcaça:

$$P_{CARC} = m \cdot g \quad (6) \qquad m = \rho_C V_{CARC} \quad (7) \qquad V_{CARC} = (\pi r_C^2 - \pi(r_C - e)^2) h_C + \pi(r_C - e)^2 e$$

(8).

Substituindo (8) em (7) e, em seguida, (7) em (6), temos:

$$\begin{aligned} P_{CARC} &= \rho_C [(\pi r_C^2 - \pi(r_C - e)^2) h_C + \pi(r_C - e)^2 e] g \\ P_{CARC} &= \rho_C [(\pi r_C^2 - \pi(r_C^2 - 2r_C e + e^2)) h_C + \pi(r_C^2 - 2r_C e + e^2) e] g \\ P_{CARC} &= \rho_C [\pi r_C^2 - r_C^2 \pi h_C + 2r_C e \pi h_C - e^2 \pi h_C + \pi e r_C^2 - 2 r_C e \pi + \pi e^3] g \\ P_{CARC} &= \rho_C g [\pi r_C^2 - r_C^2 \pi h_C + 2r_C e \pi h_C - e^2 \pi h_C + \pi e r_C^2 - 2 r_C e \pi + \pi e^3] \end{aligned}$$

(9).

Calculando o peso dos ímãs permanentes:

$$Peso_{IM} = m \cdot g \quad (10).$$

Calculando o volume dos ímãs permanentes (considerando em formato cilíndrico).

$$V_{IM} = \pi r_{IM}^2 h_{IM} \quad (11).$$

Calculando o peso do ar contido dentro do cilindro móvel:

$$Peso_{AR} = m \cdot g \quad (12).$$

$$m = \rho_{AR} V_{AR} \quad (13).$$

Pela Equação Geral dos Gases Perfeitos descobrimos a pressão que o ar exerce dentro do cilindro:

$$P_{AR} V_{AR} = n R T \quad (14).$$

Onde:

P = pressão

V = volume

n = número de mols de gás

R = constante dos gases perfeitos

T = temperatura

Podemos determinar o volume do ar pela equação:

$$V_{AR} = V_C - V_{CARC} - V_{IM} \quad (15).$$

Substituindo (2), (8) e (11) em (15), temos:

$$\begin{aligned} V_{AR} &= \pi r_C^2 h_C - [\pi r_C^2 - r_C^2 \pi h_C + 2r_C \pi h_C - e^2 \pi h_C + \pi e r_C^2 - 2r_C e^2 \pi + \pi e^3] - \pi r_{IM}^2 h_{IM} \\ V_{AR} &= \pi r_C^2 h_C - \pi r_C^2 + r_C^2 \pi h_C - 2r_C \pi h_C + e^2 \pi h_C - \pi e r_C^2 + 2r_C e^2 \pi - \pi e^3 - \pi r_{IM}^2 h_{IM} \\ V_{AR} &= 2\pi r_C^2 h_C - \pi r_C^2 - 2r_C \pi h_C + e^2 \pi h_C - \pi e r_C^2 + 2r_C e^2 \pi - \pi e^3 - \pi r_{IM}^2 h_{IM} \end{aligned} \quad (16)$$

Sabendo que $n = \frac{m_{AR}}{M_{AR}}$ (17).

Onde:

m = massa de mol do gás (ar).

M = massa molar do gás (ar).

E ainda que, $m_{AR} = \rho_{AR} V_{AR}$ (13).

Então, substituindo (13) em (17) e (17) em (14), temos:

$$\begin{aligned} P_{AR} V_{AR} &= n RT \\ P_{AR} &= \frac{\left(\frac{\rho_{AR} V_{AR}}{M}\right) RT}{V_{AR}} \\ P_{AR} &= \frac{\rho_{AR} V_{AR} RT}{M} \cdot \frac{1}{V_{AR}} \end{aligned}$$

Concluímos, assim, que para calcularmos a pressão do ar não dependemos do volume do mesmo, logo:

$$P_{AR} = \frac{\rho_{AR} RT}{M} \quad (18).$$

Substituindo (16) em (13) e, em seguida, (13) em (12), temos:

$$Peso_{AR} = g \rho_{AR} [2\pi r_C^2 h_C - \pi r_C^2 - 2r_C \pi h_C + e^2 \pi h_C - \pi e r_C^2 + 2r_C e^2 \pi - \pi e^3 - \pi r_{IM}^2 h_{IM}] \quad (19).$$

Caracterizando a EDO e aplicando um caso específico de dispositivo AWS

Pela 2ª Lei de Newton, temos:

$$F = ma \quad (20).$$

Aplicando-a à nossa modelagem, temos que o empuxo é a força que faz com que a água se desloque assim que colocamos o dispositivo, como pode ser observado na Figura 1. O empuxo é representado pela equação (3), e partindo de que a aceleração é a derivada segunda do deslocamento, temos (Lei de Arquimedes):

$$m\ddot{y} = \pi r_C^2 h_C \rho_{(H_2O \text{ sal})} g \quad (21).$$

Considerando o atrito do sistema (βy).

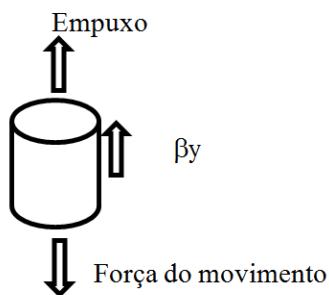


Figura 1-Forças que agem sobre o cilindro

$$m\ddot{y} = -\pi r_C^2 h_C \rho_{(H_2O \text{ sal})} g - \beta y \quad (22).$$

Para chegarmos em uma equação de movimento forçado basta incluirmos em nosso sistema uma força externa $f(t)$. Assim, teremos a seguinte equação diferencial:

$$\begin{aligned} m\ddot{y} &= -\pi r_C^2 h_C \rho_{(H_2O \text{ sal})} g - \beta y + f(t) \\ F(t) &= m\ddot{y} + \pi r_C^2 h_C \rho_{(H_2O \text{ sal})} g + \beta y \end{aligned} \quad (23).$$

Para modelarmos um caso específico de dispositivo AWS consideraremos as seguintes medidas:

$$\begin{aligned} h_C &= 34 \text{m} \text{ (altura do cilindro)} \\ \text{diâmetro} &= 9 \text{m} \text{ (diâmetro do cilindro)} \\ r_C &= 4.5 \text{m} \text{ (raio do cilindro)} \\ e &= 2.5 \text{m} \text{ (espessura do cilindro)} \end{aligned}$$

Essas medidas foram consideradas a partir de [3].

O tipo do material e sua respectiva densidade foram escolhidos baseados nas normas NORSOK que são desenvolvidas pela indústria petrolífera norueguesa para garantir segurança, agregação de valor e eficácia de custo. O material é o aço inoxidável superduplex UNS S32760 que tem excelente resistência à corrosão por uma variedade de meios, a saber, com expressiva

resistência à corrosão por pites e por frestas em água do mar e outros ambientes contendo cloreto, tendo uma temperatura crítica de pite excedendo 50°C.

A densidade do material é $\rho_C = 7810 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

Todas as medidas relacionadas com o gerador foram buscadas no artigo [2].

Peso dos ímãs permanentes = 750Kg.

Raio do cilindro que envolve os ímãs = 0.5m.

Altura dos ímãs = 2.27m.

Volume dos ímãs = 1.78m³.

Densidade do ar pressurizado dentro do cilindro:

$$\rho = 1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Massa molar do ar} = 28.95 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$R = (0.082 \text{ p/ pressões em atmosfera})$$

$$T = 27^\circ\text{C} + 273 = 300 \text{ kelvin}$$

Calculando o volume do cilindro:

$$V_C = \pi r_C^2 h_C$$

$$V_C = \pi * (4.5^2) * (3.4)$$

$$V_C = 2163 \text{ m}^3$$

Calculando o empuxo:

$$E = V_C \rho_{(\text{H}_2\text{O sal})} g$$

$$E = (2163) * (1029) * (9.8)$$

$$E = 21.81 * 10^6 \text{ N}$$

Calculando o peso da carcaça:

$$P_{CARC} = \rho_C g [\pi r_C^2 - r_C^2 \pi h_C + 2r_C e \pi h_C - e^2 \pi h_C + \pi e r_C^2 - 2 r_C e^2 \pi + \pi e^3]$$

$$P_{CARC} = 1.3525 \times 10^8 \text{ kg}$$

Calculando o peso do ímã:

$$\text{Peso}_{IM} = m \cdot g$$

$$\text{Peso}_{IM} = 7350 \text{ kg}$$

Calculando o peso do ar:

$$\text{Peso}_{AR} = g \rho_{AR} [2\pi r_C^2 h_C - \pi r_C^2 - 2r_C e \pi h_C + e^2 \pi h_C - \pi e r_C^2 + 2 r_C e^2 \pi - \pi e^3 - \pi r_{IM}^2 h_{IM}]$$

$$\text{Peso}_{AR} = 2.9934 \times 10^4 \text{ kg}$$

O peso total do cilindro, por fim, é:

$$P_C = P_{IM-PERM.} + P_{CARC.} + P_{AR}$$

$$P_C = 1.3529 \times 10^8 \text{ kg}$$

Calculando a pressão do ar dentro do cilindro necessária para o equilíbrio do empuxo com o peso do cilindro ($E=P_c$):

$$P_{AR} = \frac{\rho_{AR}RT}{M}$$

$$P_{AR} = 1.040932642 \text{ atm}$$

Códigos do MatLab

Todos os resultados obtidos acima foram calculados no software MatLab. A seguir apresentaremos os códigos dos cálculos:

```
%calculando o peso da carcaça
rc=4.5;
hc=34;
esp=2.5;
dc=7810;
g=9.8;
vcarc=(pi*(rc^2)-pi*((rc-esp)^2))*hc+(pi*esp*((rc-esp)^2));
Pcarc=dc*g*vcarc.

%calculando o peso do ar
dar=1.225;
ri=0.5;
hi=2.27;
g=9.8;
Par=g*dar*(2*pi*(rc^2)*hc-pi*(rc^2)-2*rc*esp*pi*hc+(esp^2)*hc*pi-
pi*(rc^2)*esp+2*rc*(esp^2)*pi-pi*(esp^3)-pi*(ri^2)*hi).
```

```
%peso ímã
mi=750;
g=9.8
Pima=mi*g.
```

```
%peso total do cilindro
Pc=Pima+Pcarc+Par.
```

```
%pressão do ar
R=0.082;
T=300;
M=28.95;
```

dar=1.225;
Prear=(dar*R*T)/M.

Resultados e discussões

Obtemos uma equação diferencial do movimento forçado e aplicamos a modelagem do dispositivo AWS considerando um local fictício que atende aos requisitos mínimos para a aplicação do mesmo. Este projeto nos permitiu entrar em contato direto com softwares importantes (MatLab, Maple, LaTex) que facilitam vários processos extensos. Exercitamos bastante nossa capacidade de pesquisa e busca por informações específicas. Além disso, todo o processo nos mostrou que esse tipo de tecnologia necessita de muitos estudos para tornar-se viável.

Considerações finais

Adquirimos uma perspectiva otimista sobre a energia oceânica, as diversas formas de conversão da mesma e o baixíssimo impacto ambiental condizente com cada uma. Além da modelagem realizada e do conhecimento adquirido, o projeto também serve como uma porta para diversas outras pesquisas, desde aquelas relacionadas à redução dos elevados valores de construção do dispositivo AWS até as de geração e aplicação de conversores derivados do AWS em condições totalmente diferentes, em água doce, ou até mesmo fora da água, porém utilizando os mesmos princípios de geração de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] BARROCA, T. N. P. **Dimensionamento de um gerador linear para o aproveitamento da energia das ondas.** Disponível em:
https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395144144617/dissertacao_55103.pdf. Acesso em: 02 mar. 2015.
- [2] COMPANHIA Energética de Minas Gerais. **Alternativas Energéticas:** uma visão Cemig. Belo Horizonte: Cemig, 2012. Disponível em:< http://www.cemig.com.br/pt-br/A_Cemig_e_o_Futuro/inovacao/Alternativas_Energeticas/Documents/Alternativas%20Energ%C3%A9ticas%20-%20Uma%20Visao%20Cemig.pdf> Acesso em: 11 jul. 2014.
- [3] COSTA, Paulo Roberto da. **Energia das ondas do mar para geração de eletricidade.** Disponível
em:<http://www.oceanica.ufrj.br/intranet/teses/2004_mestrado_paulo_roberto_da_costa.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2014.
- [4] CRUZ, J.M.B.P.; SARMENTO, J.N.A. **Energia das ondas:** Introdução aos aspectos tecnológicos, econômicos e ambientais. Disponível
em:<http://www.energiasrenovaveis.com/images/upload/Energias_ondas_Cruz.pdf>. Acesso em: 07 dez. 2014.

[5] FLEMING, Fernanda Pereira. **Avaliação do potencial de energias oceânicas no Brasil.** Disponível em:<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/fernanda_fleming.pdf>. Acesso em: 09 out. 2014.

[6] NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básica:** Fluidos, Oscilações e Ondas, Calor. 4^a edição. São Paulo: Editora Edgar Blucher, 2002.

[7] ZILL, Dennis G.; CULLEN, Michael R. **Equações Diferenciais.** 3^a edição. São Paulo: Pearson Makron Books, 2001.