



DIMENSIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA MAREMOTRIZ

Paulo Franklin Tavares Santos, p.franklintavares@gmail.com¹
Gultembergue Carvalho, matheus.fovra@gmail.com²
José Aprígio Carneiro Neto, aprigio.carneiro.ac@gmail.com³
Wilson Luciano Souza, wilsonluciano@yahoo.com.br⁴
Hugo Magalhães Mafra, hugo_m_mafra@hotmail.com⁵
Ariel Almeida Lima, arielalmeida1@outlook.com⁶
Guilherme Melo Henriques, guilherme.m.henriques@gmail.com⁷

¹Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

²Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

³Instituto Federal de Sergipe – IFS, Av. Padre Airton Gonçalves Lima, 1140 - São Cristóvão, Itabaiana – SE.

⁴Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

⁵Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

⁶Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

⁷Universidade Federal de Sergipe – UFS, Av. Marechal Rondon, s/n - Jardim Rosa Elze, São Cristóvão – SE.

Resumo. O presente trabalho tem como objetivo um estudo e dimensionamento do sistema de geração de energia maremotriz por meio das ondas do mar. Para isso, foram necessários estudos da teoria do comportamento oscilatório das ondas do mar e a idealização de um sistema para o aproveitamento da energia maremotriz. O sistema de maremotriz virtual foi desenvolvido tendo como dimensionamento e conceitos de hidráulica para a seleção das bombas, linhas de transmissão, acessórios, seleção da turbina e motor-gerador. Os resultados esperados na pesquisa foram alcançados e tornou a usina maremotriz em um rendimento de 62% através das variáveis como a vazão, a potência mecânica e potência elétrica gerada pelo conversor.

Palavras chave: Maremotriz. Fonte Energética. Modelagem. Dimensionamento.

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios para a humanidade é suprir a carência energética mundial utilizando de fontes limpas e renováveis de energia. A partir da queda na produção de petróleo, a disponibilidade de outras fontes de energia foi decisiva para a economia global. De acordo com o mostrado por Capellán-Pérez (2014) a demanda energética vem e continuará crescendo bem além das taxas de geração de energia elétrica por diversas fontes (eólica, solar, biogás, etc.).

Um fator de importância ao avaliar as alternativas energéticas ao petróleo é o fato de que as fontes de energia alternativas possuem custos de produção mais elevados e requerem uma quantidade de energia maior para serem produzidas do que a simples extração de petróleo (GOODSTEIN, 2004). Dessa forma, a energia gerada através de fontes energéticas renováveis auxiliara na demanda energética e não, por agora, a substituição direta do petróleo como fonte de energia principal.

Trazendo para o cenário no brasileiro, a questão energética se envolve com como um desafio e uma oportunidade energética. O desenvolvimento econômico e social demandará uma expressiva quantidade de energia trazendo desafio e oportunidade para o país dispor de condições energéticas em transformar suas riquezas naturais em energia e dessa forma agregar valor à sua produção de riqueza (TOLMASQUIM, GUERREIRO E GORINI, 2007). Nesse crescimento acelerado de consumo de energia, as incertezas em relação ao suprimento das necessidades futuras da população trazem pesquisas por novas fontes energéticas para um melhor aproveitamento através de diferentes tecnologias, o que pode adiar no tempo a previsão de crises energéticas, pelo menos nas próximas décadas (DE BARROS, 2007).

Dentre os tipos de energia relacionados acima está a fonte de energia oceânica, que apresenta uma parcela inexpressiva em relação as outras fontes de energia listadas. Esse tipo de fonte oceânica é um tipo de energia contida nos oceanos podendo ter diferentes origens e classificações. As formas de energia advindas dos oceanos podem ser classificadas em cinco tipos diferentes que são: marés, correntes, gradientes de temperatura, gradiente de salinidade e ondas (CRUZ E SARMENTO, 2004).

Para o estudo presente será aplicado o modelo bastante interessante de usina que utiliza as ondas do mar para a produção de energia elétrica vinda de estudos da Usina de Ondas da COPPE (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia) que é a Maremotriz. Diante da COPPE (2012), a maremotriz é um protótipo instalado no porto de Pecém no município de São Gonçalo do Amarante - CE, desenvolvido pela UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) em parceria com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e a Tractebel Energia (hoje em dia Engie Brasil Energia). que utiliza o movimento das ondas para produzir energia elétrica (COPPE, 2012).

Diante do exposto, vê-se a necessidade de investir em aprimoramento de tecnologias e criação de novas usinas produtoras no intuito de complementar a demanda mundial de energia elétrica de forma sustentável utilizando o potencial subutilizado de diversas fontes energéticas, como por exemplo, os oceanos, uma das fontes de energia mais abundantes do planeta. Nesse projeto objetivou-se um estudo e dimensionamento do sistema de geração de energia maremotriz bem como do comportamento oscilatório das ondas do mar.

2. METODOLOGIA

2.1. Fluxograma da usina

A problematização da usina de ondas COPPE que será trabalhado consiste em 8 etapas na qual a energia potencial gravitacional das ondas é aproveitada pelo conjunto do flutuador com o braço articulado. Em seguida com a bomba pistão que atua no sistema fechado de água doce na qual tem o apoio do acumulador hidropneumático e câmara hiperbárica para lançar na potência de eixo da turbina Pelton, finalmente, para energia elétrica que é gerada com o movimento do eixo do gerador elétrico.

2.2. Energia da onda do mar

Diante de Hodge (2010), trata que uma onda do mar se movimenta diante da Eq. (1) a seguir em que A é a amplitude, λ é o comprimento, y é a altura em relação ao nível do mar, T é o período, t é o tempo e x é a coordenada horizontal.

$$y = A * \text{sen}\left(\frac{2\pi}{\lambda} x - \frac{2\pi}{\tau} t\right) \quad (1)$$

Apesar da onda se mover na horizontal como é visto a olho nu, El-Wakil (1988) demonstra que a água percorre uma trajetória elíptica no plano o qual a onda se propaga e mostra que o somatório da energia total por unidade de área de uma onda é igual ao combinado de sua energia potencial e cinética diante da Eq. (2). Dessa forma, a energia total da onda é metade cinética e metade potencial, como pode ser visto na Eq. (3) abaixo.

$$\frac{K}{A} = \frac{P}{A} = \frac{1}{4} \rho * a^2 * g \quad (2)$$

$$E = \frac{1}{2} \rho * a^2 * g \quad (3)$$

Para as equações 2 e 3 apresentadas, tem-se que ρ é a densidade da água, a é a amplitude, g é a gravidade, K é a energia cinética, P como energia potencial e E para energia total. Outro ponto que para El-Wakil (1988) aproxima na Eq. (4) a relação entre comprimento da onda do mar (λ) e seu período (τ).

$$\lambda = 1,56 * \tau^2 \quad (4)$$

Para a previsão do modelamento das ondas feitas na região de estudo será feito o uso do software Wavewatch III®. Esse tipo de modelo matemático de previsão de ondas, diante de Lobo et. al (2017), desenvolvido pelo órgão do governo norte-americano NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) capaz de ceder informações essenciais como período e altura significativa das ondas de acordo com o comportamento dos ventos e profundidade do mar.

2.3. Braço e Flutuador

O braço mecânico a princípio será considerado no modelo da COOPE que diante de Rosa et al. (2010) atua por meio de um flutuador de aproximadamente 17 toneladas (excluído o braço que juntos passam a ter aproximadamente 25 toneladas) que ao ser erguido pela força das ondas aspira água doce, na descida o peso do flutuador multiplicado em 10 vezes, como efeito de alavanca, pressiona um pistão hidráulico que injeta a água em um circuito fechado de alta pressão.

O flutuador aplicado na usina maremotriz é do tipo semi-submerso que é um equipamento mecânico menos denso que o líquido (água do oceano) na qual vai sendo empurrado para cima e para baixo através do empuxo produzido pelo fluido.

O movimento de um flutuador gera ondas em uma ampla faixa de frequências que são irradiadas na superfície livre. Em harmonia com Cummins (1962), o movimento vertical do flutuador é descrito pela Eq. (5) na qual onde mm é a massa

do flutuador, $m_r(\omega)$ é o coeficiente de massa adicional ($\omega \rightarrow \infty$) (Greenhow e White, 1997), ω é a frequência da onda, S_m é o coeficiente elástico relacionado as forças de restauração, $v_n(t)$ é a velocidade do flutuador n na unidade de bombeamento, $f(t)$ é a força total aplicada ao flutuador e $K(t - \tau)$ é o termo de memória fluida dado pela Eq. (6) com $R_r(\omega)$ é o coeficiente de amortecimento potencial.

$$[m_m + m_r(\infty)] \frac{dv_n(t)}{dt} \int_0^\tau K(t - \tau) v_n(\tau) d\tau + S_m \int_0^\tau v_n(\tau) d\tau = f(t) \quad (5)$$

$$K(t - \tau) = \frac{2}{\pi} \int_0^\infty R_r(\omega) \cos[\omega(t - \tau)] d\omega \quad (6)$$

Os termos m_r , R_r e S_m estão relacionados a interação do flutuador com as ondas incidentes e será determinado a partir do programa numérico Wamit (Lee and Newman, 1998). A força total $f(t)$ que atua no flutuador é dada na Eq. (7) onde $f_e(t)$ é a força da onda incidente e $f_p(t)$ é a força da bomba.

$$f(t) = f_e(t) + f_p(t) \quad (7)$$

2.4. Bomba-Pistão (Hidráulica)

De acordo com Fialho (2007) bombas de pistão são classificadas como bombas de deslocamento positivo, estas bombeiam fluido sob pressão com uma vazão pulsante, problema que pode ser atenuado por meio do aumento do número de pistões. Adicionalmente, a pressão de trabalho está relacionada com a área do pistão e o volume bombeado por revolução é dado pelo deslocamento do pistão multiplicado por sua área. Considerando para o projeto em questão a força da bomba expressa em $f_p(t)$ que pode ser vista na Eq. (8) na qual p_a é a pressão no acumulador em pascal, A_p é a área da seção transversal da bomba e $p_p(t)$ é a pressão na bomba.

$$f_p(t) = A_p p_p(t), p_p(t) \approx \begin{cases} 0, v_n(t) > 0 \\ p_a, v_n(t) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

Considerando ondas regulares e senoidais para águas profundas maiores que 25 m, por Falnes (2002) a força da onda incidente ($f_e(t)$) pode ser expressa pela Eq. (9) e na Eq. (10) que $F_e(\omega)$ é o coeficiente da força de excitação, ρ_w é a massa específica da água do mar, g é a aceleração da gravidade e H_w é a altura da onda incidente.

$$f_e(t) = F_e(\omega) \cos \omega t \quad (9)$$

$$F_e(\omega) = H_w \sqrt{\frac{\rho_w g^3 R_r(\omega)}{2\omega^3}} \quad (10)$$

2.5. Acumulador Hidropneumático e Câmara Hiperbárica

Um acumulador hidropneumático e uma câmara hiperbárica compõem o sistema de armazenamento de fluido, o armazenamento se faz através da compressão do ar, que, originalmente, preenche a maior parte da câmara. Diante de Estefen (2010), é um sistema utilizado como um filtro das oscilações das ondas, deixando a pressão e vazão de saída mais uniformes.

Diante de EPOLL (2019), o acumulador de pistão consiste em um cilindro de aço fechado em que desliza um pistão de alumínio hermético. O interior do seu cilindro é dividido em duas câmaras, uma enchida com gás de pré-carga e outro com óleo, ou de um modo geral, com fluido do sistema.

Por meio de Moran, Shapiro e Boettner, para definir o volume inicial de gás no acumulador utiliza a lei de Boyle-Mariotte que leva em conta as transformações de estado em gases ideais. Para isso, consideramos na Eq. (11) em que P é a pressão no ponto de estado e V sendo o volume em determinado estado. A variável i está relacionado com a condição de pré-carga, mínima e máxima de trabalho para 0, 1 e 2 respectivamente. Por fim, o valor n denota o expoente politrópico que, em condições isotérmicas, é igual a 1. Dessa forma, é possível reorganizar a equação anterior para Eq. (12) em que ΔV que é a diferença dos volumes de trabalho máximos e mínimos.

$$P_0 * V_0^n = P_1 * V_1^n = P_2 * V_2^n \quad (11)$$

$$V_0 = \frac{\Delta V}{P_0 * \left(\frac{1}{P_1} - \frac{1}{P_2}\right)} \quad (12)$$

Para Falnes (2002), outra variável importante diante do dimensionamento é o fluxo de energia média das ondas (em W/m), considerando uma frente de onda senoidal, pode ser calculada através da Eq. (13) em que T é o período da onda.

$$J = \frac{\rho \omega g^2}{32\pi} H^2 \omega T \quad (13)$$

Diante de Falnes (2002), a pressão máxima de trabalho será dada pela potência máxima que um conversor de energia das ondas é capaz de absorver. Essa análise pode ser vista na Eq. (14) em que R_r é o coeficiente de amortecimento potencial e F_e é a força de incidência das ondas no conversor.

$$P_{a,max} = \frac{F_e^2}{8R_r} \quad (14)$$

Supondo que toda essa potência fosse absorvida pelo sistema e levando em conta as condições de transformação isotérmicas é viável a utilização da Eq. (15) abaixo.

$$\int_0^2 p dv \Rightarrow p * v = m * R * T \quad (15)$$

Assim, é realizável o volume na condição máxima de trabalho do gás através da Eq. (16) na qual pode ser obtida resolvendo da integral da equação anterior.

$$W = m * R * T * \ln\left(\frac{V_2}{V_0}\right) \Rightarrow V_2 = e^{\frac{W}{mR * T}} * V_0 \quad (16)$$

Neste caso definimos v como vazão mássica do ar e W como a potência máxima a ser absorvida. Daí, P_2 é encontrado a partir da Eq. (17).

$$P_2 = P_0 * \frac{V_0}{V_2} \quad (17)$$

Para as condições no estado 1 é permitido o mesmo procedimento definindo agora v como a potência mínima que deve ser o acumulador deve absorver para manter a usina em funcionamento. Em ambos os casos, m deve ser estimado como uma vazão ideal para uma geração de energia aceitável por parte do sistema. Como todo processo de design é iterativo, os valores obtidos aqui devem ser relacionados com o modelo matemático em estudo e reavaliados caso se prove a ocorrência de sub ou superdimensionamento.

2.6. Turbina Pelton

A turbina Pelton é uma turbina de impulso puro, um jato de fluido é lançado por um bocal contra pás rotativas da turbina e transforma a energia cinética do jato em potência de eixo. A turbina Pelton é utilizada principalmente para grandes alturas em conjunto com baixas vazões de fluido (SAYERS, 1990).

Bran e Souza (1969) diz que a rotação específica n_{qa} (também chamada de n_s) é determinada pela Eq. (18) em que N é a rotação em Hz, Q é a vazão mássica e Y é o trabalho específico. Adicionalmente foi mostrado que se pode calcular o rendimento da turbina Pelton usando como parâmetro a velocidade específica.

$$n_{qa} = n_q * 10^3 = N * \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{1}{4}}} * 10^3 \quad (18)$$

2.7. Gerador

O gerador utilizado na usina maremotriz é do tipo síncrono que possui um estator dinâmico, um circuito de campo e enrolamentos de amortecimento. O modelo do gerador síncrono considerado neste trabalho é descrito em (Krause et al., 1995). Considerando valores em pu, a potência ativa gerada pode ser calculada na Eq. (19) em que V_d , V_q , I_d e I_q representam respectivamente as tensões e correntes nos eixos d e q.

Por outro lado, de acordo com a 2ª lei de Newton, o movimento do rotor obedece a Eq. (20) diferencial onde J_m é o momento de inércia combinado do gerador síncrono e da turbina, T_m é o torque mecânico e T_e é o torque elétrico. Reordenando-se os termos e reescrevendo a equação de movimento Eq. (20) em pu (Kundur, 1994), tem-se na Eq. (21) a rotação específica.

$$n_{qa} = n_q * 10^3 = N * \frac{Q^{\frac{1}{2}}}{Y^{\frac{1}{4}}} * 10^3 \quad (19)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = T_m - T_e \quad (20)$$

$$\frac{d\bar{\omega}_m}{dt} = \frac{1}{2H_J} (\bar{P}_m - \bar{P}_e) \Rightarrow H_J = \frac{J_m \omega_m^2}{S_N} \quad (21)$$

3. RESULTADOS

3.1. Cálculo do Braço e Flutuador

Nessa etapa, utilizando as ferramentas de algoritmo no Matlab e adaptação dos gráficos no Microsoft Excel foi possível procurar parâmetros para os dados iniciais flutuador semi submerso. Antes disso, para inserção do período médio do ciclo da onda e a média da amplitude foi utilizada uma coleta de dados na praia dos Artistas em Aracaju/SE fornecido retiradas do site Surfgru que executa diariamente o modelo de ondas WAVEWATCH III®. Dessa forma, foi retirado para esse local de junho de 2018 a junho de 2019 uma média de anual de período das ondas de 6,70 s e a amplitude das ondas 1,30 m.

A onda incidente aplicada no programa do Wamit teve característica senoidal na qual considerou os dados de onda WAVEWATCH III® para $T = 6,70$ s e $H_w = 1,30$ m. Em seguida, o flutuador é considerado como um cilindro diante dos parâmetros R_r e m_r realizados por uma massa de 17 toneladas para o braço. Por meio da Eq. (13) e Eq. (14), o fluxo de potência para esta onda incidente é 10,9 kW/m e a potência máxima que o conversor pode extrair das ondas é de 59,7 kW.

Dessa forma, foi possível modelar inicialmente com as mesmas características da usina de maremotriz da COOPE na qual segue o braço mecânico feito no SolidWorks 2017 e o apoio do braço articulador através da movimentação de um parafuso passante engastado no mancal do apoio, diante da Figura 2. Por fim, o flutuador mecânico que foi dimensionamento inicialmente diante da Figura 3 com medidas nas quais terá interações de raios do flutuador através do programa do WAMIT.

Figura 2. Braço articulador e apoio em desenho CAD (Autores, 2019)

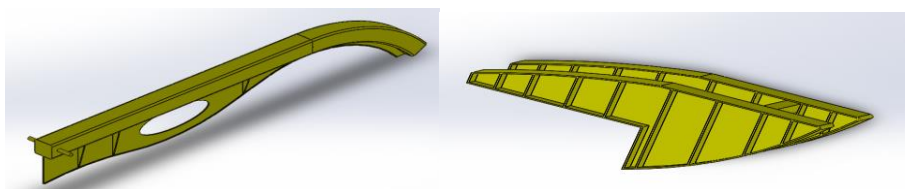
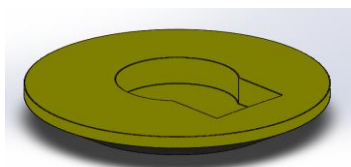


Figura 3. Flutuador em desenho CAD (Autores, 2019)



3.2. Medição da Bomba-Pistão

A quantidade de volume que entra por ciclo da bomba de pistão é dependente da altura das ondas. Como forma de aprimoramento, decidiu-se que a rotina criada disporia de 60 s de operação caso a vazão de entrada fosse zero. Dessa forma, como já se tinha os resultados de volume bombeado para o ciclo de um período, convertia-se o tempo de um minuto em quantidade de períodos. E dessa forma, estimava-se a vazão média de operação para 60 s.

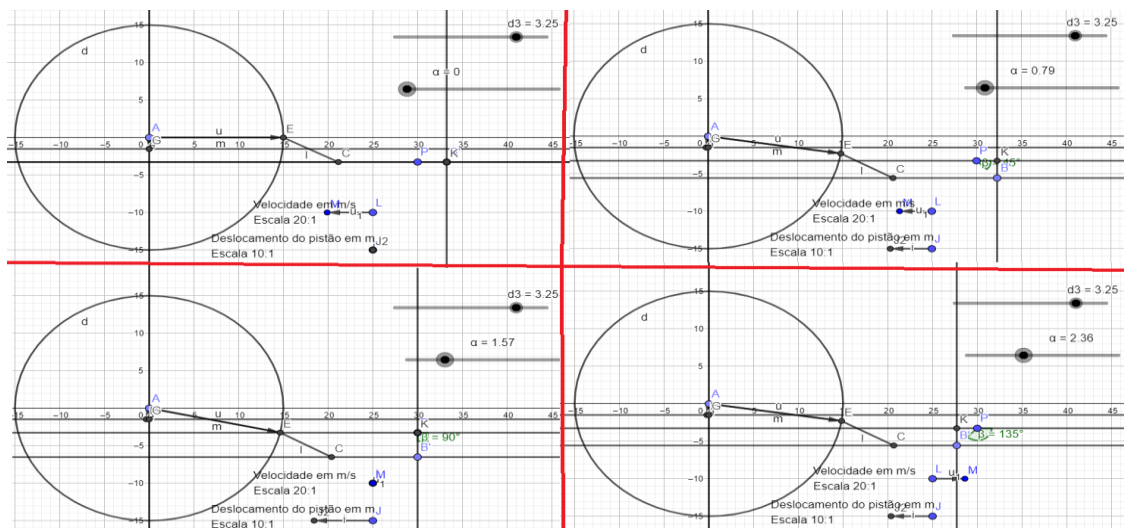
Foi utilizado o software matemático Geogebra para realizar um estudo de movimento do conjunto braço e flutuador da usina de ondas, como pode ser observado na Figura 4 na qual o movimento vertical das ondas é convertido em movimento horizontal do pistão hidráulico que bombeia a água para o acumulador hidropneumático.

Na modelagem do estudo de movimento é possível variar a altura da onda representada por d3 na barra deslizante da imagem acima, além do mais, é possível alterar o período da onda gerada “T”. O ponto “G” (abaixo da origem), representa o deslocamento do pistão da bomba, e tem um deslocamento cerca de 10 vezes menor que o ponto “C” onde fica a boia do flutuador, os vetores representados por u e i, mostram a velocidade e a posição do ponto “G” respectivamente.

A velocidade máxima do pistão que foi encontrada no estudo de movimento de uma onda de período 8s e 1,5m de altura é 23 cm/s e seu deslocamento máximo é 15 cm, no entanto, isto é só um exemplo visto que esse deslocamento e a

velocidade variam com a variação dos parâmetros de entrada das ondas, o deslocamento máximo ocorre quando a velocidade é igual a 0 e a velocidade máxima ocorre quando a posição é igual a 0, essas duas hipóteses acontecem em 0° e 90° e também em 180° e 270° nessa ordem.

Figura 4. Quadros para $0, 45, 90$ e 135° de uma onda passando pelo flutuador (Autores, 2019)



3.3. Avaliação do Acumulador Hidropneumático e da Câmara Hiperbárica

Foi adotado os seguintes valores iniciais diante a Tabela 1 na qual consta dados importantes iniciais para dimensionamento. Dessa forma, é praticável a utilização da Tabela 2 e Tabela 3 que mostra as flutuações obtidas para a vazão de saída Q_o , potência mecânica, potência elétrica e velocidade de rotação quando o volume da câmara V_c e o volume do acumulador V_a são respectivamente multiplicados e divididos por um fator igual a 10. Outro ponto em questão é que as flutuações aplicadas no programa Wamit traz que as variáveis apresentam um aumento na flutuação quando os volumes dos equipamentos são menores. Em seguida, foi dimensionado a câmara hiperbárica e o acumulador estão representados na Figura 5 através da plataforma CAD.

Tabela 1. Valores iniciais adotados (Autores, 2019).

Variáveis	Valor
Q_r	0,03 m ³ /s
$V_r = V_t$	6,3 m ³
X_{ar}	1,7 m
H_r	360 mca
w_r	188,5 rad/s
Área Acumulador (A_a)	0,57 m ²
T_w	0,15 s

Tabela 2. Flutuação nas variáveis para variação no volume da câmara hiperbárica (Autores, 2019).

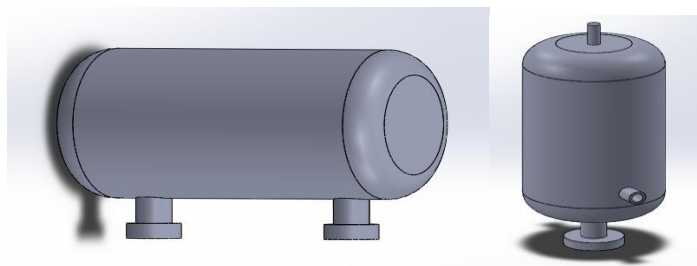
Variáveis	0,1 V_a	V_a	10 V_a
$\overline{Q_o}$	1,247%	0,301%	0,0278%
$\overline{P_m}$	3,756%	0,9098%	0,0919%
$\overline{P_e}$	0,00298%	0,00069%	0,000287%
$\overline{\omega_m}$	0,2798%	0,0710%	0,0081%

Tabela 3. Flutuação nas variáveis para variação no volume do acumulador hidropneumático (Autores, 2019).

Variáveis	0,1 V_a	V_a	10 V_a
$\overline{Q_o}$	0,289%	0,277%	0,1201%

\overline{P}_m	1,1678%	0,905%	0,3802%
\overline{P}_e	0,0009%	0,00073%	0,00039%
$\overline{\omega}_m$	0,0778%	0,0712%	0,012%

Figura 5. Câmara Hiperbárica e Acumulador hidropneumático em CAD (Autores, 2019)

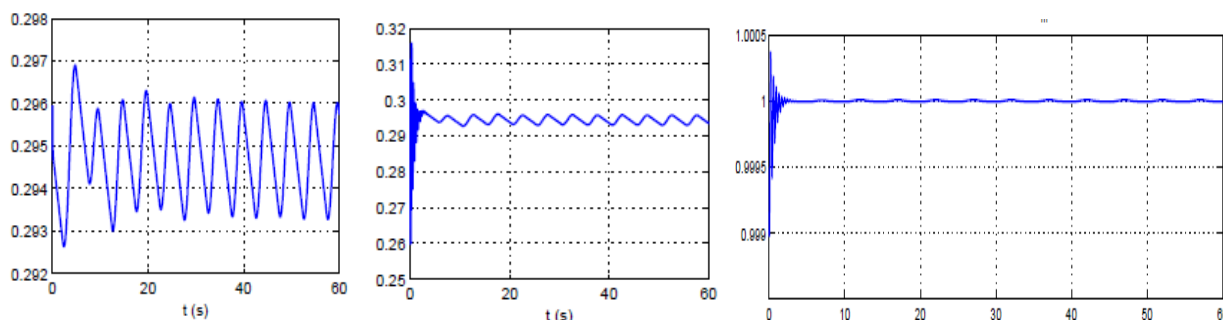


3.4. Mensuração do Gerador

O gerador elétrico foi selecionado através das combinações da Eq. (19), Eq. (20) e Eq. (21) e implementados pelos Autores no algoritmo por meio da sua potência nominal de geração elétrica e a potência aparente do gerador. Dessa forma, foi selecionado de um modelo síncrono diante da WEG (2019) de potência nominal (SN) de 125 kVA, tensão nominal de 380 V (em 60 Hz) e 2 pares de polos.

Assim, com a interação das variáveis de entrada dos dimensionamentos aplicados em torno do trabalho é possível ver o comportamento na Figura 6 do conversor conectado na rede elétrica através da velocidade de rotor e potência ativa média. Esse comportamento traz em condições iniciais que são escolhidas de modo que a máquina apresente aproximadamente a mesma frequência, tensão e fase da rede.

Figura 6. Resultados de simulação (Autores, 2019)



Logo, a velocidade de rotação do conjunto Pelton e gerador, considerou-se uma carga resistiva com potência ativa equivalente a potência gerada pois o sistema foi simulado sem um regulador de velocidade. Considerando a potência ativa média de saída de 0, 2944 pu, tem-se que a potência gerada e aproximadamente 36, 8 kW. Deste modo, a eficiência do sistema de geração simulado e aproximadamente 62%.

4. CONCLUSÃO

Neste trabalho, apresentou-se métodos de equações matemáticas que foram utilizadas para os equipamentos que fazem parte da usina de maremotriz que foram descritos nas rotinas dos softwares mencionados. Diante dos resultados obtidos, foi possível dimensionar e projetar a montagem da usina diante do modelo do protótipo inserido no Porto do Pécem/CE.

O trabalho mostrou o comportamento do sistema de geração a partir das marés através da aplicação de elementos de máquinas, máquinas de fluxo e instalações industriais nas quais obtiveram condições boas de operação. Notou-se que o rendimento da usina foi de 62% na qual quanto maior o volume da câmara e do acumulador menor é a flutuação apresentada em variáveis como a vazão, a potência mecânica e potência elétrica gerada pelo conversor. Outra característica é que as flutuações observadas na potência mecânica são reduzidas na potência elétrica gerada e na velocidade do rotor, devido a inércia existente no conjunto turbina-gerador.

Com as diversas oportunidades de estudo e desafios a serem encarados, essa tecnologia de maremotriz traz uma exploração de uma fonte energética que é pouco avaliada. Entretanto, tem um grande potencial a ser replicado e aperfeiçoamento nesse setor energético. Nesse presente trabalho como perspectiva de trabalhos futuros pode ser realizado

a análise da perda energética por conta de parâmetros da usina aqui não estudados como, por exemplo, em tubulações. Outro ponto visto é estudo de preço na implantação e a viabilidade/sustentabilidade financeira do dado modelo de usina de ondas.

Outro aspecto interessante é a produção de interface gráfica entre o usuário e os dados empíricos da usina através da implantação de um algoritmo. Através disso é possível introduzir um modelo de previsão de ondas dentro do algoritmo para ser aplicado essa interface para qualquer tipo de local. Por fim, estudar um controle de vazão dinâmico do acumulador hidropneumático para não o atrelar a uma vazão constante como foi feito nesse relatório.

5. REFERÊNCIAS

- BRAN, Richard; SOUZA, Zulcy. Máquinas de Fluxo: Turbinas–Bombas-Ventiladores. Rio de Janeiro: Editora Ao Livro Técnico S. A., 1969.
- CAPELLÁN-PÉREZ, I, et al. Fossil fuel depletion and socio-economic scenarios: An integrated approach, 2014.
- COPPE. Balanço do mar se transforma em energia elétrica no litoral do Ceará. 2012. Disponível em: <<http://www.coppenario20.coppe.ufrj.br/?p=805>>. Acesso em: 21 ago. 2018.
- CRUZ, João M.B.P; SARMENTO, António J.N.A. Energia das Ondas: Introdução aos Aspectos Tecnológicos, Económicos e Ambientais. Alfragide: Instituto do Ambiente, 2004. 61 p. Disponível em: <http://energiasrenovaveis.com/images/upload/Energias_ondas_Cruz_1.pdf>. Acesso em: 08 ago. 2018.
- DA SILVA, Karine Baitz. Energia das ondas no Brasil. 2018. Disponível em: <<http://www.usp.br/portaliobiosistemas/?p=7953>>. Acesso em: 30 dez. 2018.
- DE BARROS, Evandro Vieira. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. *Engevista*, v. 9, n. 1, 2007.
- EL-WAKIL, Mohamed Mohamed. Powerplant Technology. 2º Edition. ed. New York: McGraw-Hill Book Co, 1988. 861 p.
- ELETROBRÁS. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Manual de microcentrais hidrelétricas. Rio de Janeiro, 1985. 584 p.
- EPOLL. Hydropneumatic Piston Accumulators. 2019. Disponível em: <http://www.randergmbh.de/downloads/epe_engl.pdf>. Acesso de 10 fev. 2019.
- Falnes, J. (2002). *Ocean Waves and Oscillating Systems: Linear Interaction including Wave-Energy Extraction*, Cambridge University Press, USA.
- FIALHO, Arivelto Bustamant. Automação hidráulica: projetos dimensionamento e análise de circuitos. 5º. ed. São Paulo: Érica, 2007. 284 p.
- GEOGEBRA. GeoGebra: Início. 2019. Disponível em <<https://www.geogebra.org/>>. Acesso de 08 jan. 2019.
- HODGE, B. K. Sistemas e aplicações de energia alternativa. 1ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 309 p.
- LOBO, Matheus Santos; SANTOS, Bárbara Savina Silva; LAVENÈRE-WANDERLEY, Ana Amelia de Oliveira. Análise Estatística Anual e Mensal das Ondas Atuantes na Costa de Ilhéus (Bahia) Baseada na Reanálise de Série Temporal de 31 Anos do Modelo de Ondas WAVEWATCH III. *Revista do Departamento de Geografia*, n. spe, p. 67-74, 2017.
- MATHWORKS. Matlab: Products. 2018. Disponível em <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>>. Acesso de 02 nov. de 2018.
- MORAN, Michael J.; SHAPIRO, Howard N.; BOETTNER, Daisie D. Princípios de termodinâmica para engenharia. Grupo Gen-LTC, 2000.
- NOOA. MMAB Operational Wave Models. 2019. Disponível em: <<https://polar.ncep.noaa.gov/waves/>>. Acesso de 10 out. 2018.
- ROSA, P. B. G., Machado, I. R., da Cunha, J. P. V. S., Lizarralde, F., Watanabe E. H., Modelagem da Dinâmica de um Conversor Hiperbárico de Energia das Ondas em Energia Elétrica, XVIII Congresso Brasileiro de Automática / Bonito-MS, 12 a 16 de Setembro. 2010.
- SAYERS, A. T. Hydraulic and compressible flow turbomachines. Cape Town: [s.n.], 1990. 301 p.
- SOLIDWORKS BRASIL. 2019. Produtos SolidWorks. Disponível em: <<https://www.solidworksbrasil.com.br/sw/solidworks-products-adwords.htm>>. Acesso de 15 out. de 2018.
- TAPIA, Alejandro et al. Modelado de micro-central hidráulica para el diseño de controladores con aplicación en regiones aisladas de Honduras. *Actas de las XXXVIII Jornadas de Automática*, 2017.
- TOLMASQUIM, Mauricio T.; GUERREIRO, Amílcar; GORINI, Ricardo. Matriz energética brasileira: uma prospectiva. *Novos estudos CEBRAP*, n. 79, p. 47-69, 2007.
- WAMIT Inc. WAMIT User Manual. Version 7.1, p. 375, 2015.
- WEG. Manual Técnico WEG: Geradores Síncronos Linha GPlus. 2019.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.