

Estudo Comparativo da Implantação e Operação de Usinas Maremotrizes

Leandro Borges * Denisson Oliveira ** Pedro Bezerra Leite Neto ***

* Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA (leandro.borges@discente.ufma.br).

** Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão, MA (dq.oliveira@ufma.br)

*** Instituto de Energia Elétrica, Universidade Federal do Maranhão - Campus Balsas, MA (pedro.neto@ufma.br)

Abstract: The constant and growing demand for electricity challenges the energy sector to seek new sources of power generation, like the oceanic energy. This type of source has a large theoretical production capacity and due to energy conversion technologies it is observed that the use of tidal energy capacity can occur in several ways: by employing the amplitude variation between ebb tide and flood tide, using a reservoir to harness the potential energy stored in the water column; or by the tidal currents created by the movement of water masses, harnessing the kinetic energy of the fluid. Each of these forms of use has its characteristics, advantages and disadvantages. This paper aims to compare the operation of two tidal power plants, one based on tidal current and the other based on tide height variation, in the state of Maranhão, considering different aspects such as energy generation within the same time cycle, costs and environmental impacts. The simulations are carried out using real data collected at anchorage in the São Marcos Bay and tide tables provided by the Brazilian Navy.

Resumo: A constante e crescente demanda por energia elétrica desafiou o setor energético a buscar novas fontes de geração de eletricidade. Dentre as novas tecnologias estão as energias oceânicas. Este tipo de fonte possui uma capacidade teórica de produção muito grande e devido as tecnologias de conversão de energia observa-se que o aproveitamento da capacidade energética das marés pode ocorrer por diversas formas: por meio da variação da amplitude entre a preamar e baixa-mar, usando um reservatório para aproveitamento da energia potencial armazenada na coluna de água; ou pelas correntes de maré criadas pelo movimento das massas de água, aproveitando a energia cinética do fluido. Cada uma destas formas de aproveitamento possui suas características, vantagens e desvantagens. Este trabalho visa comparar a operação de duas usinas maremotrizes, uma baseada em corrente de maré e outra baseada em gradiente de maré, no estado do Maranhão, considerando diferentes aspectos como geração de energia dentro de um mesmo ciclo temporal, custos e impactos ambientais. As simulações são realizadas usando dados reais coletados em fundeio na Baía de São Marcos e tábuas de marés fornecidas pela Marinha do Brasil.

Keywords: Renewable energies, tidal current, tidal range, ocean energy.

Palavras-chaves: Energias renováveis, corrente de maré, gradiente de maré, energias oceânicas.

1. INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento da demanda por energia elétrica associada ao uso de combustíveis fósseis, bem como os aspectos ambientais associados à sua produção, desafiou o setor energético a buscar novas fontes de geração de eletricidade. Em 2015, ao assinarem o Acordo de Paris, várias nações se comprometeram a reduzir as emissões de gases de efeito estufa como forma de frear o aumento da temperatura do planeta.

As fontes renováveis devem contribuir para superar o desafio da descarbonização da indústria da energia. No Brasil, a energia proveniente de fontes eólica, solar e biomassa já está consolidada e ganhando cada vez mais espaço na matriz elétrica brasileira. Juntas, estas fontes

já correspondem a 19.6% do total produzido no país EPE (2021).

As energias oceânicas são fontes com grande potencial energético e que podem ser adicionadas à matriz elétrica. No entanto, tais fontes ainda são pouco exploradas. Este contexto tem impulsionado centros de pesquisa a desenvolverem tecnologias e protótipos para aproveitamento delas. Dentre as diferentes formas de aproveitamento existentes, as mais viáveis atualmente são através das ondas, das correntes de maré e do gradiente de maré, sendo que as duas últimas já possuem plantas em diferentes estágios operando em alguns países (Edenhofer et al. (2011)).

Diferentes autores tem investigado e documentado a evolução das tecnologias aplicadas a exploração das energias

oceânicas (Elghali et al. (2007); Neto et al. (2011); De Dominicis et al. (2017); Warak and Goswami (2020); Zaidi et al. (2021)). Em (Sousa Almeida et al. (2019); de Sá et al. (2018)) os autores investigam o uso de geração a partir de correntes de maré em microrredes isoladas usando algoritmos genéticos para determinar o tamanho ótimo da capacidade a ser instalada de acordo com dados reais de marés no estado do Maranhão. Sousa Almeida et al. (2019) já avançam considerando a presença de fonte fotovoltaica no mesmo sistema. Tendo em vista o uso de diferentes fontes para compor o parque de geração em microrredes isoladas, Neto et al. (2020) investigam diferentes aspectos de complementaridade entre as fontes solar, eólica e de correntes de maré.

Considerando a integração a sistemas elétricos conectados, Almeida et al. (2018) investigam as consequências da conexão de uma planta de geração usando correntes de maré a um sistema de distribuição, enquanto de Sá et al. (2017) investigam a alocação deste tipo de planta visando a melhoria da margem de potência reativa no sistema elétrico. Moon et al. (2020); Liu et al. (2016); Ma et al. (2021) investigam diferentes aspectos relacionados a dispositivos de eletrônica de potência aplicados no condicionamento da energia gerada, aspectos de confiabilidade e impactos ambientais provocados pela instalação de plantas de geração usando fontes oceânicas, respectivamente.

Todos estes trabalhos sinalizam que as energias oceânicas se apresentam como uma opção viável de aproveitamento em regiões com condições naturais propícias, como comprovam a continuidade nas investigações relacionadas ao tema. Nesse aspecto, este artigo pretende contribuir comparando a implantação de duas usinas baseadas em fontes oceânicas, uma utilizando correntes de maré e outra usando gradiente de maré, em termos energéticos, econômicos e de impactos ambientais utilizando dados reais obtidos no litoral do Maranhão. Para tornar essa comparação possível, as duas plantas seriam instaladas em locais próximos, permitindo essa análise energética dentro de um mesmo período temporal para apontar se uma opção é mais produtiva que a outra, além de discutir possíveis impactos ambientais e sociais provenientes dos dois tipos de tecnologias.

2. FONTES DE ENERGIAS OCEÂNICAS

Os tipos de aproveitamentos da energia oceânicas que atualmente possuem maiores graus de desenvolvimento tecnológico são aqueles a partir de ondas, de correntes de maré e de gradiente de maré. Em relação a geração de energia usando ondas, os dispositivos utilizados geralmente aplicam o princípio apresentado na Figura 1, em que um dispositivo flutuador se movimenta de acordo com as ondas, comprimindo ar em um reservatório. Este ar é usado para acionar uma turbina conectada ao eixo do gerador para produção de energia elétrica.

As plantas baseadas em correntes de marés se aproveitam da energia cinética da massa do fluido atravessando a área das hélices para mover a turbina, e consequentemente gerar eletricidade. Dentro dessa modalidade existem diversas topologias possíveis em relação à fixação e posicionamento das turbinas - usando boias montadas em estruturas fixa-

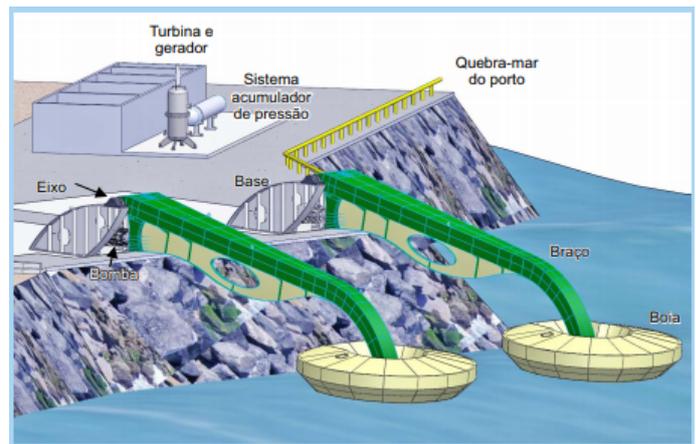


Figura 1. Esquema de uma Usina de Ondas (Fonte: Borges (2020))

das no fundo do mar, ou usando barcos ou outras estruturas flutuantes. A Figura 2 ilustra esse conceito.

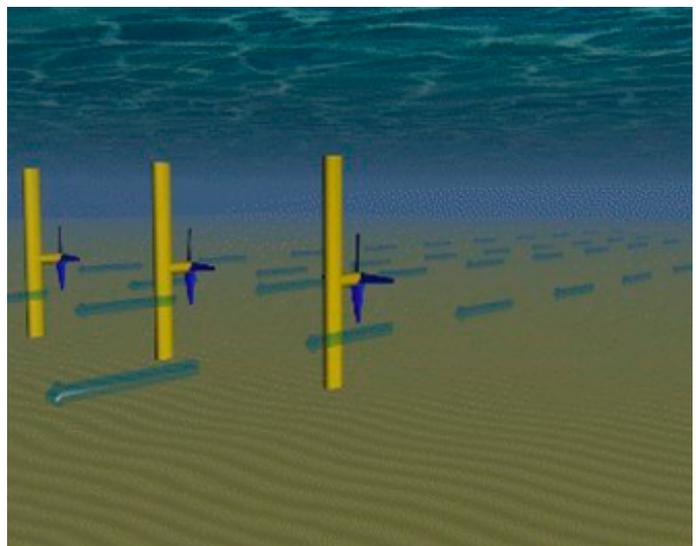


Figura 2. Funcionamento da geração por corrente de maré (Fonte: AQUA-RETProject (2012))

As plantas baseadas em gradiente de maré funcionam como hidrelétricas convencionais, formando um reservatório com uma queda d'água entre os dois lados de uma barragem. Ao atingir o nível desejado, a água flui do nível superior para o nível inferior, gerando eletricidade. Este esquema é apresentado na Figura 3. A geração pode acontecer em sentido único (enchente ou vazante) ou em ambos os sentidos. As usinas maremotrizes de La Rance, na França, e Jiangxia, na China, são exemplos deste tipo de aproveitamento de energias oceânicas.

3. METODOLOGIA

3.1 Determinação do potencial de plantas de gradiente de maré

A capacidade de armazenamento do reservatório e a amplitude das marés são os principais fatores que definem o potencial energético da geração por gradiente de marés. Tomando-se como referência a Figura 4, este potencial

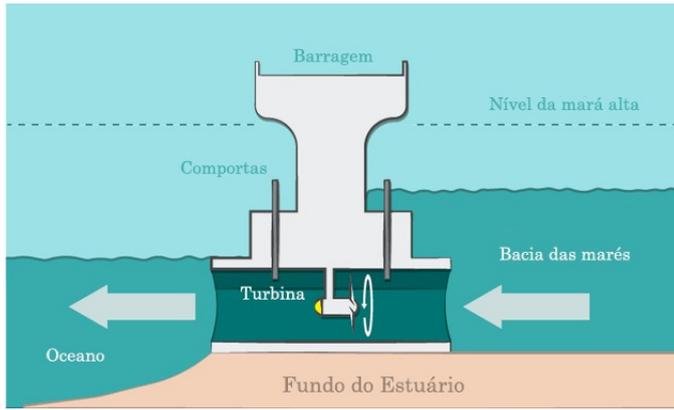


Figura 3. Ilustração de geração de energia por gradiente de maré (Fonte: Stroski (2019))

energético é calculado conforme demonstrado em Leite Neto et al. (2015) e resumido a seguir:

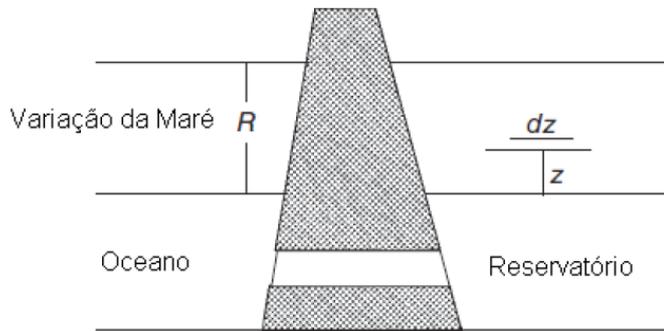


Figura 4. Principais parâmetros para o cálculo do potencial energético de um local (Fonte: Neto (2009))

Para um reservatório a uma altura z acima da maré baixa, a energia (E_f) necessária para enchê-lo será:

$$E_f = \rho g \sum_0^{R_z} z A_z dz \quad (1)$$

Para o caso particular onde A_z é constante:

$$E_f = \rho g \sum_0^{R_z} z A_z dz = \frac{\rho g A R^2}{2} = \frac{\rho g V R}{2} \quad (2)$$

Em que:

A_z é a área do espelho d'água do reservatório a uma altura z acima de uma referência;

ρ é a densidade da água do mar;

g é a aceleração gravitacional;

R_z é a faixa de variação da altura da maré.

V é o volume do reservatório.

Portanto, a energia para um ciclo completo de maré será:

$$E = \rho g V R \quad (3)$$

Considerando-se que A esteja em quilômetros quadrados e R esteja em metros, o potencial energético total será:

$$E = 2793 \times A R^2 kWh \quad (4)$$

Para 705 ciclos de marés por ano,

$$E = 1,97 \times 10^6 A R^2 kWh \quad (5)$$

A potência média extraível em um ciclo de maré será:

$$E = 225 \times A R^2 kW \quad (6)$$

Embora a equação 1 considere que a área do espelho d'água A_z seja em função da altura z , o desenvolvimento das equações 2 a 6 assume que esta área seja constante. Desta forma, algumas considerações relacionadas a este método devem ser feitas: primeiro, assume-se que as paredes do reservatório sejam praticamente verticais, e portanto, A não seja função de z ; segundo, as equações deduzidas aqui se aplicam a reservatórios cujas dimensões na direção da propagação da onda de maré são menores ou iguais ao comprimento da onda de maré; terceiro, as possíveis influências das características do fundo do reservatório na propagação da maré não foram consideradas. Entretanto, se o reservatório for suficientemente profundo e as marés apresentarem níveis razoavelmente altos, as equações 5 e 6 podem fornecer uma estimativa da magnitude do potencial energético de um local, conforme Neto (2009).

Estimativas precisas da geração anual devem considerar que a geração energética da usina varia de acordo com os níveis do mar e do reservatório. Além disso, as características operacionais dos turbogeradores também são determinantes no processo de geração, conforme descrito em Leite Neto et al. (2015).

Nesse sentido, é demonstrado em Leite Neto et al. (2015) que os valores estimados para a vazão através das turbinas podem ser obtidos a partir da equação 7.

$$Q = A_t \sqrt{2gh} \quad (7)$$

Em que h corresponde à altura em metros de queda d'água disponível e A_t corresponde a área em m^2 utilizável de cada turbina. Além disso deve ser respeitada a restrição de alturas mínimas e máxima do reservatório, dado em (8).

$$h_{min} \geq h_{res} \geq h_{max} \quad (8)$$

Em que:

h_{min} : altura mínima que pode ser alcançada no reservatório;

h_{max} : altura máxima que pode ser alcançada no reservatório;

h_{res} : nível do reservatório, em metros.

3.2 Determinação do potencial de plantas de correntes de maré

A geração de energia oceânica através da corrente de maré possui características semelhantes à geração eólica quanto à modelagem de potência mecânica transformada

da energia cinética contida no fluido. As duas formas de geração se diferenciam pelo tipo de fluido e o material que constitui as turbinas, pois o mar é um ambiente mais insalubre e requer o uso de materiais diferenciados.

A exploração da energia cinética para geração de eletricidade pode ser modelada através das equações 9 a 14.

$$P_{CM} = \frac{m(v^2)}{2} \quad (9)$$

$$m = \rho Q \quad (10)$$

$$Q = Av \quad (11)$$

$$P_{CM} = \frac{1}{2} \rho A (v^3) \quad (12)$$

$$A = \pi(R^2) \quad (13)$$

$$P_{CM} = \frac{1}{2} \rho \pi (R^2) (v^3) \quad (14)$$

Em que m é a massa do fluido em kg , v é a velocidade do fluido em m/s , ρ é a densidade do fluido em kg/m^3 , Q é a vazão em m^3/s , A é a área varrida pelas pás do rotor em m^2 e R é o raio da pá da turbina em m .

Do total de energia cinética disponível, apenas uma parcela é transformada em energia mecânica, em que a relação entre as duas energias é dada através do coeficiente de potência C_p . Para turbinas de corrente de marés esse coeficiente está entre 0,35 e 0,5, conforme Elghali et al. (2007).

O coeficiente de potência máximo foi encontrado relacionado as velocidades de entrada (v_1) e de saída da turbina (v_2), segundo demonstrado por Lanchester-Betz para $a = \frac{1}{3}$, onde $a = \frac{v_2}{v_1}$, esse valor será $C_p = 59,26\%$. Este termo é comumente chamado de limite de Betz. Desse modo a quantidade de energia mecânica transferida da corrente de maré para a turbina é dada por:

$$P_{CM} = \frac{1}{2} (C_p) \rho \pi (R^2) (v^3) \quad (15)$$

Através da equação 15, pode-se verificar que existe uma vantagem da geração por corrente de maré quando comparada a geração por fonte eólica, devido a densidade da água do mar ser cerca de 800 vezes maior que a densidade do ar. Porém, destaca-se também a importância da velocidade da maré no estuário, por esta ser diretamente proporcional a energia mecânica transferida.

3.3 Modelagem dos Recursos Energéticos das Marés

A maré e a corrente de maré possuem um movimento periódico. Um modelo exato da velocidade da corrente de maré em um estuário não é trivial devido a influência dos ventos, o atrito no fundo, as diversas formas do canal e sua constante alteração devido ao desgaste United Nations (2015).

Para modelagem da velocidade da maré utilizou-se o método SHOM (*Service Hydrographique et Océanographique de la Marine*). Este por sua vez necessita das amplitudes da maré ao longo do período estudado, para tanto utilizou-se o método HAM (*Harmonic Analysis Method*).

Na modelagem com o método HAM, a maré é descrita como uma soma de cossenos, e pode ser expressa por:

$$H_t = H_0 + \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (16)$$

De modo que H_0 é a altura média das marés, A_i , ω_i e ϕ_i são, respectivamente, a amplitude, frequência angular e fase de cada componente harmônica.

Para o método SHOM, deve-se medir inicialmente as velocidades na sizígia (V_{st}) e quadratura (V_{nt}) *in situ*. E utilizando os dados estipulados pelo HAM define-se o coeficiente de maré utilizando a equação abaixo:

$$C_m = \frac{H}{H_{eq}} 100 \quad (17)$$

Desse modo a velocidade é dada por:

$$v = V_{nt} + \frac{(C_m - 45)(V_{st} - V_{nt})}{(95 - 45)} \quad (18)$$

Onde 95 e 45 são os coeficientes médio de sizígia e quadratura do método, H é a altura instantânea da maré e H_{eq} é a altura média das marés de sizígia.

3.4 Premissas consideradas

Para realizar a comparação entre a operação de duas usinas maremotrizes baseadas em tecnologias diferentes foram consideradas algumas premissas durante a investigação, apontadas abaixo:

- As duas plantas devem ter potência instalada iguais ou bem próximas, de forma a possibilitar a comparação em termos de produtividade durante o mesmo período. Foram selecionados modelos comerciais de turbinas para as simulações de ambas as plantas;
- A operação durante o mesmo intervalo de tempo nos dois sítios foi investigada, considerando dados reais obtidos por meio de batimetrias e fundeios para medição de velocidades de correntes de marés durante intervalos de tempo iguais. Para este estudo considerou-se a operação das plantas durante um ciclo anual;
- Por falta de dados de custos individualizados dos equipamentos, foi considerado o custo de instalação por kW de potência para se estimar os custos de desenvolvimento de uma planta de geração.
- As posições das turbinas na usina de correntes de maré já obedece aos critérios de distanciamentos mínimos laterais e à jusante das unidades geradoras.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

As simulações foram realizadas considerando dados de batimetria para o estuário do Bacanga, em São Luís, MA.

Já os dados de velocidade de correntes de marés foram obtidos para o canal da ilha do Medo, em São Luís, MA. Os dois locais estão próximos geograficamente. Informações gerais sobre a potência instalada, investimento previsto, quantidade de unidades de geração, energia gerada durante um ano estão disponíveis na tabela 1.

	Ilha do Medo	Barragem do Bacanga
Modo de geração	Corrente de maré	Gradiente de Maré
Potência instalada	588 kW	594 kW
Energia gerada durante um ano	698 MWh/ano	539 MWh/ano
Média mensal de geração	58 MWh/mês	44 MWh/mês
Geração em Jan/2018	55 MWh	44 MWh
Quantidade de turbogeradores na planta	14	4
Investimento total na usina	US\$ 4,6 milhões	US\$ 2,5 milhões
Custo do kW instalado	US\$ 7,9 mil	US\$ 4,2 mil

Na tabela, os resultados mostram que embora tenha uma potência instalada maior, a usina de gradiente de maré possui menor geração ao longo do ano. Isto ocorre por causa das restrições de operação do reservatório, que se encontra em zona urbana e tem sua cota limitada.

O custos de instalação por kW e investimento totais para implantação das usinas apresentados foram obtidos de forma aproximada corrigindo os custos de plantas já desenvolvidas que utilizam a mesma tecnologia, pois não haviam estimativas e dados confiáveis de custos disponíveis. No caso da usina de gradiente de maré, os investimentos em obras civis devem predominar em relação ao custo total. Para o caso da barragem do Bacanga, o reservatório já está formado e os custos das obras civis já foram diluídos ao longo do tempo. Para o caso da planta de correntes de marés, os custos foram baseados em projetos de plantas flutuantes instaladas em embarcações, que é o modelo mais aplicável para o canal da ilha do Medo. Outros tipos de plantas com infraestrutura fixa no fundo do mar devem possuir custos diferentes.

As figuras 5 e 6 mostram o perfil de geração das duas plantas durante um período anual. A planta de correntes de maré possui um resultado superior devido às restrições de níveis do reservatório do Bacanga atualmente. A geração por gradiente de maré também demonstra claramente as variações devidas às marés de sizígia e quadratura em cada ciclo.

No caso da geração por correntes de maré, observamos que a geração do parque hidrocínético apresenta maior variabilidade, embora a máxima potência de geração ocorra durante mais horas do ano, impactando o fator de capacidade da planta. É conveniente chamar a atenção neste cenário que, se houvesse a opção por uma turbina de maior potência e tamanho, o resultado não seria positivo visto que ela necessitaria de maior velocidade para atingir sua capacidade nominal, o que é incompatível com a velocidade da corrente observada no canal, além da necessidade de maior velocidade de partida. O modelo de turbina utilizado neste artigo já foi utilizado em investigações anteriores (Sousa Almeida et al. (2019); Almeida et al. (2018)), onde demonstrou ser a unidade mais apropriada para o local.

As figuras 7 e 8 mostram a geração das unidades para um mês somente, possibilitando observar outros aspectos de cada planta. No caso da planta de geração por gradiente de maré, é possível observar a operação durante as marés de sizígia e quadratura. Durante parte do mês em que

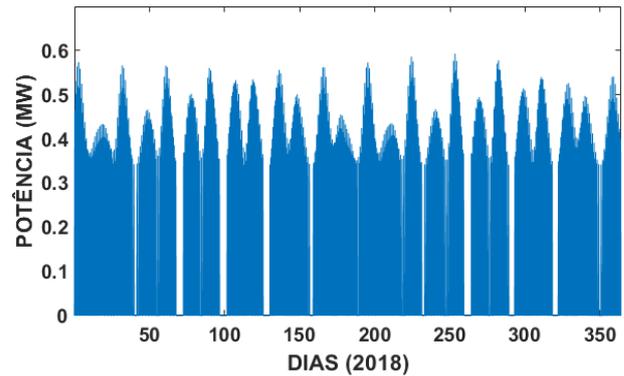


Figura 5. Curva de geração da usina de amplitude de maré, em 2018.

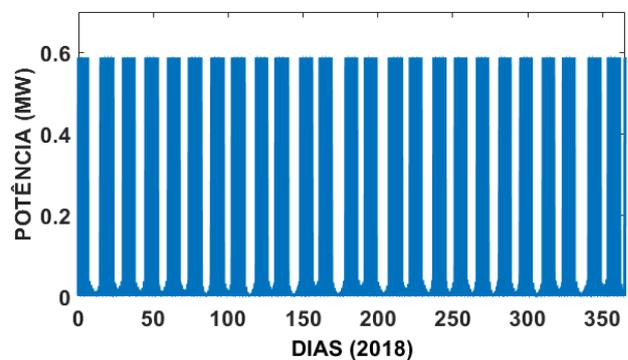


Figura 6. Curva de geração da usina de correntes de maré, em 2018.

as amplitudes de marés são maiores, a geração da planta acompanha o fenômeno natural. Outro aspecto a ser indicado neste caso é que a quantidade de turbinas usadas já foi indicada como a melhor para maximizar a geração, de acordo com a metodologia apresentada em Leite Neto et al. (2015). Aumentar esta quantidade aumentaria a vazão do reservatório, diminuindo rapidamente a queda d'água útil e conseqüentemente a geração total da planta, bem como seu fator de capacidade. Utilizar maior quantidade de turbinas menores também não traria o efeito positivo esperado.

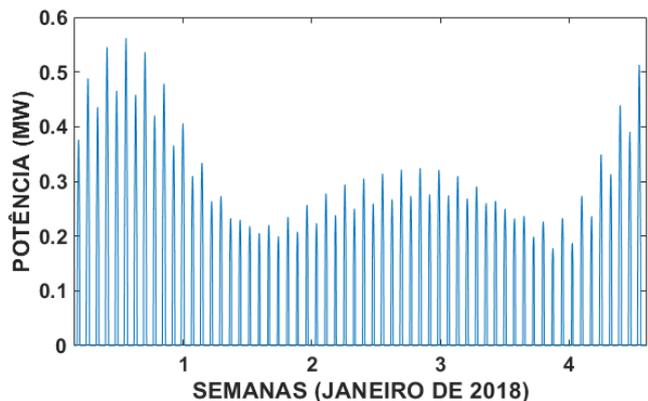


Figura 7. - Curva de geração da usina de gradiente de maré, em janeiro de 2018

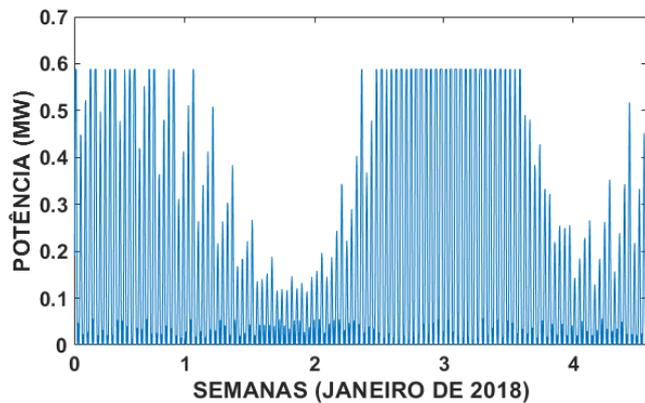


Figura 8. Curva de geração da usina de corrente de maré, em janeiro de 2018

4.1 Aspectos ambientais e sociais relacionados a operação das plantas

A implantação de plantas de geração de energia sempre traz consequências sociais e ambientais. Em relação a plantas de energia maremotriz, estes aspectos precisam ser devidamente avaliados, uma vez que cada projeto apresenta diferentes graus de impactos deste tipo.

No caso de plantas de gradiente de maré as questões ambientais se referem ao ecossistema do estuário onde a usina será construída. Estuários são zonas de grande importância ambiental onde acontece a reprodução de milhares de espécies marítimas. A construção de um reservatório vai impactar todo o ecossistema e deve ser analisada com atenção. Em caso de localização em zonas urbanas, as questões sociais se tornam mais relevantes devido à desapropriação de terrenos e deslocamento de populações no entorno do reservatório. No caso do Bacanga, o crescimento desordenado dos bairros no entorno do reservatório levaram a restrições severas nos níveis máximos de altura da água, além de problemas de saneamento básico que demandam trocas de água mais frequentes do reservatório.

Plantas de correntes de marés também demandam estudos ambientais quanto aos impactos na circulação de sedimentos no canal. Problemas sociais podem incluir modificações nas rotas de navegação, atingindo atividades pesqueiras ou rotas de navegação comerciais.

5. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma investigação comparativa entre duas usinas baseadas em fonte oceânica: uma de gradiente de maré e uma de correntes de maré. A operação das duas usinas foram simuladas para o período de um ano considerando condições naturais obtidas a partir de dados reais medidos nos respectivos sítios.

A análise dos resultados demonstra que para este caso, a planta de correntes de maré apresentou uma produtividade superior à planta de gradiente de marés. No entanto, este resultado se deve em grande parte às restrições da operação do reservatório que se encontra em zona urbana. As restrições da operação das plantas, a disponibilidade de recursos naturais para sua implantação e os estudos de

riscos e viabilidade ambiental possuem grande importância no desenvolvimento destes tipos de empreendimento.

Os custos de implantação das unidades mostrados neste trabalho necessitam de refinamentos devido a falta de dados para esta previsão e diferentes topologias de usinas de correntes de maré, com custos diversos. Estas modificações devem ser incluídas em investigações futuras sobre o tema.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Energias Oceânicas e Fluviais (INEOF), a Fundação de Amparo a Pesquisa e Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo financiamento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- Almeida, J.d.S., Saavedra, O.R., and Oliveira, D.Q. (2018). Impact of a grid-connected marine hydrokinetic farm on distribution systems. In *2018 IEEE 9th Power, Instrumentation and Measurement Meeting (EPIM)*, 1–6. doi:10.1109/EPIM.2018.8756438.
- AQUA-RETProject (2012). Correntes de marés. URL <http://www.aquaret.com/index0350.html>.
- Borges, L. (2020). Voce sabe como funciona a energia das ondas. URL <https://autossustentavel.com/2020/04/ondomotriz-energia-ondas.html>.
- De Dominicis, M., Murray, R.O., and Wolf, J. (2017). Extracting energy from tidal currents: The ocean response at multiple space and time scales. In *OCEANS 2017 - Aberdeen*, 1–7. doi:10.1109/OCEANSE.2017.8084998.
- de Sá, B.G., Oliveira, D.Q., and Gomes, T.L.C. (2017). Index for allocation of tidal current power plant for reactive margin improvement. In *2017 IEEE URUCON*, 1–4. doi:10.1109/URUCON.2017.8171878.
- de Sá, B.G., Saavedra, O.R., Oliveira, D.Q., and Leite Neto, P.B. (2018). Dimensionamento de uma usina maremotriz para sistemas isolados. In *Congresso Brasileiro de Automática 2018*, 1–6. doi:10.20906/CPS/CBA2018-1203.
- Edenhofer, O., Pichs-Madruga, R., Sokona, Y., Seyboth, K., Eickemeier, P., Matchoss, P., Hansen, G., Kadner, S., Schlömer, S., Zwickel, T., and C. Von, S. (2011). Renewable energy sources and climate change mitigation: Summary for policymakers. Technical report, IPCC.
- Elghali, S.B., Benbouzid, M., and Charpentier, J. (2007). Marine tidal current electric power generation technology: State of the art and current status. In *2007 IEEE International Electric Machines Drives Conference*, volume 2, 1407–1412. doi:10.1109/IEMDC.2007.383635.
- EPE (2021). *Balço Energético Nacional: Ano Base 2020*. Ministério de Minas e Energia, Brasil.
- Leite Neto, P.B., Saavedra, O.R., and Souza Ribeiro, L.A. (2015). Optimization of electricity generation of a tidal power plant with reservoir constraints. *Renewable Energy*, 81, 11–20. doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.03.011>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148115001937>.
- Liu, M., Li, W., Yu, J., Ren, Z., and Xu, R. (2016). Reliability evaluation of tidal and wind power generation

- system with battery energy storage. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 4, 636–647. doi:10.1007/s40565-016-0232-5.
- Ma, Z., Li, B., and Liu, Y. (2021). Research on the environmental impact of tidal power generation in china. *Applied Nanoscience*. doi:10.1007/s13204-021-01994-2.
- Moon, S.H., Park, B.G., Kim, J.W., and Kim, J.M. (2020). Effective algorithms of a power converter for tidal current power generation system. *Journal of Power Electronics*, 20, 823–833. doi:10.1007/s43236-020-00063-1.
- Neto, P.B.L., Saavedra, O.R., Camelo, N.J., and Ribeiro, L. (2011). Exploração de energia maremotriz para geração de eletricidade: aspectos básicos e principais tendências. *Ingeniare*, 19, 219–232.
- Neto, P.B.L. (2009). Geração de energia elétrica a partir de fonte maremotriz.
- Neto, P.B.L., Saavedra, O.R., and Oliveira, D.Q. (2020). The effect of complementarity between solar, wind and tidal energy in isolated hybrid microgrids. *Renewable Energy*, 147, 339–355. doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.134.
- Sousa Almeida, J.d., Saavedra, O.R., and Oliveira, D.Q. (2019). Optimal dispatch of a grid-connected hybrid microgrid with ocean and solar generation. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America)*, 1–6. doi:10.1109/ISGT-LA.2019.8895481.
- Stroski, P. (2019). Geração de energia das marés. URL <https://www.electricalibrary.com/2019/08/12/geracao-de-energia-das-mares/>.
- United Nations, U. (2015). World energy assessment: Energy and the challenge of sustainability. Technical report, United Nations Development Programme. URL <https://www.undp.org/publications/world-energy-assessment-energy-and-challenge-sustainability>.
- Warak, P. and Goswami, P. (2020). Overview of generation of electricity using tidal energy. In *2020 IEEE First International Conference on Smart Technologies for Power, Energy and Control (STPEC)*, 1–6. doi:10.1109/STPEC49749.2020.9297690.
- Zaidi, S., Abbas, M.K., Saleem, S., Khan, B.M., and Haider, S. (2021). Renewable tidal power generation significance and challenges. In *2021 International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technologies (IBCAST)*, 1–6. doi:10.1109/IBCAST51254.2021.9393280.