

ANÁLISE ECONÔMICA DE PARQUES HIDROCINÉTICOS

Marcelo Daige Prado Leite^(a), Diego Leonardo Santos Cosme^(b), Edna Raimunda da Silva^(c),
Ramiro Gustavo Ramirez Camacho^(d)

(a) Universidade Federal de Itajubá - Brasil - marcelo.daige@unifei.edu.br

(b) Universidade Federal do Maranhão - Brasil - diegocosme@gmail.com

(c) Universidade Federal de Itajubá - Brasil - ednaunifei@yahoo.com.br

(d) Universidade Federal de Itajubá - Brasil - ramirez@unifei.edu.br

INTRODUÇÃO

Dispositivos de conversão da fonte hidrocínética são tecnologias emergentes que oferecem formas de se explorar a energia renovável proveniente dos escoamentos de correntes hídricas livres, sem a necessidade do represamento ou dos desvios das hidrelétricas convencionais. As turbinas hidrocínéticas são projetadas para serem usadas em ambientes naturais ou artificiais como rios, estuários e canais (Lago, 2010).

Cosme (2023) descobriu localidades consideradas executáveis para a exploração da energia das correntes de marés, elas ficam no complexo estuarino de São Marcos e na baía de Turiaçu, ambas no estado do Maranhão (Fig.1). Dentro desse complexo se encontra o canal do Boqueirão, entre a ilha de São Luiz e a ilha do Medo, uma região interessante onde foram realizadas medições em correntes marítimas com velocidades de até 2,5 m/s.



Figura 1.- Mapa detalhando a ilha do Medo

Cosme (2023) idealizou um parque hidrocínético nesse canal, onde se evitou rotas de circulação de embarcações, ele considerou uma área segura de 500m de largura por 3000m de comprimento e para evitar o efeito de borda (baixas profundidades), distanciou as

laterais do parque em 200m de cada margem do canal (Fig.2). Assim o espaço viável para a instalação das máquinas passou a ter 1,5 km².



Figura 2.- Área disponível para instalação

Uma turbina hidrocínética carenada, ou seja, com difusor e de alto desempenho, foi desenvolvida por Rezek (2023), cujo projeto abordou dois métodos: análise em 2D baseada na teoria do disco atuador com a finalidade de determinar a melhor configuração do difusor e idealização do conjunto completo em 3D, na qual, o projeto do rotor de 6 pás, utilizou as teorias da sustentação e do vórtice potencial para as componentes de velocidade absoluta na saída do rotor (Fig. 3), Rezek (2023).

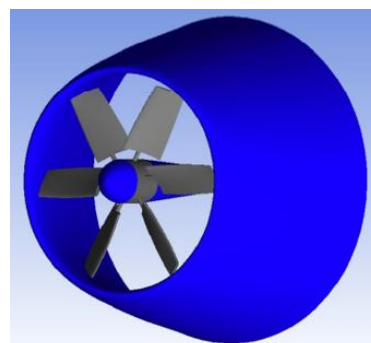


Figura 3.- Turbina Hidrocínética em 3D

METODOLOGIA

A análise econômica do citado parque contou com os dados das velocidades obtidas no canal do Boqueirão (Cosme 2023) e do projeto da recém-criada turbina com difusor (Rezek 2023) de 5kW, que foi nomeada como Yarama; com a finalidade de se obter o custo nivelado da energia (LCOE - sigla em inglês), que serve como base para a comparação entre os custos nivelados de energias produzidas por fontes renováveis intermitentes distintas, tais como: solar, eólica e hidrocinética (Eq. 1).

$$LCOE = \frac{CAPEX + \sum_{t=1}^n \frac{OPEX}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{AEP}{(1+r)^t}} \quad (1)$$

Onde: *CAPEX* é o capital investido, *OPEX* são as despesas operacionais, *AEP* é a Produção Anual de Energia, *r* é a taxa de desconto, *t* representa o ano em questão e *n* é a vida útil do empreendimento.

O CAPEX foi calculado com valores em dólares americanos (US\$), cuja cotação foi feita em 22/07/25 valendo R\$ 5,58. O cálculo levou em conta a matéria-prima utilizada na manufatura, além dos processos de fabricação, componentes mecânicos e elétricos, transporte e instalação e passivos ambientais (Tab. 1).

Tabela 1.- Itens e valores para o cálculo do CAPEX, turbina Yarama de 5kW

Carenagem	Unitário (US\$)
Esqueleto (alumínio)	896,06
Fibra de Carbono	1.254,48
Nacelle e Rotor	Unitário (US\$)
Multiplicador de velocidade	358,42
Componentes mecânicos	537,81
Conjunto com 6 pás	483,70
Gerador	537,63
Infraestrutura	Unitário (US\$)
Transporte	931,90
Flutuadores	860,22
Embarcação	376,34
Passivos Ambientais	519,71
Total	US\$ 6.756,27

Estimou-se a OPEX anual com base no relatório da Sandia (Neary, 2014) que faz uma análise em equipamentos de conversão de energias oceânicas e inclui 2 intervenções não programadas e 1 atividade agendada por ano. Em Cosme (2023) o valor é estimado em 4,5% do CAPEX em um cenário pessimista. Assim o valor anual estimado ficou em US\$ 304,03. Além disso, adicionou-se também aos custos operacionais um seguro de 3% do CAPEX por ano, equivalente a US\$ 202,69. O OPEX anual total então passou a ser de US\$ 506,72. Sendo que a vida útil determinada foi de 15 anos.

A produção anual de energia levou em conta, tanto a potência da turbina, quanto a velocidade do escoamento (Fig. 4), onde as curvas representam os diâmetros da garganta e da saída dos difusores de diversos tamanhos de turbinas, sendo que a Yarama é a primeira curva em vermelho, com diâmetro de 1,0m na garganta e 1,37m na saída do difusor.

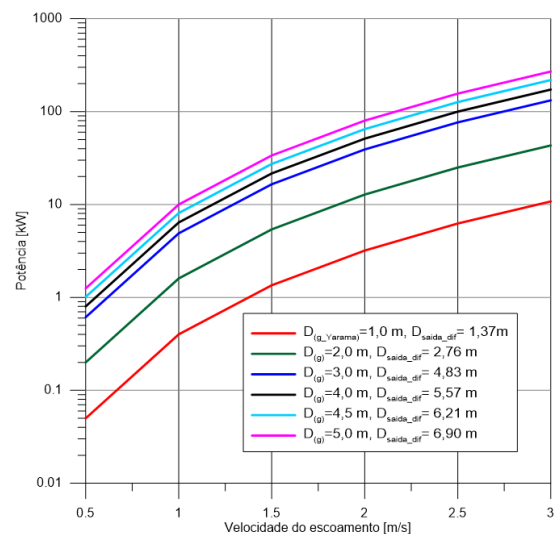


Figura 4.- Curvas logarítmicas da potência em função da velocidade do escoamento

Outros fatores foram considerados, como o coeficiente de potência (Rezek, 2023) de 0,88 e o fator de capacidade (Fig. 5), que foi levantado em função de uma análise de velocidades realizada no canal do Boqueirão por 1 ano, com medições realizadas de 10 em 10 minutos, cujo valor médio foi de 2,00m/s.

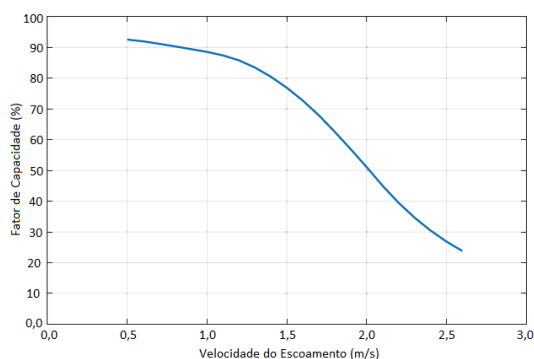


Figura 5.- Velocidade vs. Fator de Capacidade

A potência elétrica da turbina foi então calculada com a velocidade do escoamento de 2,0m/s e o coeficiente de potência de 0,88 com referência à área da garganta, que tem 1,0m de diâmetro. Um rendimento de 0,90 foi adotado para o gerador elétrico (Eq. 2).

$$P_E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V_\infty^3 \cdot A_G \cdot C_p \cdot \eta_G \quad (2)$$

Onde: ρ é a massa específica da água, V_∞ é a velocidade do escoamento, A_G é a área da garganta, C_p é o coeficiente de potência e η_G é o rendimento do gerador.

A potência obtida foi de 2,54 kW, já a energia gerada pela turbina foi calculada para um fator de capacidade de 50%, lido no gráfico (Fig. 5) com a velocidade de 2,00m/s. A Produção Anual de Energia (AEP) foi então calculada considerando que 1 ano contempla 8.760 horas (Eq. 3).

$$AEP = P_E \cdot Ano_h \cdot FC \quad (3)$$

Onde P_E é a potência elétrica, Ano_h é o número de horas que perfazem 1 ano e FC é o fator de capacidade.

A energia obtida foi de 11.112 kWh. Finalmente, substituindo os valores CAPEX, OPEX e AEP na equação 1 e com uma taxa de desconto adotada com base na Selic atualizada em 22/07/25 (BCB, 2025) de 15% calculou-se então o Custo Nivelado da Energia (LCOE) de **0,15 US\$/kWh**.

PARQUE HIDROCINÉTICO

Na concepção do parque levou-se em conta o arranjo entre as turbinas, pois o espaçamento inadequado pode resultar em perturbações no escoamento devido à esteira gerada pelas máquinas que estão a montante, impactando negativamente a eficiência das que estão a jusante e reduzindo a eficiência global do parque (Cosme, 2023).

De acordo com simulações feitas em CFD, o espaçamento lateral mínimo para que a esteira de uma turbina não influencie na outra que está ao lado é de 1,5D, o que resulta, nesse caso, em 1,5m. A distância longitudinal foi obtida pela análise da esteira também em função do diâmetro da garganta (Fig. 6).

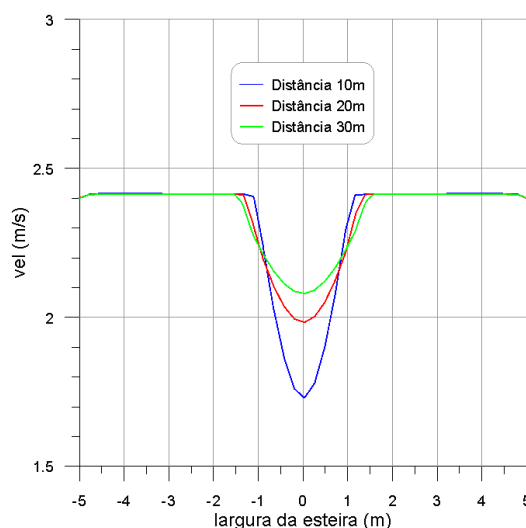


Figura 6.- Perfis de velocidade da esteira

Observando o gráfico pode-se notar que a velocidade do escoamento é maior que 2,1m/s a partir da distância de 30m da turbina, sendo assim, é possível a disposição de outra máquina a partir daí, com os espaços definidos partiu-se para o dimensionamento do parque, projetando-se uma célula de 10x75m que pode ser replicada em uma área maior (Fig. 7).

Nessa área da célula, que tem 750 m², é possível o arranjo de 14 turbinas. Em uma área como por exemplo a do canal Boqueirão de 1.500.000m² a célula poderia ser replicada 2000 vezes disponibilizando 28.000 turbinas.

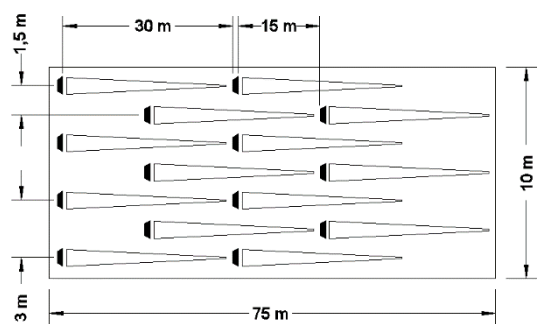


Figura 7.- Célula do parque com 14 turbinas

CONCLUSÕES

O LCOE calculado nesse trabalho se encontra abaixo da faixa de US\$ 0,42~1,47 por kWh (Nunes, 2023), estipulado para as hidocinéticas. Sendo que, na época, o LCOE da energia eólica era US\$ 0,26~0,50 por kWh, e o da solar fotovoltaica de US\$ 0,30~0,40.

O cálculo do LCOE, para o parque hidrocinético, resultaria no mesmo encontrado para 1 turbina (0,15 US\$/kWh), pois o OPEX e a AEP seriam multiplicadas pelo número de turbinas do parque, a exceção está no CAPEX, que teria seu valor diminuído. Isso devido ao fato de se tratar de uma produção em série com uma quantidade enorme de máquinas.

O presente estudo mostra o quanto a energia hidrocinética é vantajosa, desde que se encontre um aproveitamento adequado como o canal do Boqueirão. A alta eficiência dessa tecnologia também se deve muito ao projeto da turbina carenada de alto desempenho.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) APQ-01865-18, APQ-01591-18 e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) 408029/2022-6.

REFERÊNCIAS

- B. C. B. (Banco Central do Brasil) *Taxa Selic* <<https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>> Acesso em: 16/07/2025.
- D. L. S. Cosme, R. B. Veras, R.G. R. Camacho, O.R. Saavedra, A. Torres, M.M. Andrade, “*Modeling and assessing the potential of the Boqueirão channel for tidal exploration*” *Renewable Energy*, 219, 119468, 2023.
- L. I. Lago, F. L. Ponta, L. Chen, “*Advances and trends in hydrokinetic turbine systems*” *Energy for Sustainable Development*, 14, 287-296, 2010.
- T. J. Rezek, R. G. R. Camacho e N. Manzanares-Filho, “*A novel methodology for the design of diffuser-augmented hydrokinetic rotors*” *Renewable Energy*, vol. 210, pp. 524-539, 2023.
- V. S. Neary, M. Lawson, M. Previsic, A. Copping, K. C. Hallett, A. Labonte, J. Rieks, D. Murray, et al. “*Methodology for design and economic analysis of marine energy conversion (mec) Technologies*” *Sandia National Lab*, Albuquerque, NM, United States, 2014.