

Avaliação do potencial de energia hidrocínética em rios do Norte do Brasil usando dados de postos fluviométricos

Clinton Pereira da Silva¹ (IC), Ivan Felipe Silva dos Santos (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá.

Palavras-chave: Potencial Hidrocínético, Turbina Hidrocínética, Energia Renovável, Postos Fluviométricos

Introdução

A região Norte do Brasil, devido à sua vasta rede hidrográfica, apresenta um grande potencial para a geração hidroenergética. Enquanto a geração tradicional, por meio de hidrelétricas, depende majoritariamente de grandes barragens, a energia hidrocínética utiliza o fluxo natural dos rios, o que resulta em um menor impacto ambiental. (FELIZOLA et al., 2007). No contexto das comunidades ribeirinhas e dos assentamentos rurais na região Norte do Brasil, essa abordagem ganha importante relevância, uma vez que essas comunidades frequentemente enfrentam a escassez de energia elétrica, o que limita severamente seu acesso a recursos básicos, tais como a iluminação (SILVA, 2018). Portanto, a análise do potencial de geração hidrocínética dos rios pode representar uma alternativa viável para a expansão da matriz energética regional, especialmente em áreas onde a eletrificação é desafiadora devido à densidade da vegetação e à distância entre esses assentamentos e centros urbanos. A energia hidrocínética pode ser captada através de várias fontes, incluindo as marés, as correntes oceânicas, a jusante de usinas hidrelétricas existentes ou diretamente no leito dos próprios rios (SANTOS, 2019). Logo, o presente estudo tem como objetivo estimar o potencial da energia hidrocínética em rios da região Norte do Brasil, utilizando dados provenientes de estações fluviométricas, além da seleção dos postos com as maiores velocidades médias de fluxo. Por conseguinte, este estudo pretende contribuir para futuras pesquisas do potencial de geração de energia hidrocínética, utilizando uma abordagem baseada em dados secundários disponibilizados pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH).

Metodologia

Para um melhor aproveitamento da energia hidrocínética, é essencial compreender os princípios hidráulicos e hidrológicos. Isso inclui o estudo de canais abertos, como rios, a aplicação da Lei da Continuidade e a consideração

do princípio da eficiência hidráulica (Porto, 2006). Além desses conceitos fundamentais, é necessário também adotar parâmetros já estudados em outras áreas, como a geração eólica, devido à semelhança na forma de geração entre ambas. Nesse contexto, o limite de Betz, que estabelece a eficiência máxima teórica de turbinas hidrocínéticas (DI LASCIO e BARRETO, 2009). A equação 1 descreve a eficiência máxima de conversão de energia para uma turbina ideal, Limite de Betz-Lanchester, (sem perdas).

$$P = \frac{\rho * A * V^3}{2} * 0,593 \quad (1)$$

O critério de seleção dos postos considerou apenas os pontos de medição com velocidades iguais ou superiores a 1 m/s em boa parte da série histórica. A Tabela 1 ilustra a quantidade de postos consultados no portal da ANA. Dentro desse conjunto, 25 postos atenderam ao critério de seleção estabelecido, 183 estavam sem dados de resumo de descarga, 77 apresentaram erro na realização de download resultando em dados não baixados e 198 apresentaram o resumo de descarga, mas com velocidades abaixo do estabelecido, resultando em desconformidade com o escopo deste estudo.

Tabela 1: Estações Consultadas no portal HIDROWEB.

Sem dados	Atende ao critério	Erro de download	Não atende	Total
183	25	77	198	483

Fonte: (Autor, 2023).

Na fase de caracterização dos dados, optou-se em usar dados consistidos quando a estação apresentava as duas medições, bruta e consistida. A primeira etapa para a estimativa do potencial hidrocínético é a determinação da

permanência de cada posto, conforme estabelecido pela Equação 2.

$$f = \frac{n}{(m + 1)} * 100 \quad (2)$$

Onde: f = permanência; n = Número de ordem das velocidades; m = número de inferência total das velocidades. Após a obtenção da permanência de cada posto, foram gerados dois gráficos de dispersão relacionando a velocidade em função da frequência. O mesmo procedimento foi realizado para a área, com a única variável alterada sendo a velocidade, resultando em um gráfico da área molhada em relação à frequência.

Os rios localizados na região Norte do país apresentam elevada vazão volumétrica de água durante o ano, além de possuírem amplas áreas de drenagem. Devido a suas características hidrológicas favoráveis, esses rios apresentam potencial para hidroenergia mediante instalação de THCs. Desse modo, é preciso estimar a velocidade média e para tal foi utilizado a Equação 3. Em síntese, a \bar{v} foi obtida através da média simples.

Com as velocidades médias calculadas, é possível estimar a quantidade de energia cinética disponível no fluxo. Dessa maneira, podemos determinar a densidade de potência, conforme a Equação 4.

Média simples $\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3 + \dots + x_n}{n} \quad (3)$

Densidade de Potência $D_p = \frac{\rho * v^3}{2000} \quad (4)$

Neste estudo, foram consideradas três turbinas. Tendo em vista a quantidade de energia cinética disponível no fluxo de água, Equação 4, e adotando a Equação 5 para determinar a área de ataque da turbina, torna-se possível estimar a potência da turbina por meio da Equação 6.

Área da turbina $A_t = \frac{\pi * D^2}{4} * T \quad (5)$

Onde: A_t = área de abrangência, D = diâmetro de ação das hélices, 5 m (valor adotado); T = total de turbinas, 3 (valor adotado).

Potência da turbina $P_t = D_p * A_t * C_p \quad (6)$

Onde; P_t = potência das turbinas, D_p = densidade de potência; A_t = área de abrangência; C_p = Coeficiente de potência, ou seja, o rendimento da turbina. Portanto, é fundamental enfatizar que existe um valor máximo para esse C_p , denominado $C_{p\text{máx}}$. Cabe destacar que o coeficiente de potência das turbinas hidrocínéticas não pode exceder esse valor máximo de rendimento. De modo geral, o coeficiente de potência pode ser calculado por meio da Equação 7.

$$C_p = \frac{P_{ex}}{\frac{\rho V^3 A}{2}} \quad (7)$$

O C_p desempenha um papel fundamental, pois representa a eficiência com que uma turbina é capaz de extrair energia do fluxo de água e convertê-la em energia elétrica utilizável. O valor máximo teórico desse coeficiente, conhecido como $C_{p\text{máx}}$, é de 0,593, conforme estabelecido na Equação de Limite de Betz (Equação 1). Para nossa análise, calculamos um valor específico de C_p , que é igual a 0,35 (Valor próximo aos valores citados por Kumar e Saini, 2016 e Riglin et al., 2016b). Isso implica que o C_p representa a relação entre a potência extraída pela turbina hidrocínética, denominada P_{ex} , e a potência disponível no fluxo do rio. Na prática, nenhuma máquina, inclusive as hidráulicas, consegue aproveitar integralmente a energia disponível, o que justifica o uso de um valor de C_p inferior ao $C_{p\text{máx}}$.

Com os valores estimados da potência das três turbinas, pode-se calcular a energia que elas gerariam ao longo de um período de 12 meses, bastando substituir esses valores na Equação 8, considerando um fator de capacidade. Nesta estimativa, foi adotado o fator de capacidade máximo de 60%.

$$E_{\text{turbina/ano}} = P_t * 24 * 365 * F_c \quad (8)$$

Onde; $E_{\text{turbina/ano}}$ = Energia produzida durante 1 ano pelas turbinas, F_c = O fator de capacidade, considerando o valor máximo, é de 60%. Finalmente, a energia disponível. Neste contexto, ao examinar a Figura 2, que foi elaborada relacionando a Densidade de Potência com a Permanência, torna-se possível calcular o valor da energia disponível levando em consideração a permanência de cada estação fluviométrica. É importante notar que, na Equação 7, considera-se apenas a velocidade média para estimar a energia das turbinas. No entanto, agora estamos incorporando a análise da energia ao longo da permanência, ou seja, não estamos limitados apenas à velocidade média, mas estamos considerando todas as variações de velocidade ao longo do ano.

Dessa forma, a estimativa da energia disponível pode ser obtida ao calcular as áreas sob a curva de permanência de potência, realizando uma integral, o que nos permite capturar com maior precisão a energia máxima disponível para geração hidrocínética, levando em consideração as flutuações sazonais das velocidades da corrente do rio.

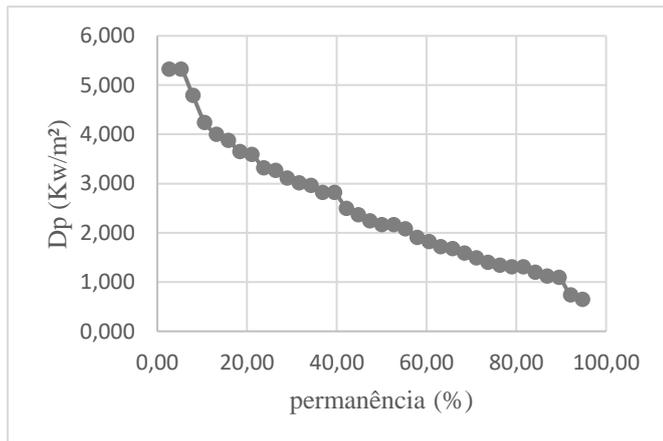


Figura 1: Relação entre Densidade de potência e permanência (Autor, 2023).

Ao efetuar o cálculo integral da relação entre a densidade de potência e a permanência, obtém-se a energia disponível. Dessa maneira, torna-se simples estimar a energia máxima, conforme indicado na Tabela 2. Isso ocorre, pois, a energia máxima pode ser calculada multiplicando-se a energia disponível pelo número de horas em um dia, que por sua vez é multiplicado pelo número de dias em um ano.

Resultados e discussão

Com o auxílio de dados hidrológicos da Hidroweb para selecionar os melhores postos, considerando densidade de potência e permanência ao longo do ano. Foi feita a comparação entre dois cenários, para as estações Santo Antônio do Içá e Cachoeira Alta, que apresentaram valores distintos. Em um dos cenários, observou-se uma permanência com geração de energia satisfatória ao longo do ano, Figura 3, enquanto no outro, os valores tornaram o trecho inviável para a implantação de THCs. No entanto, é importante destacar que o rio pode apresentar pontos com melhores velocidades, e, portanto, uma estação desfavorável não invalida todo o potencial hidrocínético do rio. A Figura 4 apresenta uma comparação entre as duas estações, na qual é possível visualizar a diferença no potencial de geração de energia nos respectivos trechos.

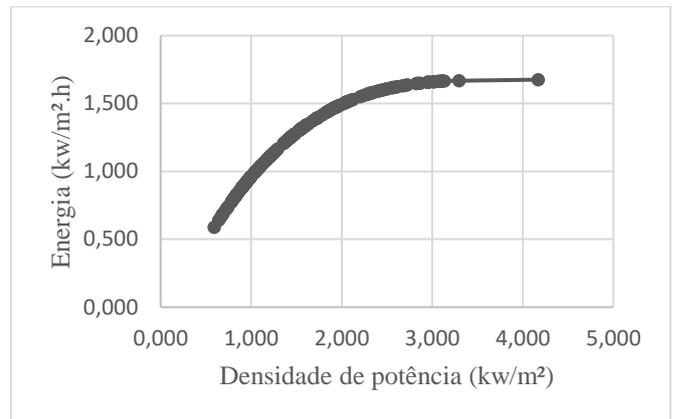


Figura 2: Curva Energia x Dp - Santo Antônio do Içá (Autor, 2023).

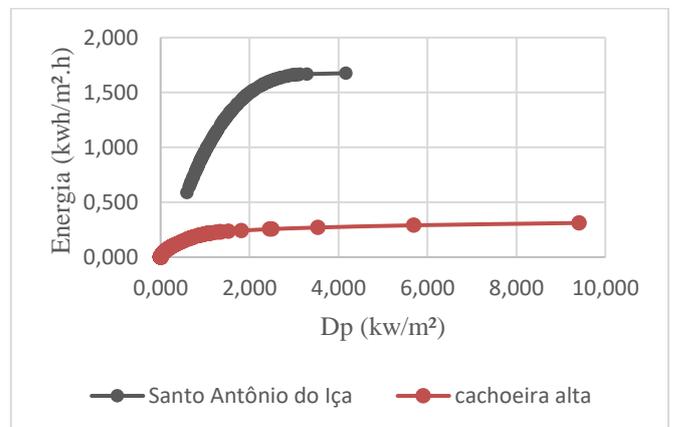


Figura 3: comparativo do potencial hidrocínético em duas estações distintas (Autor, 2023).

No caso específico da estação Cachoeira Alta, a velocidade média é inferior, o que se correlaciona com uma probabilidade de ser igualada ou superada de 90%. Ou seja, ao longo do ano a energia disponível na corrente será significativamente menor em comparação com qualquer das estações listadas na Tabela 2. É importante ressaltar que a velocidade do fluxo de água juntamente com a permanência, desempenham um papel fundamental na eficácia deste tipo de geração de energia. No âmbito deste estudo, inicialmente, a abrangência contemplava 25 estações. No entanto, foi decidido selecionar as 10 estações que exibiram o maior potencial hidrocínético, conforme detalhado na Tabela 2, a fim de concentrar a análise em um conjunto mais representativo das condições de velocidades desejáveis para geração desse tipo de energia. À medida que a velocidade do escoamento aumenta, a quantidade de energia disponível também cresce, o que resulta em uma maior capacidade de geração de energia hidrocínética (Costa, 2008). Portanto, compreender e quantificar as maiores velocidades do fluxo de água é crucial para o dimensionamento adequado de sistemas de geração

hidrocinética, bem como para a estimativa precisa da energia máxima que pode ser capturada.

Tabela 2: As 10 melhores estações com potencial hidrocinético

Código	V _{méd} (m/s)	A _{drenagem} (km ²)	D _p (kw/m ²)	E _{máx} (kwh/m ² /Ano)
11500000	1,47	1130000	1,57	5155,93
10100000	1,65	874000	2,23	5373,69
11200000	1,38	985000	1,32	4452,38
15460004	1,02	14700	0,54	2549,73
17435000	1,05	347244	0,57	2394,77
16410060	0,92	29200	0,39	2278,82
11400000	1,56	1010000	1,89	2645,36
15552300	0,96	3860	0,44	1920,02
15400002	1,16	976000	0,79	1407,63
14529000	0,93	9870	0,40	1315,04

Fonte: (Autor, 2023)

É importante ressaltar que a energia máxima apresentada na Tabela 2 representa um valor teórico que não considerou o coeficiente de potência (CP) igual a 0,35. Caso esse coeficiente fosse levado em consideração, os resultados para a energia máxima seriam ligeiramente inferiores aos calculados. Isso quer dizer que a energia máxima é a energia disponível naquele trecho do rio sem considerar a eficiência da turbina, ou seja, é um valor de energia máxima que poderia ser gerado, porém, nenhuma máquina, mesmo as hidráulicas, opera com 100% de aproveitamento da energia.

Conclusões

Os avanços tecnológicos e as políticas contemporâneas de geração de energia visam produzir eletricidade eficiente e ecologicamente sustentável para atender à crescente demanda elétrica, especialmente em áreas remotas. No entanto, a geração hidrocinética apresenta desafios, como a necessidade de custeio, padronização tecnológica, influência das mudanças climáticas na disponibilidade hídrica e questões comerciais de tecnologia específica.

Por outro lado, as Turbinas Hidrocinéticas (THCs) oferecem uma promissora solução para comunidades isoladas, especialmente em regiões com grande disponibilidade hídrica, como a região norte do Brasil. Com dados dos principais rios do país, foi possível avaliar o potencial energético, validando a viabilidade da geração hidrocinética e abrindo caminho para o desenvolvimento econômico regional e futuros projetos de pesquisa em energia sustentável.

Essa metodologia pode contribuir significativamente para a análise do potencial hidrocinético, abrindo

oportunidades para trabalhos futuros que busquem aprofundar e aprimorar as abordagens metodológicas com base em um banco de dados existente. Além disso, a avaliação do potencial hidroenergético realizada com base em dados secundários dos principais rios do país não apenas valida a viabilidade da geração hidrocinética, mas também cria um caminho para o desenvolvimento econômico regional, ao mesmo tempo em que contribui para a consecução dos ODS 7 e 1.

Agradecimentos

Ao meu orientador, Professor Ivan Felipe dos Santos, pela oportunidade, confiança e paciência; A Universidade Federal de Itajubá pela elevada qualidade de ensino oferecido; Ao CNPq, pelo financiamento do projeto de pesquisa.

Referências

- FELIZOLA, Eduardo Ribeiro et al. Identificação de áreas potenciais para implantação de turbina hidrocinética através da utilização de técnicas de geoprocessamento. *CEP*, v. 70742, p. 100, 2007.
- Sem acesso a água ou luz: documentário do WWF-Brasil mostra a realidade de quem vive sem energia. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/?76442/Sem-acesso-a-agua-ou-luz-documentario-do-WWF-Brasil-mostra-a-realidade-de-quem-vive-sem-energia-na-Amazônia>>. Acesso em: 29 jul. 2023.
- PORTO, Rodrigo de Melo. Hidráulica básica. 4ª edição. São Carlos: EESC-USP, Projeto REENGE, 2006.
- SILVA, Enid Rocha Andrade da Coordenadora. Agenda 2030: ODS-Metas nacionais dos objetivos de desenvolvimento sustentável. 2018.
- SANTOS, Ivan Felipe Silva dos. Análise técnica e econômica de parques hidrocinéticos com base em previsões numéricas (CFD) e dados experimentais. 2019.
- COSTA, Jordana Fernandes; DIAS, Diogo Gonçalves. Implementação Numérica da Fórmula de Chézy-Manning para Diferentes Seções de Canais Hidráulicos. *Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics*, v. 6, n. 2, 2018.
- TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio et al. Pequenos aproveitamentos hidroelétricos. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2008.
- DI LASCIO, Marco Alfredo; FAGUNDES BARRETO, Eduardo José. *Energia e desenvolvimento sustentável para a Amazônia rural brasileira: eletrificação de comunidades isoladas*. Ministério de Minas e Energia, 2009.
- CUNHA, Jônatas Teófilo Louzada. Análise de estabilidade da turbina hidrocinética HTUC-01 em condições de operação. 2015.
- ARAÚJO, Marcos Aurélio de. *Prospecção de parques hidrocinéticos: comparação entre projetos preliminares nos rios Iguaçu e Paraná*. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso.
- Hidroweb – Rede Hidrometeorológica Nacional. Agência Nacional de Águas 2023.