

UMA REVISÃO SOBRE O USO DE SISTEMAS HIDROCINÉTICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Ana Cláudia Pinto Ferraz¹
Ivan Felipe Silva dos Santos¹

¹*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: 10.47168/rbe.v30i4.890

RESUMO

Os sistemas hidrocínéticos são aqueles definidos pela implantação de turbinas em superfícies livres, sem necessidade de queda ou construção de barragens. O interesse em aproveitar a energia hidrocínética tem crescido atualmente, vista a necessidade de se estabelecer o uso de fontes renováveis de energia. Este artigo revisa e estuda o estado da arte desses sistemas, com enfoque na perspectiva histórica dessa aplicação no mundo e no Brasil, seu princípio de funcionamento, comparação com outras fontes renováveis, as classificações dos tipos de turbina, impactos ambientais e formação de esteiras. A análise realizada demonstra que os sistemas hidrocínéticos ainda estão em fase incipiente de desenvolvimento, embora as turbinas hidrocínéticas sejam pesquisadas há dezenas de anos e o número de publicações na área tenha crescido nos últimos anos. O Brasil possui um potencial relevante de energia hidrocínética no Norte do país, sendo alvo de muitas pesquisas, sobretudo devido ao potencial de substituição do óleo diesel usado nos sistemas isolados.

Palavras-chave: Fontes renováveis; Turbina hidrocínética; Energia hidráulica.

ABSTRACT

Hydrokinetic systems are characterized by the installation of turbines on free-flowing water surfaces, eliminating the need for water falls or dam construction. Interest in harnessing hydrokinetic energy has surged due to the increasing demand for renewable energy sources. This article reviews and analyzes the current state of these systems, with a focus on their historical context, both globally and in Brazil, their operational principles, comparisons with other renewable sources, classification of turbine types, environmental impacts, and wake formation. The analysis reveals that hydrokinetic systems remain in the early stages of development, despite decades of research into hydrokinetic turbines

and a recent increase in related publications. Brazil holds significant potential for hydrokinetic energy, particularly in its northern region, making it a focal point for research, especially regarding the possibility of replacing diesel fuel in isolated systems.

Palavras-chave: Renewable sources; Hydrokinetic turbine; Hydraulic energy.

1. INTRODUÇÃO

A busca por fontes renováveis de energia é fundamental para a diminuição das emissões de gás carbônico (CO₂). Com o crescente reconhecimento do aquecimento global, mais governos, empresas, centros de pesquisa e corporações estão comprometendo recursos para o avanço das tecnologias de fontes renováveis. Não há uma única fonte renovável de energia que seja a solução para as questões energéticas no mundo, sendo que cada país avalia a melhor matriz para a solução de suas questões.

Uma das fontes renováveis mais utilizadas em todo mundo é a hidreletricidade. A geração hidrelétrica convencional se baseia na combinação de queda e vazão para geração de potência elétrica. Contudo, a energia hidrelétrica possui também um significativo potencial em correntes de água livre, sem queda significativa, nas quais é aproveitada a energia cinética do escoamento (SANTOS et al., 2016), a chamada geração hidrocinética.

A geração hidrocinética baseia-se em um dispositivo eletromecânico que converte a energia cinética do fluxo de água em energia elétrica, através de um gerador (KHAN et al., 2008). Pode-se aproveitar a energia cinética de marés, correntes oceânicas ou rios (SANTOS, 2019). Ao contrário das usinas hidrelétricas convencionais, nas quais há a necessidade de grandes reservatórios com área alagada, conversores hidrocinéticos são construídos sem alterar significativamente o caminho natural da corrente de água (KHAN et al., 2009).

Mesmo se mostrando atrativa, muitos são os desafios que essa forma de geração ainda deve superar, para se tornar uma fonte de geração consistente, como a definição de metodologia para determinação do potencial de rios, produção dos equipamentos elétricos e mecânicos para produção de componentes de um parque hidrocinético, e mais estudos para essa forma de geração (SANTOS, 2019). Este artigo pretende contribuir com essa discussão, apresentando uma breve revisão de sistemas hidrocinéticos.

2. TECNOLOGIA HIDROcinÉTICA

2.1 Contexto Internacional

O primeiro aproveitamento da energia de rios de fluxo livre é atribuído a Peter Garman, que desenvolveu a *Water Current Turbine - WCT*. Em 1978, a *Intermediate Technology Development Group (ITDG)* desenvolveu a Garman Turbine para bombeamento de água e irrigação.

Na década de 1980 um rotor livre, com potência de saída de 15 kW, foi instalado pelo Departamento de Energia dos EUA para o aproveitamento de energia hidrelétrica de ultrabaixa queda (RADKEY; HIBBS, 1981). Em 1990 foi lançada a ideia de se utilizar a tecnologia WCT em grande escala (GUNEY; KAYGUSUZ, 2010). A Figura 1 (Ibrahim et al., 2021) apresenta uma linha do tempo sobre a evolução dos sistemas hidrocínéticos no mundo.

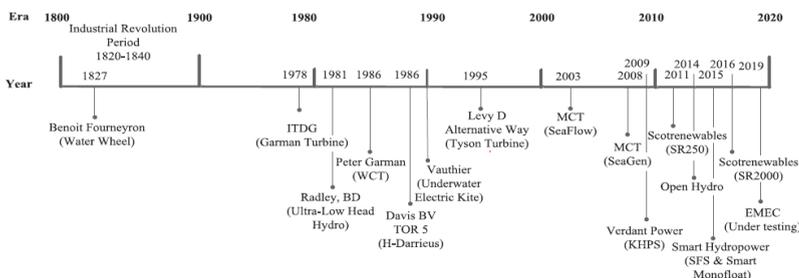


Figura 1 – Linha do tempo de desenvolvimento e progresso de sistemas hidrocínéticos

Observa-se pela linha do tempo que a partir de 1978 iniciou-se um desenvolvimento mais intenso no que diz respeito a turbinas hidrocínéticas, com alguns hiatos em certos períodos, que podem ser avaliados como reflexo das políticas de investimento em diferentes tecnologias energéticas, que podem variar conforme a demanda do momento.

Nos Estados Unidos, a partir de 2011, a *Federal Energy Regulatory Commission (FERC)* emitiu 70 licenças preliminares para projetos hidrocínéticos. No trabalho de Vermaak et al. (2014) encontra-se uma revisão das tecnologias empregadas por algumas empresas ao redor do globo até a data de 2014. Um resumo encontra-se na Tabela 1 (VERMAAK et al., 2014, adaptado por OLIVEIRA 2021).

Tabela 1 – Diversidade de turbinas usadas por empresas

Fabricantes	Nome do modelo	Tipo de turbina	Velocidade Min./ Max.	Potência de saída
Lucid Energy Pty., Ltd. (EUA)	Turbina helicoidal Gorlov	Eixo transversal helicoidal Darrieus	(0,6 m/s) sem limite	20 kW, depende do porte
Thropton Energy Services (UK)	Turbina de água corrente	Hélice de fluxo axial	(0,6 m/s) / dependendo do diâmetro	Até 2 kW e 240V
Tidal Energy Pty., Ltd. (Austrália)	Turbina Davidson-Hill Venturi (DHV)	Turbina de fluxo cruzado	Min. 2m/s	A partir de 4,6 kW
Seabell Int. Co., Ltd. (Japão)	Stream	Eixo transversal, Dual	(0,6 m/s) / sem limite	0,5 - 10 kW
New Energy Corporation Inc. (Canadá)	EnCurrent Hydro Turbine	Turbine de eixo transversal	Max. 3 m/s para máxima de potência	5 kW (e 10 kW)
Eolectic Energy Ltd. (UK)	DuoGen-3	Turbina de fluxo axial	Min. (0,93 m/s) / Max. (4,63 m/s)	8 amperes a 3,09 m/s
Alternative Hydro Solutions Ltd. (Canadá)	Turbina Darrieus de fluxo livre de água	Eixo transversal	(0,5 m/s) / depende do diâmetro	2 - 3 kW
Energy Alliance Ltd. (Rússia)	Unidade hidráulica submersível	Eixo transversal	Min 3 m/s	1- 5 kW (e > 10 kW)

Alguns exemplos de instalação de tecnologias hidrocínéticas foram organizados por Oliveira (2021) e são apresentados na Tabela 2 (OLIVEIRA, 2021).

Tabela 2 – Exemplos de instalações de tecnologias hidrocínéticas

Descrição	Faixa: Diâmetro do rotor/ Velocidade/ Potência	Finalidade	Imagem
Turbina de eixo horizontal no rio Nilo («hydrovolts.com», 2020).	Desconhecido	Bombeando água de irrigação para o Egito, Sudão e Somália.	
Turbina com duto HC de eixo horizontal, Brasil («Energia Hidrocínética: Projeto Tucunaré apresenta resultados e busca parceria para desenvolver protótipo de turbina Agência Eletronorte», 2016).	0,8 m de diâmetro V = 2 m/s P = 1 kW	Propósitos de demonstração pela Universidade de Brasília.	

Tabela 2 – Exemplos de instalações de tecnologias hidrocinéticas (cont.)

Descrição	Faixa: Diâmetro do rotor/ Velocidade/ Potência	Finalidade	Imagem
Turbina HC de barça flutuante atual, Manitoba, Canadá («Colorado initiative puts a hydropower to work 2017-06-06 Agri-Pulse», 2017).	1,5 m de diâmetro V = > 2 m/s P = 5 kW	A turbina estava no local por menos de um ano, e foi removida antes da formação de gelo no rio.	
Projeto de irrigação inteligente em Neiva, Colômbia («Eletrificação rural na Nigéria - SMART HYDRO POWER», 2017).	1m de diâmetro V = 1,7 m/s P = 1,1 kW	Flutuador duplo, alimentação de bombas de irrigação fora da rede. Operação seis anos até o presente.	
Projeto conectado à rede Smart Monofloat Roseheim, Alemanha («Eletrificação rural na Nigéria - SMART HYDRO POWER», 2017).	1m de diâmetro. V = 0,7–3,5 m/s P = 2 kW a 2,1 m/s	Turbina com único flutuador. A energia produzida alimenta a rede nacional, compensada pela política de tarifa de alimentação alemã. Em operação desde julho de 2013.	
Projeto HC de Yakima, Canal Roza, EUA (GUNAWAN, ROBERTS, et al., 2015)	3 m de diâmetro (1,5 m de altura) V = 2,5 m/s P = 10,9 kW	Turbina H-Darrius instalada em 2013 por um período de testes de três anos no canal Roza.	

Nota-se que nenhuma das instalações na Tabela 2 são pertencentes a grandes fazendas hidrocinéticas ou têm grande potência, evidenciando o caráter de estudos, pesquisas e prospecção, no qual ainda se encontra essa tecnologia.

2.2 Contexto Nacional

Em 1991, a primeira experiência bem sucedida com energia hidrocinética foi desenvolvida por pesquisadores da Universidade de Brasília, com uma turbina axial com várias inovações (VAN ELS et al., 2003). Essa turbina funcionou mais de uma década e várias melhorias de seu projeto inicial foram testadas no local.

Segundo VAN ELS et al. (2015), após 2000 várias outras turbi-

nas foram projetadas com as melhorias obtidas e foram instaladas no sertão brasileiro, para atender projetos de eletrificação rural com capacidade instalada de 300 W a 2000 W. A maioria das turbinas foi especialmente projetada para os rios que possuem diferenças máximas de nível de um metro. A Figura 2 (VAN ELS et al., 2015) mostra um modelo de turbina hidrocínética instalada no Brasil.



Figura 2 – Turbinas hidrocínéticas instaladas no Brasil

Em 2004 iniciaram-se os primeiros projetos para instalar turbinas hidrocínéticas nos rios da Amazônia (VAN ELS, 2008). Os principais problemas enfrentados nos primeiros testes de aplicação nos rios amazônicos foram ancoragens e outros problemas típicos da Amazônia, como a sazonalidade e grandes diferenças entre a estação seca e chuvosa (VERMAAK et al., 2014). A Figura 3 (Van Els et al.; 2015) mostra a estrutura precursora de aplicação de turbinas hidrocínéticas nos rios amazônicos.



Figura 3 – Unidade teste de aplicação de turbina hidrocínética na Amazônia

Por volta de 2015, o panorama era de várias pesquisas acadêmicas buscando a evolução da tecnologia de turbinas hidrocínéticas nos rios brasileiros, para atender à crescente demanda por fontes renováveis e eletrificação rural (VAN ELS et al., 2015).

Em 2008, pesquisadores da UnB registraram um tipo de turbina denominado turbina hidrocínética de terceira geração (SANTOS, 2019). De acordo com Van Els et al. (2015), esse novo layout da máquina é baseado em turbinas axiais com aprimoramento do difusor, com concepção de uma turbina padronizada que possa atender uma ampla gama de aplicativos e processos de produção que facilitam o dimensionamento e a produção em larga escala. A aplicação desse tipo de turbina hidráulica está relacionada ao fornecimento de energia elétrica para comunidades da Amazônia brasileira. A Figura 4 (Van Els et al., 2015) mostra o projeto da chamada turbina hidrocínética de terceira geração.

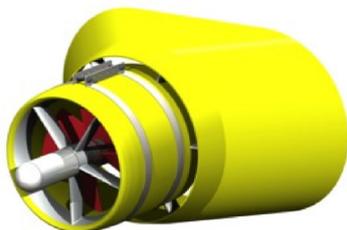


Figura 4 – Turbina hidrocínética de terceira geração

3. A CONCEPÇÃO DE SISTEMAS HIDROCINÉTICOS

Segundo Ibrahim et al. (2021), um conjunto hidrocínético é formado por uma turbina hidrocínética, um gerador, conversor de eletrônica de potência e conexão de bateria, como mostrado na Figura 5 (Ibrahim et al., 2021). A água movimenta as pás da turbina ao passar por ela, girando automaticamente o rotor do gerador que está acoplado à turbina, o que ocorre sem um sistema de engrenagem. A potência de saída é controlada e convertida pelo sistema de eletrônica de potência. A tensão variável é convertida em tensão constante por meio de um conversor.

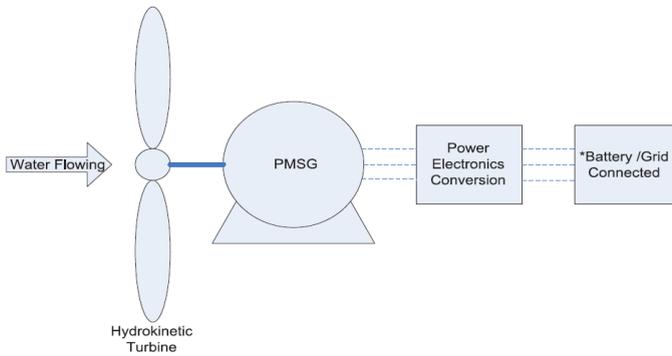


Figura 5 – Estrutura sistema hidrocinético

A geração de energia elétrica depende da densidade da água (ρ), coeficiente de potência da turbina, área da seção transversal e velocidade da água (VERMAAK et al., 2014; SORNES, 2010). A potência ideal do sistema hidrocinético é dada pela Equação 1.

$$P_m = \frac{1}{2} \rho A C_p V^3 \quad (1)$$

Onde: P_m é a potência obtida, A é a área varrida pelo rotor da turbina, V é a velocidade da corrente de água e C_p é a coeficiente de potência da turbina. O C_p é a porcentagem de potência que a turbina pode extrair da água que flui através da turbina. Conforme estudos realizados por Betz, a potência máxima teórica que pode ser extraída de um fluxo de fluido é de cerca de 59%, o que é referido como o limite de Betz (VERMAAK et al., 2014). O C_p da turbina é função da *Tip Speed Ratio* (TSR), que é a razão entre a velocidade linear da ponta da lâmina e a velocidade da água.

3.1 Classificação sistemas hidrocinéticos

Conforme trabalhos publicados por Khan et al. (2009) e Lago et al. (2010), a tecnologia hidrocinética pode ser classificada em duas classes, com base no esquema de conversão: com turbina ou sem turbina (isto é, com outros dispositivos). A Figura 6 (Khan et al., 2009 e Lago et al.; 2010, modificado) indica essa classificação.

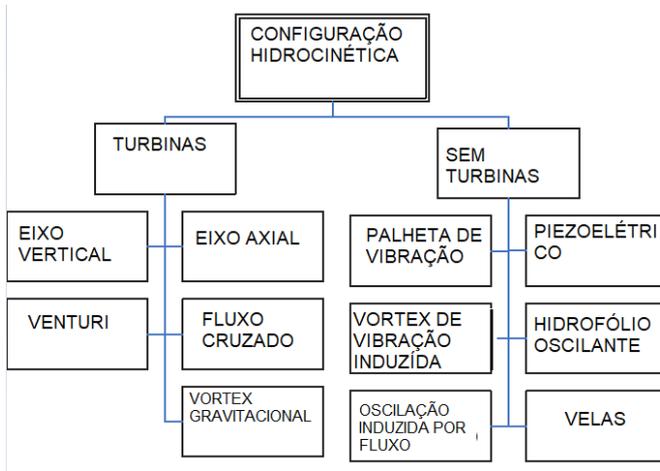
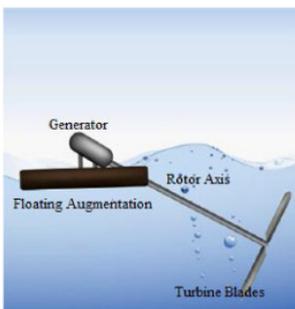


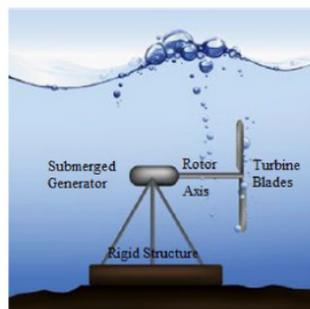
Figura 6 – Configuração hidrocínética sob a classificação turbina e não turbina

3.1.1 Turbinas hidrocínéticas de eixo horizontal

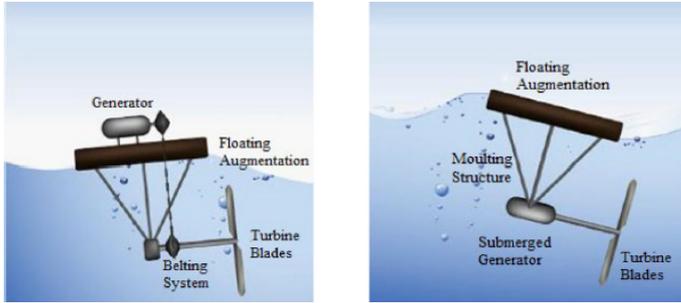
De acordo com Magagna e Uihlein (2015), a turbina de eixo horizontal dominou quase 80% da pesquisa e desenvolvimento em projetos de turbinas no mundo todo. Na turbina de eixo horizontal, o eixo de rotação é paralelo ou tem inclinação em relação ao plano da água corrente, conforme mostrado na Figura 7 (Behrouzi et al., 2016) e Ibrahim et al. (2021). Sua vantagem é que a turbina tem uma capacidade de partida automática para fluxos de baixa velocidade (KOKO et al., 2015). No entanto, a turbina é obstruída facilmente por detritos, e o custo de fabricação é maior do que o de turbinas de eixo vertical (IBRAHIM et al., 2021).



(a) Inclined Axis



(b) Rigid Mooring



(c) Non-Submerged Generator (d) Submerged-generator

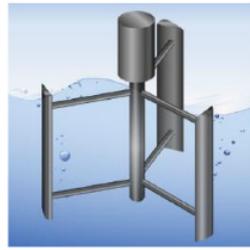
Figura 7 – Turbinas hidrocinéticas de eixo horizontal

3.1.2 Turbinas hidrocinéticas de eixo vertical

Segundo Behrouzi (2016) esse é o tipo de turbina utilizado para conversão da energia cinética nos rios. Esse tipo de turbina possui o eixo de rotação do rotor perpendicular à superfície da água (KHALID et al., 2013), podendo converter fluxos em qualquer direção. São mais silenciosas em operação, além de não requererem acoplamento de engrenagem, o que provoca diminuição nos custos devido à colocação acima da água (BIRJANDI et al., 2012). A Figura 8 (Behrouzi et al., 2016) e Ibrahim et al., 2021) indica modelos de turbinas de eixo vertical.



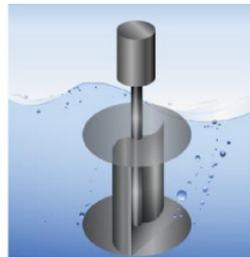
(a) Squirrel Cage Darrieus



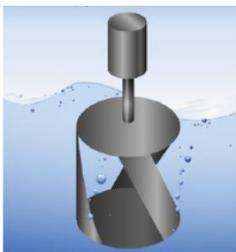
(b) H-Darrieus



(c) Darrieus



(d) Savonius

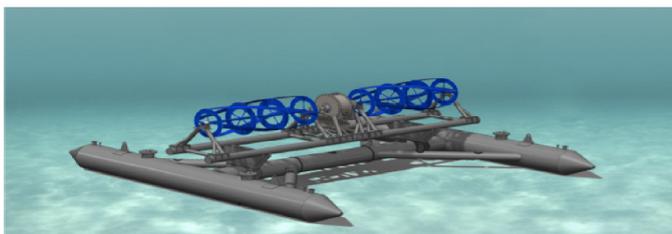


(e) Gorlov

Figura 8 – Turbinas hidrocínéticas de eixo vertical

3.1.3 Turbina hidrocínética de fluxo cruzado

Esse tipo de turbina possui um eixo de rotor ortogonal em relação ao fluxo, mas paralelo em relação à superfície da água (LAWS; EPPS, 2016). Turbinas de fluxo cruzado são preferíveis em parques hidrocínéticos por ocuparem menos espaço (CAVAGNARO, 2016). Segundo Forbush et al. (2017), turbinas de fluxo cruzado também operam em velocidade mais baixa, produzindo menos cavitação e ruídos. A Figura 9 (TidGen Power Generation, 2019; modificado por Ibrahim et al., 2021) indica exemplos desse tipo de turbina.



RivGen

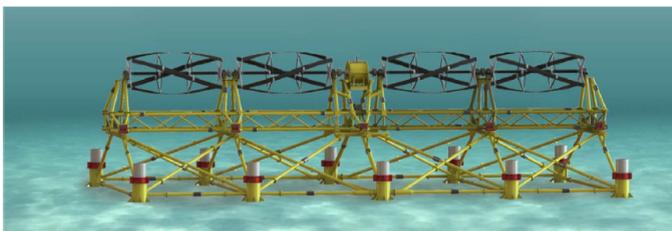


Figura 9 – Turbinas hidrocínéticas de fluxo cruzado

3.1.4 Venturi e turbina de vórtice gravitacional

A turbina Venturi pode ser aplicada em locais de baixa velocidade da água, em locais de águas rasas (NEILL; HASHEMI, 2018). Por outro lado, a turbina de vórtice é capaz de gerar energia elétrica em aproveitamentos de baixa altura e baixa vazão, usando vórtices gravitacionais (NISHI et al., 2020). A energia rotacional do vórtice movimentará o gerador, para gerar energia elétrica. A Figura 10 (TidGen Power Generation, 2019; modificado por Ibrahim et al., 2021) apresenta esquemas dessas turbinas.

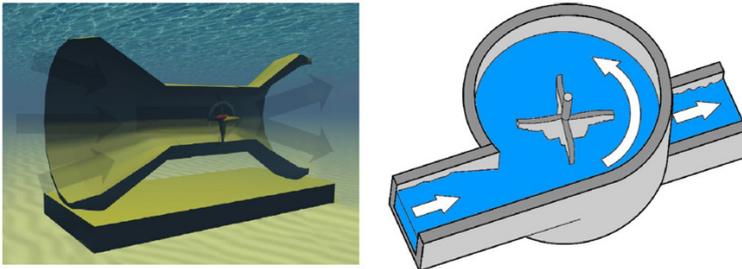
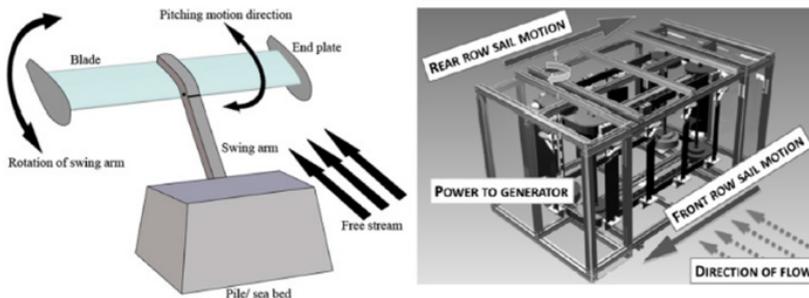


Figura 10 – Venturi (à esquerda) e turbina hidrocínética tipo vórtice (à direita)

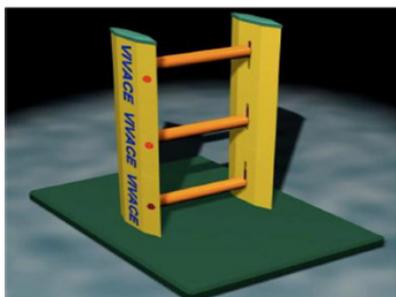
3.1.5 Sistemas hidrocínéticos sem turbinas

Um sistema sem turbina também pode ser usado para extrair energia de fluxos marinhos, fluviais ou em canais abertos. Exemplos podem ser vistos na Figura 11 (Ibrahim et al., 2021).

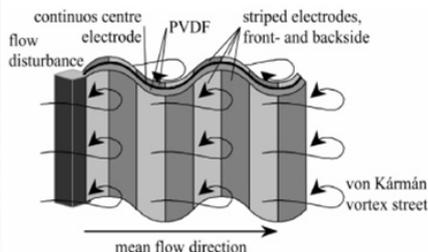


(a) *flapping foils*

(b) *sails*



(c) VIVACE converter



(d) flutter flag

Figura 11 – Sistemas hidrocínéticos sem turbinas

4. ENERGIA HIDROCINÉTICA EM RIOS NO BRASIL

Conforme Khan et al. (2009), as duas principais aplicações dos dispositivos hidrocínéticos são em correntes de maré e nos fluxos de rios. Os sistemas de conversão de energia fluvial utilizam o mesmo princípio dos sistemas de maré, mas com menor potência de saída, e são adequados para comunidades remotas. De acordo com Rodrigues et al. (2007), a geração hidrocínética em rios é uma excelente alternativa para comunidades ribeirinhas.

Segundo Arango (2011), ainda é possível a utilização de turbinas hidrocínéticas para aproveitamento do potencial remanescente a jusante de barragens hidrelétricas. Chamados de sistemas hidrelétricos de ciclos combinados (SHCC), têm como vantagem a possibilidade de interligação com a rede de transmissão já existente, o que reduz custos. No Brasil, diversos projetos para esse tipo de aplicação têm sido conduzidos pela Eletronorte (SANTOS, 2019).

No Brasil, os parques hidrocínéticos em rios ganham relevância, dado que a hidrografia brasileira é extremamente rica e diversificada, sendo um dos maiores sistemas fluviais do mundo. O Brasil possui um grande número de rios, lagos e lagoas, além de uma vasta área de bacias hidrográficas, que são responsáveis pelo fornecimento de água para o consumo humano, agricultura, indústria e geração de energia elétrica.

Destaca-se a região Norte do país para estudos de potencial hidrocínético devido à bacia do Amazonas, na qual estão inseridos os cinco principais rios brasileiros que, de modo conjunto, têm mais de 8000 km de extensão (SNIRH, 2013). Diversos trabalhos têm estudado sistemas envolvendo hidrocínéticas na região Norte: Santos (2019), Santos et al. (2021), Santos (2023), Holanda (2017), Filizola (2015) e Oliveira (2021). Apesar do potencial, a implantação de usinas hidrocínéticas em rios no Brasil é incipiente. Vale ressaltar que a região Norte

do Brasil possui ainda os chamados sistemas isolados, que são normalmente abastecidos por geradores a diesel. O uso de sistemas hidrocínéticos poderia auxiliar a substituir o uso do diesel nessa região.

5. POTENCIAL HIDROCINÉTICO

Um dos grandes desafios da aplicação da geração hidrocínética está na identificação dos potenciais, sendo, então, de extrema importância o estudo e conhecimento de metodologias já consagradas para esse tipo de análise. Santos (2019) apresentou uma tabela resumo de trabalhos com as respectivas metodologias para obtenção do potencial hidrocínético. Observa-se a grande variedade de trabalhos e metodologias envolvendo estudo de potencial, que vão desde estudos experimentais a estudos com modelagem hidrodinâmica e resolução computacional de equações teóricas, não sendo verificada, portanto, uma metodologia padrão que já esteja consolidada na literatura. O resumo de trabalhos organizados por Santos (2019) encontra-se disposto na Tabela 3 (Santos, 2019).

Tabela 3 – Resumo de trabalhos sobre prospecção de potencial hidrocínético

Autores	Potencial identificado	Metodologia aplicada
EPRI (2012)	Local: Rios do Alasca; Potencial Teórico: 39,6 TWh/ano; Vazão: Superiores a 283 m ³ /s; Potencial tecnicamente recuperável: 19,9 TWh/ano.	Obtenção do potencial teórico utilizando a equação da potência hidráulica e do potencial recuperável por meio da multiplicação por um fator de recuperação; Uso do software HEC-RAS.
EPRI (2012)	Local: EUA; Potencial Teórico: 1.381 TWh/ano; Potencial tecnicamente recuperável: 119,9 TWh/ano.	Obtenção do potencial teórico utilizando a equação da potência hidráulica e do potencial recuperável por meio da multiplicação por um fator de recuperação; Uso do software HEC-RAS.
Holanda et al. (2017)	Local: Jusante UHE Tucuruí – Brasil; Potencial Elétrico: 2,04 GWh/ano; Vazões: 5.000 a 23.000 m ³ /s; Potência instalada: próximo a 250 kW.	Análise realizada por meio da resolução das equações de Saint-Venant; Aplicação de 10 turbinas de 10 m de diâmetro,
Punys et al. (2015)	Local: Rio Neris, Lituânia Potencial hidrocínético: 39 kW; Potência média: 0,30 kW/m ² ; Velocidade média ao longo do rio: 0,3 a 2,3 m/s.	Potencial avaliado por meio do software HEC-RAS e de ferramentas de geoprocessamento.
Filizola et al. (2015)	Local: Bacia Amazônica, entre Brasil, Peru e Equador; Potencial hidrocínético: 107 a 135 MW, analisado ao longo de oito estações fluviométricas;	Imagens de ADCP; Dados hidrológicos e hidráulicos disponíveis.
Jenkinson e Cornett (2014)	Local: Canadá; Potencial hidrocínético total: 750 GW; Província de Quebec possui 190 GW do potencial total.	Correlações hidrológicas para estimativa da vazão, geometria do canal e outros parâmetros; Modelagem validada com dados experimentais de medição de velocidade e geometria por meio de 80.000 medições de velocidade em 430 estações ao longo do país.

6. ESTEIRAS HIDROCINÉTICAS

Segundo Mendes (2020), a esteira hidrocinética é a região a jusante da turbina cujo comportamento é resultante da interação do escoamento e as pás do rotor. Santos et al. (2021) falam que a instalação bem sucedida de turbinas hidrocinéticas requer análise da recuperação da esteira, juntamente com a identificação e seleção de potenciais locais.

Sood et al. (2022) descrevem a distância de recuperação da esteira como sendo o ponto de recuperação da velocidade inicial do fluxo após percorrer uma certa distância, após a passagem pelas pás das turbinas. Os mesmos autores ainda classificam as condições de fluxo a jusante da turbina, como:

- i) zona de velocidade deficitária: logo após a passagem pelas pás da turbina, sendo uma zona de velocidade mínima;
- ii) zona de esteira distante: com recuperação de 90% de sua velocidade e
- iii) zona de transição, como sendo a intermediária entres as duas zonas.

A Figura 12 (Ibarra et al., 2014) ilustra a esteira após o rotor da turbina. Uma ampla revisão sobre esteiras hidrocinéticas pode ser encontrada em Nago et al. (2022). Muitos autores utilizam uma abordagem computacional para estudo das esteiras.

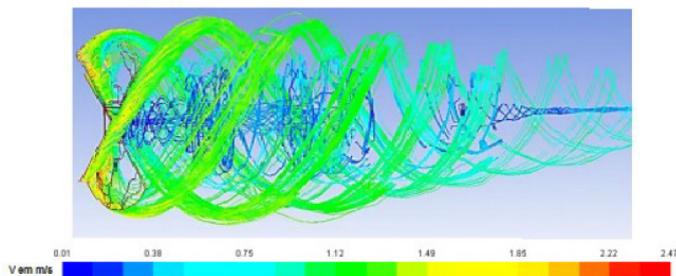


Figura 12 – Esteira formada após o rotor

Chawdary (2017) avaliou a alocação de três turbinas em formação de triângulo, doravante denominada como tri-frame, para estudar a diferença na formação da esteira em comparação com turbinas operando isoladas. Como resultados, Chawdary verificou que a potência gerada pelas turbinas tri-frame é superior a produzida por três turbinas operando separadas. Na formação tri-frame, as duas turbinas colocadas na segunda fileira produziram mais energia cinética do que a turbina isolada. Numa matriz de tri-frames, a energia excedente ge-

rada é inversamente proporcional ao espaçamento entre grupos de tri-frames e, por fim, a velocidade da esteira na configuração tri-frame se mostrou superior a de uma turbina isolada. As Figuras 13a e 13b (Adaptado de Chawdhary et al., 2017) indicam o arranjo de operação tri-frame e a velocidade na esteira, respectivamente.

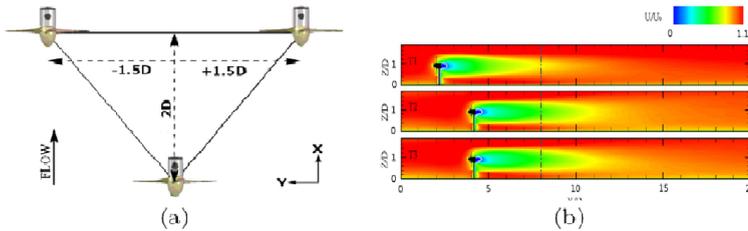


Figura 13 – Avaliação de formação de esteira em um arranjo tri-frame: (a) geometria tri-frame utilizada no experimento; (b) contorno de velocidade na esteira após a passagem do fluxo pelo rotor das turbinas no arranjo tri-frame

7. COMPARAÇÃO ENTRE A GERAÇÃO HIDROCÍNÉTICA E OUTRAS TECNOLOGIAS RENOVÁVEIS

Em oposição à geração hidrelétrica convencional, a geração hidrocínética não requer barragem ou reservatório, o que minimiza os impactos ambientais e sociais dessa fonte. Contudo, a capacidade de geração de energia hidrocínética é pequena em comparação a energia hidrelétrica convencional, sendo necessária a aplicação de muitas turbinas (construção de uma fazenda hidrocínética) para obtenção de maiores potências (LAWS; EPPS, 2016).

Já em comparação à geração eólica, Bahaj e Myers (2003) constataram que com a velocidade da água entre 2-3 m/s, um sistema hidrocínético é capaz de gerar quatro vezes a potência de saída em comparação com um sistema similar eólico. Portanto, o tamanho da turbina hidrocínética poderia ser muito menor do que a de um gerador eólico, para a mesma potência de saída. Além disso, a geração hidrocínética é menos dependente das condições meteorológicas em comparação com a geração eólica. Contudo, a geração eólica é viabilizada com maiores velocidades do vento do que as turbinas hidrocínéticas na água, além de haver mais áreas disponíveis, o que aumenta a escala do potencial eólico.

Com relação às usinas solares fotovoltaicas, tem-se que a geração hidrocínética é menos intermitente, sendo, contudo, dependente da disponibilidade de rios com alta velocidade, enquanto que os painéis fotovoltaicos dependem somente da existência de uma região adequada.

8. IMPACTOS AMBIENTAIS DAS TURBINAS HIDRO-CINÉTICAS

A construção de grandes hidrelétricas convencionais pode ter um impacto negativo no meio ambiente e no ecossistema local. Em contraste, a geração hidrocinética tem pouco ou nenhum impacto na flora e fauna (PETRIE et al., 2014). De acordo com Guney e Kaygusuz (2010), esse tipo de geração é ecologicamente correto e preserva a vida na água. Por exemplo, vários pesquisadores investigaram a impacto de turbinas hidrocinéticas em peixes. Romero-Gomez e Richmond (2014) relataram que as taxas de sobrevivência de peixes após o golpe da lâmina é superior a 96%, e melhor do que a convencional energia hidrelétrica. Schramm et al. (2017) relataram que o comportamento de peixes não foi alterado devido à emissão do som pela turbina.

9. DADOS BIBLIOMÉTRICOS SOBRE PUBLICAÇÕES ENVOLVENDO TURBINAS HIDROKINÉTICAS

Para a análise bibliométrica aqui apresentada foram utilizadas as seguintes palavras chave, com pesquisa nas plataformas SCOPUS e WOS: i) *hydrokinetic turbine and turbines*; ii) *hydrokinetic turbines and energy*; iii) *hydrokinetic systems and energy harnessing*; iv) *hydrokinetic farm and hydrokinetic wake*, e v) *hydrokinetic energy and tidal power*.

O tema turbinas hidrocinéticas tem ganhado importância com o maior interesse por outras fontes renováveis de geração e minimização dos danos causados ao meio ambiente. Isso se reflete bem na Figura 14 (SCOPUS), que mostra resultados da pesquisa bibliométrica realizada na base da SCOPUS.

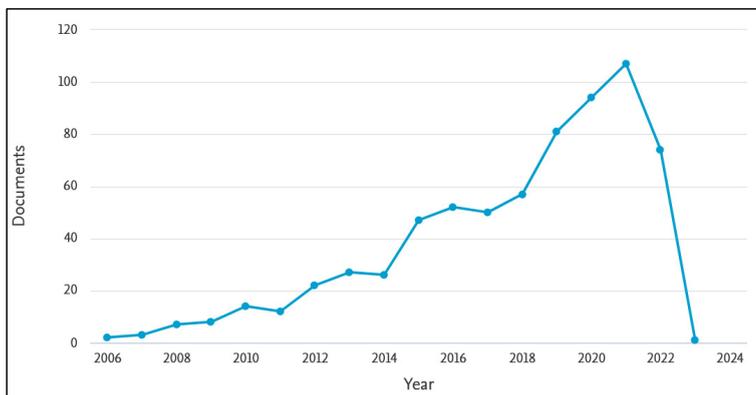


Figura 14 – Documentos gerados por ano

A Figura 15, por sua vez, apresenta para o período da pesquisa a distribuição mundial dos trabalhos envolvendo sistemas hidrocínéticos. Nota-se uma grande concentração dos estudos nos Estados Unidos. O Brasil possui posição de destaque e ocupa o quarto lugar. Por fim, nota-se na Figura 16 que a grande maioria das publicações em hidrocínética estão concentradas nas áreas de energia, engenharia e ciências ambientais.

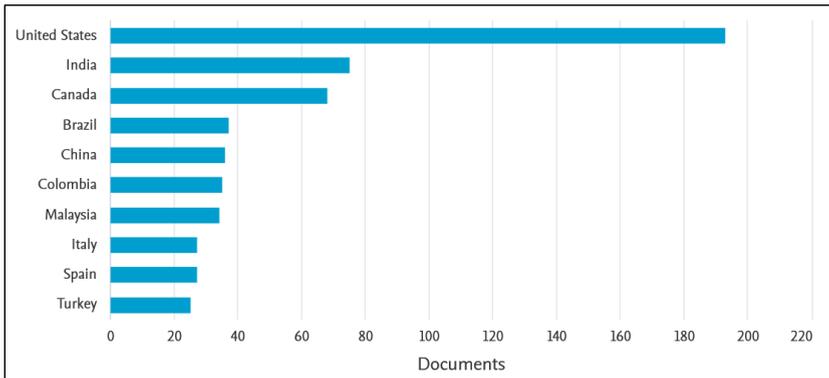


Figura 15 – Documentos gerados, classificados por país

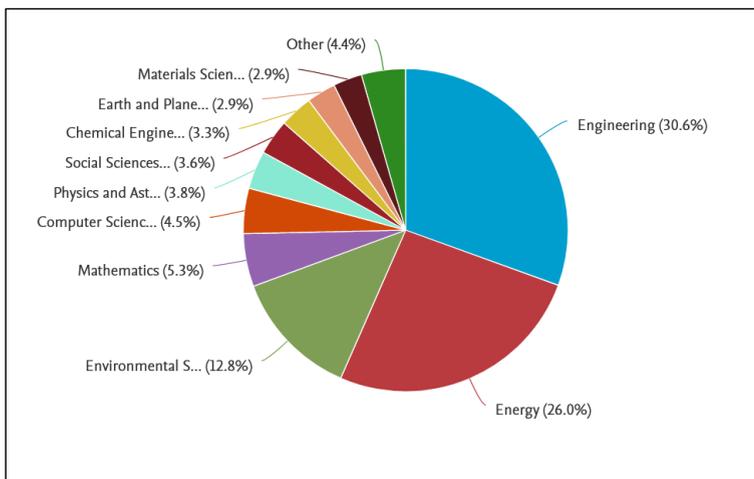


Figura 16 – Documentos gerados, classificados por área de conhecimento

10. CONCLUSÕES

Os sistemas hidrocínéticos são aqueles compostos pela inserção de turbinas na superfície livre dos rios, sem a necessidade de construção de barragens ou obras civis de maior porte. Por isso, a geração hidrocínética possui menores impactos ambientais. Além disso, a própria operação das turbinas tem baixo impacto sobre os peixes.

Embora muitas pesquisas tenham sido desenvolvidas com turbinas hidrocínéticas no Brasil e no mundo, seu uso em sistemas comerciais ainda é incipiente, sendo esses sistemas limitados, na maior parte das vezes, a pesquisas acadêmicas e/ou sistemas piloto.

Dentre os gargalos para desenvolvimento de sistemas hidrocínéticos estão a definição de metodologias para estimativa do potencial de sistemas hidrocínéticos e um maior entendimento do fenômeno das esteiras (para se definir o número de turbinas a serem inseridos em uma corrente). Devido à complexidade do fenômeno, muitos trabalhos têm empregado modelagens computacionais.

O número de publicações em hidrocínéticas tem crescido, sendo a grande maioria delas produzida nos Estados Unidos. O Brasil possui, contudo, destaque nas produções sobre sistemas hidrocínéticos, ocupando o quarto lugar no levantamento realizado. O país também possui um elevado potencial, sobretudo na região Norte, devido a sua intensa hidrografia. A implantação de sistemas hidrocínéticos no Norte do Brasil pode auxiliar a suprir energia elétrica para a região, colaborando com a diminuição do uso de diesel.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARANGO, M. A. Resource assessment and feasibility study for use of hydrokinetic turbines in the tailwaters of the priest rapids project. University of Washington, 2011.

BAHAJ, A. S.; MYERS, L. E. Fundamentals applicable to the utilisation of marine current turbines for energy production. *Renew. Energy* 28, 2205–2211, 2003.

BEHROUZI, F.; NAKISA, M.; MAIMUN, A.; AHMED, Y. M. Global renewable energy and its potential in Malaysia: A review of hydrokinetic turbine technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 62, 1270–1281, 2016.

BIRJANDI, A. H.; WOODS, J.; BIBEAU, E. L. Investigation of macro-turbulent flow structures interaction with a vertical hydrokinetic river turbine. *Renew. Energy* 48, 183–192, 2012.

CAVAGNARO, R. J. Performance Evaluation, Emulation, and Control of Cross-Flow Hydrokinetic Turbines. University of Washington, 2016.

CHAWDHARY, S.; HILL, C.; YANG, X. et al. Wake characteristics of a TriFrame of axial-flow hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*, v. 109, p. 332–345, 2017.

EPRI. Electric Power Research Institute. Assessment and Mapping of the Riverine Hydrokinetic Resource in the Continental United States. 2012. Disponível em < http://water.energy.gov/pdfs/riverine_hydrokinetic_resource_assessment_and_mapping.pdf >. Acesso: 17/08/2017.

FILIZOLA, N.; MELO, E.; ARMIJOS, E.; MCGLYNN, J. Preliminary Analysis of Potential for River Hydrokinetic Energy Technologies in the Amazon Basin Development Bank (IBD). Infrastructure and Environment Department. Energy Division. 2015. Disponível em < <https://publications.iadb.org/han> Acesso: 17/08/2017

FORBUSH, D.; CAVAGNARO, R.J.; DONEGAN, J.; MCENTEE, J.; POLAGYE, B. Multimode evaluation of power-maximizing cross-flow turbine controllers. *Int. J. Mar. Energy* 20, 80–96, 2017.

GUNEY, M. S.; KAYGUSUZ, K. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 2996–3004, 2010.

HOLANDA, P. S.; BLANCO, C. J. C.; MESQUITA, A. L. A.; BRASIL JR, A. C. P.; FIGUEIREDO, N. M.; MACÊDO, E. N.; SECRETAN, Y. Assessment of hy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, V. 101, p. 1203-1214, 2017.

IBARRA, G. A.; TIAGO FILHO, G. L.; RAMIREZ, R. G. Performance and Near Wake Analysis of a Hydrokinetic Rotor for Multistage Purposes Using CFD. In: 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM), 2014, Itajubá (MG). Proceedings of the 10th International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM), 2014.

IBRAHIM, W. I.; MOHAMED, M. R.; ISMAIL, R. M. T. R.; LEUNG, P. K.; XING, W. W.; SHAH, A. A. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review, *Energy Reports*, Volume 7, Pages 2021-2042, 2021.

JENKINSON, W.; CORNETT, A. Assessment of Canada's River Hydrokinetic Energy Resources. National Research Council Canada. Novembro, 2014.

KHALID, S. S.; LIANG, Z.; SHAH, N. Harnessing tidal energy using vertical axis tidal turbine. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.* 5, 239–252, 2013.

KHAN, M. J.; IQBAL, M. T.; QUAICOE, J. E. River current energy conversion: Progress, prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 2177–2193, 2008.

KHAN, M. J.; BHUYAN, G.; IQBAL, M. T.; QUAICOE, J. E. Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review. *Appl. Energy* 86, 1823–1835, 2009.

KOKO, S. P.; KUSAKANA, K.; VERMAAK, H. J. Micro-hydrokinetic river system modelling and analysis as compared to wind system for remote rural electrification. *Electr. Power Syst. Res.* 126, 38–44, 2015.

LAGO, L. I.; PONTA, F. L.; CHEN, L. Advances and trends in hydrokinetic turbine systems. *Energy for Sustainable Development*, Pages 287–296, 2010.

LAWS, N. D.; EPPS, B. P. Hydrokinetic energy conversion: Technology, research, and outlook. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 57, 1245–1259, 2016.

LIU, Y.; PACKEY, D. J. Combined-cycle hydropower systems e the potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations. *Renewable Energy*, V. 66, 228–231, 2014

MAGAGNA, D.; UIHLEIN, A. Ocean energy development in europe: Current status and future perspectives. *Int. J. Mar. Energy* 11, 84–104, 2015.

MENDES, R. C. F. Interação entre esteiras aerodinâmicas de turbinas de eixo horizontal em arranjos. Tese Doutorado, UNB - Brasília 2021.

NAGO, V. G.; DOS SANTOS, I. F. S.; GBEDJINO, M. J. et al. A literature review on wake dissipation length of hydrokinetic turbines as a guide for turbine array configuration. *Ocean Engineering*, v. 259, p. 111863, 2022.

NEILL, S. P.; HASHEMI, M. R. Chapter 3 - tidal energy. In: Neill, S.P., Hashemi MRB.T.-F. of ORE (Eds.), *E-Bus. Solut.*. Academic Press, pp. 47–81, 2018.

NISHI, Y.; SUZUO, R.; SUKEMORI, D.; INAGAKI, T. Loss analysis of gravitation vortex type water turbine and influence of flow rate on the turbine's performance. *Renew. Energy*, 155, 1103–1117, 2020.

OLIVEIRA, C. H. C. Avaliação do Potencial Hidráulico com Turbinas Hidrocinéticas e sua Atratividade para Sistemas Isolados e Geração Distribuída em Localidades da Região Amazônica – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2021.

PETRIE, J., DIPLAS, P., GUTIERREZ, M., NAM, S. Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites. *Renew. Energy* 69, 393–401, 2014.

PUNYS, P.; Adamonita, I.; KVARACIEJUS, A.; MARTINAITIS, E.; VYCIENE, G.; KASIULIS, E. Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study Lithuania. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, V. 50, p. 643-652, 2015.

RADKEY, R. L.; HIBBS, B. D. Definition of Cost Effective River Turbine Designs. US Dep Energy, <https://www.osti.gov/biblio/5358098>, 1981.

RODRIGUES, A. P. S. P.; BRASIL JR, A. C. P.; SALOMON, L. R. B. Modeling of Hydrokinetic Turbine. *Cobem - 19th International Congress of Mechanical Engineering*, Brasilia – DF, Brazil, 2007.

ROMERO-GOMEZ, P.; RICHMOND, M. C. Simulating blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines. *Simulating blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines*, *Renewable Energy*, vol. 71, pages 401-413, 2014.

SANTOS, I. F. S.; TIAGO FILHO, G. L.; BOTAN, A. C.; GALHARDO, C. R.; LOBÃO, P. H.; CAMACHO, R. R.; SOUZA, J. C. S. Prospecção do potencial hidrocínético em trechos fluviais via modelagem numérica. In: X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Gramado (RS). *Anais do X Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, 2016.

SANTOS, I. F. S. Análise técnica e econômica de parques hidrocínéticos com base em previsões numéricas (CFD) e dados experimentais. Tese (doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Itajubá, 213 p., 2019.

SANTOS, I. F. S.; CAMACHO, R. G. R.; TIAGO FILHO, G. L.; BOTAN, A. C. B.; VINENT, B. A. Energy potential and economic analysis of hydrokinetic implementation in rivers: An approach using numerical predictions (CFD) and experimental data. *Renewable Energy*, V. 143, 9648-662, 2019.

SANTOS, I. F. S.; CAMACHO, R. G. R.; FILHO, G. L. T. Study of the wake characteristics and turbines configuration of a hydrokinetic farm in an Amazonian river using experimental data and CFD tools. *Journal of Cleaner Production*, volume 299, 2021.

SANTOS, W. R. Avaliação do Potencial hidrocínético em um rio no Norte do Brasil por meio de uma distribuição estatística de velocidades. Relatório de iniciação científica (Engenharia Ambiental), Universidade Federal de Itajubá (MG), 2023.

SCHRAMM, M. P.; BEVELHIMER, M.; SCHERELIS, C. Effects of hydrokinetic turbine sound on the behavior of four species of fish within an experimental mesocosm. *Fisheries Research*, Volume 190, Pages 1-14, 2017.

SNIRH. Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos, Rios principais. 2013. Disponível em < http://portal1.snirh.gov.br/arquivos/atla_TEXTO.pdf>. Acesso: 19/04/2022.

SORNES, K. Small-scale water current turbines for river applications, 2010. Disponível em https://diving-rov-specialists.com/index_html_files/os_27-small-scale-water-current-turbines-for-river-applications.pdf. Acesso: 22/10/2024.

SOOD, M.; SINGAL, S. K. Development of statistical relationship for the potential assessment of hydrokinetic energy. *Ocean Engineering*, v. 266, p. 112140, 2022.

TIDGEN POWER GENERATION, 2019. Ocean renew power energy 2017. http://www.orpc.co/orpcpowersystem_tidgenpowersystem.aspx.

VAN ELS, R. H.; BALDUINO, L. F.; HENRIQUES, A. M. D.; CAMPOS, C, O. Hydrokinetic turbine for isolated villages. *PCH Notícias SHP News*, vol. 19, pp. 24–25, 2003.

VAN ELS, R. H. Sustentabilidade de projetos de implementação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: Casos no Suriname e Amapá. Tese (Doutorado em Desenvolvimento Sustentável) – CDS, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

VAN ELS, R. H.; BRASIL JUNIOR, A. C. P. The Brazilian experience with hydrokinetic turbines. *The 7th International Conference on Applied Energy – ICAE2015*. *Energy Procedia*, V. 75, p. 259-264, 2015.

VERMAAK, H. J.; KUSAKANA, K.; KOKO, S. P. Status of micro-hydrokinetic river technology in rural applications: A review of literature. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 625–633, 2014.