

## PROSPECÇÃO DO POTENCIAL HIDROKINÉTICO EM TRECHOS FLUVIAIS VIA MODELAGEM NUMÉRICA

Ivan Felipe Silva dos Santos  
Geraldo Lúcio Tiago Filho  
Antonio Carlos Botan  
Camila Galhardo  
Pedro Henrique Lobão  
Ramiro Gustavo Ramirez  
Júlio César Souza

*Universidade Federal de Itajubá*

### RESUMO

A energia hidrocínética é uma fonte de energia renovável obtida a partir da energia cinética da água, em regiões com baixíssimas quedas. Com o objetivo de colaborar com o desenvolvimento hidrocínético nacional, o presente artigo apresenta uma metodologia para simulação numérica por meio de ferramentas da fluidodinâmica computacional (CFD) de escoamento em rios, com objetivo de se avaliar as melhores regiões de um trecho de rio para implantação de turbinas hidrocínéticas. A modelagem proposta foi aplicada a um trecho do rio Jamari, localizado a jusante da UHE Samuel, apresentando resultados satisfatórios quando comparados a dados experimentais, revelando um potencial hidrocínético de 3,72 kW/m<sup>2</sup> de turbina a ser implantada por seção transversal do trecho analisado.

Palavras-chave: Energia hidrocínética, CFD, potencial hidrocínético

### ABSTRACT

Hydrokinetic is a renewable source of energy obtained from the kinetic energy of the water in low heads areas. With the objective of collaborating with the development of national hydrokinetics, the current paper presents a methodology of numeric modeling through CFD (Computational Fluid Dynamics) tools on the river stream, aiming to evaluate the best areas of a river stretch to implant hydrokinetic turbines. The proposed modeling was applied in a stretch on Jamari River, located at the downstream of Samuel Hydro Power Plant, presenting satisfactory results when compared to experimental data, revealing a hydrokinetic potential of 3.72 kW/m<sup>2</sup> of turbines to be deployed per transversal section of the analyzed stretch.

Keywords: Hydrokinetic energy, CFD, hydrokinetic potential.

## 1. INTRODUÇÃO

A hidrogeração convencional, largamente utilizada em todo o mundo, se baseia na combinação de queda e vazão para geração de potência em turbinas. Contudo, a energia hidráulica possui também um significativo potencial em correntes de água livres sem queda significativa, como em rios, canais, marés e ondas.

Esta forma de energia é chamada de hidrocínética e se baseia na conversão mecânica da energia cinética da água em movimento. Em rios, a velocidade das linhas de corrente é responsável pela movimentação dos rotores, os quais irão converter a energia hidráulica do escoamento em energia mecânica, que por sua vez é posteriormente convertida em energia elétrica por meio de geradores.

A geração hidrocínética em rios tem sido pesquisada por diversos autores para suprimento de comunidades isoladas e propriedades rurais (Cruz, 200; Kusakana e Vermaak, 2013). O potencial hidrocínético de um rio é a função cúbica da velocidade da correnteza ( $V$ ) do mesmo, conforme definido na equação 1 (Adaptada de Brasil Jr et al., 2007). De acordo com EPRI (2012, *apud* Yuce e Muratoglu, 2015), o potencial hidrocínético em rios continentais nos Estados Unidos é de aproximadamente 1381 TWh/ano, dos quais aproximadamente 120 TWh/ano são economicamente viáveis.

$$P_h = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1)$$

Onde:  $P_h$  = potencial hidrocínético;  $V$  = Velocidade da correnteza;  $A$  = Área disponível e  $\rho$  = massa específica do fluido.

Pela equação 1 vemos que a velocidade do rio tem papel preponderante na potência hidrocínética disponível no mesmo (função cúbica). A velocidade em um rio é controlada pela equação de Manning (Equação 2 - Porto, 2001), que contempla outros fatores além da velocidade, como coeficiente de *Manning* ( $\eta$ ), declividade ( $I$ ) e raio hidráulico ( $R_h$ ), sendo, portanto de complexa determinação variando anualmente nas épocas de cheia e seca. Assim sendo, a potência hidráulica disponível também variará.

$$\frac{\eta \cdot V}{\sqrt{I}} = R_h^{\frac{2}{3}} \quad (2)$$

O presente trabalho objetiva realizar uma simulação numérica via ferramentas CFD de um dos trechos à jusante da UHE de Samuel, no Rio Jamari (Rondônia), com vistas à obtenção da distribuição de velocidades deste trecho, e posterior seleção dos pontos com melhor

velocidade para implantação de turbinas hidrocínéticas, auxiliando a resolução do problema da determinação de velocidades para estimativa do potencial hidrocínético de rios.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Caracterização da área de estudo

Para modelagem computacional é necessário à construção da geometria do trecho do rio analisado em ambiente computacional. Tal trecho possuía por volta de 400m de extensão a partir da seção de entrada e representava um trecho do Rio Jamari localizado aproximadamente 4,1km a jusante da barragem da UHE Samuel (216 MW). A modelagem foi realizada no software *Ansys CFX*®, por meio de dados obtidos em uma campanha experimental realizada na época de seca, na qual foram medidas velocidade e topografia pelos pesquisadores do Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) em diversas seções transversais deste rio. O trecho analisado é apresentado em destaque na Figura 2, na qual se pode observar que se trata de um trecho curvilíneo, razão da escolha deste para a análise computacional. As medições efetuadas foram: distribuição de velocidades em diversas seções transversais, vazão (utilizando o ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*) e levantamento dos parâmetros geométricos (usando um ecobatímetro).

Abaixo são apresentados alguns dados da região estudada:

- Estudo realizado a Jusante da Usina de Samuel - Rio Jamari (Figura 1).
- Localização: Ferreira Candéias do Jamari, Estado de Rondônia, a 52 km em linha de Porto Velho.
- Dados Hidrológicos: Rio Jamari, Bacia 1 (Amazonas) e Sub-bacia 15.
- Coordenadas da Usina: Latitude: 08°45'00" S Longitude 63°25'00" W



Figura 1 - Vista geral do rio Jamari logo à jusante da UHE Samuel

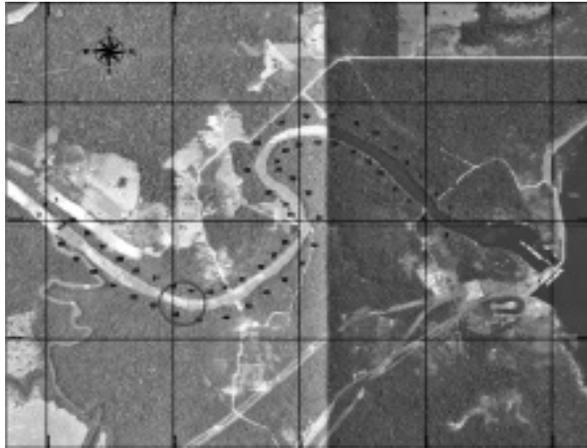


Figura 2 - Localização do trecho do rio Jamari analisado

## 2.2. Metodologia adotada para a modelagem computacional

Para simulação do potencial hidrocínético dos rios, utilizou-se o software *Ansys CFX*®. Este permite a simulação do escoamento de um fluido em uma estrutura por meio de 4 passos, a saber: a) Criação de geometria; b) Geração de malhas; c) Seleção de condições de contorno; d) Aplicação do Solver e e) Pós processamento e visualização dos resultados.

A geometria final gerada, do trecho de rio analisado, foi dividida em 5 regiões, a saber: (1) Entrada: caracterizada pela seção transversal de entrada no trecho; (2) Saída: caracterizada pela seção transversal de saída do trecho; (3) Superfície: dada pela superfície livre do rio; (4) Fundo: composta por toda região do fundo, parede e margens dos rios e (5) Lados: ocasionada pela inserção da elevação de 20cm, que caracteriza toda região lateral orientada a unir a parte do fundo com a superfície livre.

De posse da geometria finalizada prosseguiu-se com a geração das malhas. Esta também foi realizada no *ICEM CFD*®. A malha gerada foi uma malha não estruturada prismática, caracterizada pela mixagem de elementos tetraédricos, hexaédricos e prismáticos. Para isto, foram utilizados os comandos *global mesh* para geração preliminar e *part mesh* para refinamentos. A ferramenta *part mesh setup* permite selecionar parâmetros de refinamento, isto é, altura máxima dos elementos, tipos de elemento, taxa de crescimento da altura dos mesmos, etc. O número de nós e elementos da malha no trecho estudado foram respectivamente: 2.190.471 nós e 8.543.446 elementos.

As condições de contorno utilizadas estão apresentadas na Tabela 1. Os dados de velocidade coletados em campos foram utiliza-

dos para definição dos perfis de velocidade na entrada e saída da geometria durante a simulação computacional, a fim de que o escoamento no rio se amoldasse aos dados reais de velocidade medidos em campo. Em média, foram inseridos 180 valores de velocidade pontuais por seção, sendo 6 pontos de velocidade por cada vertical e em média, 30 verticais por seções.

A superfície livre foi simulada como sendo uma parede com livre escorregamento, o que corresponde a assumir a velocidade normal e as componentes da tensão tangencial como sendo nulas (Ferreira, 2012), conforme aplicado por Ferreira (2012) e Dettmeret al. (2013). Como não se procurava saber o comportamento da interação entre ar e água na superfície e nem a captura de eventuais ressaltos ou remansos durante a modelagem, mas somente as velocidades de trechos interpolados a partir de perfis de velocidades já fixados entre duas seções, optou-se por esta abordagem mais simples ao invés de uma modelagem bifásica, que por sua vez, consumiria maior tempo computacional. As declividades médias dos trechos de rio também foram desprezadas devido ao seu pequeno valor.

Tabela 1 - Caracterização das diversas regiões da geometria

Região	Caracterização da Região	Condição de Contorno
Superfície	<i>Free Slip Wall</i> (Parede com livre escorregamento)	-
Fundo	<i>No Slip Wall</i> (Parede fixa)	-
Lados	<i>No Slip Wall</i> (Paredes fixas)	-
Entrada	<i>Inlet</i>	Perfil de velocidade medido em campo com ADCP.
Saída	<i>Outlet</i>	Perfil de velocidade medido em campo com ADCP.

### 3. RESULTADOS

As Figuras 3 a 4 apresentam a composição dos perfis de velocidade impostos à entrada e saída do trecho analisado, com base nos dados da campanha experimental. Por estas, podemos observar uma redução da velocidade em direção ao trecho de saída. Já na Figura 5 é apresentando um plano transversal intermediário a entrada e saída do trecho estudado. Neste observamos o desenvolvimento de dois bulbos de velocidade mais intensa, adjacentes ao centro do rio, que serão os 'hotspots', ou seja, os locais mais indicados para implantação de turbinas hidrocínéticas.

A comparação dos resultados obtidos computacionalmente (Figura 5) e experimentalmente, por meio das medições em campo utilizando o ADCP (Figura 6), em uma seção intermediária no segmento

de rio analisado, permite a observação da proximidade entre os resultados medidos e simulados, dado que ambos apresentam concentração das maiores velocidades no centro do rio e diminuição conforme aproximamos das margens com valores de velocidade próximos (Por volta de 1,5 m/s), o que valida a metodologia empregada no modelo numérico.

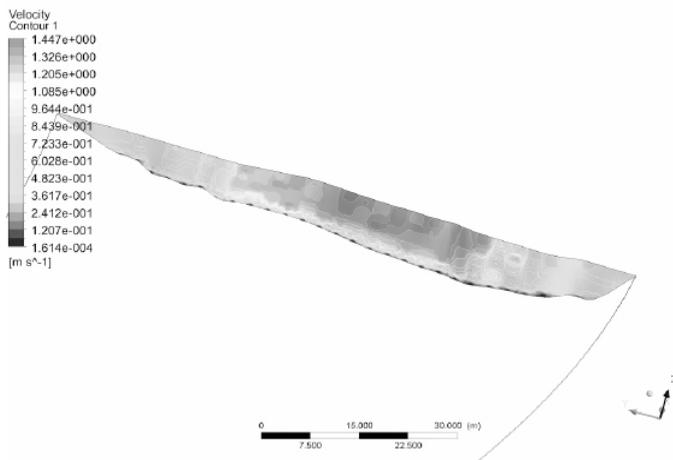


Figura 3 - Perfil de velocidades imposto na entrada do trecho do rio analisado

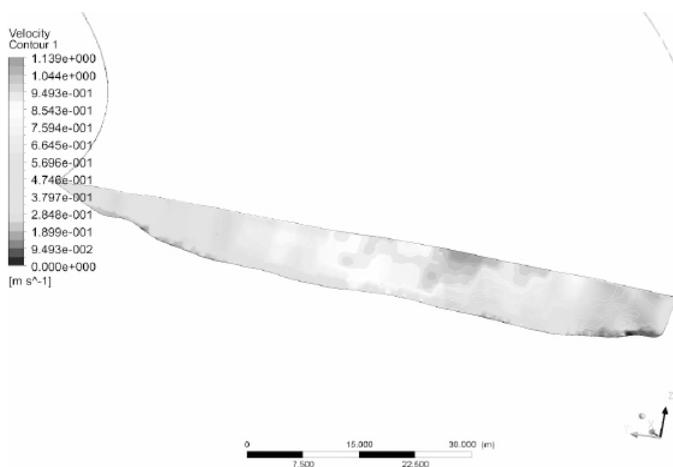


Figura 4 - Perfil de velocidades imposto na saída do trecho do rio analisado

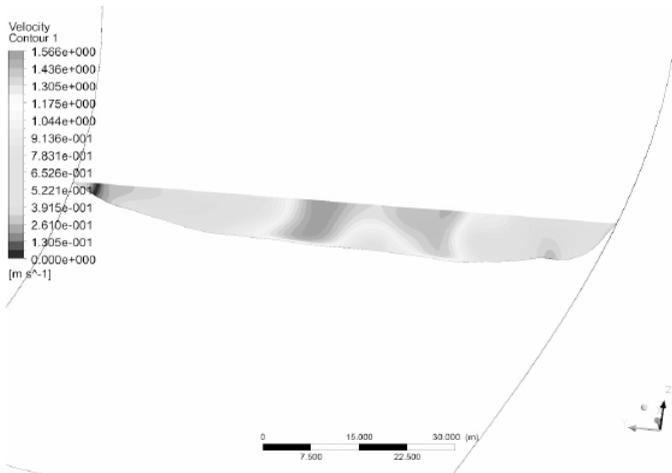


Figura 5 - Perfil de velocidades intermediário a seção de entrada e saída do trecho do rio. Resultados computacionais

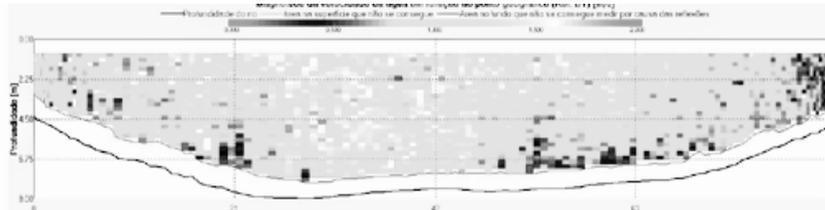


Figura 6 - Perfil de velocidades intermediário a seção de entrada e saída do trecho do rio. Resultados experimentais

As Figuras 7 e 8, que apresentam respectivamente os valores de velocidade em um plano longitudinal ao escoamento do rio e as linhas de corrente do escoamento, demonstram de modo mais eficaz os bulbos de velocidade máxima que se desenvolvem próximo ao centro do rio, permitindo a observação de que estes se prolongam por toda extensão longitudinal do rio, apresentando velocidades da ordem de 1,5 – 1,6 [m/s], sofrendo, contudo uma diminuição nos valores de velocidade conforme o escoamento se aproxima da seção de saída (Região que coincide com o término da curva – Vide Figura 2). Na Figura 8 observa-se ainda a ocorrência de uma diminuição das velocidades nas regiões próximas as margens, onde se verifica ainda, a presença de vórtices e turbulência.

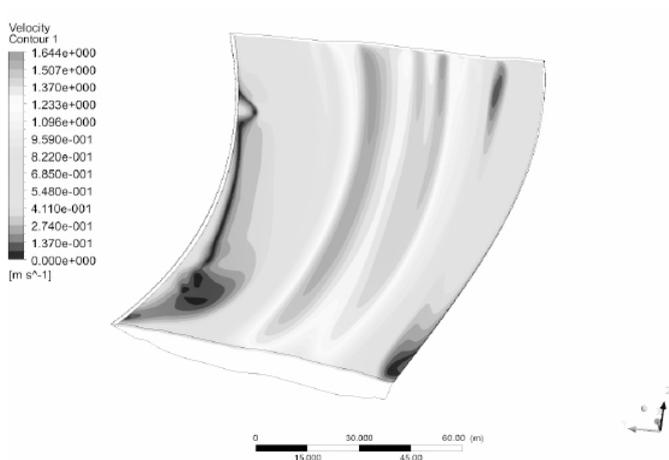


Figura 7 - Verificação das velocidades em um plano longitudinal

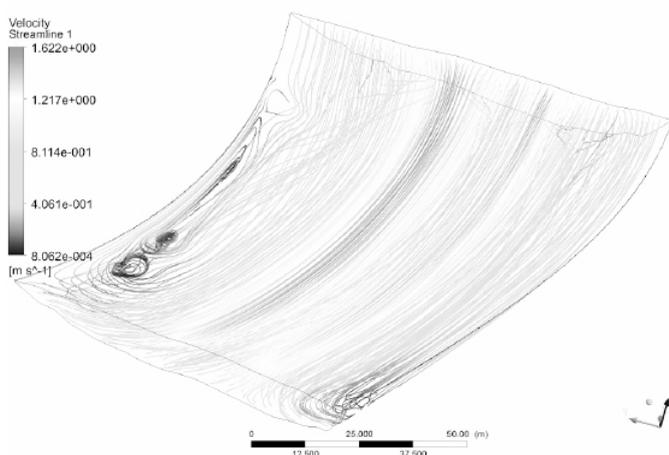


Figura 8 - Linhas de corrente do escoamento

Como as velocidades nos bulbos de velocidade máxima variam entre 1,5 e 1,6 m/s, pode se calcular a densidade de potência da seção transversal apresentada na Figura 5 por meio da equação 1, sendo obtido um valor de 1.87 kW por cada m<sup>2</sup> de turbina. Como temos duas linhas de velocidade máxima que varrem praticamente toda profundidade próxima ao centro do rio, pode-se planejar o aproveitamento com duas turbinas. Neste caso, o potencial total será de 3.72 kW por cada m<sup>2</sup> de área do rotor da turbina em uma única seção transversal.

#### 4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foi apresentada uma metodologia para simulação computacional de escoamentos em rios com o objetivo de se avaliar o potencial hidrocínético presente nos mesmos, por meio do software Ansys CFX®. A metodologia definida foi aplicada a um trecho curvilíneo do rio Jamari, utilizando-se dados experimentais reais, localizado a jusante da UHE Samuel. Uma seção intermediária a entrada e saída do segmento de rio analisado, seção da qual eram possuídos dados experimentais, foi utilizada para validação dos resultados computacionais.

Os resultados obtidos demonstraram a presença de dois trechos de máxima velocidade localizados próximos ao centro do rio e que se estendiam por praticamente todo comprimento do trecho analisado. Tal região caracteriza então o principal local para implantação de turbinas hidrocínéticas. A avaliação preliminar da potência hidráulica disponível em uma das seções transversais indicou ainda um valor de 3.72 kW por m<sup>2</sup> de área de turbina em cada seção transversal. Dado que a metodologia aqui apresentada pode ser replicada em qualquer trecho de rio que se queira analisar, conclui-se que o presente trabalho pode contribuir com estimativas de potencial hidrocínético para implantação de turbinas em rios e canais, contribuindo também com desenvolvimento da microgeração hidrocínética Nacional.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro Nacional de Referência em Pequenas Centrais Hidrelétricas (CERPCH) pela disponibilização dos dados de batimetria e correntometria das campanhas experimentais realizadas no rio Jamari. Os autores agradecem ainda a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsas e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio à participação no evento.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brasil Jr, C.P.B.J. Turbina hidrocínética geração 3. Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica – Citenel. ANEEL, 2007.
- Cruz, R. W. A. Geração de eletricidade com turbina hidrocínética na Amazônia: o caso da comunidade de São Sebastião. Encontro de energia no meio rural (Agrener), Campinas, 2000.
- Dettmer, P. H. C. et al. Simulação Numérica da capacidade de descarga de um vertedouro de baixa queda afogado por jusante. XX Simpósio Brasileiro de Recursos hídricos, 2013.

EPRI. Electric Power Research Institute. Assessment and mapping of the riverine hydrokinetic resource in the continental United States. Final report; December 2012

Ferreira, C. A. R. Simulação de Escoamentos Fluviais com Estruturas Verticais nas Margens do Leito Principal. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil – Perfil de Estruturas. Universidade Nova de Lisboa, 121 p., 2012.

Kusakana, K. e Veermak, H.J. Hydrokinetic power generation for rural electricity supply: Case of South Africa. *Renewable Energy*, V. 55, p. 467-473, 2013.

Porto, R. M. Hidráulica Básica. 2º Edição. EESC USP – Projeto REEN-GE, São Carlos, SP, 2001.

Yuce, M.I. e Muratoglu, A. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. V. 43, p. 72-82, 2015.



### Informações para Autores

Propostas de publicações em consonância com o disposto na missão da Revista Brasileira de Energia (RBE) poderão ser enviadas ao Comitê Editorial para análise, através de link específico existente no site da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético ([www.sbpe.org.br](http://www.sbpe.org.br)).

A formatação final para publicação ficará por conta do departamento de diagramação da RBE, porquanto os artigos deverão ser enviados em formatação simples, conforme o disposto a seguir:

- Os trabalhos devem ser editados e enviados em arquivo Word.
- Papel A4, margens 20 mm, fonte Times New Roman tamanho 12, espaçamento 1,5.
- Figuras com resolução mínima de 300 dpi.
- O nome do autor ou autores, não devem ser abreviados, e as respectivas informações de instituição, endereço, cidade, cep, estado, telefone e e-mail devem ser apresentadas.
- Todos os itens devem ser numerados sequencialmente, exceto Resumo e Abstract. Não usar numeração automática do processador de texto. Serão aceitos no máximo 3 subníveis de numeração, a partir dos quais poderão ser usadas letras como único subnível adicional.
- Títulos de figuras e tabelas, abaixo e acima das mesmas, respectivamente, sem descrição de fonte, a qual deverá ser feita ao longo do texto, muito menos a existência do termo “autoria própria”.
- Referências a trabalhos deverão ser citadas no texto com nome do autor (ou autores) e ano de publicação, entre parêntesis [Ex.: (Autor 1, 1928); (Autor 1 e Autor 2, 1928)]. Na existência de mais de dois autores, escreve-se o nome do primeiro autor seguido da expressão et al. [Ex.: (Autor 1 et al, 1928)].

#### Referências bibliográficas:

- Somente deverão ser citados autores ou trabalhos que estejam incluídos na lista de referências bibliográficas, assim como todos os trabalhos listados nas referências bibliográficas deverão ter sido citados no texto.
- Referências a autor(es) deverão ser citadas no texto com nome do autor (ou autores) sucedida do ano de publicação entre parêntesis [Ex.: Autor 1 (1928); Autor 1 e Autor2(1928)].
- Na existência de mais de dois autores, escreve-se o nome do primeiro autor seguido da expressão et al. [Ex.:Autor 1 et al (1928)].

