



MODELAGEM FLUVIAL DO RESERVATÓRIO DE JUSANTE DA UHE TUCURUÍ PARA AVALIAÇÃO DE LOCAIS PARA IMPLANTAÇÃO DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS

Patrícia da Silva Holanda

Claudio José Cavalcante Blanco

André Luiz Amarante Mesquita

Nélio Moura de Figueiredo

pholanda@ufpa.br

blanco@ufpa.br

andream@ufpa.br

nelio@ufpa.br

Universidade Federal do Pará-Rua Augusto Côrrea, 01, Belém-PA, 66075-110, Brasil

Antonio Cesar Pinho Brasil Junior

brasiljr@unb.br

UNB-Universidade de Brasília- Departamento de Engenharia Mecânica, Campus Darcy Ribeiro Asa Norte, Brasília, DF, 70910900, Brasil

Yves Secretan

INRS-ETE – Institut National de la Recherche Scientifique-Eau-Terre-Environnement

Universidade do Québec, 490 de la Couronne Québec (Qc), Canadá

***Resumo.** Este estudo considera a modelagem fluvial do reservatório de jusante da UHE Tucuruí para a avaliação de locais onde possam ser instaladas turbinas hidrocinéticas para o aproveitamento do potencial remanescente da hidrelétrica. O escoamento foi simulado através do modelo de Saint-Venant. Para tanto, foram levantados dados de topobatimetria para elaboração do modelo de elevação do terreno; dados de substrato para obtenção do coeficiente de Manning; e dados de vazão e nível d'água para as condições de contorno. As*

velocidades e profundidades foram simuladas para as vazões máxima e mínima observadas no período entre 2008 e 2013. Foram selecionados 10 pontos no canal do reservatório, onde as maiores velocidades e profundidades foram observadas através das simulações. Nesse caso, as velocidades variaram entre 0,6 e 2,0 m/s; e as profundidades variaram entre 11,93 e 42,60 m, demonstrando que, na área de estudo, há potencial para utilização da energia remanescente através da implantação de turbinas hidrocínéticas.

Palavras-chaves: *Energia, Potencial Remanescente, Modelo de Saint-Venant UHE Tucuruí, Reservatório de jusante.*

1 INTRODUÇÃO

A exploração da energia de correntezas, chamada comumente de energia hidrocínética, tem sido uma alternativa bastante explorada para geração de eletricidade usando o potencial de rios e oceanos (Khan et al., 2009; Guney e Kaygusuz, 2010). No caso de rios, potenciais hidrocínéticos vêm sendo analisados a jusante de centrais hidrelétricas (Holanda et al., 2013) para o aproveitamento da energia remanescente das águas vertidas e turbinadas. Em qualquer de suas aplicações, a exploração da energia hidrocínética mostra-se como um processo de conversão de energia de baixo impacto ambiental, que representa um aumento do potencial energético gerado pelos países, principalmente, para os que estão em desenvolvimento, que necessitam de energia para o desafio de se tornarem desenvolvidos.

Modelos hidrodinâmicos vêm sendo utilizados em grande quantidade de estudos sobre a hidráulica fluvial, a circulação da água em lagos, lagoas, baías, estuários, reservatórios de hidrelétricas etc. Tais modelos são frequentemente utilizados no intuito de explicar o comportamento da variação do campo de velocidades e de profundidades em função do espaço e do tempo, como por exemplo:

Lago et al.(2010) estudaram os recentes avanços e tendências no desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas. Citam a tecnologia de turbinas hidrocínéticas, que utiliza a corrente natural (rios, estuários, marés, correntes oceânicas e canais), mais promissor do que os sistemas que utilizam barragens e comportas. Explicam que a tendência atual é o uso de turbinas horizontais de fluxo livre e próximas à superfície. Além disso, os sistemas não turbinados que utilizam a vibração do fluido estão prestes a entrar em modelo de produção comercial. Por fim, os autores acreditam que o principal desafio não é o de extrair mais energia por unidade de área, mas fazer isso em um modo mais econômico e sustentável.

Duvoy e Toniolo (2012) desenvolveram uma ferramenta para estimar a energia hidrocínética em rios, esse modelo foi desenvolvido pelo (National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi), sendo aplicado ao rio Tanana próximo à Nenana, Alaska, EUA. A ferramenta HydroKal (calculadora hidrocínética) foi desenvolvida em Fortran 90, possuindo um módulo externo, o qual processa os arquivos resultantes da aplicação do CCHE2D, que é um modelo do tipo 2DH. O modelo CCHE2D tem como saída as velocidades, que são utilizadas pelo Hydrokal para calcular a densidade de potência hidrocínética em um rio, contabilizando a eficiência da turbina.

Iglesias et al. (2012) desenvolveram um índice TSE (Tidal Stream Exploitability) para a instalação de centrais maremotrizes em regiões estuarinas, tendo como estudo de caso o estuário Ría Ortigueira, localizado no noroeste da Espanha. O TSE combina os dados de velocidade e profundidade, onde são identificadas áreas, através do índice, com maior

potencial para instalação de turbinas. Os valores de profundidade e velocidade foram determinados com o Delft 3D-FLOW, o qual foi validado com medidas de velocidade.

Petrie et al. (2014) caracterizaram o perfil de velocidade média tridimensional do rio Roanoke, no leste da Carolina do Norte, EUA para avaliar os locais que possuem potencial hidrodinâmico de geração de energia. O trabalho avaliou a morfologia do canal, a batimetria e a distribuição do campo de velocidades. Essa avaliação foi feita com o uso de um ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). As medições foram realizadas ao longo de duas seções transversais perpendiculares às margens do rio. Os resultados contribuíram para a avaliação do recurso energético, bem como para o projeto de instalação de turbinas hidrocinéticas e o planejamento de estudo dos impactos ambientais.

No Brasil, os recursos hídricos têm importância decisiva no plano econômico. O país é dotado de uma vasta e densa rede hidrográfica, a qual possui barramentos para a produção hidrelétrica. No estado do Pará, no rio Tocantins, existe uma Usina Hidrelétrica considerada de grande porte – a UHE Tucuruí, a maior genuinamente brasileira, já que a usina de Itaipu é bi-nacional (Brasil-Paraguai). Assim, o objetivo do presente trabalho é aplicar a modelagem hidrodinâmica fluvial para estimativas de velocidades e profundidades para projetos de implantação de centrais hidrocinéticas a jusante da UHE Tucuruí.

2 METODOLOGIA

Dados de batimetria, condições de contorno e coeficiente de Manning

Os dados batimétricos foram fornecidos pela empresa Eletronorte/Eletronorte. Estes dados são oriundos da empresa AHIMOR- Administração das Rodovias da Amazônia Oriental e datam de setembro de 2004; e foram coletados através de ecobatímetro monofeixe. Na Figura 1, são mostrados os dados brutos de topografia de 2004 do rio Tocantins no trecho analisado, totalizando 111.583 pontos, os quais foram usados para gerar o modelo de elevação do terreno.

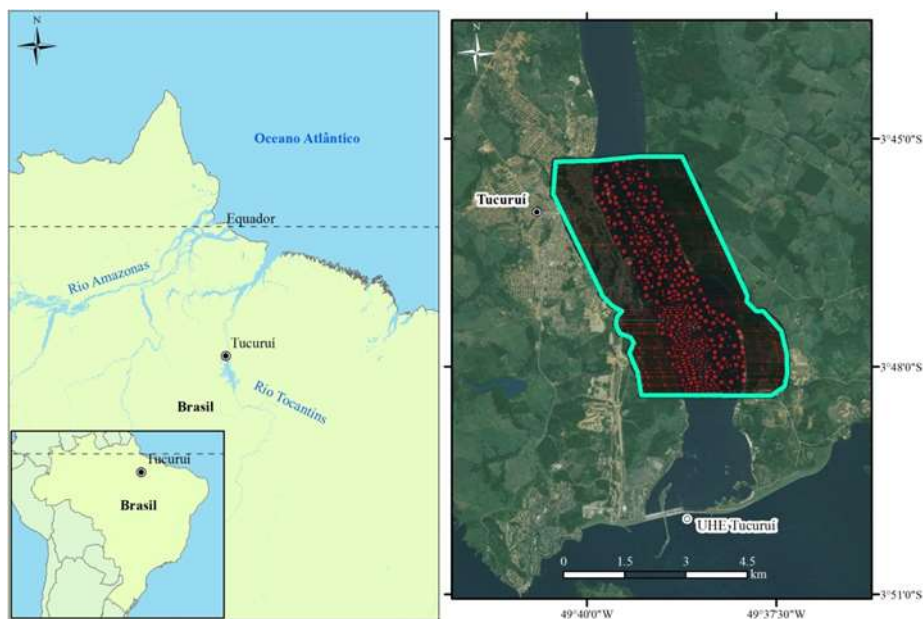


Figura 1. Localização da Área de Estudo

Para as simulações, também foram usados dados de vazão e de níveis de água a sul e a norte do trecho analisado (Figura 1). Os níveis de água e vazões foram considerados de 2008 a 2013 e fornecidos pela Eletronorte/Eletróbrás. Na Tabela 1, são apresentados os níveis de água e vazões referentes aos anos de 2012 e 2013, os quais foram medidos em campo através de um ADP-M9 (Acoustic Doppler Profiler – similar ao ADCP) com uma faixa de medida de velocidade variando de ± 20 m/s, uma acurácia de $\pm 0,2$ cm/s e resolução de 0,001 m/s. No caso das profundidades, o equipamento possui uma faixa de medição de 0,06 a 80 m, uma acurácia de 1% e uma resolução de 0,001 m.

Tabela 1. Níveis de água e Vazão

Dias	Nível de água sul (m)	Nível de água norte (m)	Vazão (m ³ /s)
24/07/2012	5,45	4,80	5.466
30/08/2012	6,45	5,40	8.032
25/09/2012	5,40	4,85	5.116
13/11/2012	4,90	4,50	3.841
13/12/2012	6,95	6,15	8.442
18/04/2013	11,98	11,04	22.910
13/06/2013	6,54	5,67	7.760
25/07/2013	5,52	4,83	5.364

Os coeficientes de Manning n , foram obtidos segundo Tucci et al., (2012) e Agudo e Juny (2001), considerando as condições das margens esquerda e direita bem como o leito do rio (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficiente de rugosidade

Tipo	Local	Valores (n)	
Paredes rugosas	Margem esquerda (cidade)	0,0200	Tucci et al., (2012)
Rios com meandros, vegetação e pedras	Leito do rio	0,0500	Agudo e Juny (2001)
Rios com Área de inundação e vegetação	Margem direita e esquerda	0,1125	Tucci et al., (2012)

Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico adotado neste trabalho é o bidimensional longitudinal-transversal, e as velocidades, $v(x,y)$, são médias na direção z . As equações de conservação da massa e de conservação da quantidade de movimento foram integradas ao longo da profundidade na direção vertical. Tal integração é favorecida pela hipótese de que os gradientes nas direções x e y são mais importantes que os na direção z . Tendo-se, assim, um modelo do tipo águas rasas, considerando, ainda, outras hipóteses:

- A coluna de água é misturada na direção vertical e a profundidade é pequena em comparação à largura e comprimento do rio;

- As ondas são de pequena amplitude e de longo período. A componente da aceleração vertical é insignificante, o que permite a aproximação da pressão hidrostática.

Adequação deste modelo em 2D para o estudo do comportamento hidrodinâmico do rio Tocantins é justificada pela: ausência de estratificação térmica; variações de salinidade pequenas; as componentes de velocidade na direção vertical são pequenas. Estas características tornam usual o modelo de Saint-Venant ou de águas rasas para simulações do escoamento no rio Tocantins. Nesse caso, a equação (1) é a equação da conservação da massa, enquanto que as equações (2) e (3) são as equações para a conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_x}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_y \quad (3)$$

q_x e q_y (m^3/s) são as vazões nas coordenadas cartesianas x e y (m); t (s) é o tempo; h (m) é o nível d'água; H (m) é a profundidade da coluna d'água, e F_x and F_y (N) são forças de volume nas direções x e y . Os somatórios de F_x e F_y são determinados através das Equações (4) e (5).

$$\sum F_x = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_x}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + F_{cx} + F_{wx} \quad (4)$$

$$\sum F_y = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_y}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + F_{cy} + F_{wy} \quad (5)$$

Sendo g a aceleração da gravidade (m/s^2); n o coeficiente de Manning; $|\bar{q}|$ o módulo da vazão específica (m^2/s); ρ a massa específica da água (kg/m^3); F_{cx} e F_{cy} as componentes da Força de Coriolis (N); e F_{wx} e F_{wy} as componentes da força devido ao vento (N); τ_{ij} é o tensor de Reynolds (N/m^2) equação (6)

$$\tau_{ij} = \nu \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

Em que \bar{U}_i é a componente da velocidade média na direção i (m/s); ν é a viscosidade cinemática. O modelo de turbulência utilizado no presente estudo é o de comprimento de mistura, que leva em consideração a distância da parede a partir da qual, o tamanho das estruturas turbulentas não é mais influenciado pela parede (Rodi, 1993). Neste caso, a viscosidade turbulenta é dada pela equação (7).

$$\nu_t = L_m^2 \sqrt{2D_{ij}D_{ij}} \quad (7)$$

Sendo D_{ij} o tensor da taxa de deformação do movimento médio (equação 8).

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (8)$$

O regime hidrodinâmico considerado neste estudo foi o estacionário, ou seja, sem a influência de ondas de maré, que é uma boa hipótese, considerando-se que os níveis de água e vazão do trecho do rio Tocantins analisado, são controlados muito mais pelas manobras de operação da UHE Tucuruí, do que pela possível variação de maré, que ainda possa atingir o rio Tocantins às proximidades de Tucuruí. A influência do vento não é considerada. O efeito da Força de Coriolis é desprezado devido ao domínio de estudo estar próximo à linha do Equador.

3 RESULTADOS

Calibração do modelo e estudo de malha

O modelo foi calibrado variando-se o coeficiente de Manning, tendo como pontos de partidas os *Mannings* apresentados na Tabela 2, visando à obtenção de uma boa concordância entre os valores de velocidades medidas e simuladas do período de 2012 a 2013 (Tabela 3) para o ponto apresentado na Figura 2. O erro relativo percentual médio entre as velocidades medidas e simuladas foi igual a 4,97%. A Figura 2 também apresenta o modelo de elevação de terreno interpolado na malha de elementos finitos da Figura 3. Tal malha foi determinada entre malhas com vértice maior de 30 m, 20 m e 15 m, sendo que a malha com vértice igual a 20 m (Figura 3) apresentou um resultado próximo ao da malha de 15 m, mas com um tempo computacional menor, sendo selecionada para todas as simulações. A malha determinada possui 97.392 nós, 48.227 elementos e foi gerada a partir de um algoritmo isotrópico frontal, que utiliza um só parâmetro de espaçamento e tenta gerar triângulos os mais regulares possíveis.

Tabela 3. Dados medidos e simulados para calibração do modelo

Dias	Qmedida (m ³ /s)	Vmedida (m/s)	Vsimulada (m/s)	Erro %
24/07/2012	5.466	1,20	1,19	0,83
30/08/2012	8.032	1,50	1,54	2,67
25/09/2012	5.553	1,00	1,10	10,00
13/11/2012	3.841	1,00	0,92	8,00
13/12/2012	8.442	1,50	1,40	6,67
18/04/2013	22.910	1,80	1,77	1,67

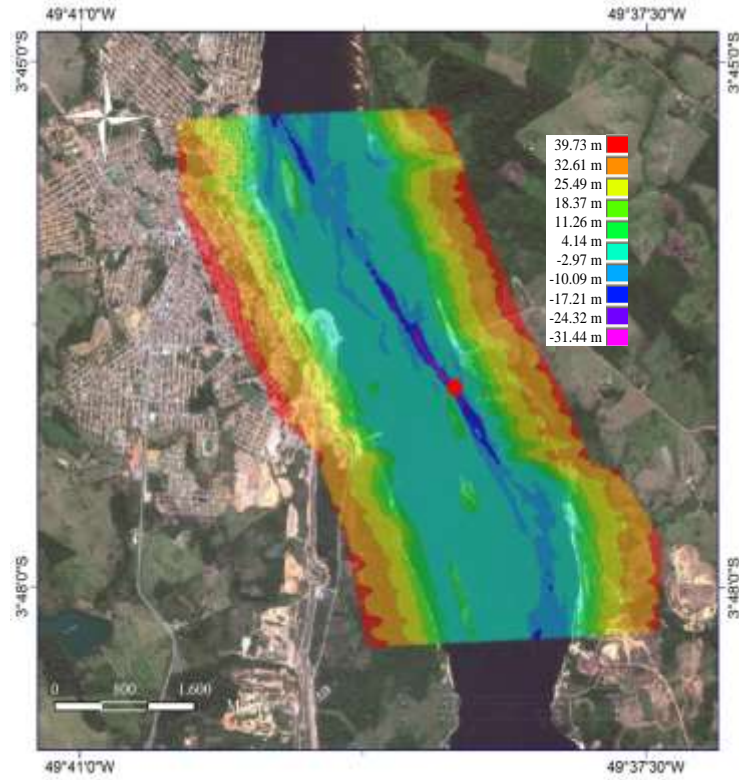


Figura 2. Isosuperfícies do modelo de elevação do terreno Interpolado (m) e ponto de medidas de velocidade



Figura 3. Malha de Elementos Finitos

Seleção dos pontos de Instalação de Turbinas Hidrocinéticas

Para análise de possíveis locais para instalação das centrais hidrocinéticas, utilizaram-se simulações de velocidade e profundidade para vazão máxima ($Q_{\max} = 31.274 \text{ m}^3/\text{s}$) e mínima ($Q_{\min} = 3.772 \text{ m}^3/\text{s}$) registradas entre 2008 e 2013, buscando-se avaliar a variação das velocidades e profundidades em função das vazões regularizadas pela central hidrelétrica. Com a profundidade, determinou-se a localização do canal principal do rio. Na Figura 6, são apresentadas, respectivamente, as isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima (Fig. 6a-b) e mínima (Fig. 6c-d).

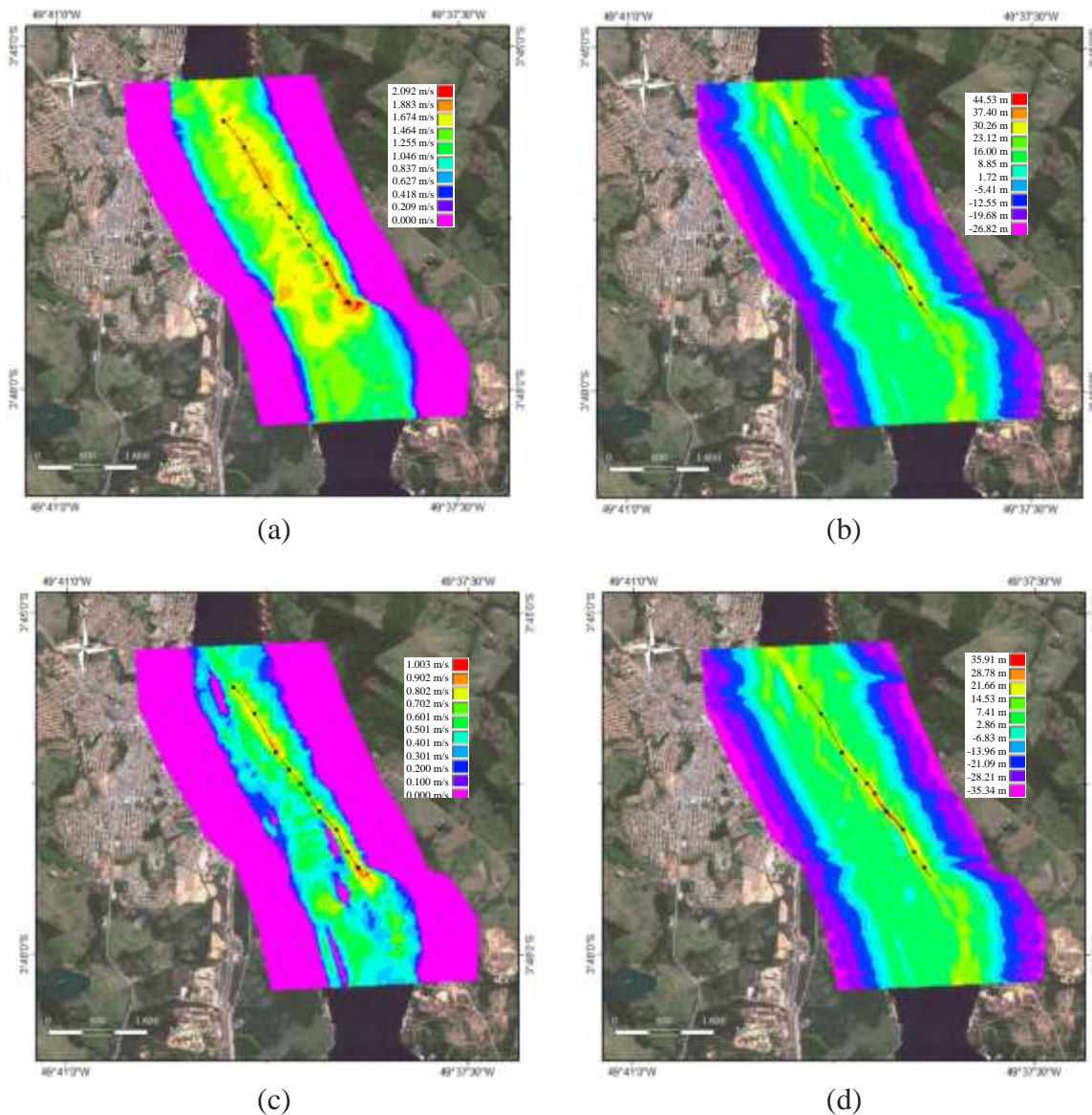


Figura 4. Isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima e mínima, e possíveis pontos para instalação de centrais hidrocinéticas

Analisando-se a Figura 6, pode-se observar o canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí mais próximo à margem direita do rio Tocantins. No canal, são encontradas as maiores velocidades e profundidades; e nele foram definidos 10 pontos com maiores velocidades, já que a energia gerada por turbinas hidrocinética varia com o cubo da

velocidade. Nesse caso, as velocidades variaram entre 0,6 e 2,0 m/s; e as profundidades variaram entre 11,93 e 42,60 m, demonstrando que, na área de estudo, há potencial para utilização da energia remanescente através da implantação de turbinas hidrocinéticas.

4 CONCLUSÃO

A metodologia apresentada foi capaz de demonstrar o potencial energético remanescente de grandes hidrelétricas, já que a UHE Tucuruí é a quarta em capacidade instalada no mundo. Observa-se que apenas o canal principal do reservatório de jusante foi analisado para a geração de energia através de turbinas hidrocinéticas. De fato, pode-se analisar toda a área entre a barragem e a saída das eclusas, respeitando-se com isso, o uso do rio Tocantins para o transporte hidroviário. Nessa área, incluindo o canal principal, pode-se avaliar a implantação de um parque hidrocinético, visando aumentar o aproveitamento da energia remanescente disponível no reservatório de jusante da UHE Tucuruí.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao CNPq pelo financiamento de uma bolsa de doutorado, processo nº 155003/2010-0; e a colaboração entre a UFPA/UnB/ELETROBRÁS-ELETRONORTE através do projeto P&D&I Tucunaré.

Responsabilidade autoral

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no trabalho.

REFERÊNCIAS

- Agudo, J.P., Juny, M.S. (2001). *Hidráulica de Canales*. Editorial Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Impreso em Espanã.
- Duvoy, P., Toniolo, H. (2012). *HYDROKAL: A module for in-stream hydrokinetic resource assessment*. *Computers & Geosciences*, Vol 39, 171–181.
- Guney, M.S., Kaygusuz, K. (2010) *Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol 14, 2996–3004.
- Holanda, P. S., Blanco, C. J. C., Mesquita, A.L.A., Cunha, A.C., Macêdo, E.N., Secretan, Y., 2013, *Hydrodynamic modeling Downstream of Tucuruí Hydroelectric Power Plant for Analysis of Sites to Sep Up of Hydrokinetic Turbines*, *Proceedings of the 22nd Brazilian Congress of Mechanical Engineering*, Ribeirão Preto, Brazil.
- Iglesias, G., Sánchez, M., Carballo, R., Fernández, H. (2012). *The TSE index e A new tool for selecting tidal stream sites in depth-limited regions*. *Renewable Energy An International Journal*, Vol. 48, 350–357.

Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaiçoe, J.E. (2009). *Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review*. Applied Energy, Vol. 86, 1823–1835.

Lago, L.I, Ponta, F.L., Chen, L. (2010). *Advances and trends in hydrokinetic turbine systems*. Energy for Sustainable Development, Vol, 14, 287–296.

Petrie, J., Diplas, P., Gutierrez, M., Nam, S. (2014). *Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites*. Renewable Energy An International Journal, Vol. 69, 393–401.

Rodi, 1993, W. *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review*, 3ed. Balkema. Taylor & Francis, pp.104.

Tucci, C.E.M, Silveira, A.L.L.da. et al.(2012). *Hidrologia: Ciência e Aplicação/organizado*, 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ ABRH.