



## **AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO REMANESCENTE A JUSANTE DE UHES NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO TIETÊ**

**Marcio de Pinho Bittencourt**

**Maurício André Nunes**

marcio.bitencourt@aes.com

mauricio.andre@aes.com

Av. Nações Unidas 17-17, 11º andar, Bauru, SP, 17013-905, Brasil

**Patrícia da Silva Holanda**

**Cleidson da Silva Alves**

**Claudio José Cavalcante Blanco**

**André Luiz Amarante Mesquita**

pholanda@ufpa.br

cleidsonalves.eng.mecanica@gmail.com

blanco@ufpa.br

andream@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**

Yves.Secretan@ete.inrs.ca

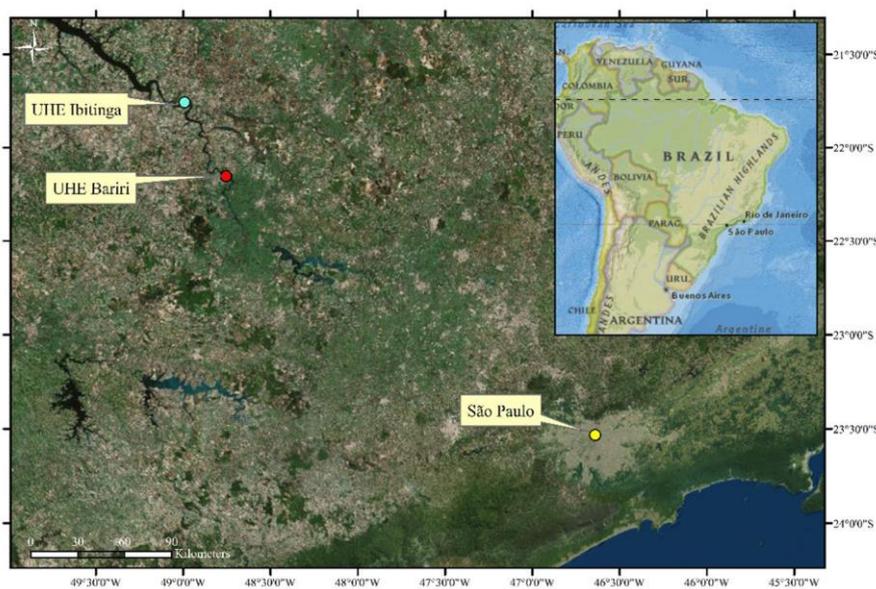
Université du Québec, 490 de la Couronne Québec (Qc), Canadá

**Resumo.** A modelagem hidrodinâmica fluvial tem sido amplamente utilizada como uma ferramenta computacional para estimar o potencial hidrocinético de reservatórios de jusante de UHEs, ou seja, aproveitando a energia remanescente. O presente estudo avaliou o potencial de duas UHEs localizadas na bacia hidrográfica do rio Tietê, as UHEs de Ibitinga e Bariri, buscando demonstrar qual das duas possui maiores velocidades em seu reservatório de jusante, já que a velocidade varia ao cubo quando se está interessado em maiores potenciais hidrocinéticos. O escoamento foi simulado através do modelo Saint-Venant. Para tanto, foram levantados dados de topobatimetria para a 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. O modelo para as duas UHEs foram validados e calibrados com dados observados de profundidade e velocidade. A partir desse modelo, velocidades e profundidades dos dois reservatórios de jusante foram simuladas para as vazões máxima, média, mínima observadas no período de 2010 a 2014. Os resultados de velocidade apontam um maior potencial hidrocinético para UHE Ibitinga, pois suas velocidades máximas, para as vazões simuladas variam entre 1,468m/s (vazão mínima) e 2,703 m/s (vazão máxima). Enquanto que as velocidades para UHE Bariri variam entre 0,61m/s e 2,05m/s.

**Palavras-chaves:** Turbinas Hidrocinéticas, Reservatórios de Jusante, Modelo de Saint-Venant.

## 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, os recursos hídricos são decisivos economicamente. O país é detentor de uma grande rede hidrográfica. No estado de São Paulo, mais precisamente no rio Tietê, existem 5 usinas hidrelétricas administradas pela AES Tietê (Figura 1). Assim, o presente trabalho tem como objetivo principal, a modelagem fluvial do reservatório de jusante das UHEs Ibitinga e Bariri. Os resultados da modelagem, i.e., velocidades e profundidades dão suporte para determinação dos locais de implantação de turbinas hidrocinéticas para aproveitamento da energia remanescente pós-passageira pelas turbinas e vertedouro da UHEs mencionadas.



**Figura 1. Localização da área de estudo**

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, ou seja, que necessitam de energia para o desafio de se tornarem desenvolvidos.

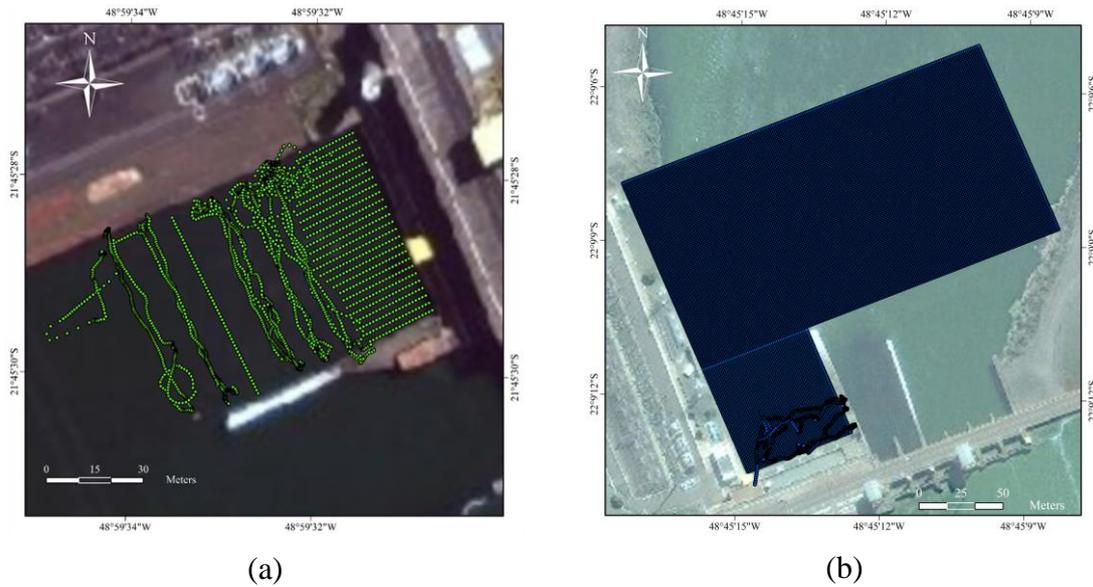
## **2 METODOLOGIA**

### **2.1 Ferramentas Computacionais**

O programa H2D2 (GRE-EHN, 2016) utilizado nesta modelagem, é composto de um pré e pós-processador de Elementos Finitos. O programa realiza todas as etapas de integração dos diversos dados de campo para a concepção do Modelo de Elevação do Terreno (MET) suportado por uma malha de Elementos Finitos. Através do Método de Elementos Finitos (MEF), as simulações hidrodinâmicas são executadas com base no Modelo de Saint-Venant. O H2D2 é desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-Hidráulica Numérica (GRE-EHN) do INRS-ETE da Universidade do Quebec - Canadá. Alguns trabalhos têm demonstrado o potencial de aplicação do modelo 2DH, tipo águas rasas, inclusive na região amazônica (Barros et al. 2011; Blanco et al. 2013; Holanda et al. 2013).

### **2.2 Dados topobatimétricos**

Os dados topobatimétricos, níveis d'água e vazão foram coletados a partir de uma medição in situ, por uma equipe da AES Tietê. Os dados foram coletados via ADP-M9 (Acoustic Doppler Profiler) com uma faixa de medida de velocidade variando de  $\pm 20$  m/s, uma acurácia de  $\pm 0,2$  cm/s e resolução de 0,001 m/s. No caso das profundidades, o equipamento mencionado possui uma faixa de medição de 0,06 a 80 m, uma acurácia de 1% e uma resolução de 0,001 m. Os dados medidos em campo estão georreferenciados (WGS84 22S) em coordenadas UTM e projetados em uma imagem de satélite da região em questão. A área da Figura 2 (a) foi a primeira a ser simulada, deixando para uma etapa posterior, a simulação de uma área maior do reservatório de jusante da UHE Ibatinga. Na Figura 2 (a) e (b) são demonstrados, respectivamente, os dados medidos em campo de Ibatinga e Bariri.



**Figura 2. Dados topobatimétricos Ibitinga (a) e Bariri (b)**

Os dados de substrato são provenientes das informações contidas em desenho técnico fornecido pela AES Tietê, onde na bacia de dissipação tanto de Ibitinga quanto de Bariri, encontram-se formações rochosas, com isso foi extrapolado para o restante dos reservatórios de jusante. No trabalho de campo, observaram-se rochas aflorantes e submersas.

### **2.3 Topobatimetria Bruta**

A topobatimetria bruta de relevo de fundo foi determinada a partir dos dados de profundidades medidos pela AES Tietê e estimados pela equipe da UFPA. As cotas topográficas foram determinadas através da equação (1), com  $N.A = 382,775$  m (Ibitinga) e 408,50 m (Bariri).

$$\text{Cota} = \text{NA} - \text{Prof} \quad (1)$$

Em que, Prof (m) é a profundidade; NA (m) é o nível d'água; e a Cota (m) é a cota de fundo.

### **2.4 Condições de Contorno**

Além dos dados topobatimétricos e de substrato são necessários também dados de condição de contorno de vazão e nível d'água, os quais também foram fornecidos pela empresa AES Tietê para o período entre 2010 e 2014 (Ibitinga) e para (Bariri) de 2011 a 2015. Na Figura 3, são mostradas as condições de contorno impostas para as simulações. Nesse caso, foram fornecidos os níveis d'água (NA) para as fronteiras de jusante; e vazão para as de montante. Na Figura 3 (a-b), são demonstradas respectivamente as condições para vazão mínima e máxima.

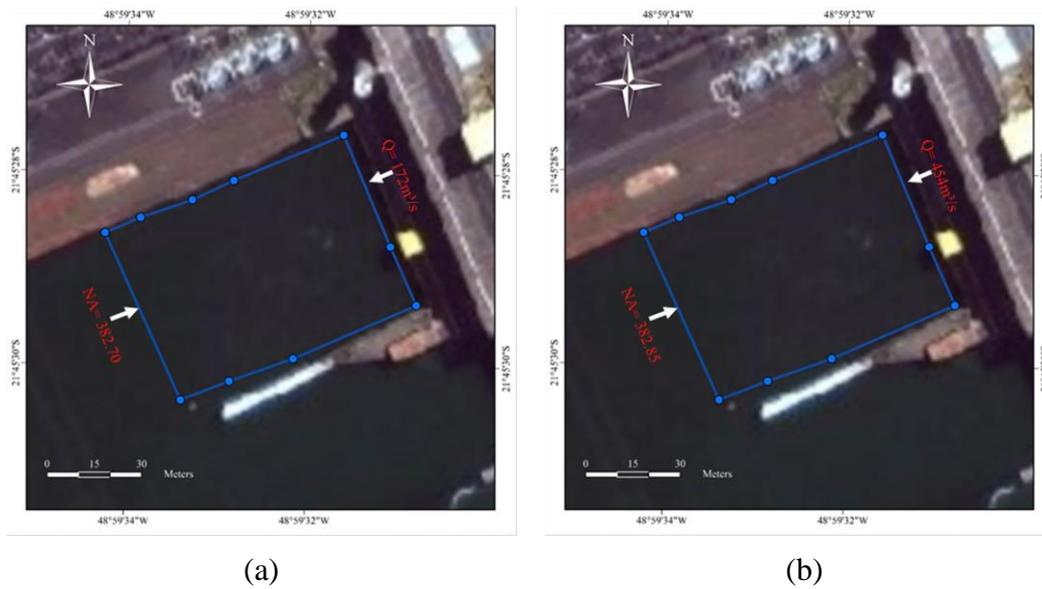


Figura 3. Condições de Contorno UHE Ibatinga para vazões mínima (a) e máxima (b)

Na Figura 4 (a-b), são apresentadas as condições para vazão mínima e máxima.

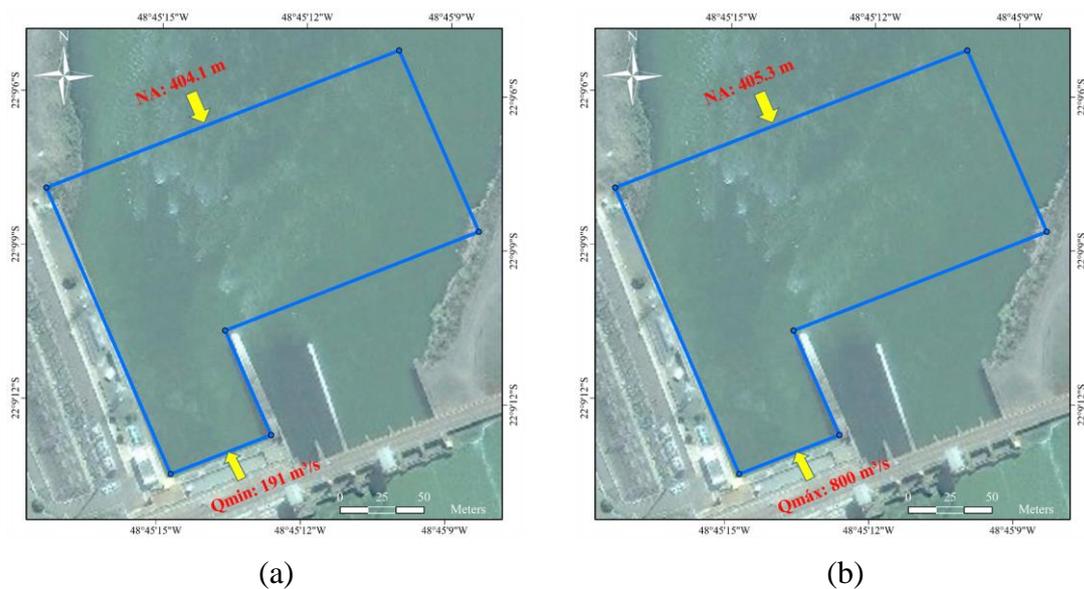


Figura 4. Condições de Contorno UHE Bariri para vazão mínima (a) e máxima (b)

## 2.5 Modelo Hidrodinâmico

O modelo hidrodinâmico adotado neste trabalho é o bidimensional longitudinal-transversal tipo águas rasas (Saint-Venant). As equações de conservação da massa e de conservação da quantidade de movimento foram integradas em relação a variável “z”. Tal integração é oriunda da hipótese de que os gradientes nas direções “x” e “y” são mais importantes que os na direção “z”. Outra consequência dessa hipótese é que a aceleração do movimento na vertical pode ser desprezada, permitindo a aproximação de pressão hidrostática. Nesse caso, a Equação (2) representa a conservação da massa e as equações (3) e (4) representam a conservação da quantidade de movimento nas direções “x” e “y”, para um escoamento incompressível e em regime permanente.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

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

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_y \quad (4)$$

Em que,  $q_x$  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 (5) e (6).

$$\sum F_x = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_x}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + F_{cx} + F_{wx} \quad (5)$$

$$\sum F_y = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{n^2 g |\bar{q}| q_y}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + F_{cy} + F_{wy} \quad (6)$$

Sendo  $g$  a aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );  $n$  o coeficiente de Manning;  $|\bar{q}|$  o modulo da vazão específica ( $m^2/s$ );  $\rho$  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);  $\tau_{ij}$  é o tensor de Reynolds ( $N/m^2$ ) equação (7)

$$\tau_{ij} = \nu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

Em que  $\bar{U}_i$  é a componente da velocidade média na direção  $i$  (m/s);  $\nu$  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 (8).

$$\nu_t = L_m^2 \sqrt{2D_{ij} D_{ij}} \quad (8)$$

Sendo  $D_{ij}$  o tensor da taxa de deformação do movimento médio (Equação 9).

$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

Os efeitos da Força de Coriolis e do vento são geralmente pequenos o suficiente, para serem desprezados, devido às dimensões dos domínios envolvidos.

## 2.6 Calibração e Estudo de Malha

Na primeira etapa, o modelo foi calibrado variando-se o coeficiente de Manning, buscando uma boa concordância entre os valores de vazões medidas e simuladas. Com a determinação do coeficiente de Manning igual a 0,025, foi realizado um estudo de malha, no qual, na saída da turbina tanto para Ibitinga quanto para Bariri utilizou-se uma malha mais refinada com vértices de (5 m), enquanto que para o restante dos dados foi feito um particionamento de malha onde os vértices foram de 10 m para Bariri e Ibitinga. Foram realizadas várias simulações com diferentes malhas, as que melhores representaram o escoamento foram as malhas da Figura 5(a-b), onde foi feito um refino na seção da saída das turbinas com elementos triangulares com vértice de 5 m e para o restante da seção os elementos foram de 10 m vértices. O erro relativo percentual entre as vazões simuladas e observadas tanto para Ibitinga quanto para Bariri ( $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$ ) foi menor que 1,0%.

## 3 RESULTADOS

### 3.1 Malha de Elementos Finitos

A malha estoca todas as grandezas de entrada necessárias a resolução das equações de Saint-Venant, bem como as grandezas resultantes da simulação do escoamento bidimensional (velocidades  $x$  e  $y$ , profundidade e nível d'água). As grandezas de entrada consideradas no modelo são: as coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ , interpoladas via MEF (Modelo de Elementos Finitos); o valor da rugosidade média calculada; e as condições de contorno definidas anteriormente e transferidas para a malha. Na Figura 5 (a-b) são apresentadas a malha (a), possuindo 305 elementos triangulares e 668 nós; e a malha (b), possuindo 959 elementos triangulares e 2032 nós. As malhas foram geradas a partir de um algoritmo isotrópico frontal que utiliza um só parâmetro de espaçamento e tenta gerar triângulos os mais regulares possíveis (Secretan et al., 2000).

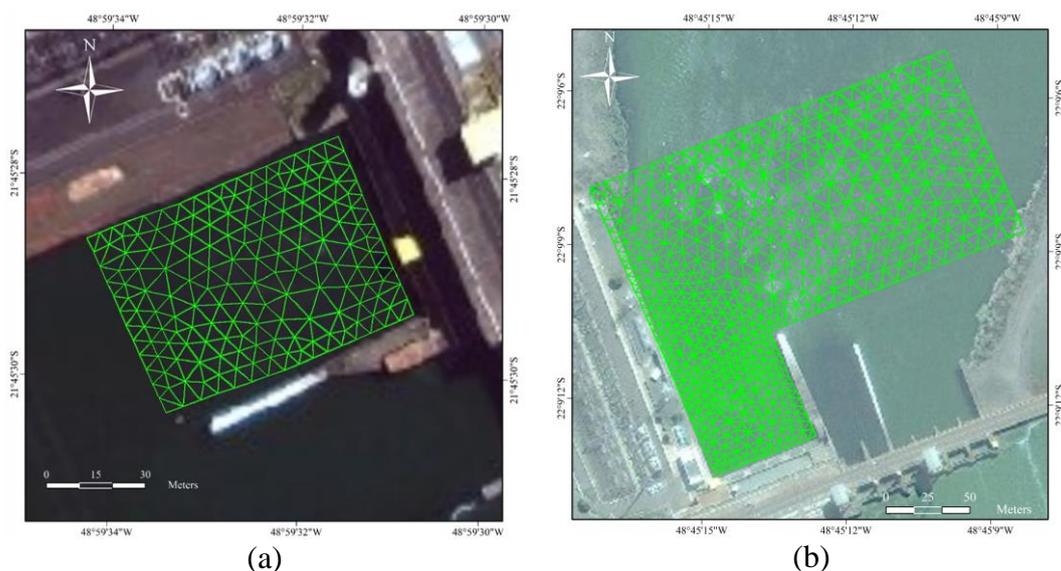
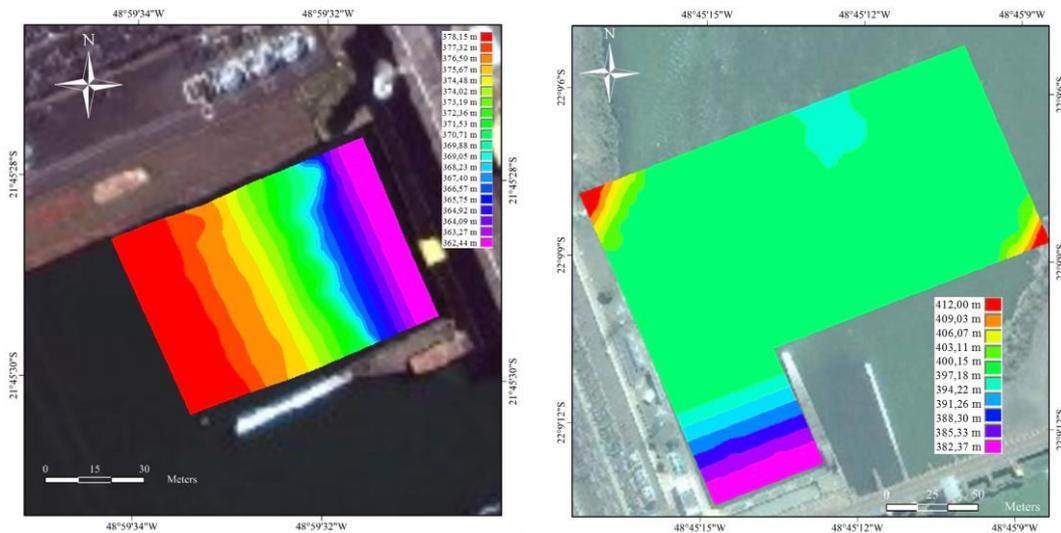


Figura 5. Malha hidrodinâmica UHEs Ibitinga (a) e Bariri (b)

### 3.2 Modelo de Elevação do Terreno

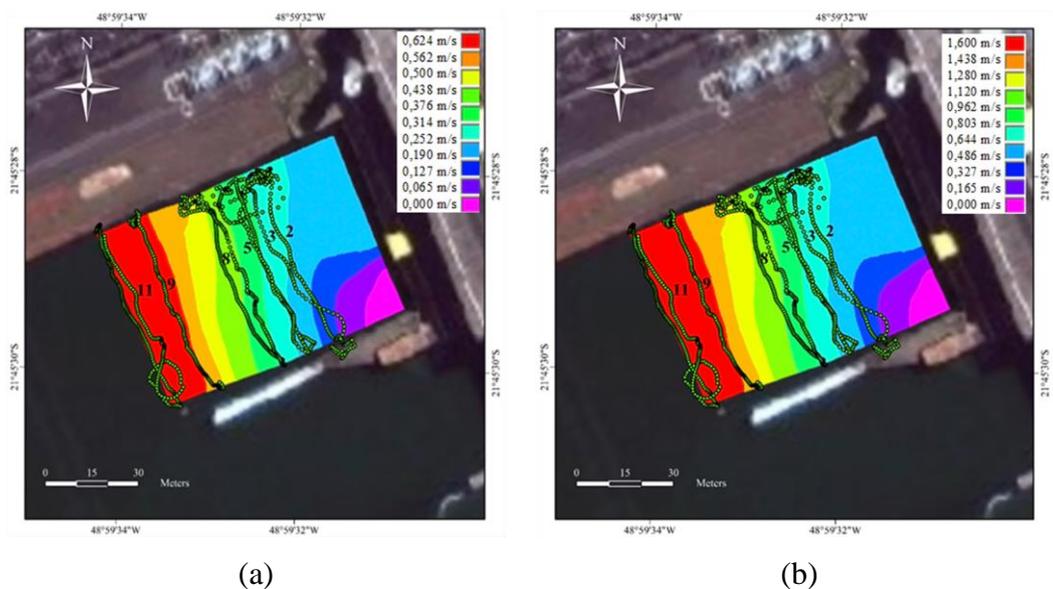
Na Figura 6 (a-b), são demonstradas as Isosuperfícies do modelo de elevação de terreno interpolado via métodos dos elementos finitos.



**Figura 6. Modelo de Elevação do Terreno Ibitinga (a) Bariri (b)**

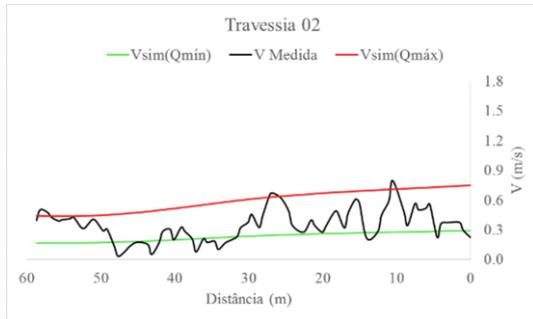
### 3.3 Velocidades medidas e simuladas (Ibitinga)

Na Figura 7 (a-b), são mostrados os campos de velocidade simulados para  $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$ . Analisando a figura, pode-se observar a operação da UHE Ibitinga ocorrida, na qual a unidade geradora 3 estava em manutenção, ou seja, em sua saída o escoamento era nulo, região a sudeste dos campos de velocidade. Visando a instalação de turbinas hidrocinéticas, as velocidades ao final da bacia de dissipação são mais interessantes, sendo maiores devido ao estrangulamento do escoamento ao final da rampa da bacia de dissipação.

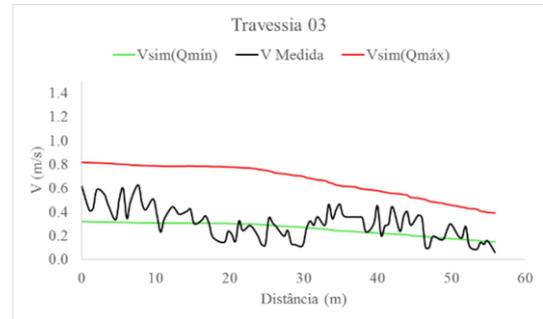


**Figura 7. Isosuperfícies de velocidades para  $Q_{\min}$  (a) e  $Q_{\max}$  (b); e travessias**

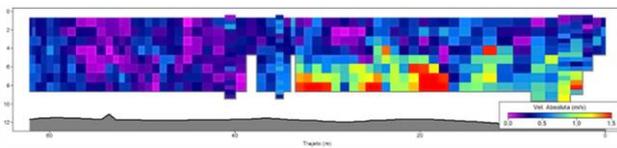
Na Figura 8 (a-b-e-f-i-j), são apresentadas as velocidades médias na vertical medidas (calculadas pela ADP) e simuladas (calculadas pelo modelo) em função das travessias. Na Figura 8 (c-d-g-h-k-l), são apresentadas as seções transversais com as velocidades medidas pontualmente (nas células de medidas da ADCP) em função das travessias.



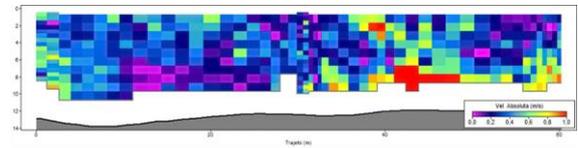
(a)



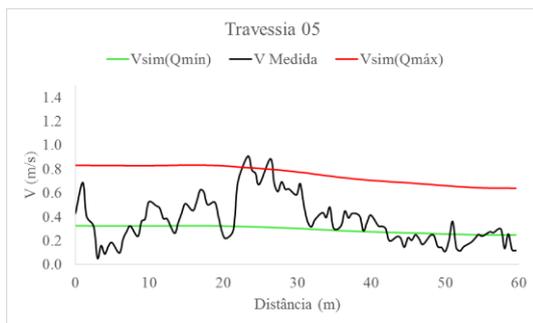
(b)



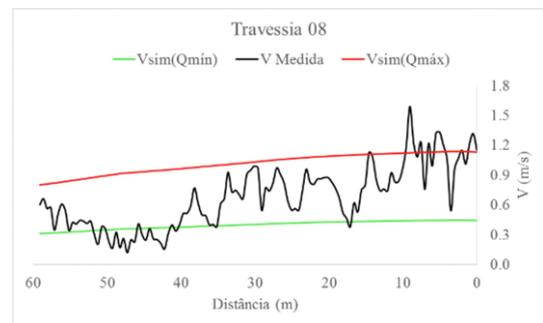
(c)



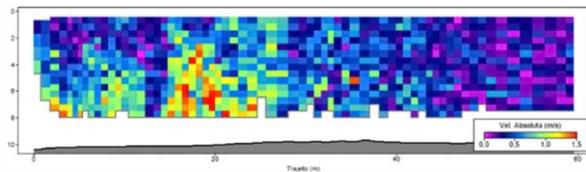
(d)



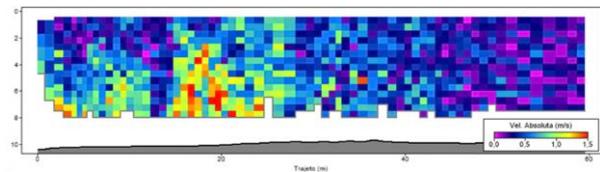
(e)



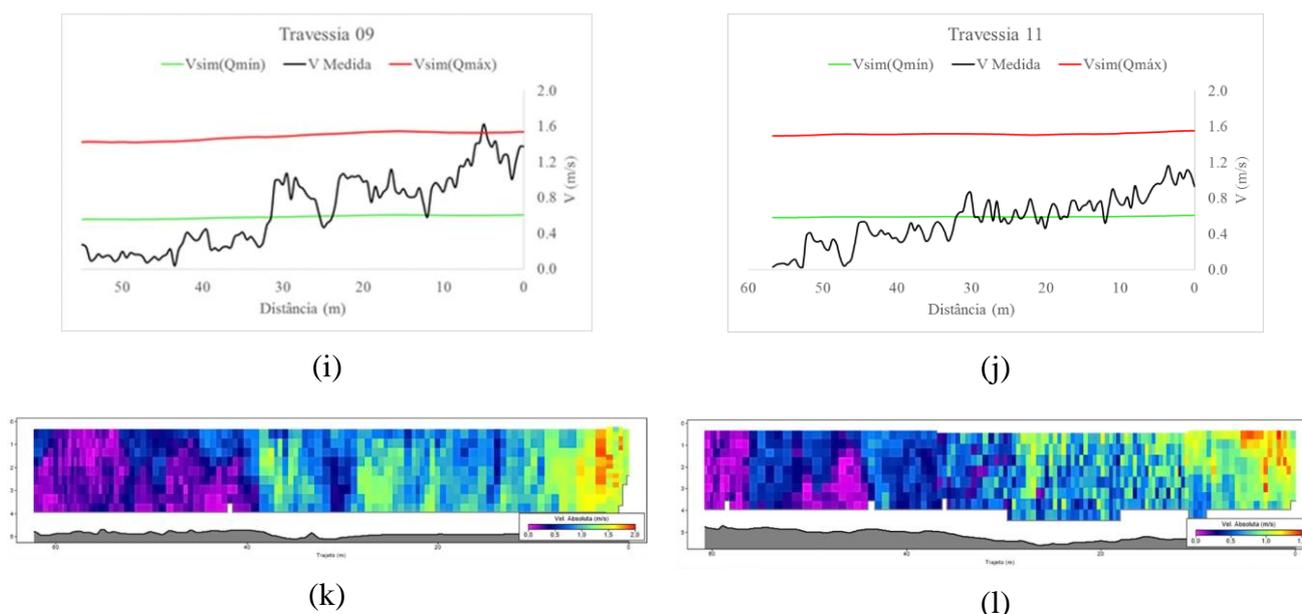
(f)



(g)



(h)



**Figura 8. Velocidades médias medidas na vertical das travessias e simuladas para  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$  e velocidades medidas nas transversais das travessias**

Para validação do modelo, percebe-se que as velocidades medidas confirmam as maiores velocidades simuladas no lado direito do canal de saída (Figura 8), já que no lado esquerdo, uma das unidades geradoras estava em manutenção no dia das medidas. As velocidades medidas também confirmam as maiores velocidades simuladas no final da bacia de dissipação, devido ao estrangulamento do escoamento, pois, como visto no modelo de elevação de terreno, a bacia de dissipação possui o formato de uma rampa com fim no final do canal de saída das turbinas da UHE Ibitinga. Também se observa alta flutuabilidade nas medidas de velocidade, o que o modelo não conseguiu reproduzir, pois o mesmo deve ter como condição de contorno um escoamento não muito distante do fluvial (laminar). Todavia, no início do domínio de simulação, o que se tem é um escoamento com características de torrencial (turbulento), consequência do escoamento pós-turbinas. Contudo, essa condição de contorno desfavorável ao modelo, não o impediu de simular as velocidades médias máximas na vertical com razoável concordância em relação às medidas (Figura 8 a-e-f-i).

### 3.4 Profundidades medidas e simuladas

Na Figura 9, são mostrados os campos de profundidade simulados para  $Q_{min}$  e  $Q_{max}$  e mais as travessias medidas pela ADP-M9 para medidas de profundidade.

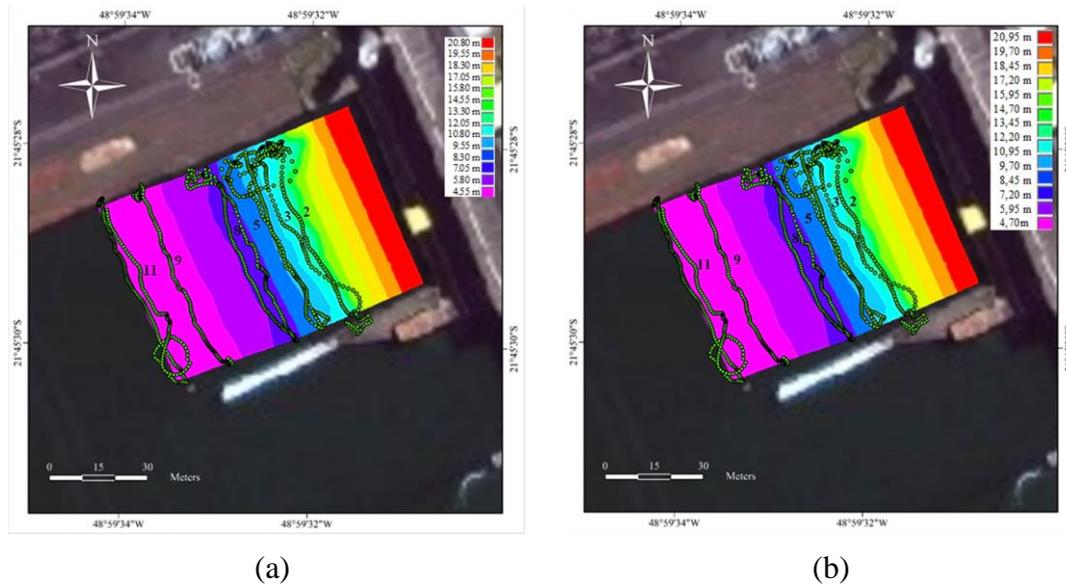


Figura 9. Isosuperfícies de profundidade e travessias  $Q_{\min}$  (a) e  $Q_{\max}$  (b)



Figura 10. Profundidades medidas e simuladas para  $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$

Analisando-se a Figura 10 (a-b), travessias 02 e 03, observam-se diferenças importantes entre as profundidades medidas e as simuladas. Uma explicação plausível para essas diferenças foram as estimativas feitas para a batimetria do terreno pela equipe da UFPA (Figura 2), visando aumentar o domínio computacional e melhorar a convergência do modelo. Para as outras travessias, apresentadas nas Figuras 10 (c-d-e-f), as profundidades simuladas aproximam-se bastante das profundidades medidas. Assim, pode-se completar a análise do potencial hidrocinético do canal de saída da UHE Ibitinga para as duas condições de contorno exploradas. Nesse caso, tem-se que o melhor local para implantação de turbinas hidrocinéticas é ao lado direito do canal de saída com velocidades máximas médias na vertical de até, aproximadamente, 1,6 m/s e profundidades de, em média, até 5 m. Pode-se considerar que o final da bacia de dissipação, é o melhor local para a implantação de turbinas hidrocinéticas, devido ao estrangulamento do escoamento, aumentando as velocidades na área, resultando em potências e energias geradas maiores.

### 3.5 Velocidades medidas e simuladas (Bariri)

Na Figura 11 (a-b), são mostrados as Isosuperfícies de velocidades simulados para  $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$ .

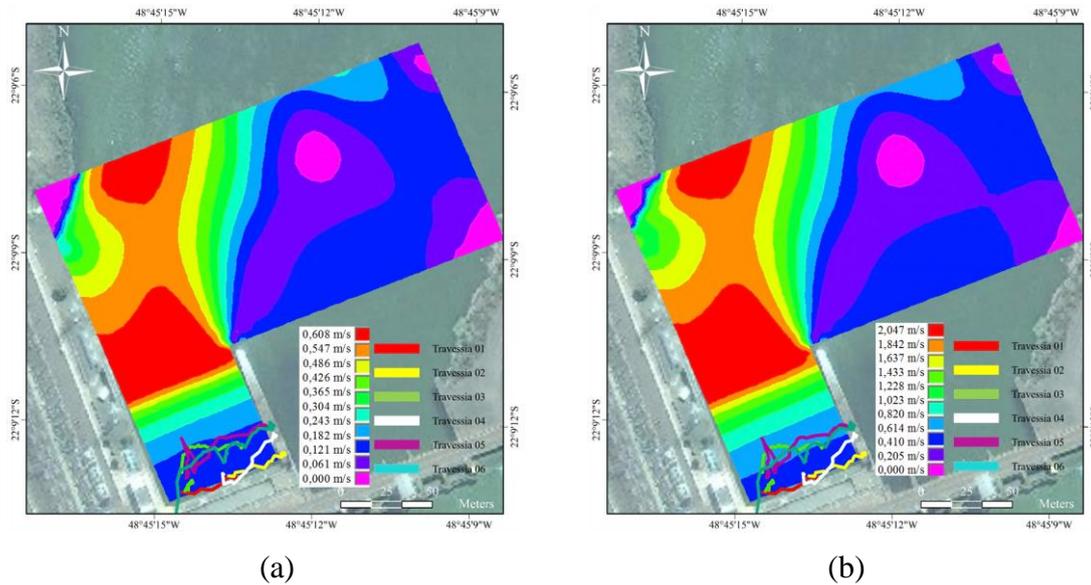
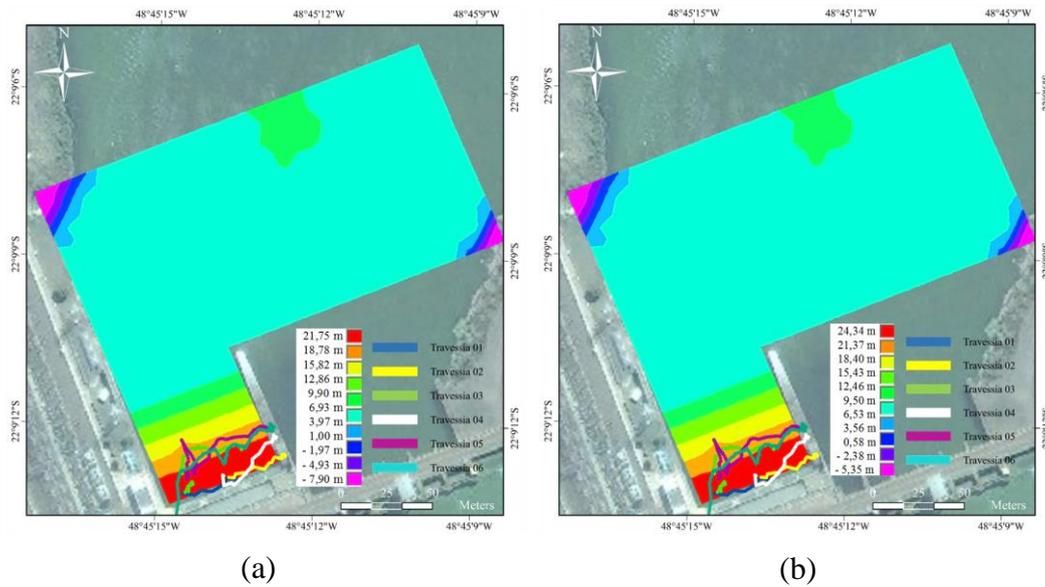


Figura 11. Isosuperfícies de velocidade para  $Q_{\min}$  (a) e  $Q_{\max}$  (b); e travessias

Na Figura 11 (a-b), são mostrados os campos de velocidade simulados para  $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$ . Nesse caso, as velocidades ao final da bacia de dissipação são interessantes, sendo maiores devido ao estrangulamento do escoamento ao final da rampa. Após a rampa, o escoamento desacelera-se, voltando a se acelerar ao norte domínio de cálculo, com velocidades da magnitude do final da bacia de dissipação. Portanto, destacam-se essas duas regiões em Bariri para possível instalação de turbinas hidrocinéticas, as quais além de boas velocidades, possuem boas profundidades (Figura 12).

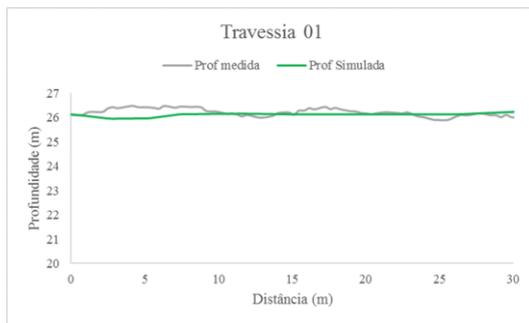
### 3.6 Profundidades medidas e simuladas

Na Figura 12 (a-b), são mostradas as Isosuperfícies de profundidades simuladas para  $Q_{\min}$  e  $Q_{\max}$ .

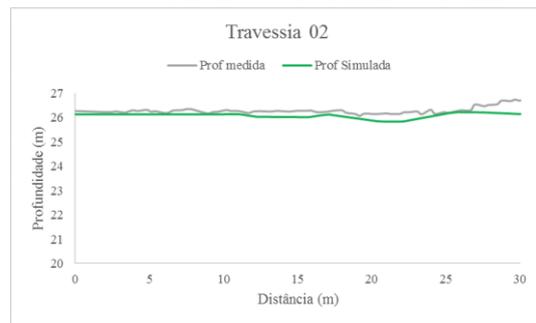


**Figura 12. Isosuperfícies de profundidade para  $Q_{\min}$  (a) e  $Q_{\max}$  (c); e travessias**

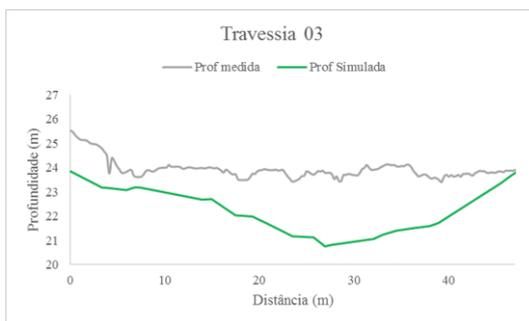
Na validação, foram realizadas campanhas de campo com algumas travessias ao longo do reservatório a jusante da UHE, para aferição da profundidade, por meio de um ADP-M9. As profundidades medidas foram comparadas às profundidades simuladas pelo modelo de Saint-Venant.



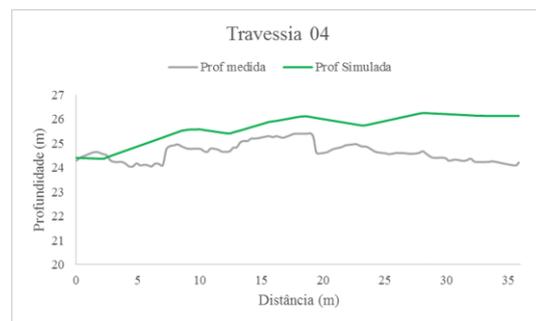
(a)



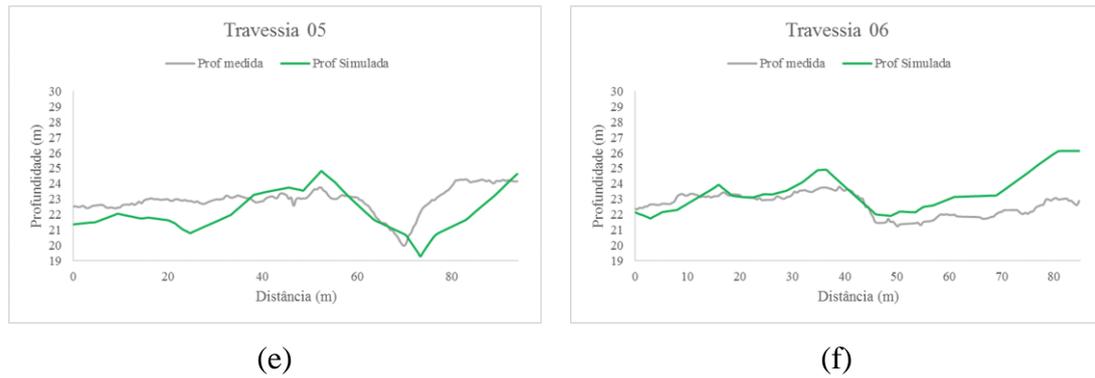
(b)



(c)



(d)



**Figura 13. Profundidades medidas e simuladas**

Analisando-se a Figura 13 (a-b-d-e-f), observa-se boa concordância entre as profundidades simuladas e medidas. Isso demonstra que o modelo simulado representou bem o terreno. Enquanto que na travessia 03, as profundidades simuladas são diferentes das medidas, isso se deve ao fato da batimetria realizada não seguir o padrão de uma rampa. E pode ser devido a erros de medição.

## 4 CONCLUSÃO

O presente estudo demonstrou que tanto a UHE de Ibitinga e Bariri existem um potencial energético a ser explorado. As simulações foram realizadas nas Vazões mínimas e máximas, com intuito de se conhecer o perfil de velocidades no período de estiagem e na cheia. O modelo foi calibrado e validado, variando-se o coeficiente de Manning, obtendo-se uma boa concordância entre os valores de vazões medidas e simuladas. Os resultados mostraram que as possíveis áreas favoráveis para instalação de turbinas hidrocínética, são onde se encontram as maiores velocidades. Tanto em Ibitinga quanto em Bariri, as velocidades ao final da bacia de dissipação são mais interessantes, sendo maiores devido ao estrangulamento do escoamento ao final da rampa, resultando em potências e energias geradas maiores. Em Bariri, ainda se tem outra região mais ao norte do domínio de cálculo.

## Responsabilidade autoral

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

## Agradecimentos

Agradece-se ao CNPq pelo financiamento de uma bolsa de doutorado, processo nº 155003/2010-0; e a empresa AES Tietê pela parceria no projeto de P&D&I – HydroK, juntamente com a UnB e a UFPA.

## REFERÊNCIAS

Barros, M.L.C., Sena, M.J.S., Mesquita, A.L.A., Blanco, C.J.C., Secretan, Y.(2011). *A water flow pattern analysis of Guajará Bay: Amazon Estuary – Brazil*, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering , Vol. 33, pp. 79-85.

Blanco, C. J. C., Sena, M. J. S., Mesquita, A. L. A., Furtado Filho, M. D. C., Secretan, Y.(2013). *Hydrodynamic evaluation of a flood embankment in the Amazon estuary region-Brazil* Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil Engineering, Vol. 166, 49–55.

Gre-ehn, *Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-hidráulica Numérica*, Disponível em: <http://www.gre-ehn.ete.inrs.ca/H2D2>. Acesso em: 17 mar. 2016.

Guney, M.S., Kaygusuz, K. (2010). *Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 14, 2996–3004.

Khan, M.J., Bhuyan, G., Iqbal, M.T., Quaiocoe, 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.

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 22<sup>nd</sup> Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, Brazil.

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

Secretan, Y., Roy, Y. *et al. Modeleur: User's Guide 1.0a07*. 2000 - INRS-Eau, Québec.