



Programa de Pós-Graduação em Engenharia  
de Recursos Naturais da Amazônia

## **AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO À JUSANTE DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

Patrícia da Silva Holanda

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Naturais da Amazônia, ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais.

Orientadores: Claudio José Cavalcante Blanco  
André Luiz Amarante Mesquita  
Yves Secretan

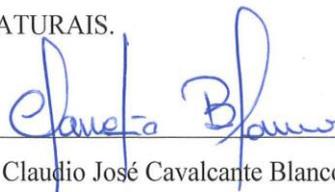
Belém  
Dezembro de 2017

## AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROcinÉTICO À JUSANTE DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS

Patrícia da Silva Holanda

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS DA AMAZÔNIA (PRODERNA/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE RECURSOS NATURAIS.

Aprovada por:



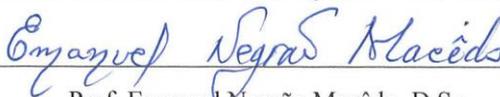
Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, Ph.D.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA - Orientador)



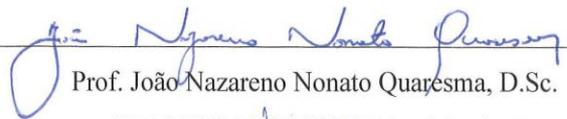
Prof. André Luiz Amarante Mesquita, Dr.Ing.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Coorientador)



Yves Secretan, Ph.D.  
(INRS-ETE/Universidade de Québec - Coorientador)



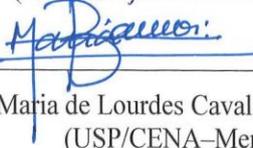
Prof. Emanuel Negrão Macêdo, D.Sc.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Membro)



Prof. João Nazareno Nonato Quaresma, D.Sc.  
(PRODERNA/ITEC/UFPA – Membro)



Prof. Jerson Rogério Pinheiro Vaz, D.Sc.  
(PPGEM/ITEC/UFPA–Membro)



Profa. Maria de Lourdes Cavalcanti Barros, D.Sc.  
(USP/CENA–Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

DEZEMBRO DE 2017

Dados Internacionais de Catalogação - na – Publicação (CIP) Sistema de  
Bibliotecas da UFPA

---

Holanda, Patrícia da Silva, 1981-

Avaliação de potencial hidrocínético à jusante de Centrais Hidrelétricas  
/ Patrícia da Silva Holanda.-2017.

Orientador: Cláudio José Cavalcante Blanco

Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto  
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos  
Naturais da Amazônia , Belém, 2017.

1. Usinas hidrelétricas – Brasil – estudo. 2. Turbinas hidráulicas –  
testes. 3. Energia elétrica – produção. I. Título.

CDD 23 ed. 621.3121340981

---

## **DEDICATÓRIA**

Ao meus pais Zenira Martins e Wellington Holanda, aos meus irmãos Narjara, Bianca e Marcus Vinícius, pelo amor, incentivo, fortalecendo a concluir mais uma etapa de minha vida, e meu eterno agradecimento.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, com sua infinita misericórdia, sempre alimentando minha fé, e me fazendo compreender que tudo acontece no tempo certo.

Aos meus pais, que apesar de toda dificuldade, sempre me incentivaram a buscar o conhecimento, que eu mesmo distante de vocês, mais sempre presente em seus corações, me apoiaram ao longo desta minha jornada. A vocês meus amados minha eterna gratidão e meu muito obrigada.

Aos meus queridos irmãos, obrigada pelo amor, carinho e dedicação, e por serem presentes de Deus na minha vida.

Aos meus tios Maria Zilda e Raimundo Eduardo, meu agradecimento, ao amor e as orações, concedidas a mim.

Ao meu namorado Danilo Oliveira, pelo companheirismo, paciência, amor e compreensão durante esta jornada, me fortalecendo cada dia mais.

Ao meu orientador Prof. Claudio José Cavalcante Blanco, por ter me orientado desde o mestrado até o doutorado, sempre com prontidão em me auxiliar. Obrigada ao conhecimento a mim transmitido durante esta trajetória, que foi de suma importância para a minha formação profissional.

Ao meu co-orientador Prof. André Luiz Amarante Mesquita pela ajuda, incentivo, por ser sempre muito solícito, na fase de amadurecimento desta pesquisa.

Ao Prof. Antônio Cezar Brasil, por ter contribuindo com o seu domínio sobre o tema em questão.

Aos Prof. Emanuel Negrão e João Nazareno, amizade, os conhecimentos a mim repassados foram muitos valiosos.

Ao Prof. Nélio Figueiredo, por ter fornecido as informações de fundamental relevância para a pesquisa.

Ao Prof. Alan Cavalcanti da Cunha pelo auxílio nas medidas de campo feitas com ADCP.

Ao Prof. Yves Secretan por ter me orientado em meu estágio de doutorado no Canadá.

Às empresas ELETRONORTE e AES Tietê que disponibilizaram recursos para esta pesquisa.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo tanto no Brasil quanto no Programa Ciências sem Fronteiras, permitindo assim a viabilização do referido trabalho.

À CAPES por meio do Projeto Pró-Amazônia nº 047/2012.

Aos amigos que tive a oportunidade de trabalhar no INRS-ETE, Pascale Dubé, Pascal Matte, Mario Juan e Macarena, pelo convívio profissional, sendo de suma importância para aquisição de conhecimento.

Aos amigos, Alícia Hamassaki, João Moreira, Matty Fifer, Nathalie, Mathilda Baekelmans, Mikael Diadhiou, Sergio Alves, Marcílio Jardim, Lisette Jacques e Thaynan Decicino, que ao longo da minha permanência em Québec me auxiliaram na minha adaptação, o carinho de vocês foi essencial.

Ao meu amigo Igor Gomide, um ser de um coração muito generoso, sempre pronto pra me ajudar, com quem eu vivenciei minhas alegrias e tristezas, e todas as vezes tinha uma palavra amiga e confortante. A sua contribuição foi valorosa, para realização deste trabalho.

À amiga Ana Júlia, uma pessoa de uma sensibilidade e um coração enorme, que não mediu esforços para me ajudar. Serei sempre grata a você.

Ao Bolsista de Iniciação Científica Cleidson Alves, uma pessoa muito gentil, com que eu tive um enorme prazer em trabalhar e compartilhar a jornada diária, meu profundo agradecimento.

Resumo da Tese apresentada ao PRODERNA/UFGA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia de Recursos Naturais (D.Eng.)

## **AVALIAÇÃO DE POTENCIAL HIDROCINÉTICO À JUSANTE DE CENTRAIS HIDRELÉTRICAS**

**Patrícia da Silva Holanda**

Dezembro/2017

Orientadores: Claudio José Cavalcante Blanco

André Luiz Amarante Mesquita

Yves Secretan

**Área de Concentração: Uso e Transformação de Recursos Naturais**

É possível maximizar o rendimento de empreendimentos hidrelétricos, aproveitando a energia remanescente a jusante de barragens a partir da instalação de turbinas hidrocinéticas. Nesse contexto, são apresentados dois estudos de casos de usinas hidrelétricas, um de grande porte Tucuruí, construída no rio Tocantins, na Amazônia, e outro de médio porte Bariri no rio Tietê, no Sudeste do Brasil. Nos projetos de centrais hidrocinéticas, é fundamental o dimensionamento do diâmetro do rotor e da velocidade da água, os quais dependem, respectivamente, das profundidades e velocidades dos rios. Assim, o modelo de Saint-Venant foi aplicado as regiões de estudos. A calibração do modelo foi realizada através de uma regressão linear entre as vazões medidas e simuladas para ambos, resultando em uma correlação de 0,99. A validação foi realizada para um ponto do rio Tocantins com velocidades medidas via ADCP. As velocidades medidas são comparáveis às velocidades simuladas pelo modelo. Assim, foi gerada uma curva de potência entre as vazões medidas e as velocidades simuladas para o ponto que teve suas velocidades validadas, obtendo-se uma correlação de 0,96. Essa mesma curva foi utilizada para estimativas de velocidade, calculando-se a densidade energética e definindo-se a velocidade de projeto para UHEs Tucuruí igual a 2,35 m/s e Bariri 2,25 m/s. Com a velocidade de projeto definida, foram selecionados 10 pontos UHE Tucuruí

1 ponto UHE Bariri para a implantação das turbinas hidrocínéticas. As velocidades desses pontos foram determinadas com o mesmo método usado para a validação das velocidades. Os pontos foram selecionados com base no canal do reservatório de jusante Tucuruí e no final da bacia de dissipação Bariri, o qual possui as maiores profundidades e velocidades sendo convenientes para uma maior geração de energia. Considerando a profundidade do rio e a tecnologia disponível para a sua fabricação, definiu-se para o estudo de grande porte o diâmetro do rotor em 10 m e para o de médio porte 2,1 m. Com a velocidade de projeto definida, o projeto do rotor foi realizado pela metodologia BEM (Blade Element Momentum), permitindo a definição de uma curva de potência instalada da turbina em função da velocidade do rio. Em termos de energia gerada as 10 turbinas podem gerar 2,04 GWh/ano. Esses números demonstram o real potencial do aproveitamento da energia remanescente de usinas hidrelétricas.

Palavras-chave: Potencial Remanescente das Usinas Hidrelétricas, Turbinas Hidrocínéticas, Modelagem Hidrodinâmica, UHEs Tucuruí e Bariri.

Abstract of Thesis presented to PRODERNA/UFGA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Natural Resources Engineering (D.Eng.)

## **ASSESSMENT OF HYDROKINETIC ENERGY RESOURCES DOWNSTREAM OF HYDROPOWER PLANTS**

**Patrícia da Silva Holanda**

December/2017

Advisors: Claudio José Cavalcante Blanco

André Luiz Amarante Mesquita

Yves Secretan

Research Area: Use and Transformation of Natural Resources

The maximization of the performance of hydropower projects by taking advantage of the remaining energy downstream of dams via the installation of hydrokinetic turbines is feasible. In this context, two case studies of the hydroelectric power plants are presented, one of large Tucuruí in the Tocantins river, Amazonia, and another of medium size Bariri in the Tietê river, in the Southeast of Brazil. In central hydrokinetic projects, the design of the rotor diameter and velocity of the water are fundamental and depend on the depth and velocity of the river, respectively. Thus, the Saint-Venant model has been applied to these areas of studies. The calibration of the model was performed by linear regression of the measured and simulated flow rates for both, resulting in a correlation of 0.99. Validation was performed for a point on the Tocantins river using velocities measured with an acoustic Doppler current profiler (ADCP). The measured velocities are comparable to the velocities simulated by the model. Thus, a power curve was generated for the measured flow rates and the simulated velocities for the point at which the velocities were validated, thus obtaining a correlation of 0.96. This same curve was used for estimates of velocity, calculation of the energy density, and defining a design velocity for Tucuruí HPP equal to 2.35 m/s and Bariri 2.25 m/s. After the design velocity was defined, 10 points were selected in Tucuruí and 1 point in Bariri for the location of hydrokinetic turbines. The velocities of these points were determined with the same method used for the validation of the velocities. The points were selected based on the channel downstream of the

reservoir and at the end of the Bariri dissipation basin, with the largest depth and velocity, which are characteristics favorable for greater power generation. Considering the rivers depth and available manufacturing technology, the rotor diameter was defined for the large study in 10 m and for the medium 2.1 m. After the design velocity was defined, the rotor design was implemented using the blade element method (BEM Blade Element Momentum), allowing for the definition of an installed power curve of the turbine as a function of the river velocity. In terms of generated energy, the 10 turbines can generate 2.04 GWh/year. These numbers demonstrate the potential for utilizing the remaining energy of hydroelectric plants.

Keywords: Remaining Potential of Hydropower Plants, Hydrokinetic Turbines, Hydrodynamic Modelling, Tucuruí and Bariri Dam.

## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO.....	6
1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	6
1.3 OBJETIVOS.....	6
<b>1.3.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>6</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>6</b>
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	7
<b>CAPÍTULO 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>8</b>
2.1 A IMPORTÂNCIA DO USO DE MODELOS .....	8
2.2 MODELAGEM E MODELOS .....	8
2.3 MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT).....	9
<b>CAPÍTULO 3 METODOLOGIA .....</b>	<b>10</b>
3.1 DADOS DE BATIMETRIA, VELOCIDADE, VAZAO E NÍVEIS DE ÁGUA	11
3.2 MODELO DE RUGOSIDADE.....	13
3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO.....	14
3.4 MODELO HIDRODINÂMICO FLUVIAL.....	15
3.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS .....	18
3.6 CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E SIMULAÇÕES DO MODELO HIDRODINÂMICO .....	20
3.7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO.....	20
<b>CAPÍTULO 4 ÁREAS DE ESTUDO .....</b>	<b>22</b>
4.1 UHE TUCURUÍ.....	22
<b>4.1.1 Clima .....</b>	<b>23</b>
<b>4.1.2 Geologia e Geomorfologia .....</b>	<b>25</b>
<b>4.1.3 Solos.....</b>	<b>25</b>
4.2 UHE BARIRI .....	25
<b>4.2.1 Clima .....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.2 Geologia, Geomorfologia.....</b>	<b>27</b>
<b>4.2.3 Solos.....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>28</b>
5.1 ESTUDO DE CASO UHE TUCURUÍ .....	28
<b>5.1.1 Dados de Batimetria e Velocidade.....</b>	<b>28</b>

<b>5.1.2</b>	<b>Rugosidade de Fundo .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.3</b>	<b>Condições de Contorno .....</b>	<b>29</b>
<b>5.1.4</b>	<b>Calibração do Modelo .....</b>	<b>31</b>
<b>5.1.5</b>	<b>Modelo de Elevação do Terreno .....</b>	<b>32</b>
<b>5.1.6</b>	<b>Validação do modelo.....</b>	<b>33</b>
<b>5.1.7</b>	<b>Seleção dos Pontos de Instalação das Turbinas Hidrocinéticas .....</b>	<b>35</b>
<b>5.1.8</b>	<b>Determinação da Velocidade e Rotação de projeto, Diâmetro do rotor, Potência instalada, Energia Gerada e Parâmetros de Projeto .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2</b>	<b>ESTUDO DE CASO 2 – UHE BARIRI MÉDIO PORTE.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Dados de Batimetria e Velocidade.....</b>	<b>49</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Rugosidade de Fundo .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Condições de Contorno .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.4</b>	<b>Calibração do modelo .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.5</b>	<b>Modelo de Elevação do Terreno .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2.6</b>	<b>Seleção do Ponto de Instalação da Turbina Hidrocinética .....</b>	<b>52</b>
<b>5.2.7</b>	<b>Determinação da Velocidade e Rotação de Projeto, Diâmetro do Rotor, Potência Instalada, Energia Gerada e Parâmetros de Projeto.....</b>	<b>54</b>
	<b>CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES .....</b>	<b>60</b>
<b>6.1</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>60</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>67</b>

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Descrição da Matriz de Energia Elétrica Brasileira. ....	2
Figura 3.1 Esquema de aplicação da metodologia. ....	11
Figura 3.2 Equipamento ADCP (a) acoplada ao barco (b) visão geral do equipamento. ....	12
Figura 3.3 Régua CPRM. ....	12
Figura 3.4 Representações dos modelos de rugosidade do <i>Modeleur</i> . ....	13
Figura 3.5 Desenho esquemático da especificação das condições de contorno nas fronteiras fechadas e abertas dos domínios de simulação hidrodinâmica fluvial. ....	14
Figura 3.6 Sistema de Coordenadas para as equações que foram integradas na vertical. ....	16
Figura 3.7 Estrutura de uma partição utilizada pelo <i>Modeleur</i> . ....	18
Figura 3.8 Triangularização do H2D2. ....	19
Figura 4.1 Descrição da UHE Tucuruí. ....	22
Figura 4.2 Localização do reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	24
Figura 4.3 Localização Geográfica da UHE Bariri. ....	26
Figura 5.1 Dados de Batimetria UHE Tucuruí. ....	28
Figura 5.2 Campanha para medição de velocidade. ....	29
Figura 5.3 Condição nível Barragem. ....	30
Figura 5.4 Estação fluviométrica. ....	30
Figura 5.5 Malha de Elementos Finitos do Modelo Hidrodinâmico UHE Tucuruí. ....	31
Figura 5.6 Correlação entre as vazões medidas e simuladas pelo modelo UHE Tucuruí. ....	32
Figura 5.7 Modelo de Elevação do Terreno UHE Tucuruí. ....	33
Figura 5.8 Ponto de medidas de velocidade para validação do modelo de reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	34
Figura 5.9 Vazões medidas x velocidades simuladas para o ponto de validação do modelo. ....	35
Figura 5.10 Isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima, média e mínima; e pontos para instalação de centrais hidrocínéticas UHE Tucuruí. ....	36
Figura 5.11 Perfis de velocidade do canal em função das vazões analisadas e 10 pontos para instalação de turbinas hidrocínéticas UHE Tucuruí. ....	37
Figura 5.12 Séries históricas de Vazão –UHE Tucuruí -2008-2013. ....	38

Figura 5.13 a) Frequência de ocorrência da velocidade do rio. b) Densidade energética. .....	39
Figura 5.14 Curva característica da turbina, rotação de projeto e limites de cavitação.	40
Figura 5.15 a) Potência e b) rotação da turbina em função da velocidade do rio.....	41
Figura 5.16 Vazões medidas e velocidades nos pontos de 1-4 do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	42
Figura 5.17 Vazões medidas e velocidades nos pontos de 5-10 do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	43
Figura 5.18 Energia gerada pelas turbinas nos pontos 1 e 2 do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	44
Figura 5.19 Energia gerada pelas turbinas nos pontos 3 e 4 do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	45
Figura 5.20 Energia gerada pelas turbinas nos pontos 5 (e) e 6 (f) do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	46
Figura 5.21 Energia gerada pelas turbinas nos pontos 7 (g) e 8 (h) do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	47
Figura 5.22 Energia gerada pelas turbinas nos pontos 9 (i) e 10 (j) do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí. ....	48
Figura 5.23 Equipe da AES Tietê medindo profundidades com ADCP no Q-boat. ....	49
Figura 5.24 Dados de batimetria UHE Bariri. ....	49
Figura 5.25 Malha de Elementos Finitos do Modelo Hidrodinâmico Bariri.....	50
Figura 5.26 Correlação entre as vazões medidas e simuladas pelo modelo UHE Bariri. .....	51
Figura 5.27 Modelo de Elevação do Terreno UHE Bariri.....	52
Figura 5.28 Isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima, média e mínima; e o ponto para instalação da central hidrocínética UHE Bariri. ....	53
Figura 5.29 Séries históricas de Vazão –UHE Bariri-2011-2014. ....	55
Figura 5.30 Vazões medidas e velocidades simuladas no ponto selecionado para instalação da turbina no reservatório de jusante UHE Bariri. ....	55
Figura 5.31 a) Frequência de ocorrência da velocidade do rio. b) Densidade energética. .....	56
Figura 5.32 Coeficiente de potência em função da rotação da turbina.....	57
Figura 5.33 Rotação da turbina em função da velocidade do rio. ....	58

Figura 5.34 Potência da turbina em função da rotação da turbina e da velocidade do rio. .....	58
Figura 5.35 Vazão e geração mensal de energia para o ano de 2011. ....	59

## Lista de Tabelas

Tabela 5.1 Tabela de convergência entre o balanço de massa e as malhas. ....	31
Tabela 5.2 Dados medidos e simulados no trecho analisado do rio Tocantins. ....	34
Tabela 5.3 Informações dos 10 pontos definidos UHE Tucuruí. ....	38
Tabela 5.4 Dados do rotor da turbina .....	40
Tabela 5.5 Tabela de convergência entre o balanço de massa e as malhas. ....	51
Tabela 5.6 Informações de 1 ponto definido UHE Bariri.....	54
Tabela 5.7 Dados do rotor da turbina. ....	57
Tabela 5.8 Geração anual do sistema para os anos de 2011-2014. ....	59

## NOMENCLATURA

ADCP = Acoustic Doppler Current Profiler  
AHIMOR = Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental  
ANEEL = Agência Nacional de Energia Elétrica  
BEM = Blade Element Momentum  
CMB = Comissão Mundial de Barragens  
D = tensor de deformação, N/m<sup>2</sup>  
F= Força volume, N  
g = aceleração da gravidade, m/s<sup>2</sup>  
H= profundidade da coluna d'água, m  
h= nível da água, m  
L= comprimento de mistura, m  
MET = Modelo de Elevação do Terreno  
MNT = Modelo Numérico do Terreno  
MEF = Modelo de Elementos Finitos  
n= coeficiente de manning, adimensional  
N. A = Nível d' água, m  
P = profundidade, m  
q= vazão específica, m<sup>2</sup>/s  
 $|\vec{q}|$  = módulo da vazão específica, m<sup>2</sup>/s  
SEPOF = Secretaria de Estado e Planejamento Orçamentos e Finanças  
SIN = Sistema Interligado Nacional  
TIN = Triangular Irregular Network  
T6L= triângulo com seis nós  
t= tempo , s  
UHE = Usina Hidrelétrica de Energia  
UTM = Universal Transverse Mercator  
U= velocidade relativa na direção x, m/s  
V= velocidade relativa na direção y, m/s  
x = Sistema de Coordenada Cartesiana na direção x  
y = Sistema de Coordenada Cartesiana na direção y  
z = Sistema de Coordenada Cartesiana na direção z  
zf = cota de fundo

### **Símbolos gregos**

$\partial$  = derivada parcial relativa

$\varepsilon$  = resíduos da regressão

$\rho$  = densidade da água, kg/m<sup>3</sup>

$\tau$  = tensor de Reynolds, N/m<sup>2</sup>

$\nu$  = viscosidade

### **Subscritos**

$c_x$  = força de Coriolis em x

$c_y$  = força de Coriolis em y

$i$  = relativo ao plano  $\tau$  e ao plano D, e relativo a direção da derivada parcial

$j$  = relativo ao plano  $\tau$  e ao plano D, e relativo a direção da derivada parcial

$m$  = mistura relativa

$t$  = turbulento relativa

$x$  = direção relativa em y

$y$  = direção relativa em x

$w_x$  = força relativa ao vento em x

$w_y$  = força relativa ao vento em y

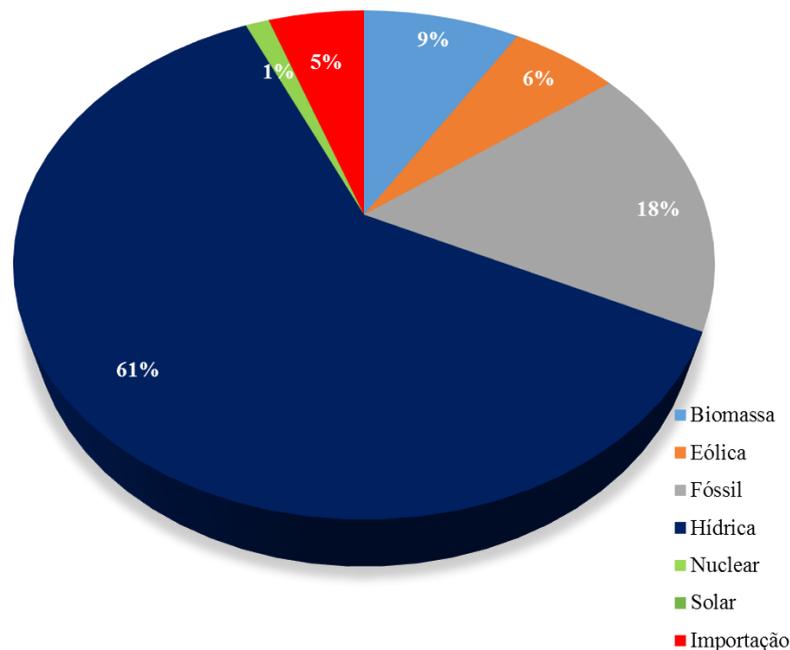
## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUÇÃO**

Na Amazônia brasileira, hidrelétricas, como a de Tucuruí no estado do Pará, foram implantadas na década de 1980, por exemplo, Balbina no estado do Amazonas e Samuel no estado de Rondônia. Na região Sudeste, no estado de São Paulo, no rio Tietê foram implantadas as hidrelétricas de Bariri, Ibitinga e Barra Bonita. Essas hidrelétricas têm, como principal passivo ambiental, a formação de lagos para regularizar as vazões turbinadas. Nesse contexto, pode-se maximizar o rendimento hidrelétrico dessas centrais, aproveitando a energia remanescente das correntes pós-passagem pelas barragens; e também de novos projetos mais amigáveis do ponto de vista ambiental, por serem a fio d'água, tais como: Santo Antônio e Jirau no estado de Rondônia, no rio Madeira; Belo Monte no estado do Pará; e Santo Antônio do Jari no estado do Amapá. Assim, a principal motivação desse trabalho, é a geração de energia hidrocínética nos reservatórios de jusante de usinas hidrelétricas, aproveitando a correnteza remanescente pós-passagem pelas turbinas e vertedouro.

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; GUNNEY e KAYGUSUZ, 2010; KUMAR e SAKAR, 2016). No caso de rios, potenciais hidrocínéticos vêm sendo analisados a jusante de centrais hidrelétricas (LIU e PACKEY, 2014; 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.

Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a maior participação na matriz elétrica brasileira em termo de capacidade instalada de geração elétrica é a hídrica com 61%, os outros 39% estão divididos em biomassa, eólica, fóssil, nuclear, solar e importada, como mostra a Figura 1.1.



**Figura 1.1** Descrição da Matriz de Energia Elétrica Brasileira.  
 Fonte: Adaptado de ANEEL (2016).

No Brasil, os recursos hídricos têm importância decisiva no plano econômico. Ao longo dos últimos anos observou-se um crescimento acentuado, no que diz respeito à capacidade de geração de energia, no entanto vale ressaltar que nos dias atuais ocorre uma preocupação maior de como utilizar estes recursos naturais sem impactar de forma demasiada o meio ambiente, ou seja, aproveitar a energia já existente de forma mais sustentável. O país é dotado de uma vasta e densa rede hidrográfica, a qual possui barramentos para a produção hidrelétrica, os quais podem ser estudados para os fins do presente trabalho por meio do conhecimento das velocidades e profundidades. Desde que quanto maiores as velocidades e profundidades, maiores são as potências das turbinas hidrocínéticas a serem implantadas; e em consequência, maior será a geração de energia.

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. A seguir serão apresentados alguns trabalhos disponíveis na literatura que incluem a modelagem hidrodinâmica para estimar potencial hidrocínético em corpos de água.

BLUNDEN e BAHAJ (2006) utilizaram um modelo numérico de elementos finitos 2DH para estimar o recurso energético de correntes de marés disponível na pequena península de Portland Bill Dorset, localizado na costa sul do Reino Unido, sendo este um local que tem potencial a ser explorado, possuindo altas velocidades. O modelo foi validado, utilizando elevações e correntes de marés. A capacidade do modelo em reproduzir características da corrente de maré se mostrou razoável. Os resultados foram usados para produzir uma série temporal de velocidade de corrente ao longo do período de simulação, podendo ser utilizada em trabalhos futuros para otimizar a localização de turbinas no local.

CARBALLO *et al.* (2009) avaliaram um modelo numérico de fluxo de energia das marés na Ria de Muros. A Ría de Muros é um estuário, localizado na costa noroeste da Espanha com correntes de maré de picos superiores a 2 m/s. O objetivo do trabalho foi quantificar o recurso de corrente de maré, bem como avaliar a viabilidade de uma central maremotriz. Para tanto, o modelo Delft 3D-FLOW, desenvolvido pela Delft Hydraulics, foi utilizado para resolver as Equações de Navier-Stokes e de transporte, podendo ser utilizado como 3D ou 2DH, neste caso foi utilizado o modelo 2DH. O modelo foi validado por meio de velocidades medidas em um ponto, utilizando o equipamento ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler). Uma boa correlação entre as velocidades medidas e simuladas foi obtida, comprovando sua aplicabilidade em estimar o potencial energético da área de estudo, considerando as variações de amplitude das marés.

DUVOY e TONIOLO (2012) desenvolveram o CCHE2D, que é um modelo do tipo 2DH para auxiliar a estimar a energia hidrocínética em rios, o qual foi desenvolvido pelo National Center for Computational Hydroscience and Engineering, University of Mississippi. O modelo tem como saída velocidades, que são utilizadas pelo Hydrokal (calculadora hidrocínética) para calcular a densidade de potência hidrocínética em um rio, contabilizando a eficiência da turbina. O fator de eficiência auxilia os usuários a determinar o quanto se pode extrair de energia a partir de uma central hidrocínética. O modelo foi aplicado ao rio Tanana próximo à Nenana, Alaska, EUA.

IGLESIAS *et al.* (2012) estudaram 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 e identifica áreas com maior potencial para instalação de turbinas, usando o TSE. As profundidades e velocidades foram determinados com o Delft 3D-FLOW, o qual foi validado usando medidas de velocidade tomadas em campo.

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 hidrocínéticas e o planejamento de estudo dos impactos ambientais.

FILIZOLA *et al.* (2015) realizaram um estudo do potencial hidrocínético da bacia do rio Amazonas, utilizando dados de velocidade com intervalos de tempo limitado. Foram desenvolvidos oito estudos de casos dos 54 locais observados, indicando que Brasil, Peru e Equador possuem condições variáveis, mas com potencial favorável para a utilização de energia hidrocínética em rios.

PUNYS *et al.* (2015) avaliaram o potencial hidrocínético na Lituânia no rio Neris, um dos maiores rios daquele país, com uma vazão média anual de 179 m<sup>3</sup>/s. Os autores utilizaram o modelo 1DHEC-RAS, para a simulação da vazão do rio. O modelo foi validado a partir de uma série histórica de dados de vazão, velocidade e área transversal, em três estações de calibração.

RAMIREZ *et al.* (2016) realizaram um estudo sobre o uso potencial de turbinas hidrocínéticas nos canais de vazão de grandes usinas hidrelétricas na Colômbia. Eles também utilizaram o modelo 1DHEC-RAS e a vazão horária para obtenção de séries temporais da velocidade e profundidade da água em seções transversais dos canais. As vazões mais enérgicas variaram entre 100 e 150 m<sup>3</sup>/s. Analisando os valores apresentados, eles concluíram que o uso de turbinas hidrocínéticas nos canais de vazão de grandes usinas hidrelétricas nos estudos de caso não é recomendável em função da viabilidade financeira. No entanto esta análise foi realizada utilizando apenas uma turbina de 5 kW e duas de 10kW.

RIGLIN *et al.* (2016) utilizaram como ferramenta computacional CFD (Computational Fluid Dynamics), nas simulações de uma matriz hidrocínética para determinar as características das aplicações em rios com restrições espaciais entre as turbinas. Concluíram que é mais vantajoso operar com unidades posicionadas lado a lado para otimizar a produção de energia.

Na literatura são descritos trabalhos que analisaram o avanço tecnológico no que diz no que diz respeito às turbinas hidrocínéticas, por exemplo:

SOUZA *et al.* (2006) realizaram um estudo experimental de um modelo reduzido de turbina hidrocínética. Essa turbina foi desenvolvida para geração de energia elétrica em comunidades isoladas, com baixo impacto ambiental. Os resultados experimentais demonstraram as características do modelo reduzido da turbina, que foi testada para diversos valores de velocidade média do escoamento. O efeito de melhora na conversão de energia com o uso de difusores de saída foi testado em diferentes condições de operação da máquina. Os testes em escala reduzida permitiram a otimização de operação da máquina.

LAGO *et al.* (2010) estudaram os recentes avanços e tendências no desenvolvimento de turbinas hidrocínéticas. 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.

MILLER *et al.* (2011) realizaram uma avaliação do ciclo de vida, para comparar os impactos ambientais das turbinas hidrocínéticas com as de outros sistemas de geração de energia e concluíram que são semelhantes aos pequenos sistemas hidrelétricos.

AKIMOTO *et al.* (2013) propuseram uma nova configuração de uma turbina hidrocínética de eixo vertical, para reduzir o custo da estrutura flutuante. Essa configuração da turbina de eixo inclinado resulta em um melhor equilíbrio de cargas hidrodinâmicas, dando mais fluabilidade e minimizando o peso da estrutura.

VAN ELS e BRASIL JUNIOR (2015) descreveram a evolução da tecnologia hidrocínética e as iniciativas empreendidas para disponibilizá-la para a eletrificação rural no Brasil a partir dos anos 80. As primeiras iniciativas foram desenvolvidas para implementar pequenas centrais hidrelétricas para atender comunidades remotas, inaugurando a primeira geração de turbinas hidrocínéticas. Atualmente, observa-se uma tendência para utilizar a tecnologia hidrocínética não só para a energia hidrelétrica de pequeno porte, mas também para grande porte, visando à conversão da energia cinética presente em rios e oceanos.

O presente trabalho propõe avaliar o potencial hidrocínético à jusante de centrais hidrelétricas, partindo da análise de dados de campos necessários, passando pela modelagem hidrodinâmica do reservatório de jusante, definindo possíveis áreas para a instalação de turbinas hidrocínéticas e culminando com a determinação da energia remanescente gerada.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Estudos vêm sendo realizados para o desenvolvimento tecnológico de turbinas, que proporcionem baixos impactos ambientais e que aproveitem a energia disponível em correntes aquáticas tais como: rios, oceanos, estuários, canais etc. As UHEs têm potenciais a serem explorados, pois remanescem correntezas em seus reservatórios de jusante, podendo ser aproveitadas de forma sustentável através de centrais hidrocínéticas.

Baseado nestas informações, a motivação para a elaboração do presente trabalho é maximizar o potencial de aproveitamento de um empreendimento hidrelétrico, que já impactou ambientalmente na fase de implantação e impacta na fase de operação. Nesse caso, o padrão dos escoamentos nos reservatórios de jusante é estabelecido através de modelagem hidrodinâmica para o conhecimento das velocidades e profundidades, que determinam o tamanho e a potência das turbinas hidrocínéticas a serem instaladas.

## 1.2 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

Estabelecimento de metodologia para avaliação do potencial hidrocínético à jusante de centrais hidrelétricas, partindo da análise de dados de campos necessários, passando pela determinação de velocidades e profundidades do reservatório de jusante por meio de modelagem hidrodinâmica, definindo possíveis áreas para a instalação de turbinas hidrocínéticas e culminando com a determinação da energia remanescente gerada.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo Geral

Estabelecer metodologia para avaliar o potencial hidrocínético à jusante de centrais hidrelétricas.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Calibrar o modelo hidrodinâmico aplicado aos corpos de água analisados a partir das vazões medidas e simuladas;
- Validar o modelo comparando as velocidades medidas em campo com as velocidades simuladas pelo modelo;

- Determinar parâmetros de projeto, tais como: velocidade, rotação, diâmetro do rotor, potência instalada, energia gerada das turbinas hidrocínéticas.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

No capítulo 1 buscou-se enfatizar as motivações, os objetivos e as contribuições do presente trabalho.

No capítulo 2 a fundamentação teórica da pesquisa é apresentada.

No capítulo 3 é descrita a metodologia desenvolvida no presente trabalho.

No capítulo 4 as áreas de aplicação da metodologia são apresentadas.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho e sugestões para pesquisas futuras.

No anexo 1 é apresentado o artigo publicado, fruto da tese:

“HOLANDA, P. S.; BLANCO, C. J. C.; MESQUITA, A. L. A.; BRASIL JUNIOR, A. C. P.; FIGUEIREDO, N. M.; MACEDO, E. N.; SECRETAN, Y. Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, v. 217, pp. 1203-1214, 2016”.

No anexo 2 é apresentado o capítulo de livro publicado, também fruto da tese:

Holanda, Patrícia da Silva; BLANCO, Claudio José Cavalcante; Mesquita, André Luiz Amarante; Alves, Cleidson da Silva; Junior, Antonio Cesar Pinho Brasil; Bittencourt, Marcio de Pinho; Nunes, Maurício André; Secretan, Yves; Celani, Gabriela; Kanoun, Olfa . Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants in the Tietê River Basin, São Paulo State, Brazil. In: Gabriela Celani, Olfa Kanoun. (Org.). *Frontiers of Science and Technology*. 1ed. Berlin/Boston: De Gruyter, 2017, v. 1, p. 61-81.

No anexo 3 é apresentada a planilha de cálculo com os dados de vazão, nível d'água para UHE Tucuruí.

No anexo 4 é apresentada a planilha de cálculo com os dados de vazão, nível d'água para UHE Bariri.

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Neste capítulo são apresentadas a importância da utilização de modelos, a definição de modelos e modelagem, a descrição do modelo numérico de terreno.

#### **2.1 A IMPORTÂNCIA DO USO DE MODELOS**

A necessidade da aplicação de modelos para estudos, projetos e auxílios à gestão de recursos hídricos é importante, especialmente em bacias hidrográficas e seus rios, nos quais incidem conflitos pelos usos múltiplos da água. Modelos são ferramentas integradoras, sem as quais dificilmente consegue-se uma visão dinâmica e global dos fenômenos inerentes aos sistemas hídricos (ROSMAN *et al.*, 2001). Eles também permitem integrar informações espacialmente dispersas, além de interpolar informações para regiões, nas quais, não há medições, ajudando a interpretar medidas pontuais, propiciando o entendimento da dinâmica de processos e simulando cenários futuros.

Os modelos estão sendo cada vez mais utilizados em estudos ambientais, pois ajudam a entender o impacto das ações antrópicas e a prever alterações futuras nos corpos d'água. Ele pode ser considerado como uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que envolvem (RENNÓ e SOARES, 2000).

#### **2.2 MODELAGEM E MODELOS**

Outra definição importante é a de modelagem, que pode ser uma construção teórica, que procura descrever e explicar o funcionamento de um determinado sistema através da representação de um fenômeno ou conjunto de fenômenos do mundo, tomando como base certas hipóteses. O principal produto da modelagem é o modelo. Em virtude da grande versatilidade e aplicabilidade, os modelos computacionais são comuns nas mais diversas áreas. Eles fornecem previsões, a partir de um conjunto de informações de entrada, que permitem examinar as consequências de diversos cenários de um sistema existente ou de um sistema em projeto.

A modelagem de sistemas hídricos pode ser empregada no intuito de fornecer um importante subsídio técnico aos processos de tomadas de decisão referentes ao planejamento e à operação dos mesmos, além de proporcionar condições para elaboração de vários estudos sobre os processos naturais e antrópicos de uma região (MAGALHÃES,

2005). No caso do presente trabalho, destacam-se as modelagens numéricas do terreno, de rugosidade de fundo e hidrodinâmica, as quais estão inseridas na modelagem de sistemas hídricos.

### 2.3 MODELO NUMÉRICO DO TERRENO (MNT)

O modelo de elevação do terreno é uma representação matemática da variação da topografia que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre, da qual se conhece um conjunto finito de pontos com coordenadas (x, y e z). A partir desses pontos, as informações relativas à superfície, das quais tais pontos fazem parte, são interpoladas, buscando-se com isso a modelagem da altimetria da área de estudo. Os pontos amostrais fornecidos ao modelador são valores coletados a partir de uma superfície real, constituídos por triplas formadas por um par de coordenadas (x, y) (representativo da posição da amostragem na superfície), associada a uma variável z (cota do terreno), ou seja, variável que se quer modelar. Os pontos amostrais estão todos georreferenciados a um sistema de eixos cartesianos triortogonais (SIMÕES, 1993).

Para a representação de uma superfície real no computador, é indispensável à criação de um modelo de elevação do terreno. Este pode ser representado por equações analíticas ou uma rede de pontos, de modo a transmitir características espaciais do terreno. Assim, a topografia de uma área pode ser representada pelo modelo de elevação do terreno. Portanto, o modelo de elevação do terreno é um dado destinado a gerar uma superfície representativa da distribuição espacial de uma determinada característica real, ou seja, possibilitando sua análise, manipulação e avaliação espacial contínua (SIMÕES, 1993).

Os modelos de elevação do terreno são capazes de representar um conjunto de dados, gerando informações adicionais, seja por meio de consultas diretas, ou através de análises ou manipulações. Com isso, o modelo de elevação é utilizado para obter informações da superfície em estudo, sem se trabalhar diretamente com a superfície real. A criação de um modelo de elevação do terreno corresponde a uma nova maneira de enfocar o problema de elaboração e implantação de projetos. A partir do modelo de elevação de terreno, podem-se calcular volumes, áreas, desenhar perfis e seções transversais da área em estudo (FELGUEIRAS, 1987).

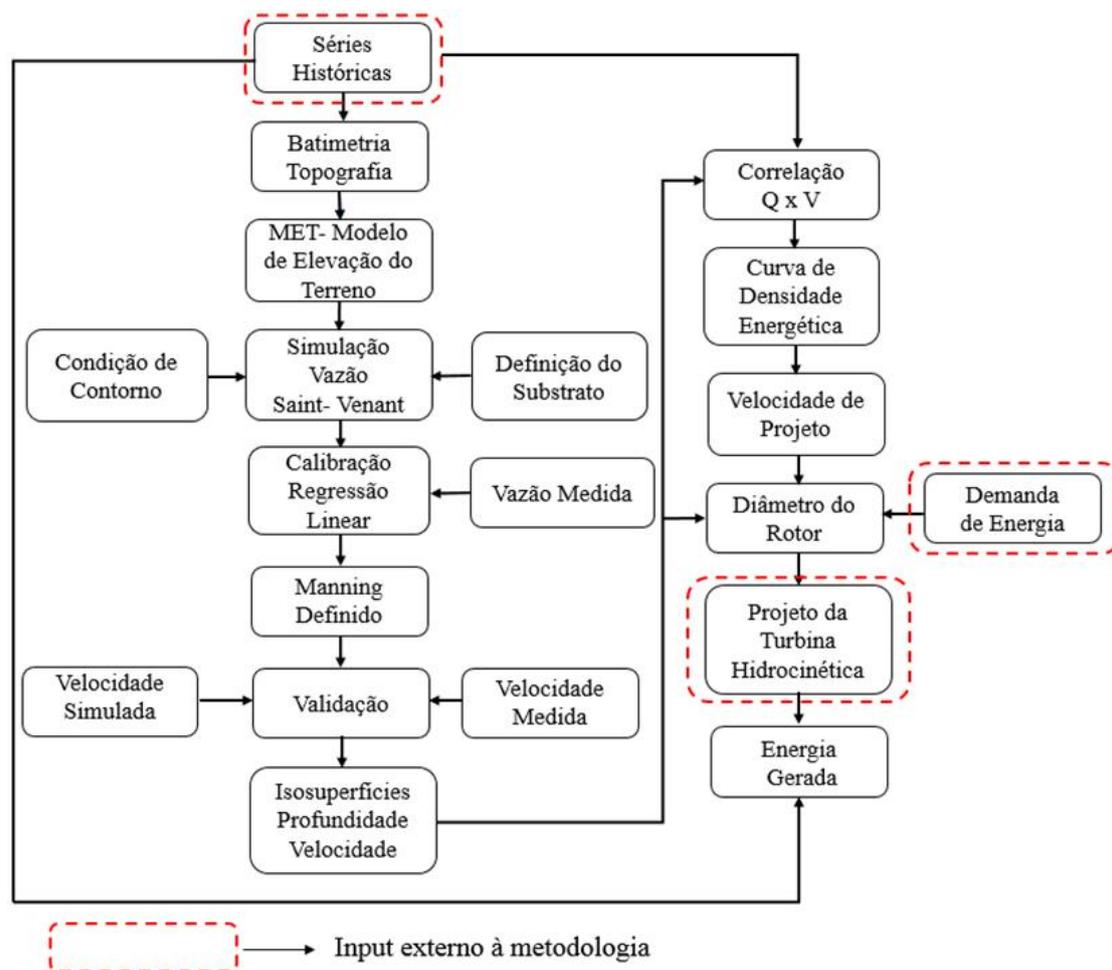
## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGIA**

Este capítulo descreve a metodologia desenvolvida e aplicada no presente trabalho através dos seguintes passos, conforme esquema apresentado na Figura 3.1:

1. Coleta de dados históricos de vazão existentes.
2. Aquisição de dados de batimetria e topografia para construção do modelo de elevação do terreno (MET); dados de velocidade para validação do modelo; e dados de vazão e níveis de água para definição das condições de contorno.
3. Análise do substrato de fundo do corpo hídrico para determinação do coeficiente de Manning;
4. A calibração do modelo (do tipo Saint-Venant ou águas rasas) é efetuada através de uma regressão linear entre as vazões medidas e simuladas. Neste caso, o coeficiente de Manning é variado para aproximar ao máximo os valores simulados dos medidos, maximizando o valor de  $R^2$  da regressão.
5. Na validação, velocidades medidas e simuladas são comparadas para análise de desempenho do modelo.
6. Com o modelo calibrado e validado, são simuladas isosuperfícies de velocidade e profundidade, considerando, por exemplo, vazões (mínimas médias e máximas), buscando a analisar a sazonalidade do escoamento; e identificar as regiões que mais favorecem a implantação de centrais hidrocinéticas.
7. Com as regiões definidas, determina-se a velocidade de projeto através da curva de densidade energética, que é determinada via curva de ocorrência de velocidades, as quais foram obtidas através de uma regressão de potência entre dados de vazão medidos e velocidades simuladas para cada região identificada com potencial para implantação de centrais hidrocinéticas.
8. Com a velocidade de projeto, as profundidades determinadas e a demanda energética, determina-se o diâmetro do rotor. Velocidade e diâmetro do rotor são dados necessários para determinação do coeficiente de potência e os limites de cavitação das máquinas.
9. Por fim, o rotor é dimensionado por metodologia específica (Silva *et al.*, 2017) e obtida a sua curva característica de potência em função da rotação da máquina.
10. Com os dados da curva de potência do gerador, da curva característica do rotor e dos dados de séries, energia anual gerada pela turbina é calculada.

Na Figura 3.1 é apresentado o esquema operacional da metodologia.



**Figura 3.1** Esquema de aplicação da metodologia.

### 3.1 DADOS DE BATIMETRIA, VELOCIDADE, VAZAO E NÍVEIS DE ÁGUA

As velocidades, vazões e também profundidades são, geralmente, medidas com uso de ADCP (KIM e YU, 2010; KIM e MUSTE, 2012; LEE *et al.*, 2014), que utiliza o efeito Doppler, varrendo grandes áreas das seções dos rios através da emissão de ondas acústicas pela vibração de materiais cerâmicos piezoelétricos. As ondas propagam-se da superfície para o fundo do rio e vão sendo refletidas pelo material em suspensão na água. Assim, a velocidade das partículas é medida por efeito Doppler, sendo a velocidade da água considerada igual à velocidade das partículas. Para o caso das medidas de profundidade, o ADCP (Figura 3.2) também conta com um ecobatímetro, possuindo uma faixa de medição de 0,06 a 80 m com uma acurácia de 1% e uma resolução de 0,001 m. Para as velocidades, o ADCP possui uma faixa de medida variando de  $\pm 20$  m/s, uma

acurácia de  $\pm 0,2$  cm/s e resolução de 0,001 m/s. Entretanto, os dados de batimetria também podem ser medidos apenas por ecobatímetros, que não necessariamente fazem parte de um ADCP.



(a)



(b)

**Figura 3.2** Equipamento ADCP (a) acoplada ao barco (b) visão geral do equipamento.

Os níveis de água são, geralmente, medidos por régua, linimétricas (Figura 3.3) instaladas nos rios.

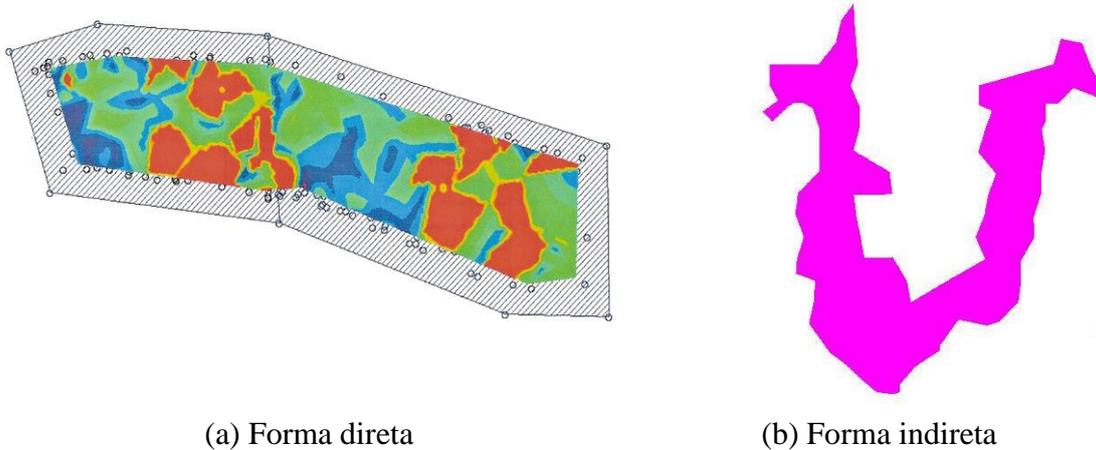


**Figura 3.3** Régua CPRM.

Os dados de batimetria e topografia estão georreferenciados (WGS84 22S e SAD69 22S) em coordenadas UTM e são projetados em imagens de satélite das regiões de estudo.

### 3.2 MODELO DE RUGOSIDADE

Para a determinação da rugosidade de fundo, é necessário ter conhecimento da granulometria dos materiais que formam o leito do corpo d'água. Tal granulometria serve como base para a elaboração do modelo de rugosidade, imprescindível na construção do modelo hidrodinâmico. Na presente modelagem, há duas possibilidades para a construção do modelo de rugosidade, que são as formas direta ou indireta. Na primeira (Figura 3.4(a)), o parâmetro de rugosidade é explicitamente definido através de um campo de distribuição de substrato. Na segunda (Figura 3.4(b)), são usadas faixas de granulometria como dados de entrada, no intuito de se calcular um diâmetro médio, que represente a rugosidade do fundo do corpo d'água, neste caso representado por uma só cor.



**Figura 3.4** Representações dos modelos de rugosidade do *Modeleur*.

Fonte: SECRETAN *et al.* (2001).

Na forma indireta, o coeficiente de atrito de Manning ( $n$ ) (SECRETAN *et al.*, 2000) é calculado através da Equação (3.1).

$$n = \frac{1}{\left\{ 34,9 \left[ -\log(d_{med}) \right]^{0,31} \right\} + 0,00017} \quad (3.1)$$

Em que  $d_{med}$  é o diâmetro médio das partículas componentes do substrato.

Outra opção é a determinação de um coeficiente de Manning médio determinado pela média dos coeficientes de Manning dos materiais formadores da calha e das margens dos rios.

### 3.3 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Outro elemento fundamental para que o modelo hidrodinâmico funcione de forma adequada, são as condições de contorno ou de fronteiras apropriadas. Nelas podem ser impostos valores de nível de água (NA) e vazão (Q) nas fronteiras abertas, a montante e a jusante, do domínio de simulação. O contorno fechado caracteriza as margens e seção dos corpos d'água, o contorno aberto, as condições deste contorno, que devem ter a capacidade de trazer para dentro do domínio as características do escoamento externo ao domínio. Em todas as fronteiras fechadas, fundo e laterais, do domínio de simulação, é considerada a condição de não deslizamento.

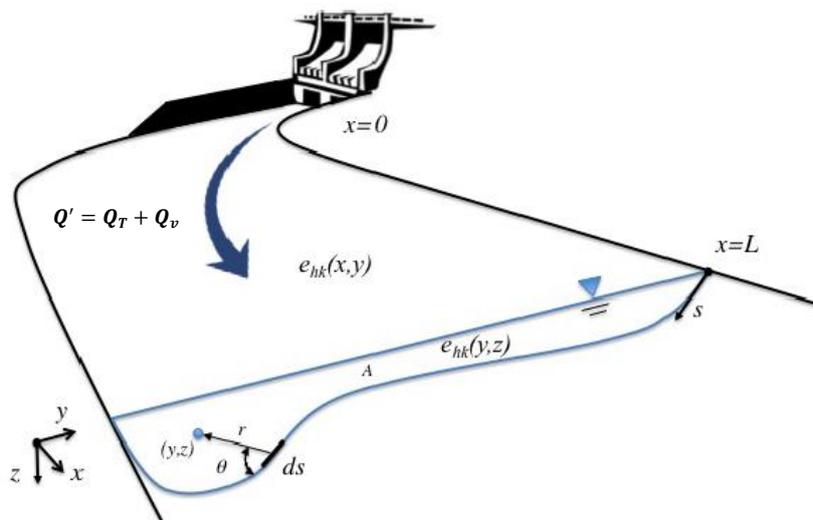
Neste estudo foram consideradas as seguintes condições de contorno:

- Fronteiras sólidas: condição de impermeabilidade.
- Fronteiras líquidas: vazões e níveis d'água.

**Fronteira Montante:** Régua soleira da Barragem: nível de água;

**Fronteira Jusante:** Estação fluviométrica: Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Na Figura 3.5 são apresentadas as condições de contorno que podem ser impostas ao longo das fronteiras do domínio.



**Figura 3.5** Desenho esquemático da especificação das condições de contorno nas fronteiras fechadas e abertas dos domínios de simulação hidrodinâmica fluvial.

### 3.4 MODELO HIDRODINÂMICO FLUVIAL

Os modelos hidrodinâmicos servem para determinar o padrão de correntes em corpos d'água em superfície livre, como águas costeiras, baías, sistemas estuarinos, rios, lagoas e lagos. Esses modelos variam muito em complexidade, desde unidimensionais (1D), passando por modelos bidimensionais (2D) e até modelos tridimensionais (3D). Esses modelos hidrodinâmicos são frequentemente utilizados no intuito de simular a variação do campo de velocidade em função do espaço e do tempo. Tais modelos alimentam outros modelos, como por exemplo, os de dispersão de poluentes, de qualidade da água, de transporte de sedimentos, uma vez que estes fenômenos dependem de características hidrodinâmicas dos corpos d'água (BARROS *et al.*, 2011).

As equações fundamentais que governam a hidrodinâmica em corpos d'água são deduzidas a partir da aplicação dos princípios básicos de leis de conservação de duas grandezas fundamentais da Mecânica dos Fluidos: *massa e quantidade de movimento*. As relações matemáticas que tais grandezas expressam, podem ser obtidas a partir do balanço de massa em um volume de controle infinitesimal de um fluido. A partir do balanço de massa surge a equação da continuidade. A partir da aplicação do balanço da quantidade de movimento, originam-se as Equações de Navier-Stokes. Tais equações podem ser encontradas em (MARTIN e MC CUTCHEON, 1999; HERVOUET, 2007).

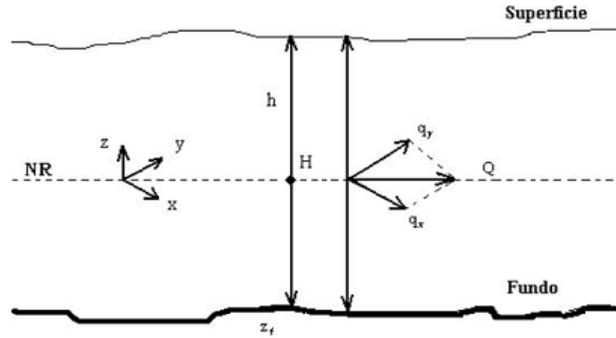
As equações tridimensionais de Navier-Stokes constituem o modelo matemático geral para o escoamento de fluidos. A representação dos escoamentos através da consideração destas equações de forma completa consiste em uma abordagem mais complexa. No entanto, a representação de alguns corpos d'água pode ser feita considerando simplificações destas equações, o que leva a modelos menos complexos e com menor exigência de dados de entrada. Além de uma exigência menor de recursos computacionais, porém com resultados que representam bem a realidade como mostra a Figura 3.6.

O modelo hidrodinâmico adotado neste trabalho é o bidimensional longitudinal-transversal, e as velocidades  $v(x,y)$ , são médias na direção  $z$  (SECRETAN e LECLERC, 1998). 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, o clássico modelo de Saint-Venant para

águas rasas, considerando, ainda, outras hipóteses (SAINT-VENANT, 1871; HENICHE *et al.*, 2000):

- A coluna de água é misturada na direção vertical e a profundidade é pequena em comparação com a largura e o 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.



**Figura 3.6** Sistema de Coordenadas para as equações que foram integradas na vertical.  
Fonte: SECRETAN *et al.* (2000).

Adequação do modelo de Saint-Venant para simulação do comportamento hidrodinâmico dos rios Tocantins e Tietê é justificada pela: ausência de estratificação térmica; variações de salinidade pequenas, as componentes de velocidade na vertical são pequenas. Neste caso, a Equação (3.2) é a equação da conservação da massa, enquanto que as Equações (3.3) e (3.4) são as Equações para a conservação da quantidade de movimento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0 \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_x}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_x \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \frac{q_x}{H} + \frac{\partial q_y}{\partial y} \frac{q_y}{H} = \sum F_y \quad (3.4)$$

onde  $q_x$  e  $q_y$  ( $m^3/s$ ) são as vazões nas coordenadas cartesianas  $x$  e  $y$ ;  $t$  (s) tempo;  $h$  (m) nível da água;  $H$  (m) a profundidade da coluna d'água, e  $F_x$  e  $F_y$  (N) forças de volumes nas direções  $x$  e  $y$ . Os termos do lado direito das Equações (3.3) e (3.4) são dados pelas Equações (3.5) e (3.6).

$$\sum F_x = -gH \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{n^2 g |\vec{q}| q_x}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{xx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{xy})}{\partial y} \right) + F_{cx} + F_{wx} \quad (3.5)$$

$$\sum F_y = -gH \frac{\partial h}{\partial y} - \frac{n^2 g |\vec{q}| q_y}{H^{1/3}} + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{yx})}{\partial x} \right) + \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial(H\tau_{yy})}{\partial y} \right) + F_{cy} + F_{wy} \quad (3.6)$$

sendo  $g$  a aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);  $n$  o coeficiente de Manning;  $|\vec{q}|$  o módulo da vazão específica (m<sup>2</sup>/s);  $\rho$  a massa específica da água (kg/m<sup>3</sup>);  $F_{cx}$  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<sup>2</sup>) Equação (3.7).

$$\tau_{ij} = \nu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.7)$$

onde  $\bar{U}_i$  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 calculada pela Equação (3.8).

$$\nu_t = L_m^2 \sqrt{2D_{ij}D_{ij}} \quad (3.8)$$

sendo  $D_{ij}$  o tensor da taxa de deformação do movimento médio

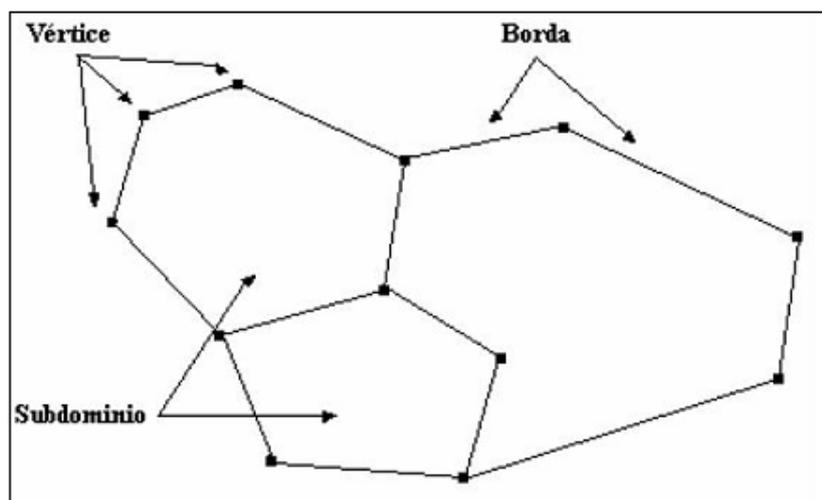
$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3.9)$$

O regime hidrodinâmico considerado neste estudo foi estacionário, ou seja, sem influência de ondas de marés, que é uma boa hipótese, considerando-se que os níveis de água e vazão dos trechos dos rios Tocantins e Tietê analisados, são controlados pelas manobras de operação das UHEs Tucuruí e Bariri. A Influência do vento não é considerada, pois as regiões das UHEs não se encontram próximo ao continente, onde as correntes de ar são significativas. O efeito da Força de Coriolis é desprezado devido aos domínios de estudo serem pequenos o suficiente.

### 3.5 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS

O programa H2D2 (GRE-EHN, 2016) utilizado nesta modelagem, é composto de 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. Também, através do Método de Elementos Finitos (MEF), as simulações hidrodinâmicas são executadas com base nas equações de águas rasas. 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 H2D2 (BARROS *et al.*, 2011; BLANCO *et al.*, 2013; HOLANDA *et al.*, 2016).

O *Modeleur* é um software acoplado ao H2D2, que possui partições para: topografia, malha hidrodinâmica, substrato, vento e condições de contorno. A Figura 3.7 mostra uma partição, que consiste em uma ferramenta espacial, composta por vértices, bordas e subdomínios, possuindo condições de coerência em sua estrutura, por exemplo, uma borda não pode cruzar outra borda, o subdomínio deverá estar fechando superfícies e nunca deverá estar no interior de outro subdomínio. A partição permite ser utilizada de várias formas para a construção e modificação geométrica, ela é uma ferramenta genérica designada para suprir informações nos vértices e subdomínios.

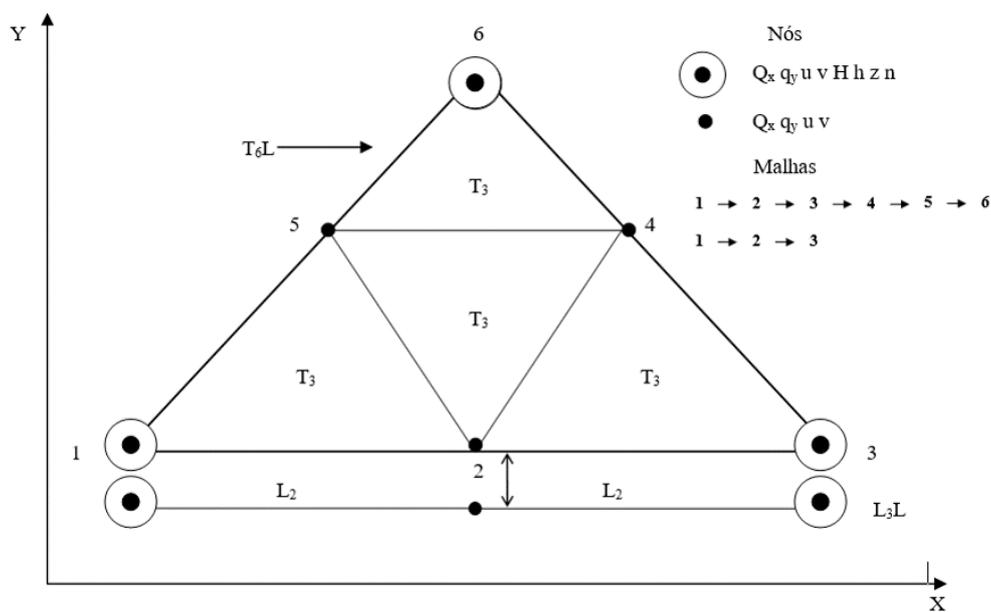


**Figura 3.7** Estrutura de uma partição utilizada pelo *Modeleur*.

Existe certo número de partições que são designadas para gerar dados específicos. A base da partição conta com a independência entre os dados do terreno e os dados reais utilizados na simulação hidrodinâmica. Com isso, o banco de dados do programa pode

ser alimentado com a adição de novas partições que podem ser combinadas às já existentes. Assim, a qualidade do modelo pode evoluir com o tempo.

O modelo matemático representado pelas equações de Saint-Venant não possui solução analítica, desta forma, deve-se utilizar um método numérico para a solução. O software H2D2 utiliza o MEF para a discretização espacial das Equações de Saint-Venant. O modelo é bidimensional-longitudinal-transversal. As equações de conservação da massa e da quantidade de movimento são integradas na profundidade. Deste modo, os valores obtidos para as velocidades são médios na direção vertical. O MEF faz uma interpolação quadrática em cada elemento da malha triangular, isto significa que a malha é formada por triângulos constituídos por seis nós, denominados de T6 (Figura 3.8). Desta forma, o MEF permite não somente representar os valores médios em um campo variável, mas também resolve as equações da mecânica do contínuo aplicáveis ao problema físico analisado.



**Figura 3.8** Triangularização do H2D2.  
Fonte: SECRETAN *et al.* (2001).

Na Figura 3.8, as variáveis  $h$  (altura d'água),  $H$  (profundidade),  $z_f$  (cota de fundo) e o coeficiente de rugosidade (pontos 1, 3, 6) são interpolados linearmente, pois seus gradientes são menos acentuados que os gradientes das velocidades e vazões específicas (pontos 2, 4, 5), os quais são interpolados quadraticamente, por, geralmente possuírem gradientes mais acentuados. Assim, o H2D2 gera a malha Figura 5.5, que estoca todas as

grandezas de entrada necessárias à resolução das equações de águas rasas, 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 e transferidas para a malha hidrodinâmica, o coeficiente de Manning e as condições de contorno definidas anteriormente. A malha é gerada a partir de um algoritmo isotrópico frontal, que utiliza um só parâmetro de espaçamento e tenta gerar triângulos os mais regulares (SECRETAN *et al.*, 2000).

### 3.6 CALIBRAÇÃO, VALIDAÇÃO E SIMULAÇÕES DO MODELO HIDRODINÂMICO

A calibração do modelo é efetuada através de uma regressão linear entre as vazões medidas e simuladas. Neste caso, o coeficiente de Manning e o refino de malha (estudo de malha) são variados para aproximar ao máximo os valores simulados dos medidos, maximizando o valor do coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão. Na validação, velocidades medidas e simuladas são comparadas para análise de desempenho do modelo. Com o modelo calibrado e validado, são simuladas isosuperfícies de velocidade e profundidade, considerando, por exemplo, vazões (mínimas, médias e máximas), buscando analisar a sazonalidade do escoamento; e identificar as regiões que mais favorecem a implantação de centrais hidrocinéticas em uma relação espaço-temporal.

### 3.7 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE PROJETO

A velocidade de projeto é selecionada através da determinação da densidade energética Equação (3.10) do local de implantação da turbina hidrocinética. Entretanto, para a determinação da densidade, é necessário determinar a curva de distribuição de frequência (ocorrência) percentual das velocidades. Tais velocidades são determinadas através de uma regressão do tipo potência estabelecidas entre as vazões observadas e velocidades simuladas para o ponto analisado. A velocidade de projeto é aquela que proporciona a maior densidade energética.

$$De = \frac{1}{2} \rho V^3 p \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (3.10)$$

onde  $De$  é a densidade energética ( $\text{W/m}^2$ );  $\rho$  é a massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ ); e  $p$  é a porcentagem de ocorrência da velocidade ao longo do período de medição.

Com a definição da velocidade de projeto e do diâmetro do rotor através da profundidade do local de implantação da turbina, define-se a rotação de projeto através da análise da variação do  $C_p$  (coeficiente de potência) em função dos limites de cavitação da máquina (SILVA *et al.*, 2017). O diâmetro do cubo do rotor, além do número de pás também depende do projeto de cada máquina; e os perfis utilizados são, geralmente, do tipo NACA.

A potência instalada é determinada através da Equação (3.11). Para determinação da energia gerada, basta-se multiplicar a potência pelo tempo de funcionamento da turbina.

$$P_i = \frac{1}{2} \rho C_p A v^3 \quad (3.11)$$

onde  $P_i$  é a potência (W);  $\rho$  é a massa específica da água ( $\text{kg/m}^3$ );  $C_p$  é o coeficiente de potência;  $A$  é a área ( $\text{m}^2$ ) varrida pelo rotor de diâmetro  $D$  (m); e  $v$  é a velocidade de projeto (m/s).

## CAPÍTULO 4

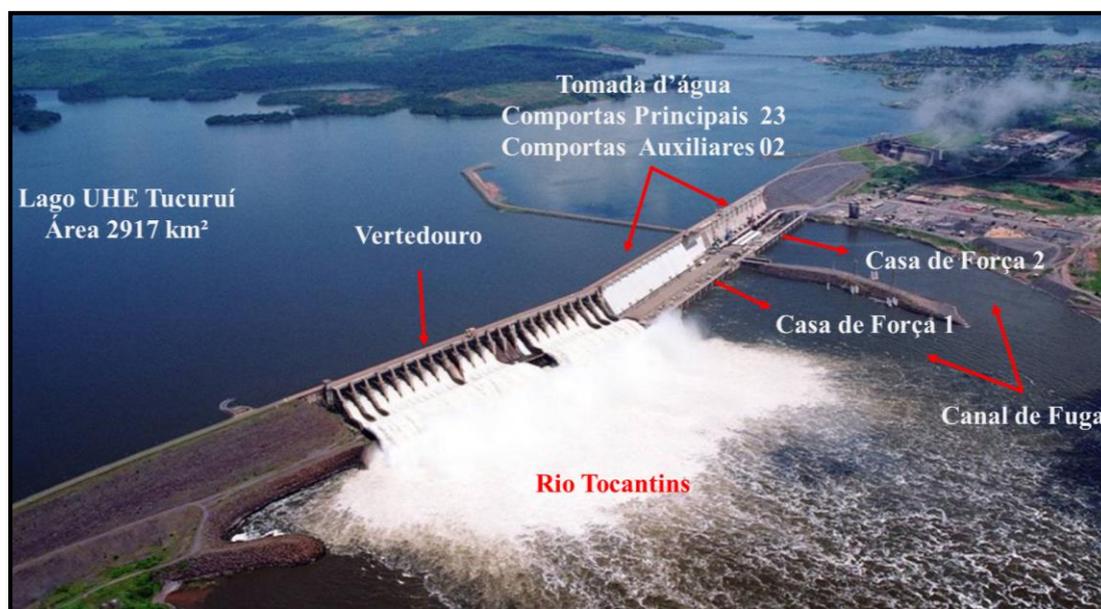
### ÁREAS DE ESTUDO

Neste capítulo são apresentadas as áreas de estudo para aplicação da metodologia, UHE de Tucuruí – grande porte (rio Tocantins); e UHE Bariri – médio porte (rio Tietê).

#### 4.1 UHE TUCURUÍ

A construção da UHE-Tucuruí ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa foi construída a primeira casa de força com 12 unidades geradoras de 350 MW cada, mais duas auxiliares de 22,5 MW. Totalizando uma potência instalada de 4.245 MW, sendo concluída em dezembro de 1992. A segunda etapa foi iniciada em meados de junho de 1998, com a construção da segunda casa de força, com mais 11 unidades geradoras cada uma de 375 MW, totalizando uma potência instalada de 4.125 MW, sendo finalizada em 2007 (ELETRONORTE, 2016 a).

A UHE Tucuruí é uma das maiores centrais hidrelétrica do mundo utilizando 25 turbinas do tipo Francis, a capacidade instalada hoje é de 8.370 MW. A Figura 4.1 demonstra a descrição do funcionamento da UHE.



**Figura 4.1** Descrição da UHE Tucuruí.

Sendo a, principal geradora do sistema Norte/Nordeste, a UHE Tucuruí faz parte do Sistema Interligado Nacional (SIN) ligando o Norte-Sul. Esta linha permite a preservação de reservatórios hidrelétricos em outras regiões durante o período

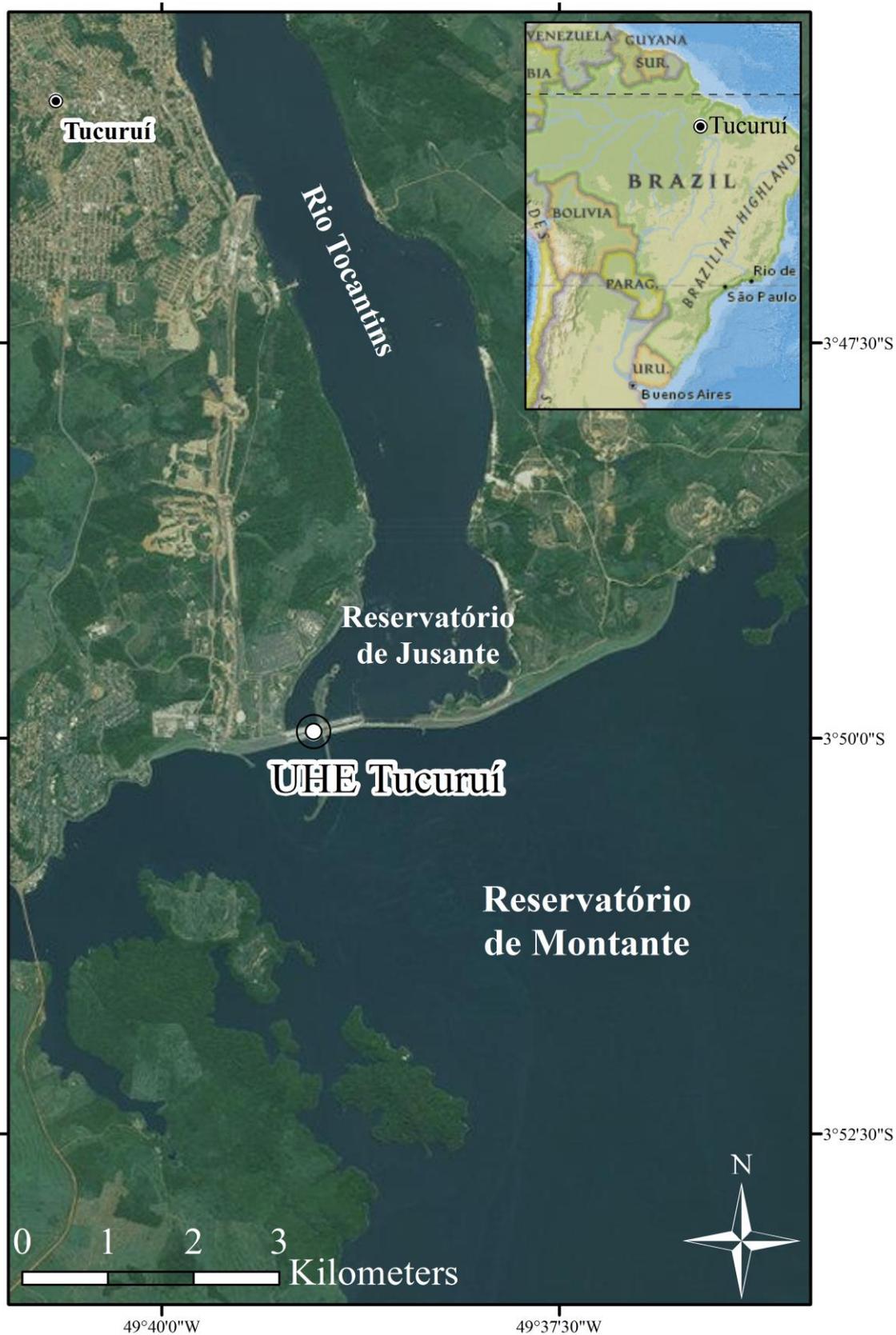
hidrológico favorável do rio Tocantins. Esta energia é escoada por linhas de transmissão nas tensões de 69 kV, 138 kV, 230 kV e 500 kV. Atendendo os estados do Pará, Maranhão e Tocantins, a usina também exporta energia para as regiões Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste (ELETRONORTE, 2016 b)

A Usina Hidrelétrica de Tucuruí, é gerenciada pela Eletronorte e subsidiária da Eletrobras, estando localizada a uma distância de 350 km em linha reta ao sul da Capital do Estado do Pará – Belém, a 13km da cidade de Tucuruí, possuindo as seguintes coordenadas geográficas: 03°45'03'' de latitude Sul e 49°40'03'' de longitude a oeste, região do Baixo Tocantins. Seu reservatório forma um lago artificial com uma área de 2.917 km<sup>2</sup>. Em sua área de influência estão localizados os municípios de Tucuruí, Breu Branco, Novo Repartimento, Goianésia do Pará, Jacundá, Itupiranga e Nova Ipixuna. Nestas regiões as principais atividades econômicas desenvolvidas são o extrativismo vegetal e a pecuária.

#### 4.1.1 Clima

A área de estudo representa uma regularidade climática, caracterizada por estações com pequenas variações anuais na distribuição das temperaturas, da velocidade dos ventos, da umidade do ar, da insolação e da evaporação. O clima nesta área é do tipo quente úmido, Am (Classificação Koppen), ficando mais úmido e quente a medida que se caminha para a foz ao norte. As temperaturas máximas ao norte da bacia atingem 38° C nos meses de agosto e setembro, enquanto que as mínimas são registradas em torno de 22° C no período chuvoso. O período mais seco ocorre entre os meses de setembro e outubro e o período chuvoso de fevereiro a abril. O índice pluviométrico anual fica em torno de 2.400mm, apresentando umidade relativa de 85%, na parte mais ao sul da bacia (CMB, 2000).

Na Figura 4.2 é mostrada a localização geográfica do reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



**Figura 4.2** Localização do reservatório de jusante da UHE Tucuruí.

#### 4.1.2 Geologia e Geomorfologia

A área de estudo localiza-se na província geológica da Amazônia Oriental, caracteriza-se por ambientes geológicos distintos, em função da época que se originaram e dos eventos tectônicos ocorridos. A área do reservatório de Tucuruí caracteriza-se por dois grandes domínios geológicos embasamento cristalino, formado por rochas ígneas e meta sedimentos e cobertura sedimentar. Sendo formada por sedimentos que se depositaram durante os períodos mesozoico e cenozoico (terciário e quaternário) (CMB, 2000). A barragem de Tucuruí situa-se ao final de um longo encachoeirado, divide-se em três unidades de relevo: Planalto Setentrional Pará-Maranhão, Planalto Rebaixado do Amazonas e Depressão Periférica do Sul do Pará, sendo esta a área do reservatório. O relevo é suave na área do reservatório, tendo um desnível de 11 metros entre a soleira da barragem e o nível do mar (CMB, 2000).

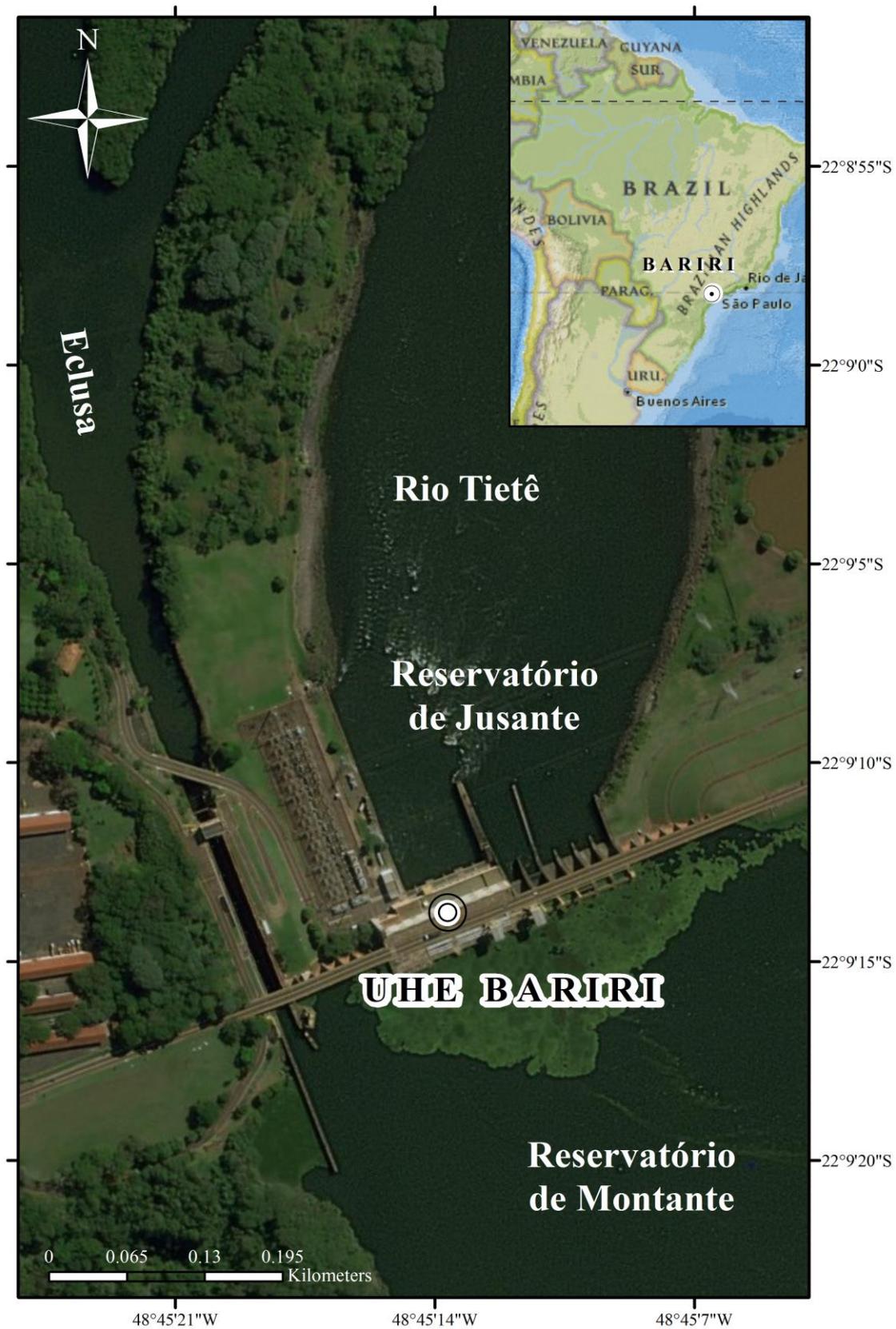
#### 4.1.3 Solos

Os solos são ácidos e pobres em nutrientes, ou seja, apresentam baixa fertilidade natural na área do reservatório e a jusante. Os principais tipos de solos são: os Podzólicos Vermelho-Amarelo, Latossolos Vermerlhos-Amarelos e Latossolos Amarelos. Os Podzólicos Vermelho-Amarelo estão localizados na margem esquerda do reservatório, ocupam mais que 60% da área de influência do reservatório, enquanto que os Latossolos Vermerlhos-Amarelos e Amarelos representam cerca de 25% localizados na margem direita do reservatório (CMB, 2000).

#### 4.2 UHE BARIRI

No estado de São Paulo, mais precisamente no rio Tietê, existem 5 usinas hidrelétricas administrada pela AES Tietê. A UHE Bariri é uma delas e tem potência instalada de 143,1 MW, localiza-se entre os municípios de Bariri e Boracéia, a cerca de 9 km de Bariri. O município de Bariri, faz divisa com as cidades de Bocaina, Jaú, Itapuú, Boracéia, Pederneiras, Arealva, Itaju, Ibitinga e Boa Esperança do Sul. A Usina entrou em operação em 05/10/1965, possui três turbinas Kaplan, capacidade unitária de 47,7 MW, tensão nominal de 138 kV. A hidrelétrica possui uma barragem com comprimento de 856, 25 m.

Na Figura 4.3 é mostrada a localização geográfica do reservatório de jusante da UHE Bariri.



**Figura 4.3** Localização Geográfica da UHE Bariri.

O estado de São Paulo possui 22 Unidades de Gestão de Recursos Hídricos (22 UGRHIS). A bacia do Tietê - Jacaré encontra-se na 13ª unidade (UGRHI -13), localizada no centro do estado entre 49°32' - 47° 30' de longitude e 21°37' - 22° 51' de latitude. Nessa região estão localizados três reservatórios Bariri, Ibitinga e Carlos Botelho, a área de drenagem da bacia é de aproximadamente de 11.749 km<sup>2</sup> (PREFEITURA MUNICIPAL BARIRI, 2012).

#### 4.2.1 Clima

O clima é caracterizado como tropical, tendo seu período chuvoso entre os meses de outubro e março. As chuvas concentram-se mais entre os meses de dezembro e fevereiro. Enquanto que o período mais seco está entre os meses de abril e setembro. (PREFEITURA MUNICIPAL BARIRI, 2012).

#### 4.2.2 Geologia, Geomorfologia

As unidades geológicas encontradas na área da (UGRHI- 13) são: sedimentos clásticos predominantemente arenosos, pertencendo a formação Itaqueri, rochas ígneas basálticas pertencem ao grupo São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral), as rochas sedimentares do grupo Bauru (formações Vale do Rio do Peixe- Adamantina e Marília), os depósitos das Serras de São Carlos e Santana e os depósitos aluvionares associados à rede de drenagem, além dos eluviões e coluviões (PIOLTINE, 2009). A área da (UGRHI-13) está inserida na Província Geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista e das Cuestas Basálticas, possuem os sistemas de relevos: planícies fluviais, colinas amplas, colinas médias, morros amplos, morrotes alongados e espigões, morros arredondados, mesas basálticas, encostas sulcadas por vales subparalelos, encostas não escarpadas com cânions locais e escarpas festonadas (PIOLTINE, 2009).

#### 4.2.3 Solos

Na UGRHI-13 encontram-se seis grupos de solos dentre eles: latossolo roxo e terra rocha estruturada, latossolo vermelho-escuro textura média e latossolo vermelho-amarelo textura média, podzólico vermelho-amarelo abrupto e não abrupto textura média, areias quartzosas, solos liólicos e cambissolos e planossolos (PIOLTINE, 2009).

## CAPÍTULO 5

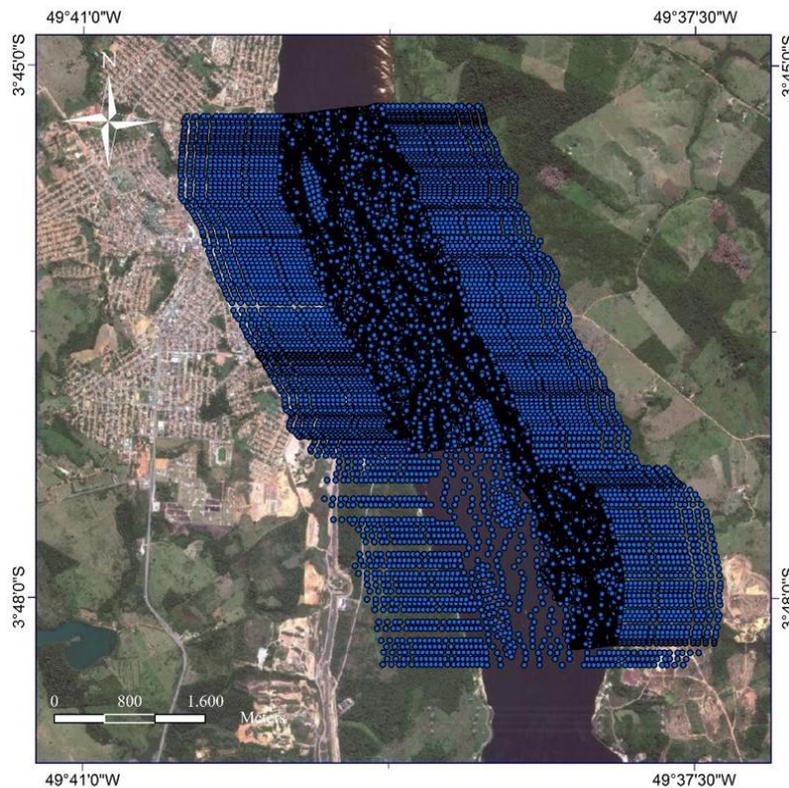
### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados de Dados de Batimetria e Velocidade, determinação da rugosidade de fundo, definição das condições de contorno, calibração e validação do modelo, concepção dos Modelos de Elevação do Terreno, seleção dos pontos para instalação das turbinas hidrocinéticas, determinação dos parâmetros de projeto e possível energia gerada pelas turbinas, para os estudos de caso das UHEs Tucuruí e Bariri.

#### 5.1 ESTUDO DE CASO UHE TUCURUÍ

##### 5.1.1 Dados de Batimetria e Velocidade

Os dados de batimetria do rio Tocantins no trecho analisado, foram fornecidos pela empresa Eletronorte/Elektrobras. Estes dados são oriundos da empresa AHIMOR (Administração das Hidrovias da Amazônia Oriental) e datam de setembro de 2004; e foram coletados através de ecobatímetro monofeixe. Na Figura 5.1, 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 5.1** Dados de Batimetria UHE Tucuruí.

Os dados de velocidade foram medidos em campanhas de campo (Figura 5.2) entre os anos de 2012 e 2013, utilizando um ADCP (Figura 3.2). Na Figura 5.2 é apresentada a equipe em deslocamento para as medições in loco das velocidades.



**Figura 5.2** Campanha para medição de velocidade.

### 5.1.2 Rugosidade de Fundo

Para determinação da rugosidade equivalente de fundo do trecho analisado do rio Tocantins, é necessário ter dados de granulometria dos materiais, que formam o leito do rio. Tal composição do material serve como base para a elaboração do modelo de rugosidade, imprescindível na construção do modelo hidrodinâmico. Assim, os coeficientes de Manning,  $n$ , foram obtidos baseados na literatura CHOW, (1959). No entanto, os valores foram determinados por meio da calibração, variando-se o coeficiente de Manning até se atingir uma boa correlação entre as vazões medidas e simuladas.

### 5.1.3 Condições de Contorno

Além dos dados topobatimétricos e de substrato, também foram necessários dados de condição de contorno de vazão ao sul e nível d'água ao norte do trecho analisado Figura 5.1. Para a fronteira Sul, os dados foram assumidos iguais aos dados da régua linimétrica instalada na soleira da barragem (Figura 5.3), que foram fornecidos pela Eletronorte/Eletobrás para o período entre 2007 e 2013.



**Figura 5.3** Condição nível Barragem.

Para a fronteira Norte, os dados foram obtidos no site [hidroweb.ana.gov.br/](http://hidroweb.ana.gov.br/) da ANA (Agência Nacional de águas) através da estação fluviométrica Tucuruí – 29700000 (Figura 5.4), para o período de 2007 a 2013.

### **TUCURUÍ (29700000)**

<b>Dados da Estação</b>	
Código	29700000
Nome	TUCURUÍ
Código Adicional	-
Bacia	RIO TOCANTINS (2)
Sub-bacia	RIO TOCANTINS,ITACAIÚNAS,..... (29)
Rio	RIO TOCANTINS
Estado	PARÁ
Município	TUCURUÍ
Responsável	ANA
Operadora	ANA
Latitude	-3:45:28
Longitude	-49:39:12
Altitude (m)	1,87
Área de Drenagem (km2)	764000

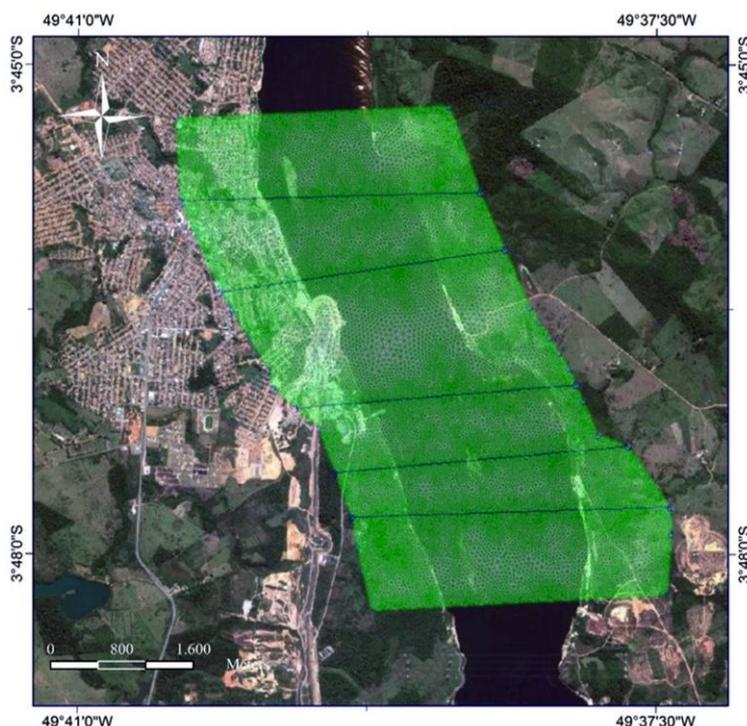
Consultar série de:

**Figura 5.4** Estação fluviométrica.

Dessas séries apenas 92 tríades de pares eram coerentes, nos outros casos as diferenças de nível de água entre montante e jusante do domínio de simulação não correspondiam a vazão registrada ANEXO 3.

### 5.1.4 Calibração do Modelo

Com os modelos de elevação de terreno bruto, de rugosidade e as condições de contorno definidas, logo a malha hidrodinâmica (Figura 5.5), pode ser criada, permitindo testes de convergência de malhas, que culminam com a etapa de calibração do modelo hidrodinâmico. A malha utilizada no estudo possui 97.392 nós e 48.227 elementos triangulares.



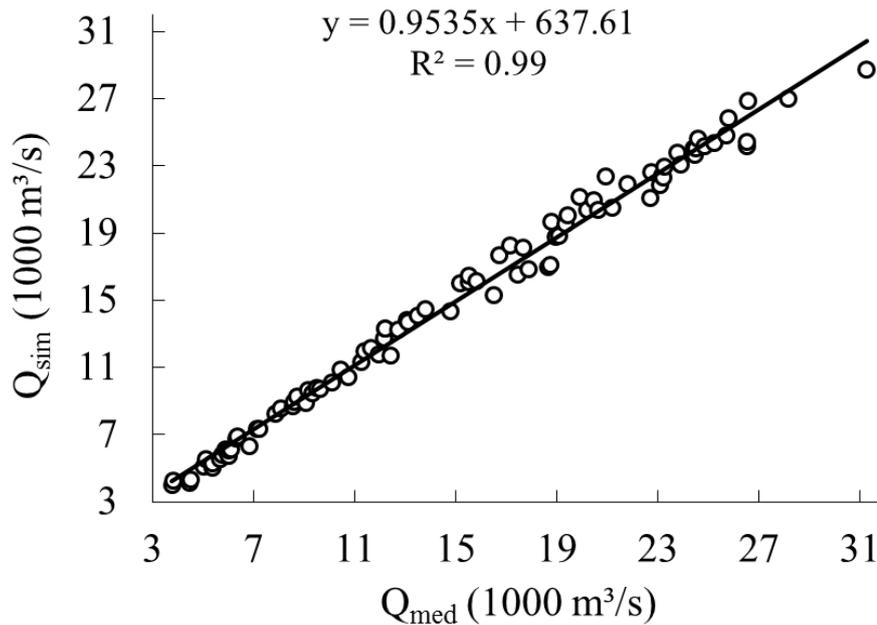
**Figura 5.5** Malha de Elementos Finitos do Modelo Hidrodinâmico UHE Tucuruí.

Assim, o modelo foi calibrado variando-se o coeficiente de Manning para obtenção de uma boa concordância entre os valores de vazões medidas e simuladas Figura 5.6. A partir da determinação do coeficiente de Manning, foram realizados testes de convergência de malhas com vértice maior de 30 m, 20 m e 15 m, sendo que a malha com vértice igual a 20 m (Figura 5.5) apresentou um resultado próximo ao da malha de 15 m, mas com um tempo computacional menor como mostra a Tabela 5.1, sendo selecionada para todas as simulações.

**Tabela 5.1** Tabela de convergência entre o balanço de massa e as malhas.

Malha (m)	Q (medida) m <sup>3</sup> /s	Q(simulada) m/s	Erro %	Tempo Computacional
30	14.784	15.430	4,37	04 min 02 s
20	14.784	14.369	2,80	02 min 40s
15	14.784	14.345	2,97	03 min 28s

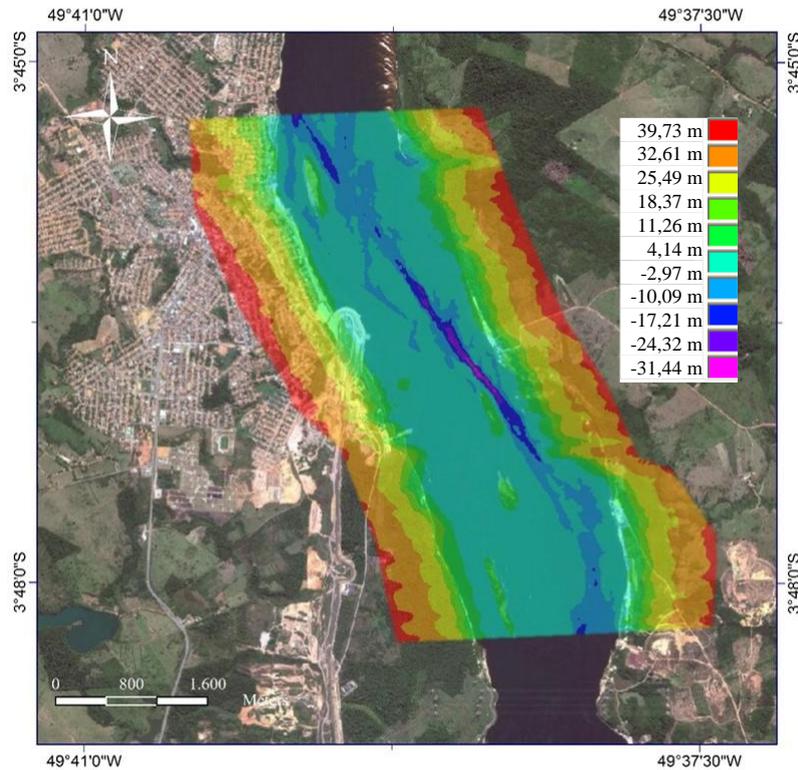
Outro fator importante considerado na aferição da resposta do modelo hidrodinâmico foi a aplicação da técnica de regressão linear entre as vazões simuladas e medidas. Sendo o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), um indicador de precisão da modelagem, que é comumente usado em hidráulica e hidrologia (GUPA *et al.*, 2009; VIS *et al.*, 2015). O  $R^2$  mais próximo de 1 demonstra um bom ajuste entre vazões observadas e simuladas. A regressão mostrou uma boa correlação com um valor de  $R^2$  igual a 0,99.



**Figura 5.6** Correlação entre as vazões medidas e simuladas pelo modelo UHE Tucuruí.

### 5.1.5 Modelo de Elevação do Terreno

Na Figura 5.7, são apresentadas as isosuperfícies do modelo de elevação de terreno interpolado via método dos elementos finitos.

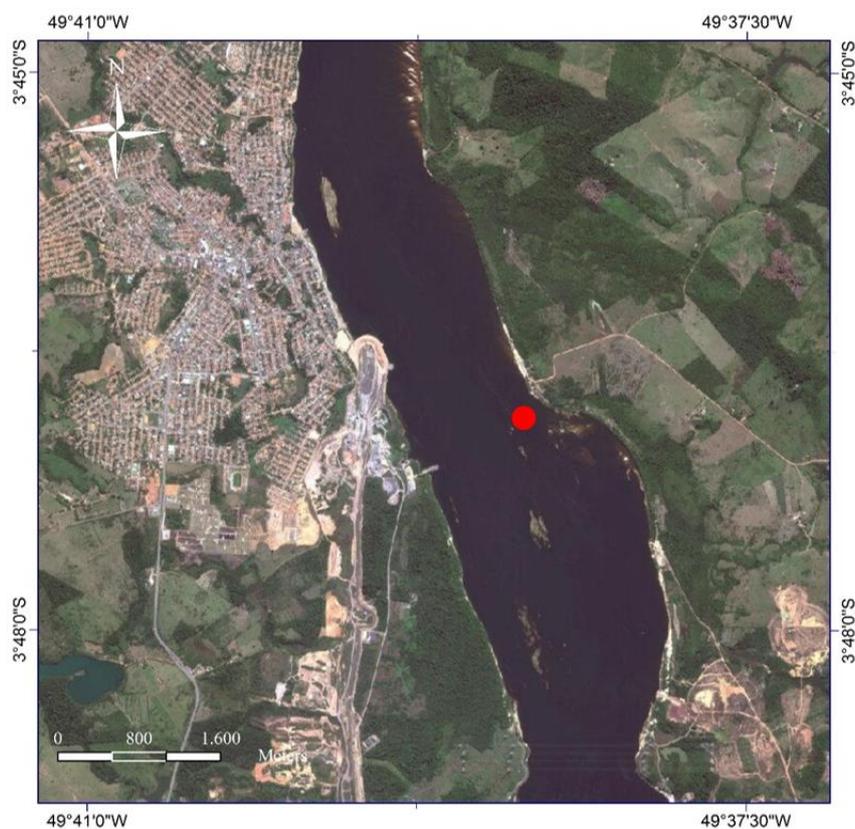


**Figura 5.7** Modelo de Elevação do Terreno UHE Tucuruí.

Observa-se que o modelo representou bem a morfologia de fundo, pois o canal do reservatório de jusante da usina hidrelétrica de Tucuruí e bem evidente, que consiste no canal original do rio antes da construção da barragem.

#### 5.1.6 Validação do modelo

Foram realizadas campanhas de campo no período de 2012 a 2013 para aferição das velocidades simuladas pelo modelo, as quais foram medidas por meio de um ADCP no ponto de coordenadas  $x = 650491.59$  e  $y = 9581965.38$  UTM (Figura 5.8). Na Tabela 5.2, são apresentados os dias das campanhas, as vazões medidas, as velocidades médias na vertical, calculadas através do perfil de velocidades medido pelo ADCP; as velocidades simuladas, que são médias na vertical, calculadas pelo modelo hidrodinâmico bidimensional e as profundidades. Analisando a tabela, observa-se que o modelo simulou razoavelmente as velocidades observadas, com um erro percentual mínimo de 0,83%, médio de 8,77% e o máximo de 22,00%.



**Figura 5.8** Ponto de medidas de velocidade para validação do modelo de reservatório de jusante da UHE Tucuruí.

**Tabela 5.2** Dados medidos e simulados no trecho analisado do rio Tocantins.

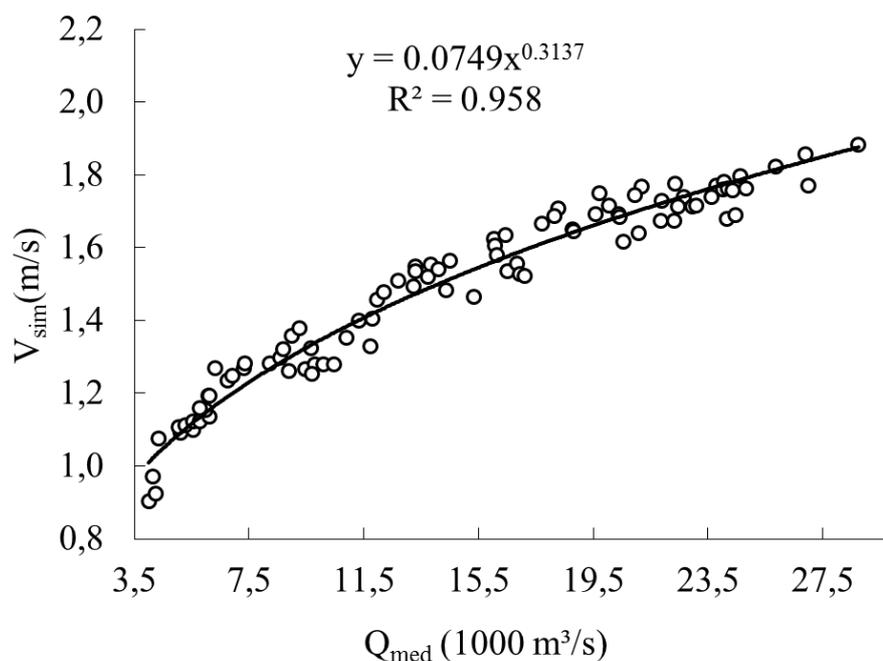
Dias	Q (medida) m <sup>3</sup> /s	V (medida) m/s	V(simulada) m/s	Erro %	P (m)
24/07/2012	5.466	1,20	1,19	0,83	36,53
30/08/2012	8.032	1,50	1,54	2,67	37,32
25/09/2012	5.553	1,00	1,10	10,00	36,52
13/11/2012	3.841	1,00	0,92	8,00	36,11
13/12/2012	8.442	1,50	1,40	6,67	37,95
18/04/2013	22.910	1,80	1,77	1,67	42,89
13/06/2013	7.760	1,20	1,42	18,33	37,50
25/07/2013	5.363	1,00	1,22	22,00	36,57

No dia 18/04/2012 no momento da campanha de medição realizada in loco, o vertedouro da barragem encontrava-se aberto, por isso um dado de vazão tão expressivo, que por sua vez é medido de forma diferente pelo pessoal da barragem, trazendo incertezas ao valor de vazão observado.

Com os resultados satisfatórios apresentados na Tabela 5.2, foi feita uma correlação de potência (Figura 5.9) entre as vazões medidas no trecho e as velocidades simuladas para o ponto da (Figura 5.8). Nesse caso, o  $R^2$  apresentou um valor igual a

0,958, mostrando que as velocidades simuladas estão bem correlacionadas às vazões medidas. Desta forma, pode-se estimar a velocidade do ponto analisado, a partir de qualquer vazão medida através da seguinte função de potência Equação (5.1).

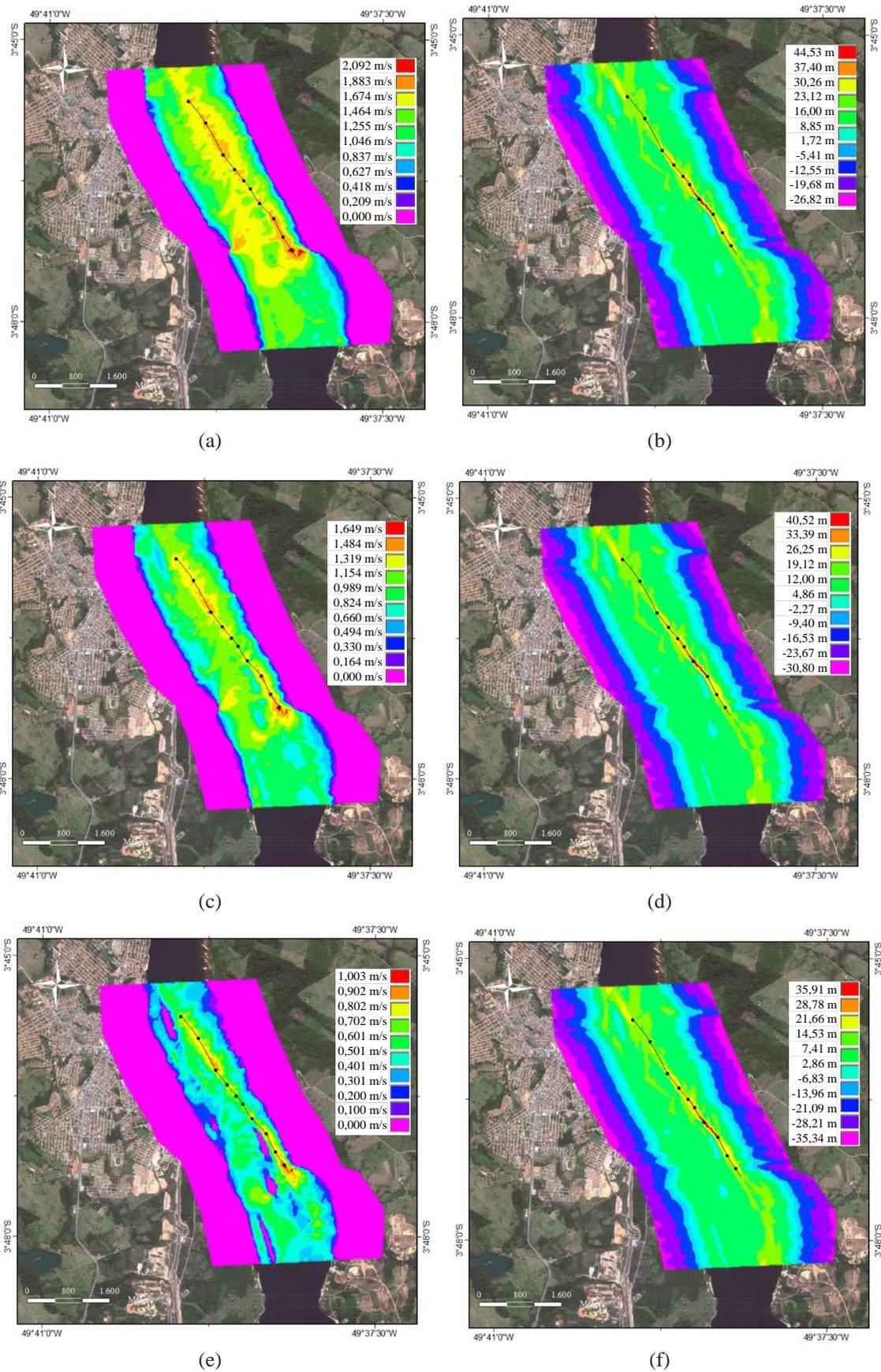
$$V_{sim} = 0.0749Q_{med}^{0.3137} \quad (5.1)$$



**Figura 5.9** Vazões medidas x velocidades simuladas para o ponto de validação do modelo.

### 5.1.7 Seleção dos Pontos de Instalação das Turbinas Hidrocinéticas

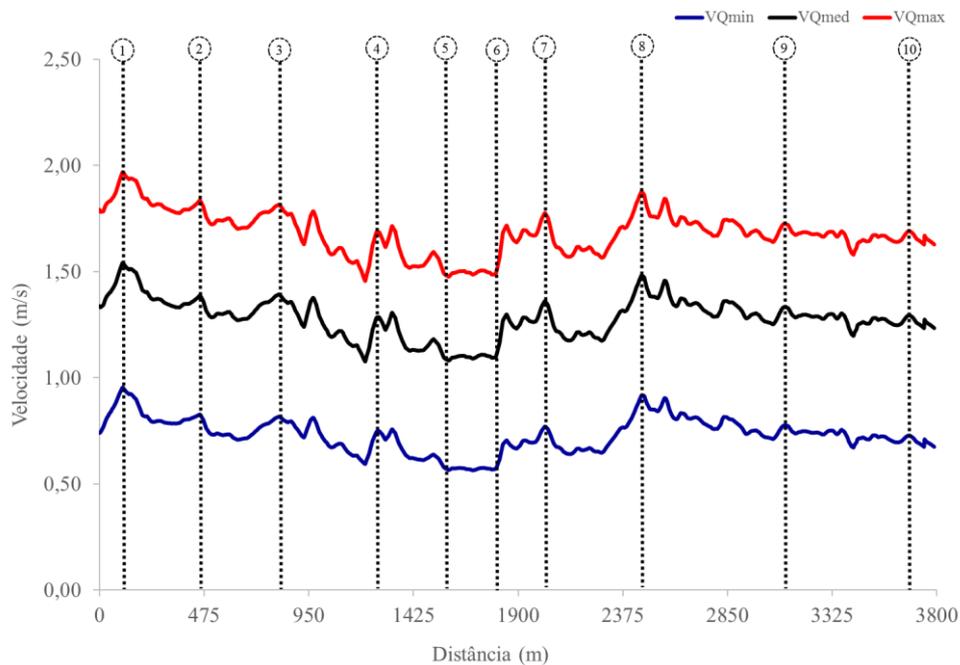
Para análise de possíveis locais para a instalação das centrais hidrocinéticas, utilizaram-se simulações de velocidade e profundidade para a vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x} = 31.274 \text{ m}^3/\text{s}$ ), média ( $Q_{m\acute{e}d} = 14.784 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e mínima ( $Q_{m\acute{i}n} = 3.772 \text{ m}^3/\text{s}$ ), buscando-se avaliar a variação de velocidades e profundidades em função das vazões regularizadas pela central hidrelétrica de Tucuruí. Com a profundidade, determinou-se a localização do canal principal do rio, já que a densidade energética (Equação 3.10), que determina a velocidade de projeto, varia com o cubo da velocidade. Na Figura 5.10, são apresentadas, respectivamente, as isosuperfícies de velocidade e de profundidade para a vazão máxima (Fig. 5.10 a-b), média (Fig. 5.10 c-d), mínima (Fig. 5.10 e-f).



**Figura 5.10** Isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima, média e mínima; e pontos para instalação de centrais hidrocinéticas UHE Tucuruí.

Observando-se a Figura 5.10e, na qual a vazão simulada é mínima, surge a formação de algumas ilhas ao longo do canal, esse período é de estiagem, havendo escassez de chuvas com fechamento do vertedouro, diminuindo o nível de água a jusante e a montante da barragem. Enquanto que para as vazões máximas e médias (Figura 5.10 a-c), o volume de água é maior, com as ilhas imersas.

Com as informações extraídas da Figura 5.10, foi elaborada a Figura 5.11, apresentando os perfis de velocidade no canal para as vazões analisadas (VQmín, VQméd, VQmáx). No canal foram definidos 10 pontos com maiores velocidades, em locais onde a profundidade do rio permite a instalação de turbinas hidrocínéticas com diâmetros de 10m. Na Tabela 5.3 são apresentadas as velocidades, profundidades e coordenadas (projeção SAD69 22S) desses pontos para os extremos de vazão e a vazão média.

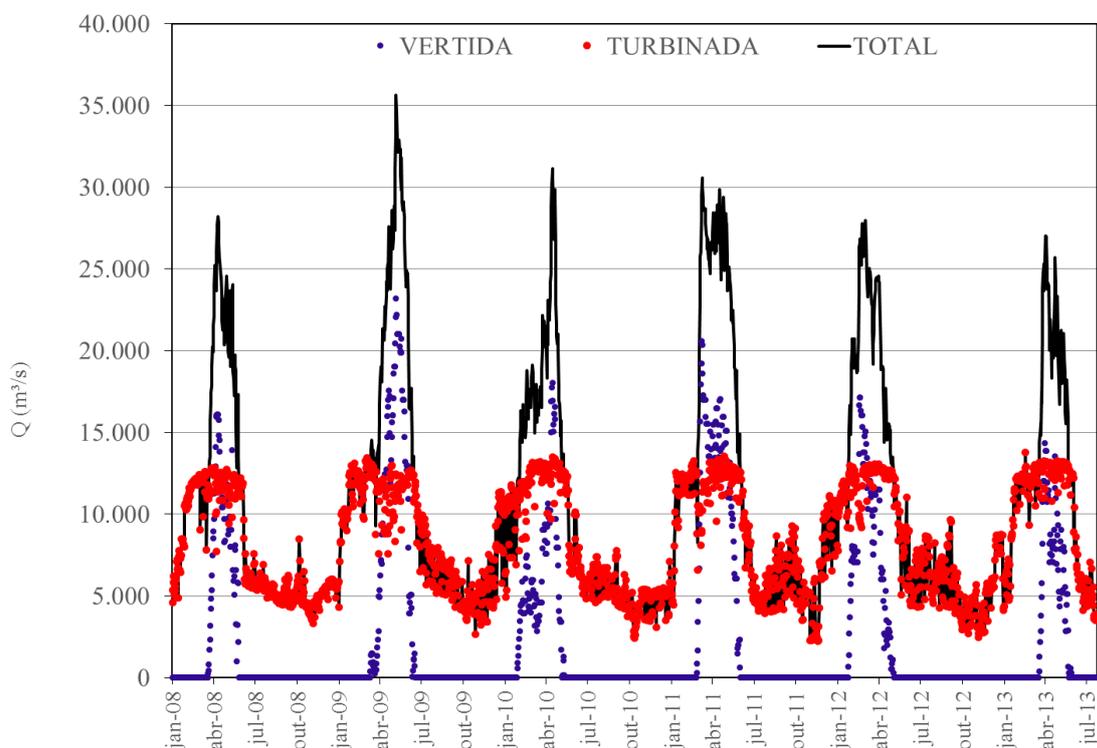


**Figura 5.11** Perfis de velocidade do canal em função das vazões analisadas e 10 pontos para instalação de turbinas hidrocínéticas UHE Tucuruí.

**Tabela 5.3** Informações dos 10 pontos definidos UHE Tucuruí.

Pontos	X (m)	Y (m)	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>méd</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>mín</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
			V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)
1	650908.80	9581266.87	1,97	20,71	1,54	16,63	0,95	11,93
2	650743.53	9581523.34	1,83	21,68	1,39	17,63	0,82	12,96
3	650555.68	9581883.17	1,77	34,66	1,35	30,61	0,79	25,96
4	650383.15	9582176.86	1,67	42,60	1,27	38,59	0,74	33,98
5	650101.92	9582459.58	1,48	34,64	1,08	30,62	0,57	26,00
6	649974.92	9582626.27	1,49	30,32	1,10	26,30	0,58	21,69
7	649800.30	9582848.52	1,77	29,23	1,36	25,24	0,77	20,67
8	649572.12	9583133.77	1,87	24,76	1,48	20,79	0,92	16,25
9	649235.45	9583755.70	1,72	21,37	1,33	17,41	0,77	12,91
10	648895.42	9584174.90	1,68	20,69	1,29	16,75	0,73	12,27

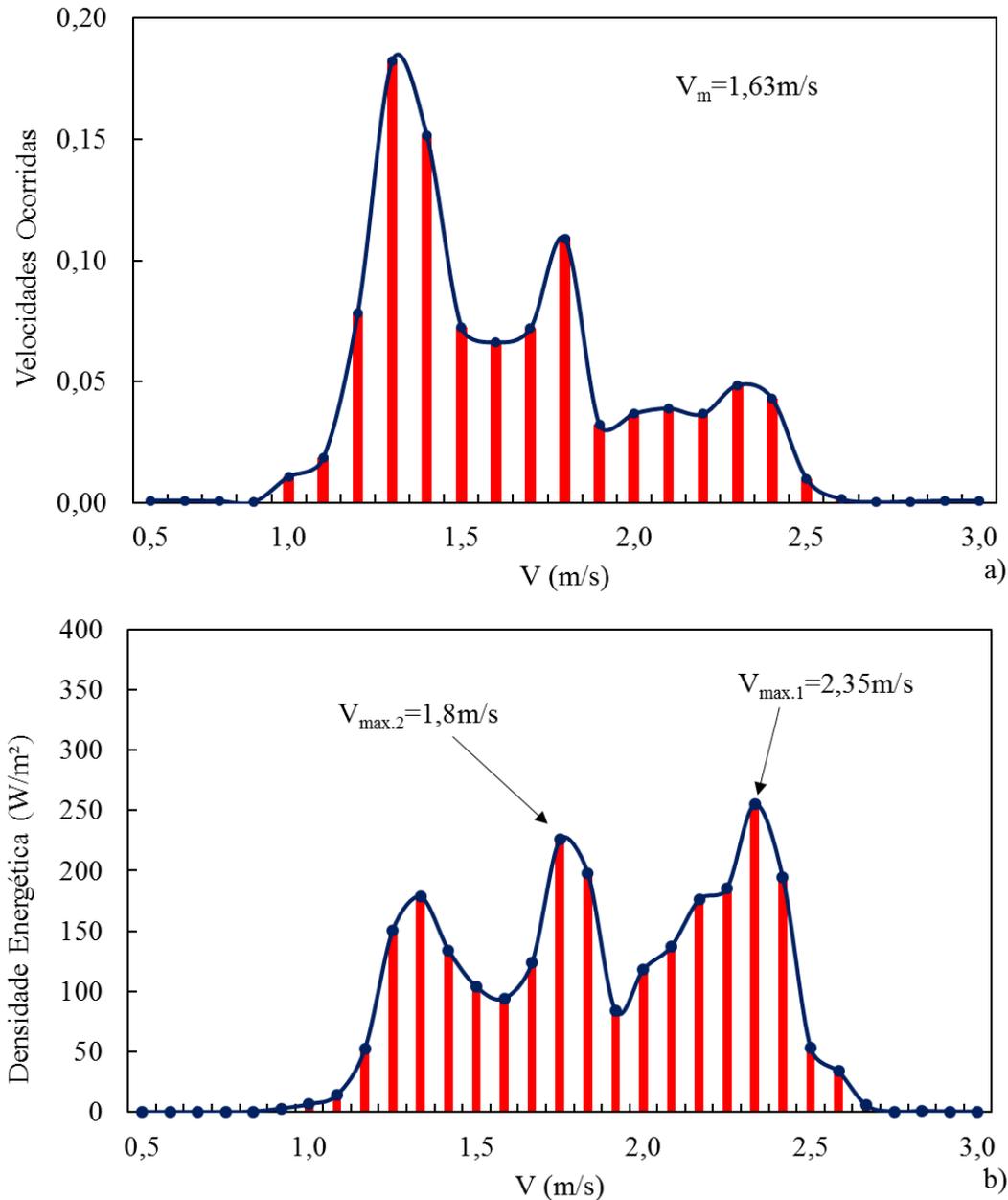
Na Figura 5.12, são mostradas as vazões turbinada, vertida e total, observando-se a característica sazonal da região, devido aos períodos de cheia e estiagem.



**Figura 5.12** Séries históricas de Vazão –UHE Tucuruí -2008-2013.

### 5.1.8 Determinação da Velocidade e Rotação de projeto, Diâmetro do rotor, Potência instalada, Energia Gerada e Parâmetros de Projeto

A determinação da velocidade de projeto foi baseada na determinação da densidade energética (Figura 5.13b), que é baseada na Equação (3.10), considerando as séries históricas do rio Tocantins para o período de 2008 a 2013.

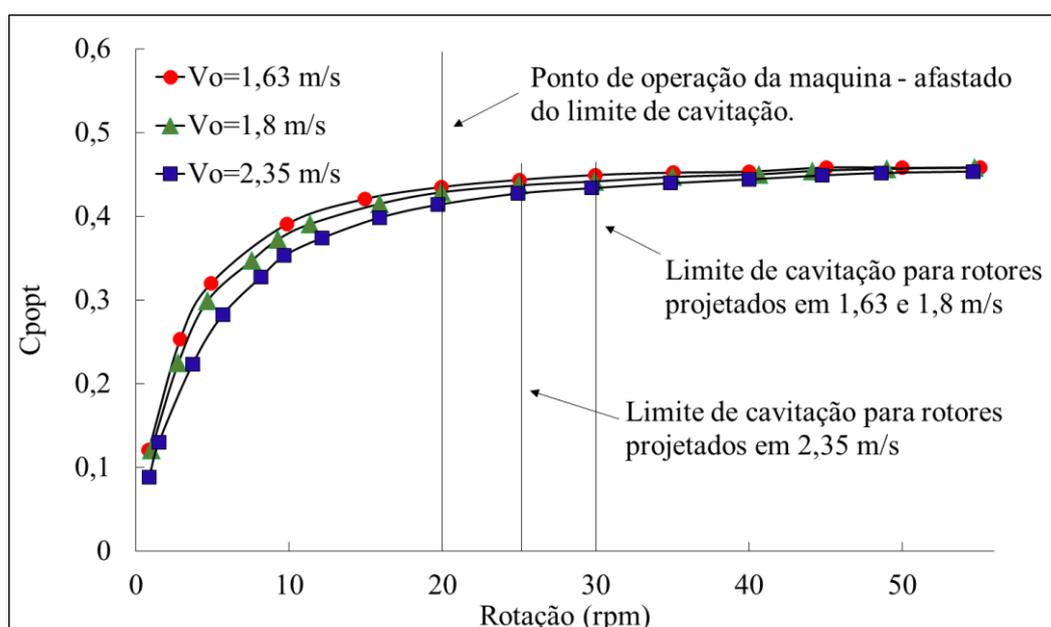


**Figura 5.13** a) Frequência de ocorrência da velocidade do rio. b) Densidade energética.

Na Figura 5.13(a) é mostrada a frequência de velocidade da água residual a jusante da barragem da UHE Tucuruí. Essa figura foi elaborada com as velocidades simuladas pela regressão da Equação (5.1). Nesse caso, observa-se que a maior ocorrência corresponde à velocidade de 1,3 m/s (com 18% de ocorrência ao longo de todo o período

de medição). As velocidades mínimas, média e máxima são 0,98, 1,63 e 2,61 m/s, respectivamente. Ressalta-se que os dados são de controle da UHE para o período de 01/10/2008 a 22/07/2013. Na Figura 5.13(b) é mostrada a densidade energética disponível no local da medição. Observa-se que os dois maiores picos de energia ocorrem para as velocidades de 1,80 e 2,35 m/s, respectivamente. Entretanto a maior densidade energética define a velocidade de projeto sendo igual a 2,35 m/s.

Considerando as profundidades do canal do rio Tocantins no trecho analisado (Figura 5.10), definiu-se o diâmetro do rotor em 10 m, com o conhecimento da profundidade mínima determinou-se o diâmetro, com isso a turbina pode trabalhar tanto no período de cheia quanto na estiagem, evitando assim que a mesma fique inoperante. Com a velocidade de projeto e o diâmetro do rotor, foi analisada a variação do coeficiente de potência em função da rotação do rotor dimensionado (Figura 5.14). Na Tabela 5.4 são apresentados outros parâmetros de projeto.

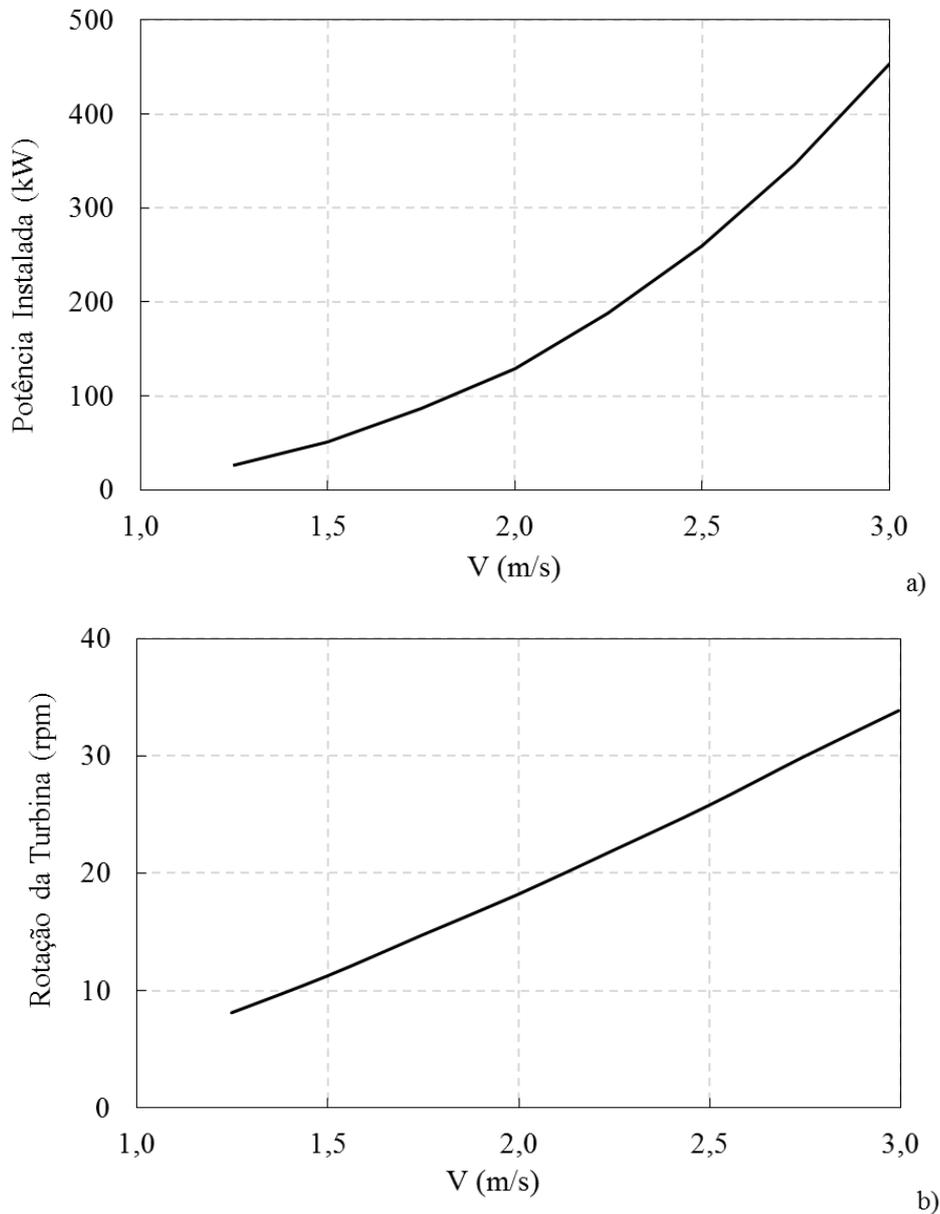


**Figura 5.14** Curva característica da turbina, rotação de projeto e limites de cavitação.

**Tabela 5.4** Dados do rotor da turbina

Parâmetro	Especificação
Diâmetro do rotor (m)	10,0
Diâmetro do cubo do rotor (m)	1,50
Número de pás	3,00
Perfil da pá	NACA 653 – 618

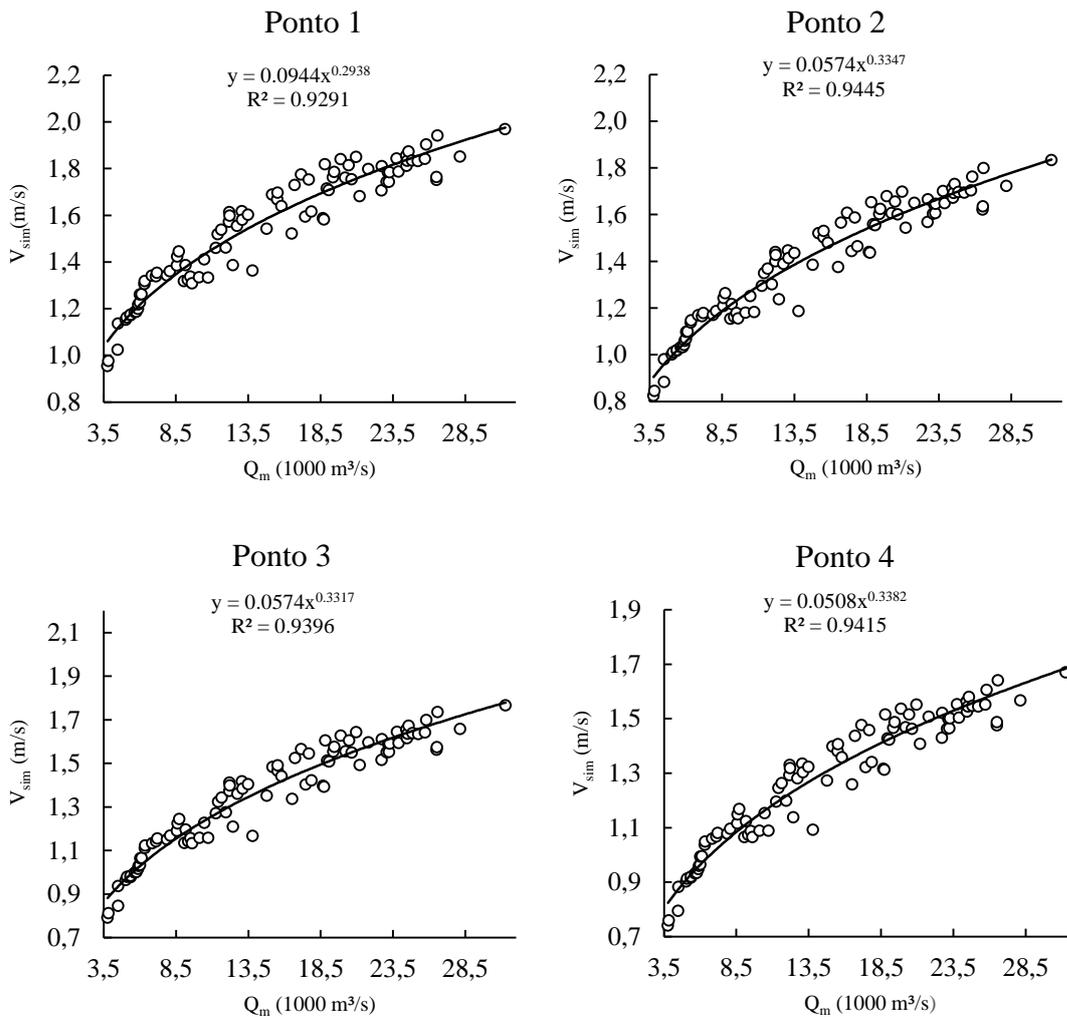
Assim, pode-se definir a rotação do projeto, livre de ocorrência de cavitação, sendo igual a 20 rpm. A eficiência do gerador e multiplicador, de acordo com dados de fabricantes encontrados no mercado é de 93,7% e 98%, respectivamente. Na Figura 5.15 são apresentadas respectivamente a potência instalada e a rotação da turbina em função da velocidade do rio.



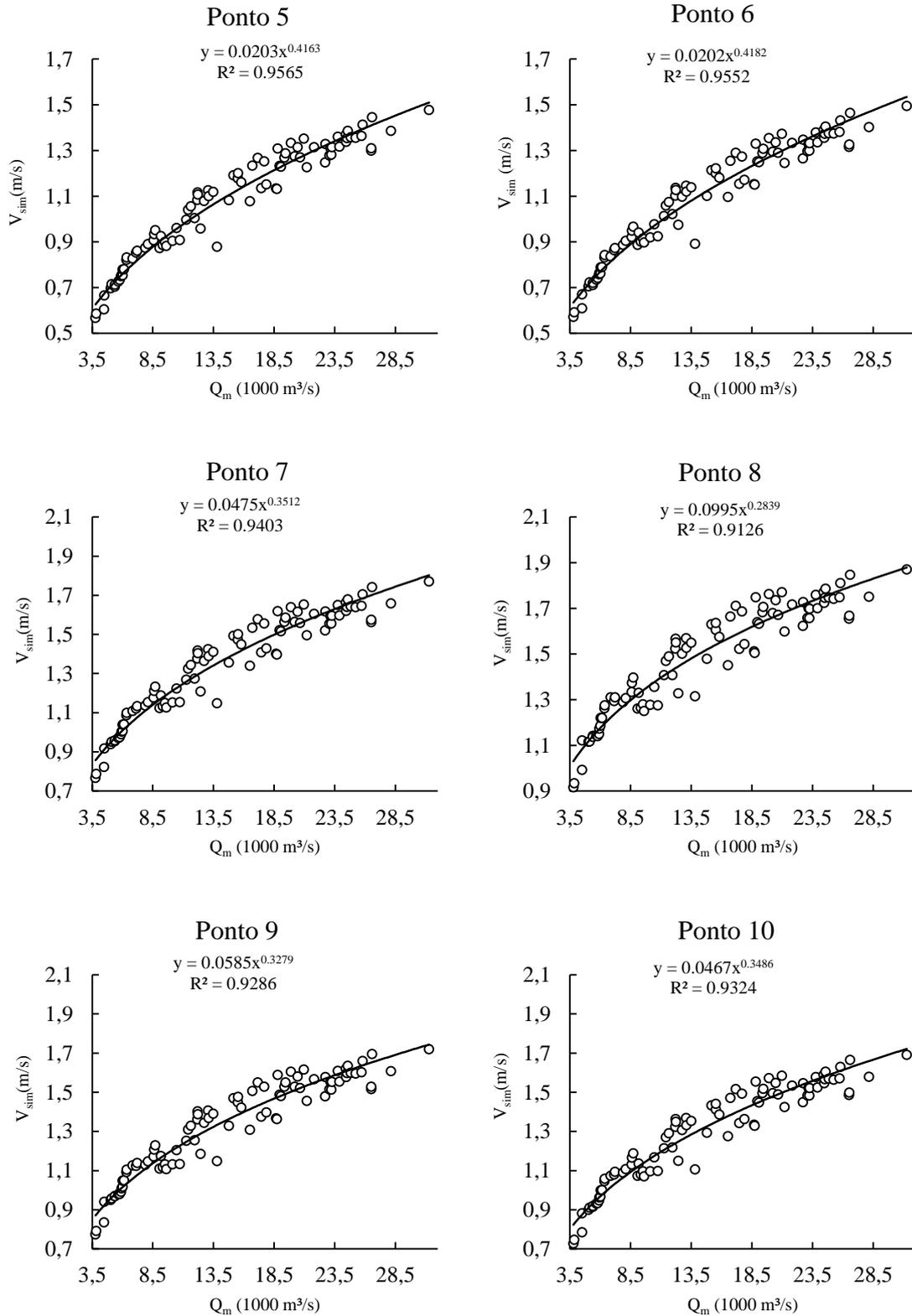
**Figura 5.15** a) Potência e b) rotação da turbina em função da velocidade do rio.

Para o cálculo da geração de energia, nos 10 pontos selecionados para a instalação da turbina projetada, é necessário o conhecimento da velocidade do escoamento para uso da correlação entre potência instalada e velocidade (Figura 5.15(a)). Assim, baseando-se na validação do modelo ilustrada na Figura 5.9, foram levantadas 10 correlações de

potência, representando a correlação entre as vazões medidas ( $Q_m$ ), e as velocidades simuladas ( $V_{sim}$ ) de cada ponto das Figura 5.17 e Figura 5.17. Observa-se que todas as correlações são superiores a 90%, explicando bem as velocidades a partir das vazões medidas. Assim, para cada ponto foram usadas as correlações visando simular a velocidade de projeto em função das vazões medidas entre os anos de 2008 e 2013.



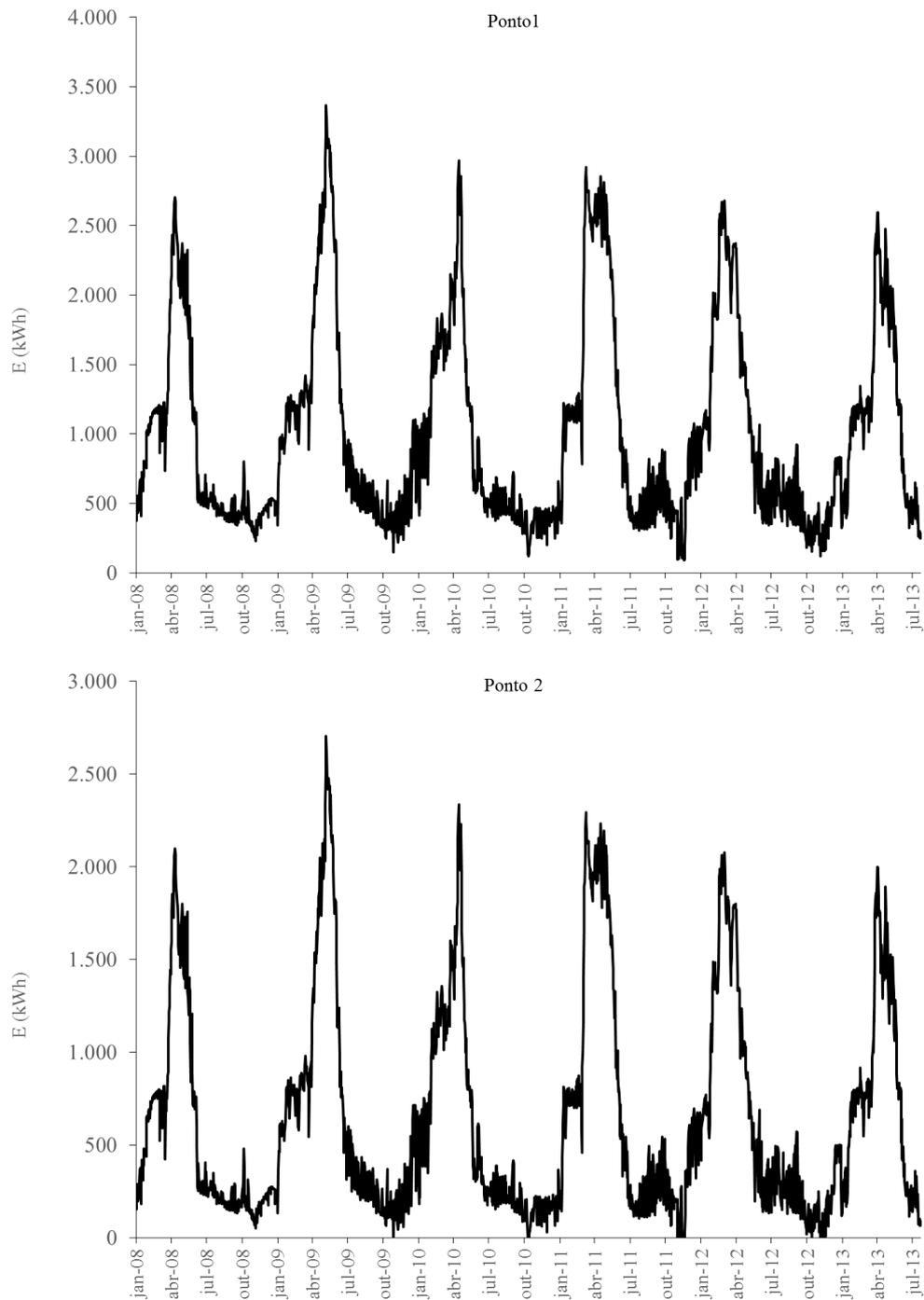
**Figura 5.16** Vazões medidas e velocidades nos pontos de 1-4 do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



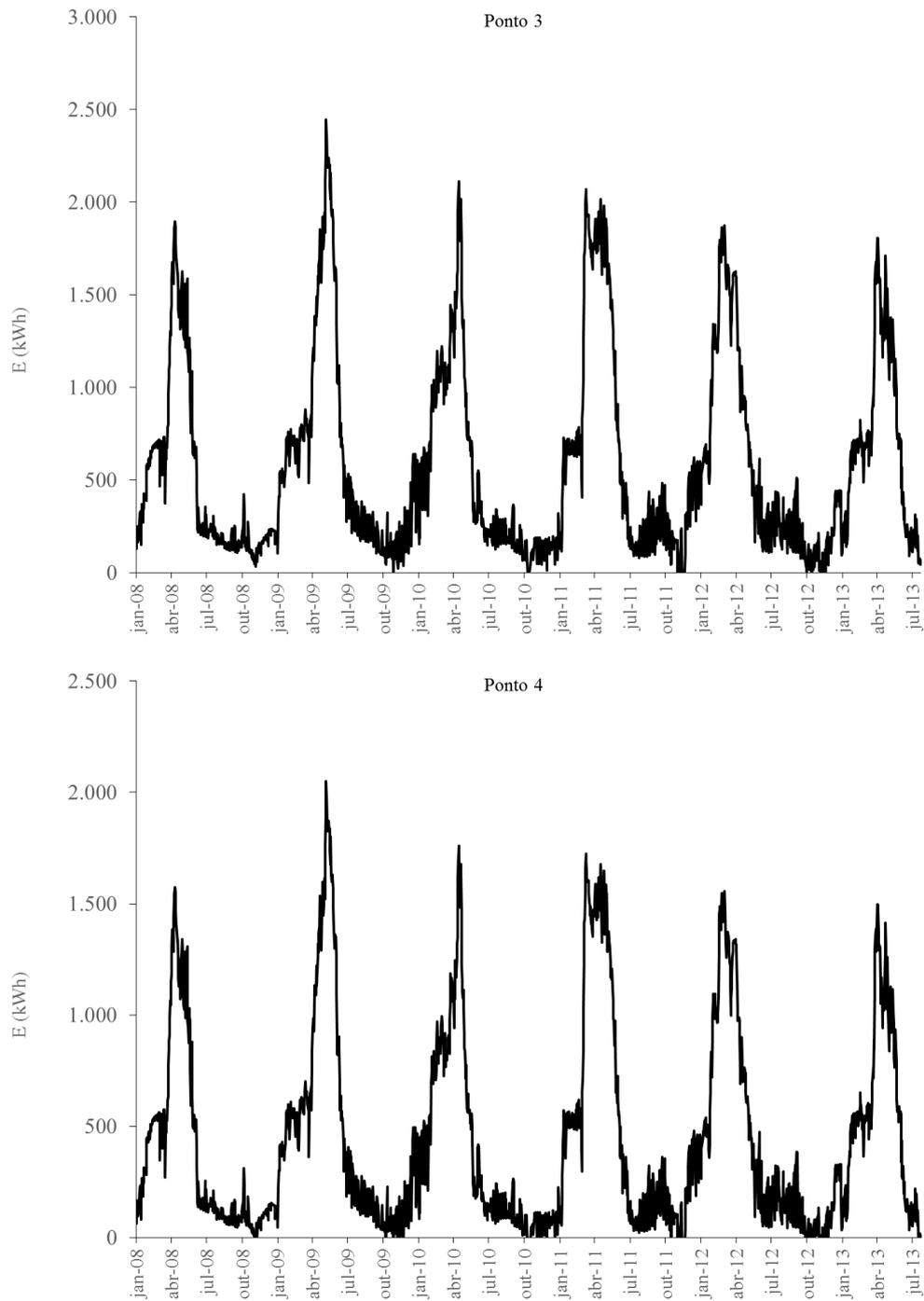
**Figura 5.17** Vazões medidas e velocidades nos pontos de 5-10 do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí.

Nas Figura 5.18 (1-2), Figura 5.19 (3-4), Figura 5.20 (5-6), Figura 5.21 (7-8), Figura 5.22 (9-10) são apresentadas a geração de energia no período analisado para os 10

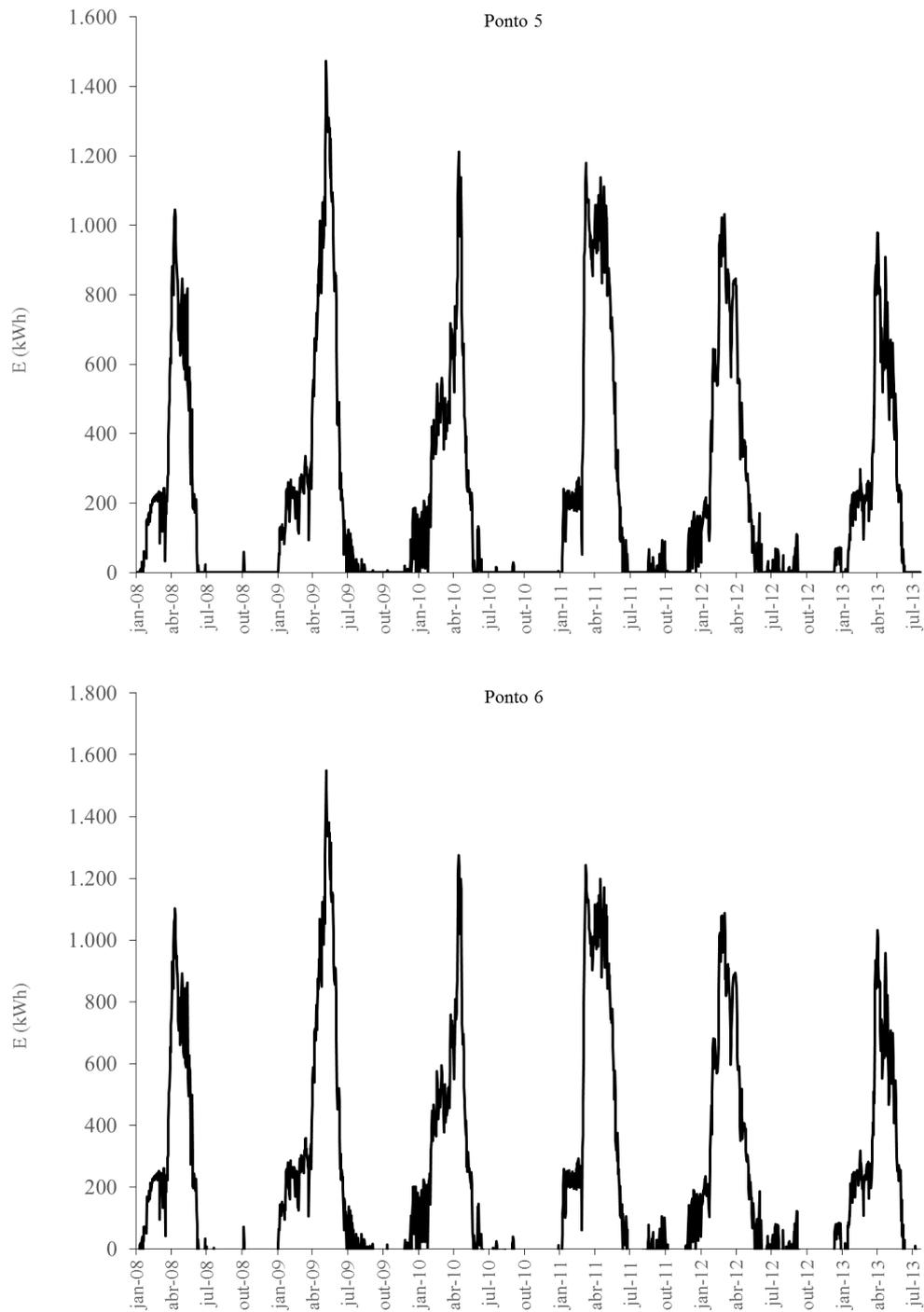
pontos selecionados. O cálculo da energia foi determinado com o auxílio da Figura 5.15. Através das Figuras mencionadas anteriormente, pode se perceber a sazonalidade das vazões (Figura 5.12) e velocidades, as quais são refletidas na quantidade de energia gerada em cada um dos 10 pontos. Foi também calculada, a energia média anual gerada pelas turbinas entre 2008 e 2013, a qual teve um valor igual a 2,04 GWh/ano.



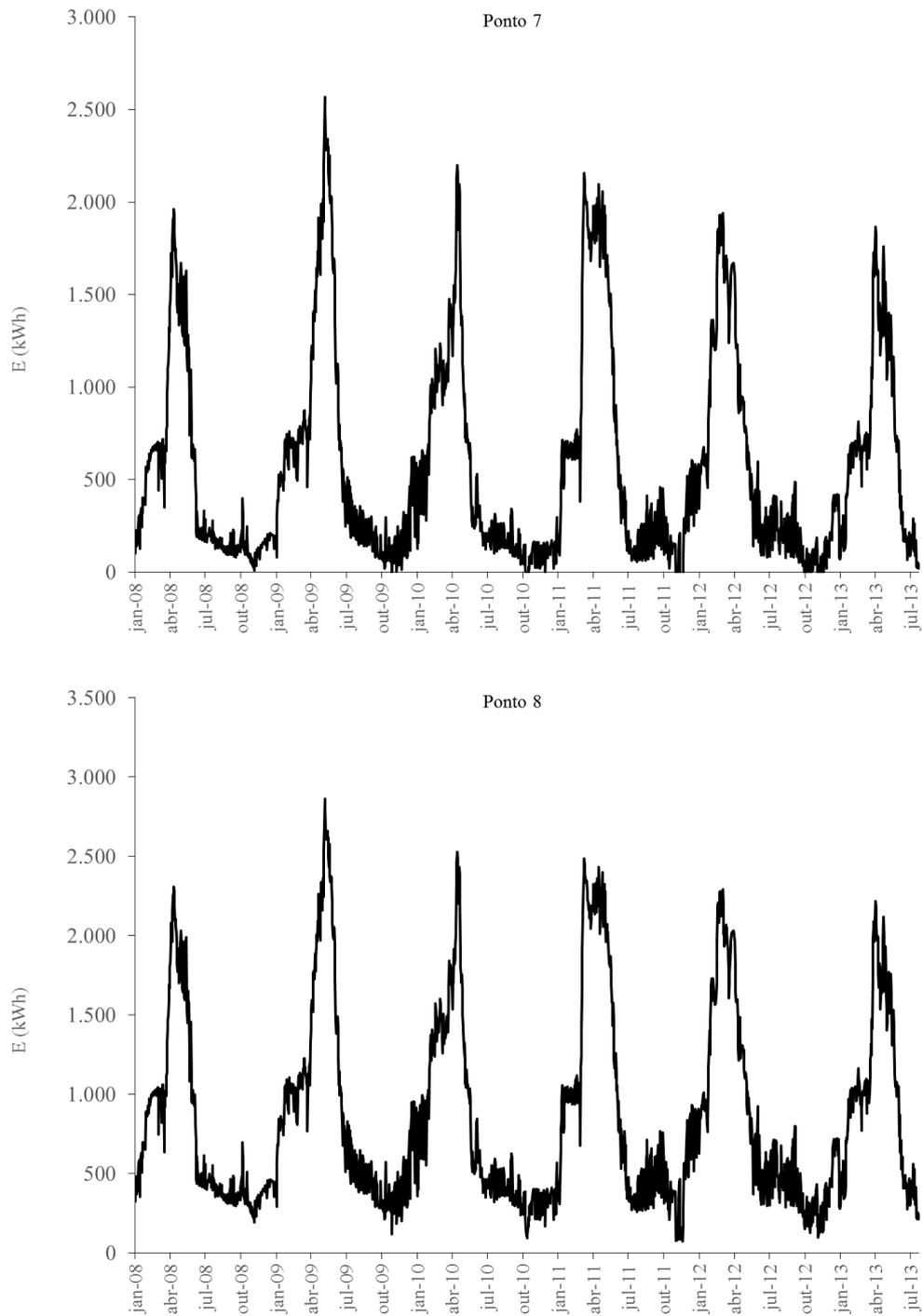
**Figura 5.18** Energia gerada pelas turbinas nos pontos 1 e 2 do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



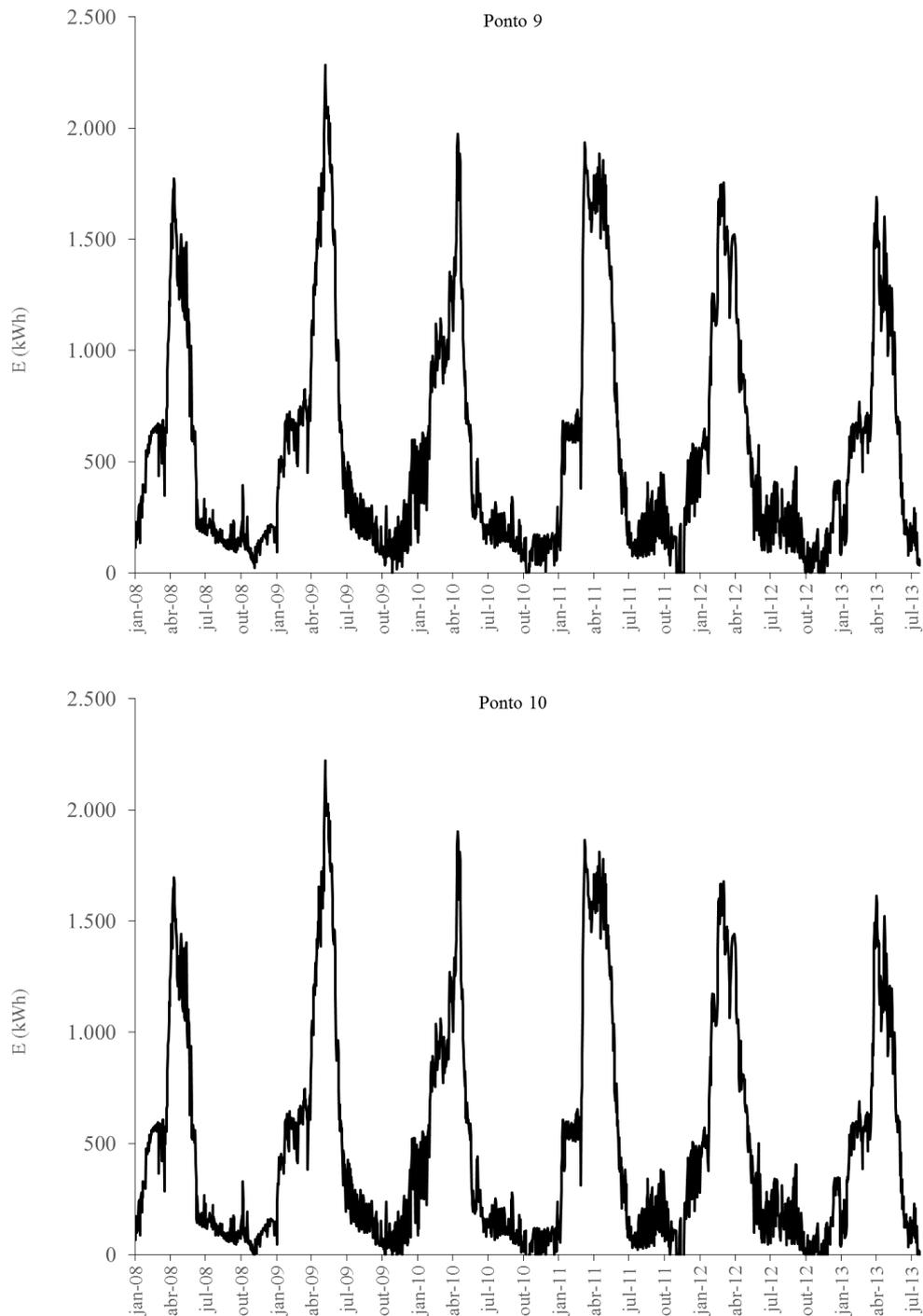
**Figura 5.19** Energia gerada pelas turbinas nos pontos 3 e 4 do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



**Figura 5.20** Energia gerada pelas turbinas nos pontos 5 (e) e 6 (f) do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



**Figura 5.21** Energia gerada pelas turbinas nos pontos 7 (g) e 8 (h) do canal de reservatório de jusante da UHE Tucuruí.



**Figura 5.22** Energia gerada pelas turbinas nos pontos 9 (i) e 10 (j) do canal do reservatório de jusante da UHE Tucuruí.

Nas Figura 5.18 até as Figura 5.22 são mostrada a energia sendo gerada pelas turbinas nos 10 pontos. Observa-se que a turbina que vai gerar maior energia é a do ponto 1 e que vai gerar uma quantidade menor é a do ponto 5. Isso se deve pela seção em que a turbina 5 encontra-se, já que as velocidades nessa região são menores.

## 5.2 ESTUDO DE CASO 2 – UHE BARIRI MÉDIO PORTE

### 5.2.1 Dados de Batimetria e Velocidade

Em Bariri foi utilizado um ADCP, ao qual foi acoplado ao Q-boat para tornar o sistema remoto (Figura 5.23). Infelizmente, por motivos técnicos foram apenas realizadas medidas de profundidade e assim, no presente estudo de caso, o modelo não foi validado por falta de dados de velocidades. Tais medidas de profundidade foram feitas apenas em um trecho do reservatório de jusante, em uma parte menor, que pode ser visualizada na Figura 5.24. O restante dos dados foi estimado a partir de uma planta da jusante de Bariri. Assim, na saída das turbinas criaram-se dados de profundidade, admitindo esta região como uma rampa, para o restante estimou-se um valor médio de profundidade, a partir de medição realizada in loco. Próximo às margens consideraram-se valores mais altos, ou seja, valores maiores que o nível de água.



**Figura 5.23** Equipe da AES Tietê medindo profundidades com ADCP no Q-boat.



**Figura 5.24** Dados de batimetria UHE Bariri.

### 5.2.2 Rugosidade de Fundo

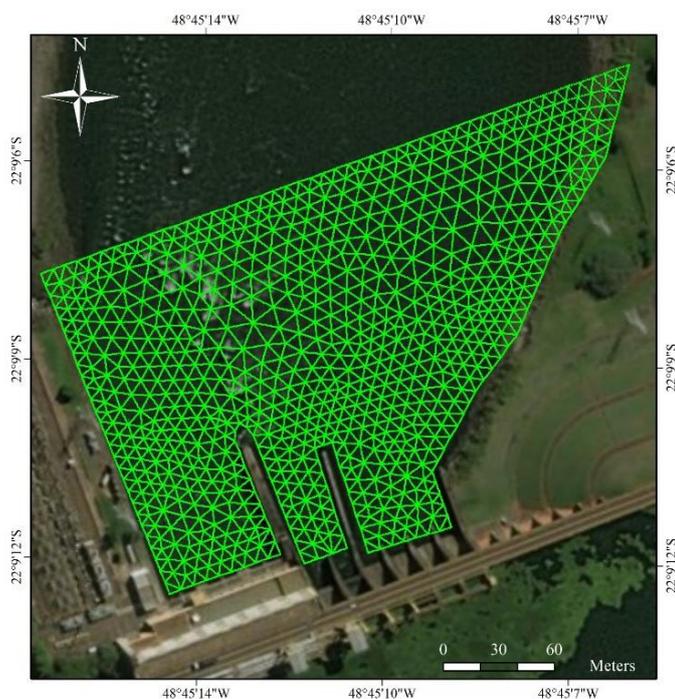
No caso de Bariri, os dados de substrato são provenientes das informações contidas em desenho técnico, no qual, para a bacia de dissipação da UHE Bariri, é citada a formação rochosa. Essa informação foi extrapolada para o restante do reservatório de jusante, sendo considerado um coeficiente de Manning igual a 0,025 (CHOW, 1959).

### 5.2.3 Condições de Contorno

Além dos dados topobatimétricos e de substratos são necessários dados de condição de contorno de vazão e nível d'água. Nesse caso, foram impostos níveis de água para as fronteiras de jusante; e vazão para as de montante. Os dados foram fornecidos pela empresa AES Tietê. Desses dados foram selecionados 34 pares coerentes como mostra (ANEXO 4).

### 5.2.4 Calibração do modelo

Com os modelos de elevação de terreno bruto, de rugosidade e as condições de contorno definidas, logo a malha hidrodinâmica (Figura 5.25), pode ser criada, permitindo testes de convergência de malhas, que culminam com a etapa de calibração do modelo hidrodinâmico. A malha utilizada no estudo possui 3244 nós e 1533 elementos triangulares.



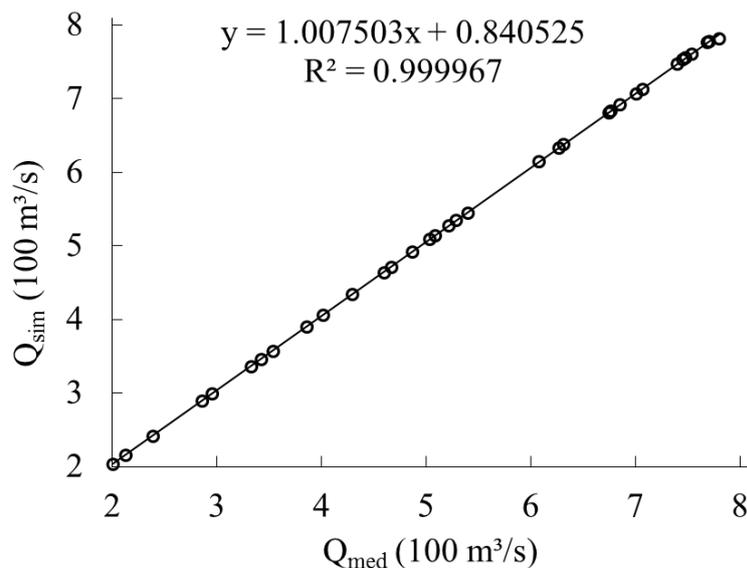
**Figura 5.25** Malha de Elementos Finitos do Modelo Hidrodinâmico Bariri.

A calibração do modelo foi estabelecida por meio da variação do coeficiente de Manning. Nesse caso, foi obtida uma boa concordância entre os valores de vazões medidas e simuladas (Figura 5.26). A partir da determinação do coeficiente de Manning, foram realizados testes de convergência de malha com vértice de 5m, 7m e 9m. A malha que melhor representou o modelo foi a de 7m (Figura 5.25) com menor tempo computacional (Tabela 5.5), sendo selecionada para todas as simulações.

**Tabela 5.5** Tabela de convergência entre o balanço de massa e as malhas.

Malha (m)	Q (medida) m <sup>3</sup> /s	Q(simulada) m/s	Erro %	Tempo Computacional
9	512	525	2,53	03 min 49 s
7	512	517	0,97	01 min 57s
5	512	505	1,36	02 min 24s

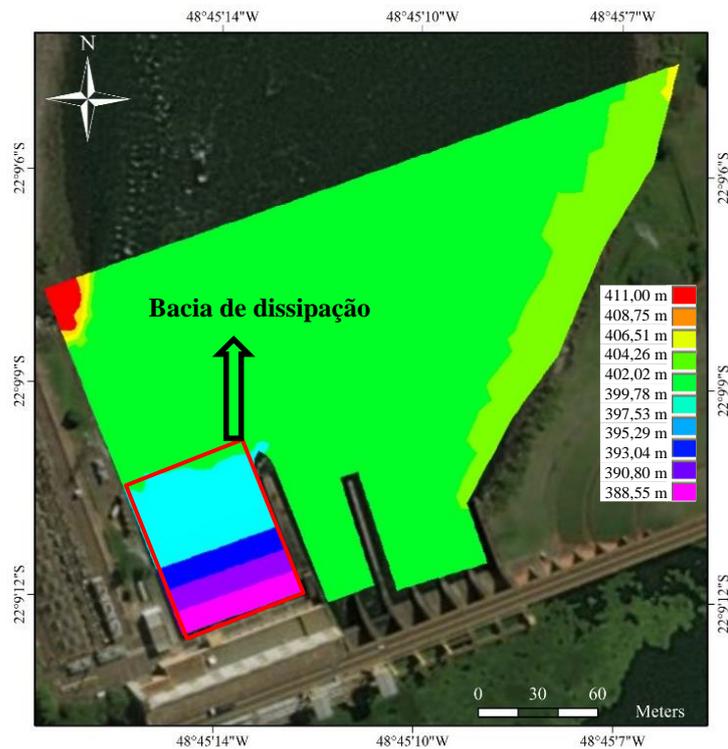
Na aferição do modelo hidrodinâmico, foi aplicada a técnica de regressão linear entre as vazões simuladas e medidas. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ), é um indicador de precisão da modelagem, que é comumente usado em hidráulica e hidrologia (GUPA *et al.*, 2009; VIS *et al.*, 2015). O  $R^2$  mais próximo de 1 demonstra um bom ajuste entre vazões observadas e simuladas. A regressão mostrou uma boa correlação com um valor de  $R^2$  igual a 0,99.



**Figura 5.26** Correlação entre as vazões medidas e simuladas pelo modelo UHE Bariri.

### 5.2.5 Modelo de Elevação do Terreno

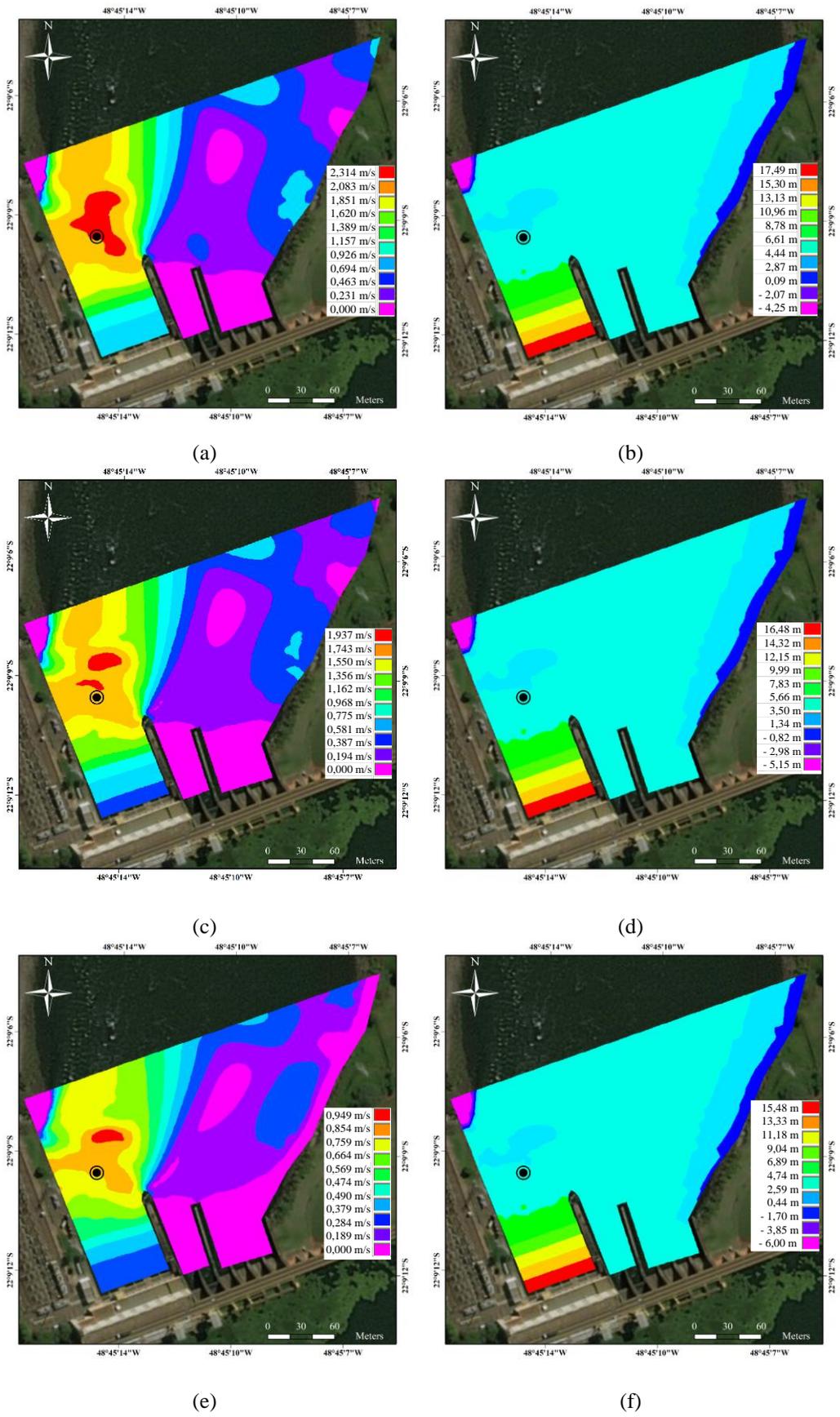
Na Figura 5.27 observam-se as isosuperfícies de elevação, as quais demonstram a geometria da bacia de dissipação, ou seja, uma rampa na qual se busca dissipar a energia do escoamento pós- passagem pelas turbinas, evitando com isso a erosão na calha do rio. No restante do domínio de simulação, o modelo de elevação do terreno do reservatório de jusante da UHE Bariri, mostra variações de topografia entre 400 e 404 m, chegando até 411 m em sua extremidade noroeste.



**Figura 5.27** Modelo de Elevação do Terreno UHE Bariri.

### 5.2.6 Seleção do Ponto de Instalação da Turbina Hidrocinética

Na Figura 5.28 são mostradas as isosuperfícies de velocidade e profundidades para a vazão máxima ( $Q_{\text{máx}} = 770 \text{ m}^3/\text{s}$ ), média ( $Q_{\text{méd}} = 512 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e mínima ( $Q_{\text{mín}} = 191 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A determinação do possível local para a instalação da central hidrocinética em Bariri baseou-se nas maiores velocidades simuladas, já que a densidade energética Equação (3.10), que determina a velocidade de projeto, varia com o cubo da velocidade. Assim, determinou-se a localização de um ponto após a bacia de dissipação (Figura 5.28).



(a) (b) (c) (d) (e) (f)

**Figura 5.28** Isosuperfícies de velocidade e de profundidade para vazão máxima, média e mínima; e o ponto para instalação da central hidrocínética UHE Bariri.

Na Tabela 5.6 são apresentadas as velocidades, profundidades e coordenadas (projeção WGS 1984 22S) desse ponto para as vazões mínima, média e máxima.

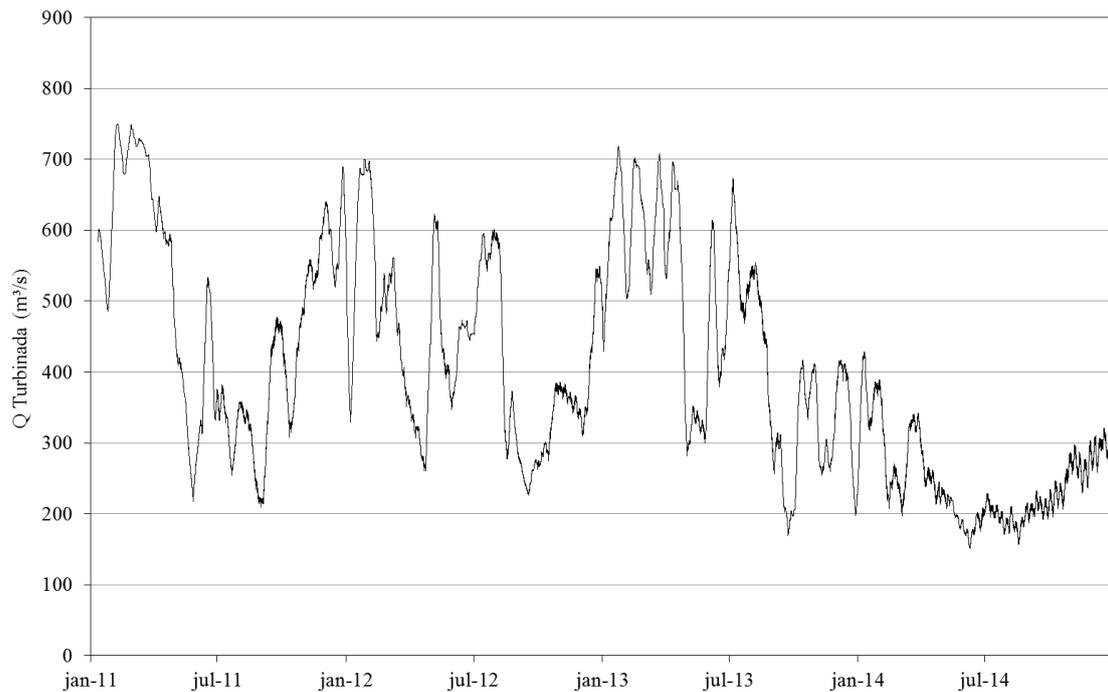
**Tabela 5.6** Informações de 1 ponto definido UHE Bariri.

Ponto	X (m)	Y (m)	Q <sub>máx</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>méd</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>mín</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
			V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)
1	650908.80	9581266.87	1,97	20,71	1,54	16,63	0,95	11,93

Na Figura 5.28, são mostradas as isosuperfícies de velocidades para Q<sub>mín</sub>, Q<sub>méd</sub> e Q<sub>máx</sub>. Após a rampa, encontram-se as maiores velocidades e profundidades, favorecendo a instalação de turbinas hidrocínéticas. No restante do domínio de simulação, o escoamento é inerte. Isso se deve ao vertedouro ter ficado fechado durante o período de dados considerado no estudo, causado por um período de forte estiagem na região sudeste do Brasil, não havendo ocorrência de vazão vertida.

### 5.2.7 Determinação da Velocidade e Rotação de Projeto, Diâmetro do Rotor, Potência Instalada, Energia Gerada e Parâmetros de Projeto

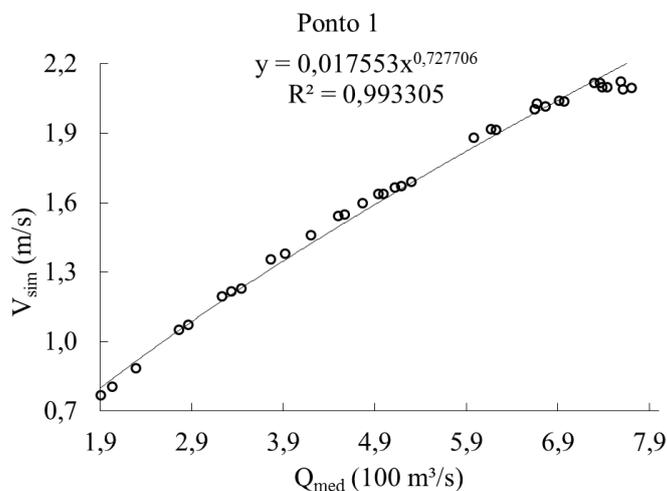
A velocidade de projeto foi definida a partir da determinação da densidade energética Equação (3.10) do local selecionado para instalação da turbina, considerando as séries históricas de vazão e nível de água da UHE Bariri no período de 2011 a 2014. Na Figura 5.29 é mostrada a vazão turbinada, observando a sazonalidade da região em questão. Em Bariri foram consideradas apenas as vazões turbinadas, pois no ponto selecionado para instalação da turbina hidrocínética há predomínio de correntezas originadas somente pela descarga da vazão turbinada (Figura 5.29).



**Figura 5.29** Séries históricas de Vazão –UHE Bariri-2011-2014.

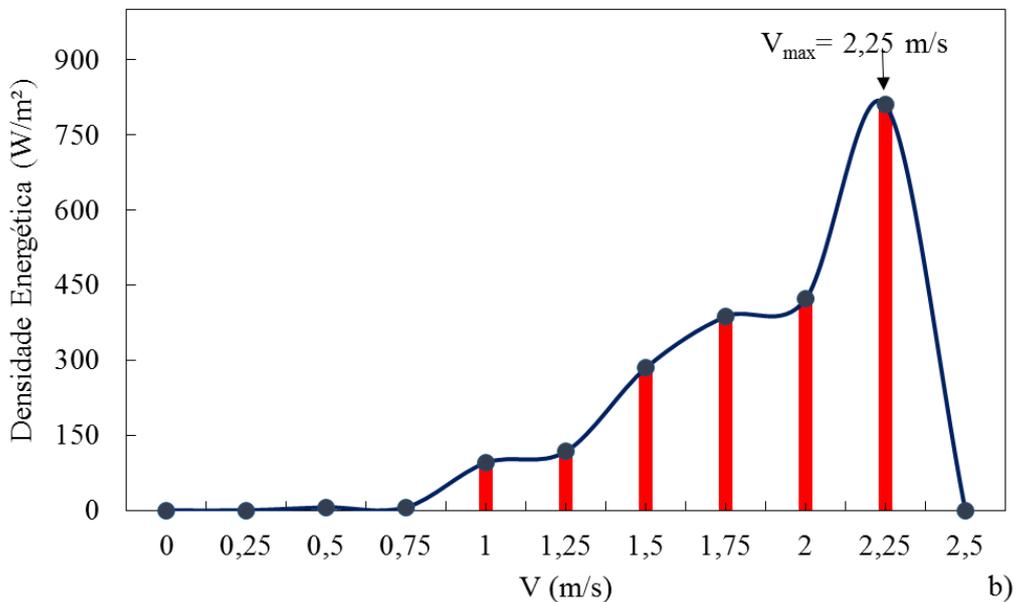
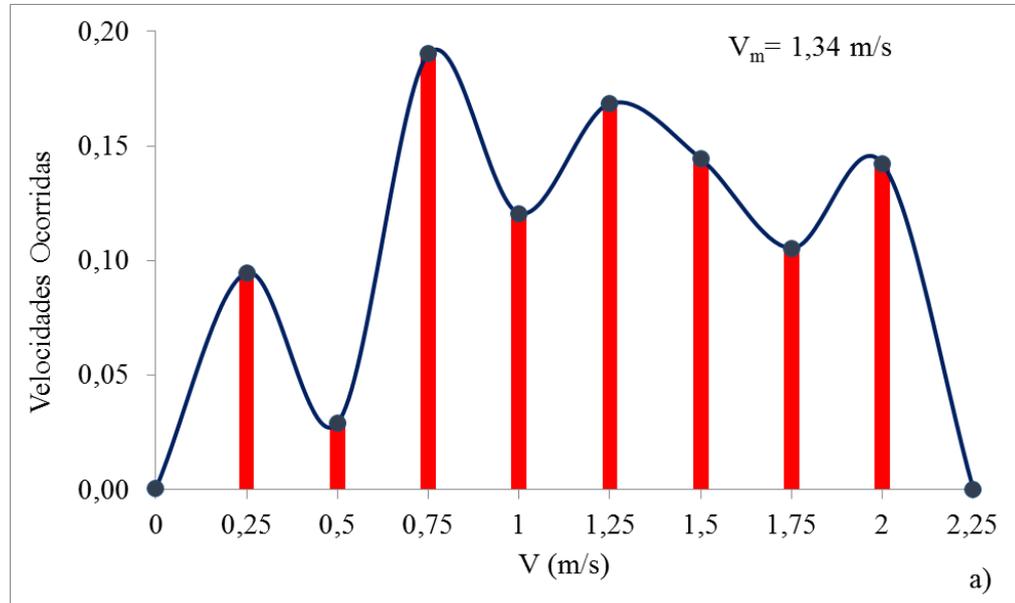
Para se determinar a velocidade de projeto, através da curva de densidade energética, que é função da frequência de ocorrência da velocidade no ponto selecionado para instalação da turbina hidrocínética, foi elaborada uma regressão do tipo potência para instalação da turbina hidrocínética, foi elaborada uma regressão do tipo potência (Figura 5.30) para determinação das velocidades em função das vazões medidas entre 2001 e 2014. A Equação (5.2) representa a regressão com um  $R^2$  igual a 0,993305, demonstrando uma excelente correlação entre as velocidades simuladas e as vazões medidas.

$$V_{sim} = 0.017553Q_{med}^{0.727706} \quad (5.2)$$



**Figura 5.30** Vazões medidas e velocidades simuladas no ponto selecionado para instalação da turbina no reservatório de jusante UHE Bariri.

Assim, na Figura 5.31 a é mostrada a frequência de ocorrência da velocidade de correnteza da água residual à jusante da barragem da UHE Bariri; e na Figura 5.31 b a curva de densidade energética determinada a partir da Equação (3.10).

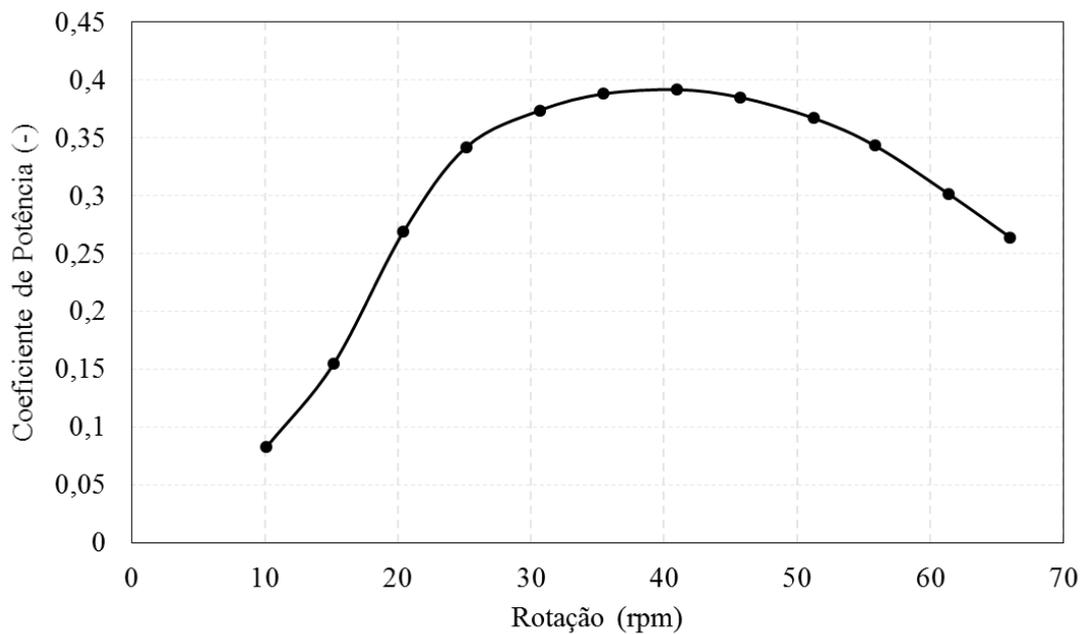


**Figura 5.31** a) Frequência de ocorrência da velocidade do rio. b) Densidade energética.

Nesse caso, observa-se que a maior ocorrência corresponde à velocidade de 1,0 m/s (com 19% de ocorrência ao longo de todo período de medição). As velocidades mínimas, médias e máximas são respectivamente 0,0, 1,34 e 2,25 m/s. Velocidades nulas são observadas devido a períodos em que as turbinas da UHE param de funcionar para

manutenção. Na Figura 5.31b é apresentada densidade energética do local selecionado para instalação da turbina hidrocinética. Observa-se que o pico mais alto de energia ocorre para a velocidade de 2,25 m/s, sendo essa a velocidade de projeto.

Considerando a profundidade do rio Tietê no ponto selecionado para instalação da turbina, definiu-se o diâmetro do rotor sendo igual a 2,1 m, com o conhecimento da profundidade mínima determinou-se o diâmetro, com isso a turbina pode trabalhar tanto no período de cheia quanto na estiagem, evitando assim que a mesma fique inoperante. Assim, com a velocidade de projeto e o diâmetro do rotor, foi analisada a variação do coeficiente de potência em função da rotação do rotor dimensionado (Figura 5.32). Na Tabela 5.7 são apresentados outros parâmetros de projeto.



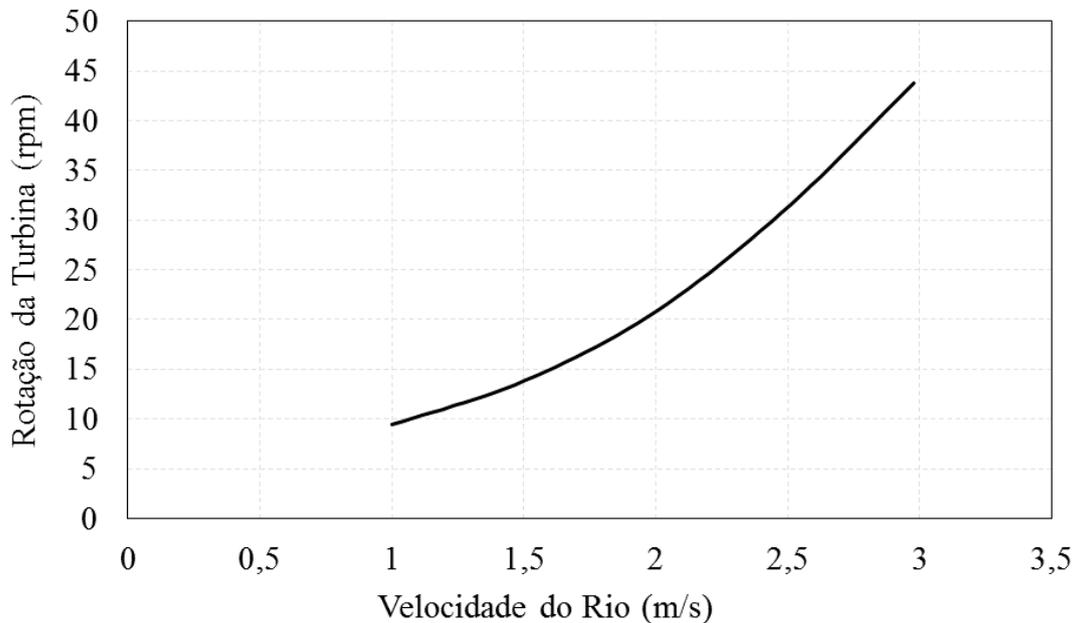
**Figura 5.32** Coeficiente de potência em função da rotação da turbina.

**Tabela 5.7** Dados do rotor da turbina.

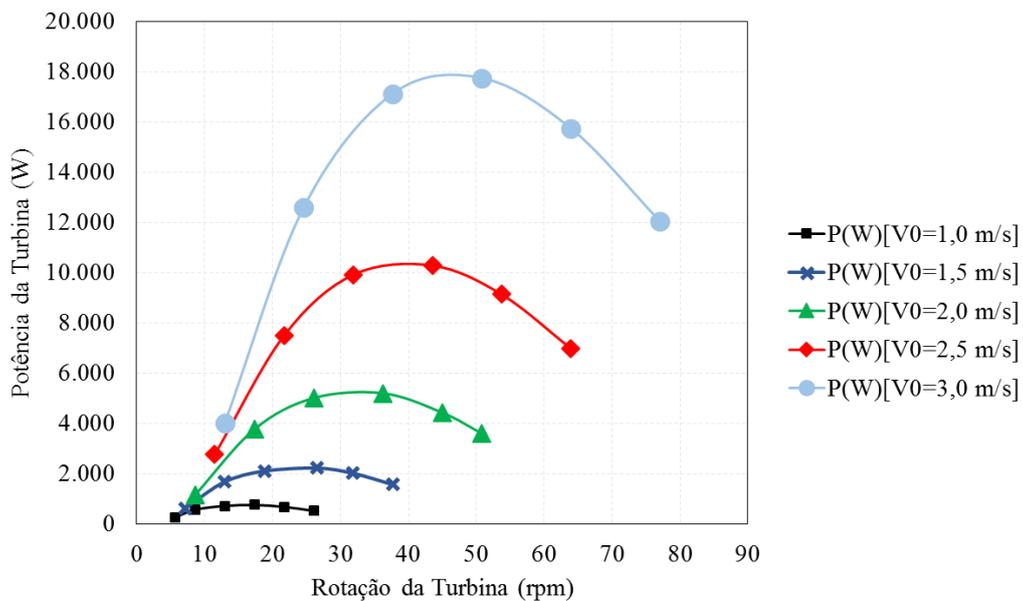
Parâmetro	Especificação
Diâmetro do rotor (m)	2,2
Diâmetro do cubo do rotor (m)	0,30
Número de pás	4,00
Perfil da pá	NACA 653 – 618

Assim, pode-se definir a rotação de projeto, livre de ocorrência de cavitação, sendo igual a 40 rpm. A eficiência do gerador e multiplicador, de acordo com dados de

fabricantes encontrados no mercado é de 90% e 95%, respectivamente. Na Figura 5.33 é apresentada a rotação da turbina em função da velocidade do rio e na Figura 5.34 são apresentadas as curvas de potência instalada em função da a rotação da turbina e da velocidade do rio.



**Figura 5.33** Rotação da turbina em função da velocidade do rio.



**Figura 5.34** Potência da turbina em função da rotação da turbina e da velocidade do rio.

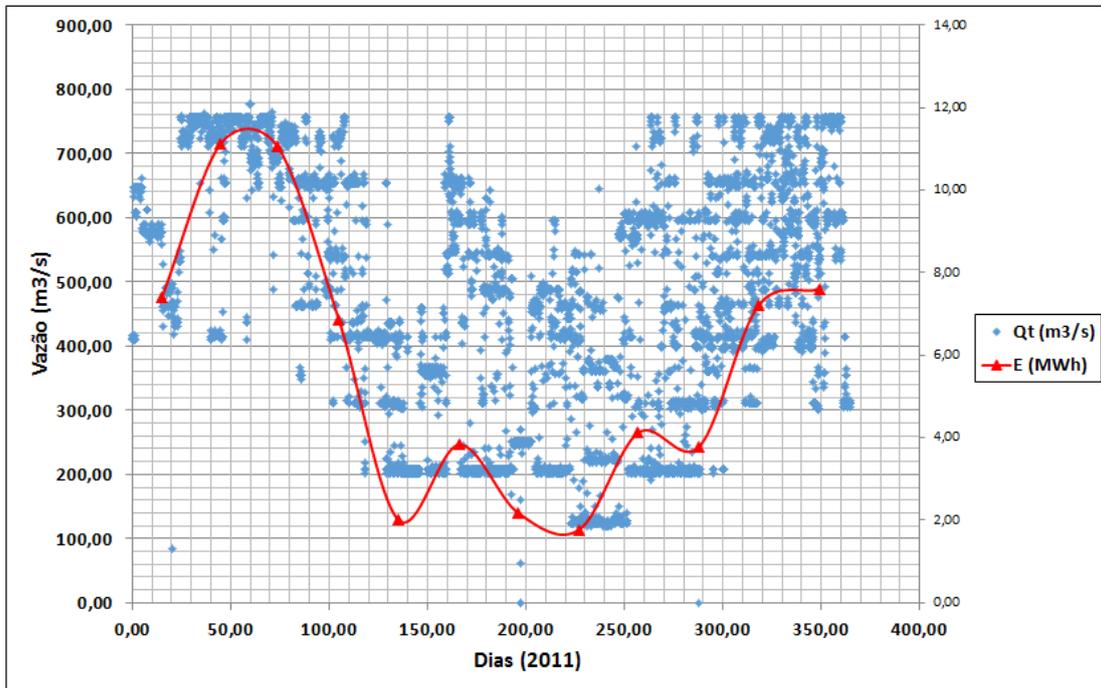
Assim, a Tabela 5.8 apresenta a energia gerada para os anos de 2011-2014 para o sistema composto por 3 turbinas. Este cálculo leva em considerações as condições não

nominais da turbina, através da curva do coeficiente de potência do rotor e das condições hidrodinâmicas do local. Um detalhamento da evolução da energia gerada por mês e para o ano de 2011 é apresentada na

Figura 5.35.

**Tabela 5.8** Geração anual do sistema para os anos de 2011-2014.

Ano	Energia Gerada (MWh)
2011	68,9
2012	51,3
2013	62,0
2014	18,0



**Figura 5.35** Vazão e geração mensal de energia para o ano de 2011.

## CAPÍTULO 6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

### 6.1 CONCLUSÕES

A metodologia apresentada foi capaz de demonstrar o potencial energético remanescente das UHEs Tucuruí e Bariri. Observa-se que apenas o canal principal do reservatório de jusante para o estudo de grande porte foi analisado, enquanto que para o de médio porte, a área definida é o final da bacia de dissipação, onde nestas áreas encontram-se as maiores velocidades e profundidade favoráveis para a geração de energia através de turbinas hidrocínéticas.

O modelo hidrodinâmico foi aferido para os estudos de caso das UHEs Tucuruí e Bariri, por meio da técnica de regressão linear onde o  $R^2$  próximo de 1 indica uma boa correlação entre as vazões observadas e simuladas. O modelo foi validado para UHE Tucuruí, comparando as velocidades medidas e simuladas, o modelo apresentou uma boa concordância entre as velocidades, com erro percentual mínimo de 0,83%, médio de 8,77% e o máximo de 22,00%.

Com a margem de erros dentro do limite aceitável, aplicou-se a técnica de regressão de potência entre as vazões medidas no trecho e as velocidades simuladas para o ponto, o  $R^2$  apresentou valor igual a 0,958 demonstrando que as velocidades simuladas estão bem correlacionadas com as vazões medidas.

Com o conhecimento das isosuperfícies de velocidade e profundidade para as vazões máximas, médias e mínimas, analisou-se a sazonalidade do escoamento, identificando as regiões mais favoráveis para implantação de centrais hidrocínéticas. Após a coleta dos dados necessários, foi realizada a configuração de projeto para UHE Tucuruí, sendo definida a partir da densidade energética no local onde a turbina poderá ser instalada com base na série histórica de vazões do rio, na profundidade do rio, considerados para cada ponto analisado, e também com base na tecnologia de fabricação disponível. Assim para esta análise, foi possível conceber um conjunto de 10 turbinas hidrocínéticas que gerariam 2,04 GWh/ano, o que representa um valor considerável para um recurso de energia não utilizada.

Na UHE Bariri serão realizados mais estudos com intuito de se avaliar se existe um potencial maior a ser explorado, visto que o trabalho está em fase inicial. Após novos testes e com novos dados disponíveis para análise será possível estimar a geração de energia de forma mais precisa.

A metodologia apresentada, embora seja uma ferramenta útil para o projeto de turbinas hidrocínéticas para aproveitar a energia cinética remanescente de usinas hidrelétricas, deve incluir ainda aspectos ambientais e de dimensionamento da produção energética. Pois a implantação de turbinas hidrocínéticas no reservatório de jusante de centrais hidrelétricas acarretará a diminuição da queda útil da central, gerando um problema de otimização entre os dois aproveitamentos, sendo necessário uma análise mais completa, incluindo estudos de implantação de parques hidrocínéticos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKIMOTO, H., TANAKA, K., UZAWA, K., 2013, “A conceptual study of floating axis wáter Current turbine for low-cost energy capturing from river, tide and ocean currents”, *Renewable Energy*, v. 57, pp. 283-288.

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-Brazil Estuary”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 33, pp. 79-85.

BLANCO, C. J. C., SENA, M. J. S., AMARANTE MESQUITA, A. L., FURTADO FILHO, M. D. C., SECRETAN, Y., 2013, “Hydrodynamic evaluation of a flood embankment in the Amazon estuary region- Brazil”. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers. Civil Engineering*, v. 166, pp. 49-55.

BLUNDEN, L. S., BAHAJ, A. S., 2006, “Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill Uk”, *Renewable Energy an International Journal*, v. 31, pp. 121-132.

CARBALLO, R., IGLESIAS, G., CASTRO, A., 2009, “Numerical model evaluation of tidal stream resources in the Ría de Muros (NW Spain)”, *Renewable Energy an International Journal*, v. 34, pp. 1517-1524.

CHOW, V. T., 1959, *Open Channel Hydraulics*. McGraw-Hill, New York.

CMB -*Comissão Mundial de Barragens. Estudos de Caso da Comissão Mundial de Barragens Usina Hidrelétrica de Tucuruí (Brasil)*, 2000, Relatório Final, Laboratório Interdisciplinar de Meio Ambiente. Programa de Planejamento Energético, Instituto de Pesquisa e Pós- Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ-Brasil.

DUVOY, P., TONIOLO, H. HYDROKAL., 2012, “A module for in-stream hydrokinetic resource assessment”, *Computers & Geosciences*, v. 39, pp. 171-181.

ELETRONORTE ELETROBRÁS. *Geração-Pará(a)* Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/para/>>. Acesso em 10 jul.2016.

ELETRONORTE ELETROBRÁS. *Transmissão-Tucuruí(b)*. Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/transmissao/estados/tucuruí/>>. Acesso em 09 ago.2016.

FELGUEIRAS, C.A., *Desenvolvimento de um Sistema de Modelagem Digital de Terreno para Microcomputadores*. Dissertação de Mestrado em Computação Aplicada, INPE, 1987.

FILIZOLA, N., MELO, E., ARMIJOS, E., MCGLYNN, J., 2015, *Preliminary analysis of potencial of river hydrokinetic energy technologies in the Amazon Basin*, IDB- Inter American Development Bank, IDBN -TN -891 Report.

GRE-EHN. *Grupo de Pesquisa e Estudos em Eco-hidráulica Numérica*. Disponível em: <<http://www.gre-ehn.ete.inrs.ca/H2D2>>. Acesso em 16 jun.2016.

GUNEY, M.S., KAYGUSUZ, K., 2010, “Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, pp. 2996-3004.

GUPA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., MARTINEZ, G.F., 2009, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modelling”, *Journal of Hydrology*, v. 377, pp. 80-91.

HENICHE, M.A., SECRETAN, Y., BOUDREAU, P., LECLERC, M., 2000, “A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries”, *Advances Water Resources*, v. 23, pp. 359-372.

HERVOUET, J.M., 2007, *Hydrodynamics of Free Surface Flows: Modelling with the Finite Element Method*. Chichester, John Wiley & Sons, Inc.

HOLANDA, P.S., BLANCO, C.J.C., AMARANTE MESQUITA, A.L., CUNHA, A.C., MACÊDO, E.N., SECRETAN, Y., 2013, “Hydrodynamic Modeling Downstream of Tucuruí Hydroelectric Power Plant for Analysis of Sites to Set Up of Hydrokinetic Turbines”. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Congress of Mechanical Engineering, COBEM-22<sup>nd</sup>*, ISSN 2176-5480, Ribeirão Preto, Brazil, 3-7 November.

HOLANDA, P. S.; BLANCO, C. J. C.; MESQUITA, A. L. A.; BRASIL JUNIOR, A. C. P.; FIGUEIREDO, N. M.; MACEDO, E. N.; SECRETAN, Y., 2016, “Assessment of

hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants”, *Renewable Energy*, v. 217, pp. 1203-1214, 2016.

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*, v. 48, pp. 350-357.

KIM, D., YU, K., 2010, “Uncertainty estimation of the ADCP velocity measurements from the moving vessel Method, (I) Development of the Framework”, *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 14(5), pp. 797-801.

KIM, D., MUSTE, M., 2012, “Multi-dimensional representation of river hydrodynamics using ADCP data processing software”, *Environmental Modelling & Software*, v. 38, pp. 158-166.

KHAN, M.J., BHUYAN, G., IQBAL, M.T., QUAICOE, 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*, v. 86, pp. 1823-1835.

KUMAR, D., SARKAR, S., 2016, “A review on the technology, performance, design optimization, reliability, technology performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 58, pp. 796-813.

LAGO, L.I, PONTA, F.L., CHEN, L., 2010, “Advances and trends in hydrokinetic turbine systems”, *Energy for Sustainable Development*, v. 14, pp. 287-296.

LEE, K., HO, H.-C., MARIAN, M., WUA, C. – H., 2014, “Uncertainty in open channel discharge measurements acquired with StreamPro ADCP”, *Journal of Hydrology*, v. 509, pp. 101-114.

LIU, Y., PACKKEY, D.J., 2014, “Combined – cycle hydropower systems e the potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations”, *Renewable Energy*, v. 66, pp. 228- 231.

MAGALHÃES, L. P. C., *Modelo Integrado para Simulação de Sistemas Hídricos*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2005.

MARTIN, J.L., MC CUTCHEON, S.C., 1999, *Hydrodynamics and Transport for Water Quality Modeling*. Lewis Publishers.

MILLER, V.B., LANDIS, A.E., SCHAEFER, A.L., 2011, “A benchmark for life cycle air emissions and life cycle impact assessment of hydrokinetic energy extraction using life cycle assessment”, *Renewable Energy*, v. 36, pp. 1040-1046.

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*, v. 69, pp. 393-401.

PIOLTINE, V., *Análise do Atendimento às Demandas Hídricas Superficiais no Reservatório da Usina Bariri (SP) Utilizando o Simulador Computacional Mike Basin*. Dissertação de Mestrado Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, São Paulo, SP, Brasil, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BARIRI., 2012, *Termo de Referência Plano Diretor de Drenagem Urbana do Município de Bariri*.

PUNYS, P., ADAMONYTE, I., KVARACIEJUS, A., MARTINAITIS, E., VYCIENE, G., KASIULIS, E., 2015, “Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 50, pp. 643-652.

RAMIREZ, M. R., CUERVO, F.I., RICO, C.A.M., 2016, “Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: A case study”, *Renewable Energy*, v. 99, pp.136-147.

RENNÓ, C.D., SOARES, J.V., 2000, *Modelos hidrológicos para gestão ambiental*. São José dos Campos: INPE, p. 60.

RIGLIN, J., DASKIRAN, C., JONAS, J., SCHLEICHER, W. C., OZTEKIN, A., 2016, “Hydrokinetic turbine array characteristics for river applications and spatially restricted flows”, *Renewable Energy*, v. 97, pp. 274-283.

RODI, W., 1993, *Turbulence models and their application in hydraulics: a state of the art review*. 3<sup>a</sup> ed. Balkema, Taylor & Francis.

ROSMAN, P.C.C., MASCARENHAS, F.C.B., MIGUEZ, M.G., 2001, *Um Sistema Computational de Hidrodinâmica Ambiental*. Métodos Numéricos em Recursos Hídricos 5.1ed. Rio de Janeiro, RJ, Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

SAINT-VENANT, A.J.C., 1871, “Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l’introduction des marées dans leur lit”, *C. R. Acad. Sc. Paris*, v. 73, pp. 147-154.

SILVA, P.A.S.F., SHINOMIYA, L.D., OLIVEIRA, T.F., VAZ, J.R.P., AMARANTE MESQUITA, A.L., BRASIL JUNIOR., A.C.P., 2017, “Analysis of cavitation for the optimized design of hydrokinetic turbines using BEM”, *Applied Energy*, v.185, pp.1281-1291.

SECRETAN, Y., LECLERC, M., DUSCHESNE, S., HENICHE, M., 2001, “Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle”, *Revue des Sciences de l’eau*, v. 14, pp. 187-212.

SECRETAN, Y., LECLERC, M., 1998, “Modeleur a 2D hydrodynamic GIS and simulation software”. In: *Proceedings of the Hydroinformatics-98*, pp 1-18, Copenhagen, Denmark.

SECRETAN, Y., ROY, Y., GRANGER Y., LECLERC, M., 2000, . *Modeleur 1.0a07 – Guide d’utilisation*. Rapport R482-G3F, INRS-EAU, Québec, CA.

SIMÕES, M.G., *Modeladores Digitais de Terreno em Sistemas de Informações Geográficas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 1993.

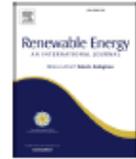
SOUZA, F.M., OLIVEIRA, T.F., BRASIL JUNIOR, A. C.P., 2006, “Estudo experimental de um modelo reduzido de turbina hidrocínética”. Simpósio de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 16º POSMEC, PM160067, Uberlândia, Brasil, 11-13 Dezembro.

VAN ELS, R.H., BRASIL JUNIOR, A.C.P., 2015, “The Brazilian experience with hydrokinetic turbines”. In: 7<sup>th</sup> Internacional Conference on Applied Energy ICAE, doi: 10.1016/j.egypro.2015.07.328, Abu Dhabi, United Arab Emirates, March 28-31.

VIS, M., KNIGHT, R., POOL, S., WOLFE, W., SEIBERT, J., 2015, “Model calibration for estimating ecological flow characteristics”, *Water*, v.7, pp. 2358-2381.

## **ANEXOS**

**ANEXO 1 - ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA RENEWABLE ENERGY 2016**



## Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants



Patrícia da Silva Holanda <sup>a</sup>, Claudio José Cavalcante Blanco <sup>b, \*</sup>,  
 André Luiz Amarante Mesquita <sup>c</sup>, Antônio César Pinho Brasil Junior <sup>d</sup>,  
 Nelio Moura de Figueiredo <sup>e</sup>, Emanuel Negrão Macêdo <sup>f</sup>, Yves Secretan <sup>g</sup>

<sup>a</sup> Natural Resources Engineering PRODERNA/ITEC/UFPA, Rua Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>b</sup> Faculty of Sanitary and Environmental Engineering IAESA/ITEC/UFPA, Rua Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>c</sup> Faculty of Mechanical Engineering FEM/ITEC/UFPA, Rua Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>d</sup> Faculty of Technology of Mechanical Engineering/UnB, Campus Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF, Brazil

<sup>e</sup> Faculty of Naval Engineering HENA/ITEC/UFPA, Rua Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>f</sup> Faculty of Chemical Engineering FEQ/ITEC/UFPA, Rua Augusto Correa, 01, CEP 66075-110, Belém, PA, Brazil

<sup>g</sup> INRS-EIE -Université du Québec, 490 Rue de la Couronne, Québec, Québec, G1K 9A9, Canada

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 1 April 2016

Received in revised form

19 September 2016

Accepted 5 October 2016

Available online 6 October 2016

#### Keywords:

Remaining potential of hydropower plants

Hydrokinetic turbines

Hydrodynamic modelling

Tucuruí Dam

### ABSTRACT

Maximizing the performance of hydropower plants by taking advantage of the remaining energy downstream of dams via the installation of hydrokinetic turbines is feasible. In these cases, the design of the rotor diameter and velocity are fundamental and depend on the depth and velocity of the river, respectively. In this study, the Saint-Venant model was applied and calibrated by linear regression of measured and simulated flow rates, which resulted in a correlation of 0.99. The validation was performed using measured velocities that are comparable to the simulated velocities. A power curve was generated for the measured flow rates and simulated velocities and obtained a correlation of 0.96. The curve was used to estimate the velocity, calculate the energy density, and define a design velocity of 2.35 m/s. Ten points in the study area were selected for the turbine locations, and the velocities were determined using the power curve for the measured flow rates and simulated velocities. The rotor design was performed using the blade element method (BEM), and a rotor diameter of 10 m was defined. The 10 turbines can generate 2.04 GWh/year of electricity. The results demonstrate the potential for utilising the remaining energy of hydroelectric plants.

© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

### 1. Introduction

The exploration of energy currents, which is commonly referred to as hydrokinetic energy, has been a highly investigated alternative method for generating electricity using the potential energy of rivers and oceans (Khan et al. [1], Guney and Kaygusuz [2], Kumar and Sakar [3]). The use of the remaining energy in the hydrokinetic potential downstream of hydropower plants in rivers was analysed by Liu and Packey [4]. In all of its applications, the exploitation of hydrokinetic energy has been found to be an energy conversion

process with a low environmental impact that could increase the energy potential of countries, principally developing countries, which will require energy to overcome the challenges of development.

In Brazil, water resources are crucial in economic planning. The country has a vast and dense hydrographic network, including dams for hydroelectric power production. The UHE Tucuruí plant is a large-scale hydroelectric power plant that is located in the state of Pará on the Tocantins River. It is the largest Brazilian power plant because the Itaipu plant is bi-national (Brazil-Paraguay). Thus, the objectives of this study are to apply river hydrodynamic modelling to estimate the velocities and depths of rivers for the implantation of central hydrokinetic projects downstream of large hydroelectric power plants, estimate the hydrokinetic potential of sites, and contribute to the understanding of the power generation potential of this low impact method. The results will allow the generation

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [pholanda@ufpa.br](mailto:pholanda@ufpa.br) (P.S. Holanda), [blanco@ufpa.br](mailto:blanco@ufpa.br) (C.J.C. Blanco), [andream@ufpa.br](mailto:andream@ufpa.br) (A.L.A. Mesquita), [brasiljr@unb.br](mailto:brasiljr@unb.br) (A.C.P. Brasil Junior), [nelio@ufpa.br](mailto:nelio@ufpa.br) (N.M. de Figueiredo), [enegrão@ufpa.br](mailto:enegrão@ufpa.br) (E.N. Macêdo), [yves.secretan@ete.inrs.ca](mailto:yves.secretan@ete.inrs.ca) (Y. Secretan).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.10.011>

0960-1481/© 2016 Elsevier Ltd. All rights reserved.

potential of a hydroelectric project that has already affected the environment to be maximized, which will minimize the project's previous impact. For hydrokinetic technology and in the case in this study, knowledge of the velocities, depths, and relief of the riverbed is needed to estimate the power generation potential, which depends on the velocity and the area available for the installation of turbines with the largest possible diameters for increased power generation.

In this study, the flow pattern was modelled to determine where hydrokinetic turbines could be installed to utilize the remaining potential of the UHE Tucuruí plant in the Amazon, Brazil. The evaluations of these sites focused on the velocities and depths because higher velocities and greater depths allow the use of larger rotors, which results in increased power generation. Studies by Barros et al. [5], Blanco et al. [6] and Holanda et al. [7] corroborated the efficiency of the H2D2 software [8] and the velocities and depths of the rivers in the study area. H2D2 is a type of two-dimensional horizontal (2DH) model that can be used to solve the equations of the Saint-Venant model via the finite element method.

## 2. Literature review

Hydrodynamic models have been used extensively in studies of river hydraulics and water circulation in lakes, ponds, bays, estuaries, and hydroelectric power plant reservoirs. These models are often used to explain variations in the behaviour of the velocity field and depths as functions of space and time. For example, Blunden and Bahaj [9] used a numerical finite element model, the 2DH model, to estimate the energy resources of tidal currents on the small peninsula of Portland Bill Dorset, which is located on the southern coast of the United Kingdom. This location has the potential to be exploited due to the high velocities of the tidal currents. The model was validated using the elevations and tidal currents and was able to reasonably reproduce the characteristics of the tidal currents. The results were used to produce a time series of the current velocities during the simulation period and can be used in future studies to optimize the locations of turbines at the site.

Carballo et al. [10] evaluated a numerical model of tidal energy flow in the Ría de Muros, which is an estuary on the northwest coast of Spain with peak tidal currents that exceed 2 m/s. The objective of the study was to quantify the tidal current resources and to assess the feasibility of a tidal power plant. The Delft 3D-FLOW model, which was developed by Delft Hydraulics, was used to solve the Navier-Stokes and transport equations and implement the results as a 3D or 2DH model; in this case, the 2DH model was used. The model was validated using the velocities measured at one point with an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP). A good correlation between the measured and simulated velocities was obtained by considering the amplitude variations of the tides, which demonstrates their applicability in estimating the energy potential of the study area.

Lago et al. [11] studied the recent advances and trends in the development of hydrokinetic turbines. They found that hydrokinetic turbine technology, which uses natural currents (rivers, estuaries, tides, ocean currents, and channels), is more promising than systems using dams. They explained that the current trend includes the use of near-surface horizontal and free flow turbines. Furthermore, non-turbine systems that utilize fluid vibrations will soon enter the commercial production phase. The authors believed that the main challenge is not to extract more energy per unit area but to produce energy in a more economical and sustainable manner.

Iglesias et al. [12] developed a Tidal Stream Exploitability (TSE)

index for the installation of tidal power plants in estuarine regions using the estuary Ría Ortigueira in northwest Spain as a case study. The TSE combines velocity and depth data and identifies areas with the greatest potential for the installation of turbines using the index. The depths and velocities were determined with the Delft 3D-FLOW model, which was validated using velocity measurements. However, this evaluation could be altered by technological (Ramos and Iglesias [13]) or economic aspects (Vazquez and Iglesias [14]).

To reduce the cost of the floating structure, Akimoto et al. [15] proposed a new configuration for a vertical-axis hydrokinetic turbine for capturing energy from river, tide and ocean currents. In this configuration, the turbine shaft is inclined as a net result of the balance of hydrodynamic loads, buoyancy and weight, which minimizes the supporting structures.

Considering river applications, Miler et al. [16] carried out a life cycle assessment to compare the environmental impacts of hydrokinetic turbines with those of other power generation systems and concluded that they are similar to small hydropower systems. Duvoyn and Toniolo [17] developed the HydroKal hydrokinetic calculator to estimate the hydrokinetic energy in rivers. The model was developed by the National Center for Computational Hydroscience and Engineering at the University of Mississippi and is being applied to the Tanana River near Nenana, Alaska, USA. HydroKal was developed in Fortran 90 and contains an external module that processes the files that result from the application of CCHE2D, which is a 2DH-type model. The output of CCHE2D consists of velocities, which are used by HydroKal to calculate the hydrokinetic power density in a river while considering the efficiency of the turbine. The efficiency factor aids users in determining how much energy can be extracted from a hydrokinetic plant.

Filizola et al. [18] performed a study of the hydrokinetic potential of the Brazilian Amazon River Basin using the limited existing current speed data. They developed case studies for 8 of the 54 investigated sites, which indicated that Brazil, Peru and Ecuador have variable but generally very favourable hydrological conditions for river hydrokinetic energy.

Using a computational fluid dynamics (CFD) code, Riglin et al. [19] conducted simulations of a hydrokinetic turbine array to determine the characteristics for river applications with spatial restrictions and estimate the interactions between the turbines. They concluded that it is more advantageous to operate the units in a side-by-side arrangement to obtain the optimum power production.

The application of hydrokinetic turbines upstream of a hydropower plant was analysed in detail by Lalander and Leijon [20], who discussed the effects of the upstream water level on the hydropower energy generation. They presented a case study of a site in Sweden, where the river flow through the channel upstream of the hydropower plant was simulated by a specific code, which was calibrated and validated by ADCP measurements. The depths at the site ranged from 4.5 m to 6 m, and the channel was 100 m wide. The 5–10 kW and 15–20 kW turbines had cross-sectional areas of 25 m<sup>2</sup> (5 m × 5 m) and 49 m<sup>2</sup> (7 m × 7 m), respectively. They concluded that the turbine hydrokinetics cause a power loss for the power plant due to the increase of the upstream level. For the case study of a river flow rate of 500 m<sup>3</sup>/s and a calculated head loss of 2 cm, 100 kW hydrokinetic turbines were not implemented for this reason.

Petrie et al. [21] characterized the average three-dimensional velocity profile of the Roanoke River in eastern North Carolina, USA, to assess locations with the hydrodynamic potential for power generation. The steady flow rate was approximately 565 m<sup>3</sup>/s, and the depths at the site ranged from 5.0 to 8.5 m with a mean depth of 7.1 m. The study evaluated the morphology, bathymetry, and distribution of the velocity field in the channel using an ADCP.

Measurements were obtained along two cross sections perpendicular to the riverbank. The results contributed to the assessment of the energy resources and to the project during the installation of the hydrokinetic turbines and the environmental impact study.

To assess the potential for hydrokinetic production in Lithuania, Punys et al. [22] performed a study of the Neris River, which is the second largest free-flowing river in the country with a mean annual flow of 179 m<sup>3</sup>/s. They used the 1D HEC-RAS model for the river flow simulation, which was validated with historical stage, flow, velocity and cross-sectional area data at three gauging stations. Ramirez et al. [23] performed a study of the potential use of hydrokinetic turbines in the discharge channels of large hydroelectric power plants in Colombia. They also employed the 1D HEC-RAS model and hourly flow discharge to obtain time series of the mean flow velocity, stream velocity, and water depth at specific hydraulic cross sections in the channels. The most energetic flows were between 100 and 150 m<sup>3</sup>/s. Based on a net present value analysis, they concluded that the use of hydrokinetic energy generators in the discharge channels of the large hydropower plants in the case studies was not recommended from a financial perspective. However, this analysis was carried out using only one (5 kW) and two (2 × 10 kW units) turbine in each tested channel. A study of a turbine farm could be considered.

### 3. Methodology

#### 3.1. Bathymetry data, boundary conditions, and the Manning coefficient

The bathymetric data were provided by the Eletronorte/Eletróbras Company. These data were obtained from the Administration of Hydroways of the Eastern Amazon (Administração das hidrovias da Amazônia Oriental - AHIMOR) and were collected in September 2004 using a single beam echo sounder. Fig. 1 shows the raw topographic data for the analysed stretch of the Tocantins River, which include 111,583 points that were used to generate the terrain elevation model. The Tucuruí Dam is also shown in Fig. 1. It is one of the largest hydroelectric power stations in the world. Using 25 Francis hydroturbines with an installed capacity of 8370 MW, it produces 21.4 TWh of electricity that is dispatched to the Brazilian grid. The strategic characteristics of the Tucuruí power plant include the installation of hydrokinetic units to demonstrate the sustainability of this emergent technology of generating electricity from the remaining energy in the dam's outflow. The possibility of generating renewable energy using in-stream river turbines that are installed downstream of an existing hydropower unit is an important alternative to hydrokinetic turbine technology. The remaining energy of a hydropower unit is available as hydrokinetic energy in the outflow channel, where the downstream flow velocity is a result of the outflow from the turbines and the spill flow. The remaining energy can be converted to electricity by a set of hydrokinetic turbines in the outflow channel, which share the infrastructure for dispatching electricity with the main hydropower plant.

Water flow rate and level data that were collected from 2007 to 2014, which consisted of 93 pairs of consolidated data provided by Eletronorte/Eletróbras, were used in the simulations. Table 1 shows the water levels and flow rates for 2012 and 2013 that were measured in the field. The remaining data were provided by Eletronorte/Eletróbras, which manages the Tucuruí hydroelectric power plant.

Initially, the Manning coefficients were obtained based on the literature (Chow [24]); however, the final values were obtained

through calibration, which consists of varying the Manning coefficient to obtain a good correlation between the measured and simulated flow rates.

#### 3.2. Hydrodynamic model

This study used a 2D longitudinal-transverse hydrodynamic model, and the velocities,  $v(x, y)$ , are averages in the  $z$  direction (Secretan and Leclerc [25]). The mass and momentum conservation equations were integrated in the vertical direction. This integration is favoured by the hypothesis that the gradients in the  $x$  and  $y$  directions are more important than that in the  $z$  direction. For a shallow water model, other hypotheses are considered, including:

- The water column is mixed in the vertical direction, and the depth of the river is small compared to the width and length;
- The waves have a small amplitude and a long period. The vertical acceleration component is negligible, which allows the hydrostatic pressure to be approximated.

Using this 2D model to study the hydrodynamic behaviour of the Tocantins River is justified by the absence of thermal stratification, the small variations in salinity, and the small vertical velocity components. These characteristics allow the Saint-Venant or shallow water model to be used to simulate the flow of the Tocantins River. In this case, equation (1) is the equation for the conservation of mass, while equations (2) and (3) are the equations for the conservation of momentum:

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

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

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

where  $q_x$  and  $q_y$  (m<sup>3</sup>/s) are the flow rates in the Cartesian coordinates  $x$  and  $y$ , respectively;  $t$  (s) is time;  $h$  (m) is the water level;  $H$  (m) is the depth of the water column, and  $F_x$  and  $F_y$  (N) are forces in the  $x$  and  $y$  directions, respectively. The terms on the right sides of equations (2) and (3) are given by equations (4) and (5), respectively:

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

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

where  $g$  is the acceleration of gravity (m/s<sup>2</sup>);  $n$  is the Manning coefficient;  $|\bar{q}|$  is the magnitude of the specific flow rate (m<sup>2</sup>/s);  $\rho$  is the density of water (kg/m<sup>3</sup>);  $F_{cx}$  and  $F_{cy}$  are the components of the Coriolis force (N);  $F_{wx}$  and  $F_{wy}$  are the force components due to wind (N); and  $\tau_{ij}$  is the Reynolds stress (N/m<sup>2</sup>):



Fig. 1. Location of the study area.

**Table 1**  
Water levels and flow rates.

Date	South water level (m)	North water level (m)	Flow rate (m <sup>3</sup> /s)
24/07/2012	5.45	4.80	5466
30/08/2012	6.45	5.40	8032
25/09/2012	5.40	4.85	5116
13/11/2012	4.90	4.50	3841
13/12/2012	6.95	6.15	8442
18/04/2013	11.98	11.04	22910
13/06/2013	6.54	5.67	7760
25/07/2013	5.52	4.83	5364

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

where  $\bar{U}_i$  is the average velocity component in the  $i$  direction (m/s); and  $\nu$  is the kinematic viscosity. This study uses the mixing length as the turbulence model, which considers the distance from the wall at which the size of the turbulent structures is not influenced by the wall (Rodi [26]). In this case, the turbulent viscosity is given by equation (7):

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

where  $D_{ij}$  is the strain rate tensor of the average movement, and:

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

This study considered a stationary hydrodynamic regime (i.e., not influenced by tidal waves), which is a good hypothesis because the water levels and flow rates of the analysed stretch of the Tocantins River are more strongly influenced by the operation of the UHE Tucuruí power plant than by the possible tidal variations that reach the Tocantins River in the vicinity of Tucuruí. The

influence of wind was not considered. The effect of the Coriolis force was neglected because the study area is near the equator.

### 3.3. Velocity measurements

For hydrokinetic power plant projects, it is necessary to determine the velocities and depths of the rivers in which the plants will be constructed. ADCP, which uses the Doppler effect to scan large areas of river sections via the projection of acoustic waves produced by vibrating piezoelectric ceramic materials, is employed in large rivers (Kim and Muste [27]). The waves travel from the surface to the bottom of the river and are reflected by the suspended material in the water. Thus, the particle velocity is measured by the Doppler effect, and the water velocity is assumed to be equal to that of the particles. To construct hydrokinetic power plants on large rivers, it is necessary to understand the velocities in a specific section. This allows the best locations for installation of the plants to be selected as long as the velocity field and depth of the entire section are known because the ADCP also relies on an echo sounder. River hydrodynamic modelling is a useful technique for analysing large rivers and long sections because it is capable of globally evaluating the velocities and depths of rivers. This study used an acoustic Doppler profiler (ADP-M9, which is similar to ADCP) with a velocity measuring range of  $\pm 20$  m/s, an accuracy of  $\pm 0.2$  cm/s, and a resolution of 0.001 m/s. For the depth, it had a measurement range of 0.06–80 m, an accuracy of 1%, and a resolution of 0.001 m.

### 3.4. Hydrokinetic project definition

The final configuration of the hydrokinetic project is based on the site location and river stream velocity that offer the greatest annual energy production considering the river depth at each point and the available manufacturing technology. The selection of the design velocity was based on the frequency of the current velocity and the energy density of the location where the turbine was to be installed based on historical data of the river.

**4. Results**

*4.1. Calibration and mesh study*

The model was calibrated by varying the Manning coefficient to obtain a good correlation between the measured and simulated flow rates (Fig. 2). A mesh study was conducted with a vertex of 20 m (Fig. 3) and showed similar results to using 15 m vertices but with a much shorter computational time; therefore, 20 m vertices were used for all of the simulations. Another important factor in the assessment of the Saint-Venant model response was the

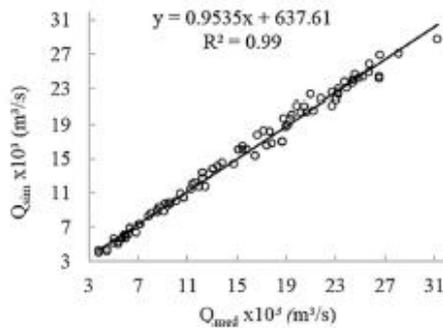


Fig. 2. Correlation between the measured flow rates and those simulated by the model.

application of linear regression for the simulated and measured flow rates. The linear regression  $r^2$  is an indicator of the model accuracy that is commonly used in hydrology (Gupta et al. [28]; Vis et al. [29]). The closer  $r^2$  is to 1, the better the fit between the observed data and simulations. The regression showed a good correlation with an  $r^2$  value of 0.99 (Fig. 2). The hydrodynamic mesh (Fig. 3) had 97,392 nodes and 48,227 elements; it was generated with a frontal isotropic algorithm that used only one spacing parameter and attempted to generate the largest number of regular triangles.

*4.2. Terrain elevation model*

Fig. 4 shows the isosurfaces of the interpolated terrain elevation model obtained via the finite element method. We observe that the model represents the terrain well because the channel downstream of the reservoir of the Tucuruí hydroelectric plant, which is the original river channel that was present before construction of the dam, is visible.

*4.3. Validation*

Field surveys were conducted by ADCP in 2012 and 2013 to confirm the velocities that were simulated by the model at the coordinates  $x = 650491.59$  and  $y = 9581965.38$  UTM (Fig. 4). Table 2 shows the days that the measurements were obtained, the measured flow rates, the vertically-averaged velocities (calculated from the velocity profile measured by ADCP), the simulated velocities (means of the vertical profiles calculated from the model

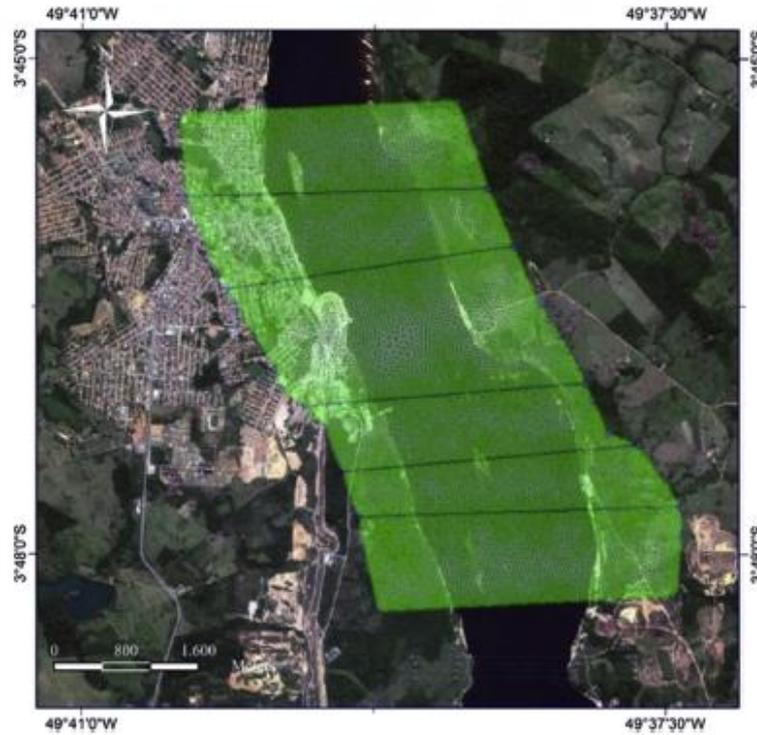


Fig. 3. Finite element mesh of the hydrodynamic model.

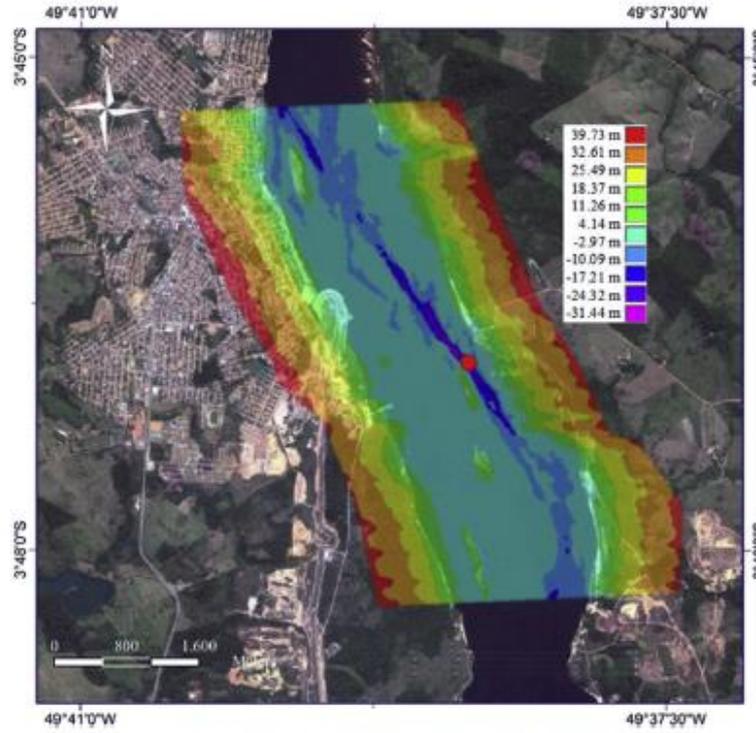


Fig. 4. Isosurfaces of the interpolated terrain elevation model (m).

Table 2  
Measured and simulated data for the analysed stretch of the Tocantins River.

Days	$Q_{measured}$ ( $m^3/s$ )	$V_{mean}$ (m/s)	$V_{simulated}$ (m/s)	Error (%)	P (m)
24/07/2012	5466	1.20	1.19	0.83	36.53
30/08/2012	8032	1.50	1.54	2.67	37.32
25/09/2012	5116	1.00	1.10	10.00	36.52
13/11/2012	3841	1.00	0.92	8.00	36.11
13/12/2012	8442	1.50	1.40	6.67	37.95
18/04/2013	22910	1.80	1.77	1.67	42.89
13/06/2013	7760	1.20	1.42	18.33	37.50
25/07/2013	5364	1.00	1.22	22.00	36.57

and the Saint-Venant equation), and the depths. An analysis of these data showed that the model reasonably simulated the observed velocities with a minimum error of 0.83%, an average error of 8.77%, and a maximum error of 22.00%.

Using the results shown in Table 2, a power correlation was generated (Fig. 5) between the flow rates that were measured along the analysed stretch and the simulated velocities at the point in Fig. 4. In this case,  $r^2$  had a high value of 0.958, which indicates that the simulated velocities were highly correlated with the measured flow rates. Therefore, the velocity at the analysed point can be estimated from any measured flow rate via the following power function:

$$V_{sim} = 0.0749Q_{mean}^{0.3137} \tag{9}$$

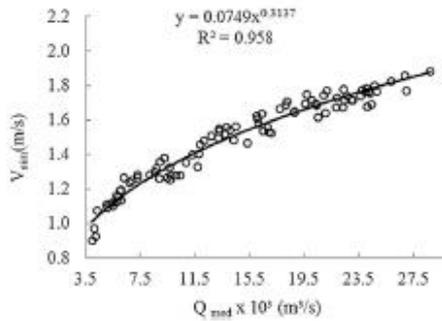


Fig. 5. Measured flow rates versus simulated velocities.

#### 4.4. Selection of the hydrokinetic turbine installation locations

To analyse possible locations for the installation of hydrokinetic power plants, simulations of the velocity and depth were used to obtain the maximum ( $Q_{max} = 31274 m^3/s$ ), mean ( $Q_{mean} = 14784 m^3/s$ ), and minimum flow rates ( $Q_{min} = 3772 m^3/s$ ), which were used to evaluate the variations of the velocities and depths as functions of the flow rates regulated by the hydroelectric power plant. The location of the main river channel was based on the depth. Fig. 6 shows the isosurfaces of the velocity and depth for the maximum (Fig. 6a–b), mean (Fig. 6c–d), and minimum flow rates (Fig. 6e–f).

Fig. 7 was prepared using information extracted from Fig. 6 and

shows the velocity profiles in the channel for the analysed flow rates ( $V_{Q_{min}}$ ,  $V_{Q_{mean}}$ , and  $V_{Q_{max}}$ ). The 10 points with the highest velocities were defined in the channel in areas where the depth of

the river allows for the installation of hydrokinetic turbines with a diameter of 10 m. Table 3 shows the velocities, depths, and coordinates (projection SAD69 22S) of these points for the maximum,

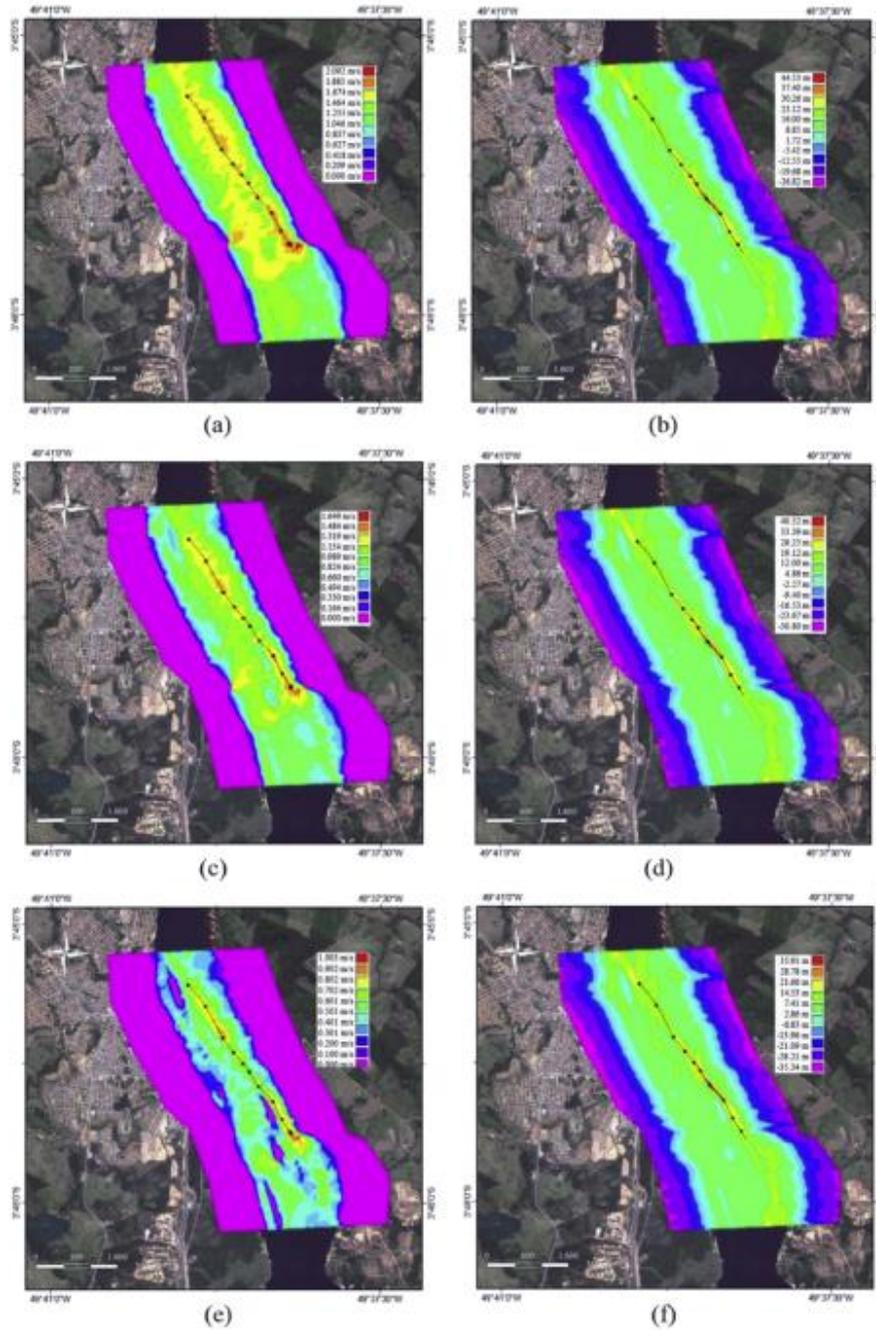


Fig. 6. Isosurfaces of velocity and depth for the maximum, mean, and minimum flow rates and locations for the installation of hydrokinetic power plants.

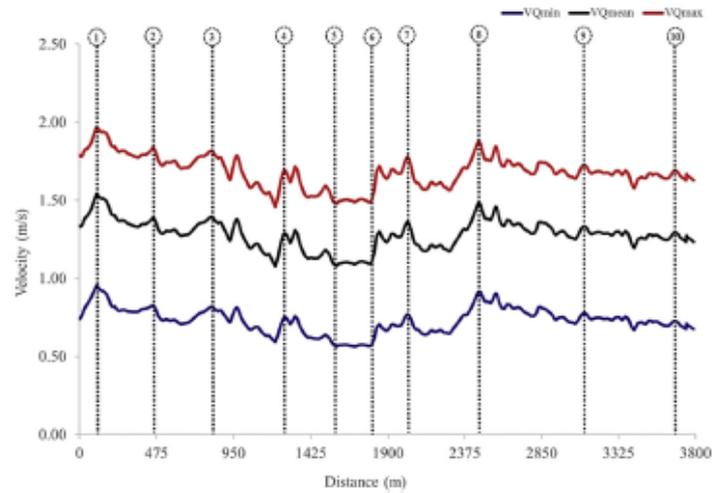


Fig. 7. Velocity profiles of the channel as a function of the analysed flow rates and 10 points considered for the installation of hydrokinetic turbines.

Table 3  
Information about the 10 defined points.

Points	X (m)	Y (m)	Q <sub>max</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>mean</sub> (m <sup>3</sup> /s)		Q <sub>min</sub> (m <sup>3</sup> /s)	
			V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)	V (m/s)	P (m)
1	650908.80	9581266.87	1.97	20.71	1.54	16.63	0.95	11.93
2	650743.53	9581523.34	1.83	21.68	1.39	17.63	0.82	12.96
3	650555.68	9581883.17	1.77	34.66	1.35	30.61	0.79	25.96
4	650383.15	9582176.86	1.67	42.60	1.27	38.59	0.74	33.98
5	650101.92	9582459.58	1.48	34.64	1.08	30.62	0.57	26.00
6	649974.92	9582626.27	1.49	30.32	1.10	26.30	0.58	21.69
7	649800.30	9582848.52	1.77	29.23	1.36	25.24	0.77	20.67
8	649572.12	9583133.77	1.87	24.76	1.48	20.79	0.92	16.25
9	649235.45	9583755.70	1.72	21.37	1.33	17.41	0.77	12.91
10	648895.42	9584174.90	1.68	20.69	1.29	16.75	0.73	12.27

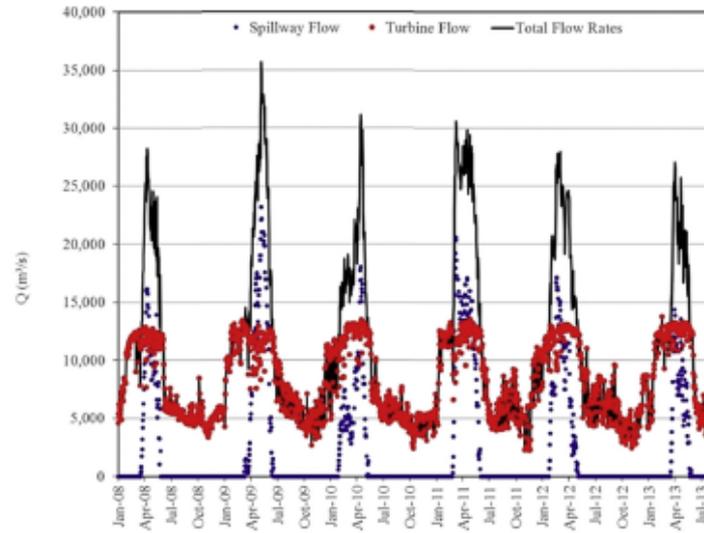


Fig. 8. Historical series of flow rates for UHE Tucuruí from 2008 to 2013.

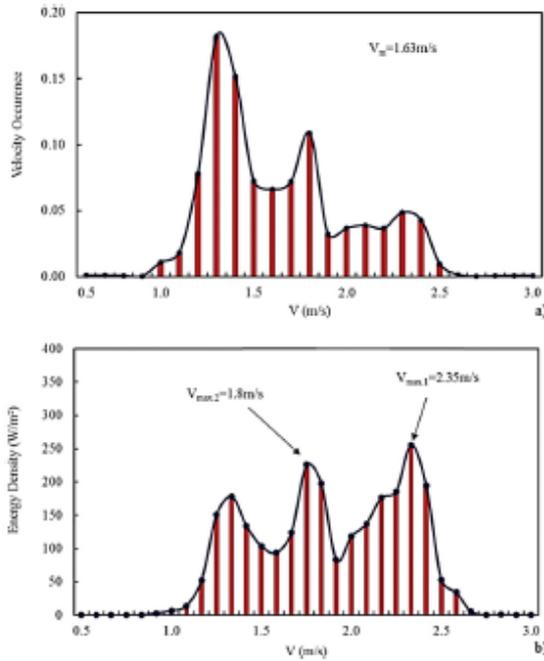


Fig. 9. a) Occurrence frequency of the river velocity. b) Energy density ( $W/m^2$ ).

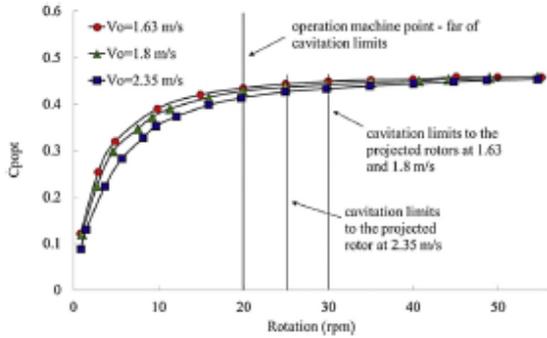


Fig. 10. Characteristic curves of the turbine, design rotation, and cavitation limits.

minimum and mean flow rates.

4.5. Selection of the design velocity of the hydrokinetic turbines

To calculate the energy density, historical series of flow rates of the river were analysed for the period from 2008 to 2013 (Fig. 8).

Table 4  
Data of the turbine rotor.

Parameter	Specification
Rotor diameter (m)	10.0
Rotor hub diameter (m)	1.50
Number of blades	3
Blade profile	NACA 653–618

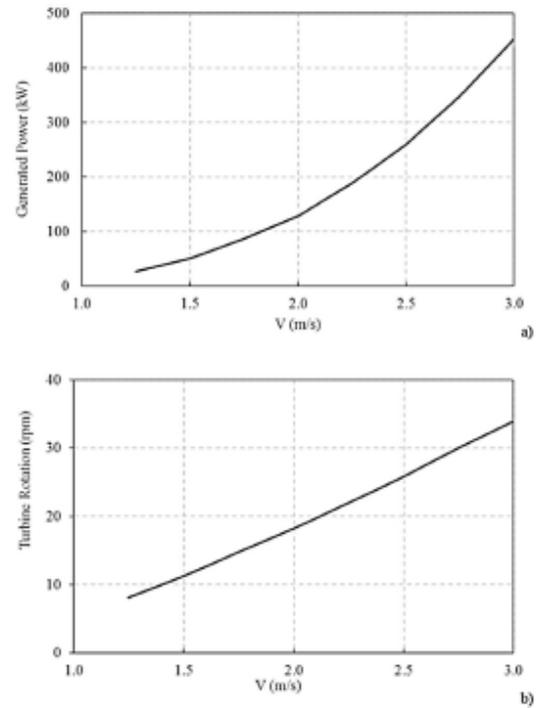


Fig. 11. Power (a) and rotation (b) of the turbine as a function of the river velocity.

The data show the spillway flow, turbine flow, and total flow rates, including the seasonal characteristics due to periods of floods and droughts.

Fig. 9a shows the current velocity frequency of the water downstream of the Tucuruí Dam. This figure was developed from the velocities that were used for the regression of Eq. (9). The most common occurrence corresponds to a velocity of 1.3 m/s (18% occurrence of the entire measurement period). The minimum, mean, and maximum velocities are 0.98, 1.63, and 2.61 m/s, respectively. The data consist of measurements that were collected from 01/01/2008 to 22/07/2013. Fig. 9b shows the energy density available at the measurement location. The two major energy peaks occur at velocities of 1.79 and 2.35 m/s.

The energy density was calculated using Eq. (10), and the design velocity was set to 2.35 m/s:

$$De = \frac{1}{2} \rho V^3 p [W/m^2] \tag{10}$$

where  $p$  is the percentage velocity occurrence over the measurement period.

4.6. Design of the hydrokinetic turbine

Considering the river depth and the available manufacturing technology, a rotor diameter of 10 m was selected. Using the design value of the river velocity, the rotor design was developed using the blade element method (BEM) (Amarante Mesquita et al. [30]). Fig. 10 shows the variation of the power coefficient as a function of the river velocity for the rotor based on the data presented in Table 4.

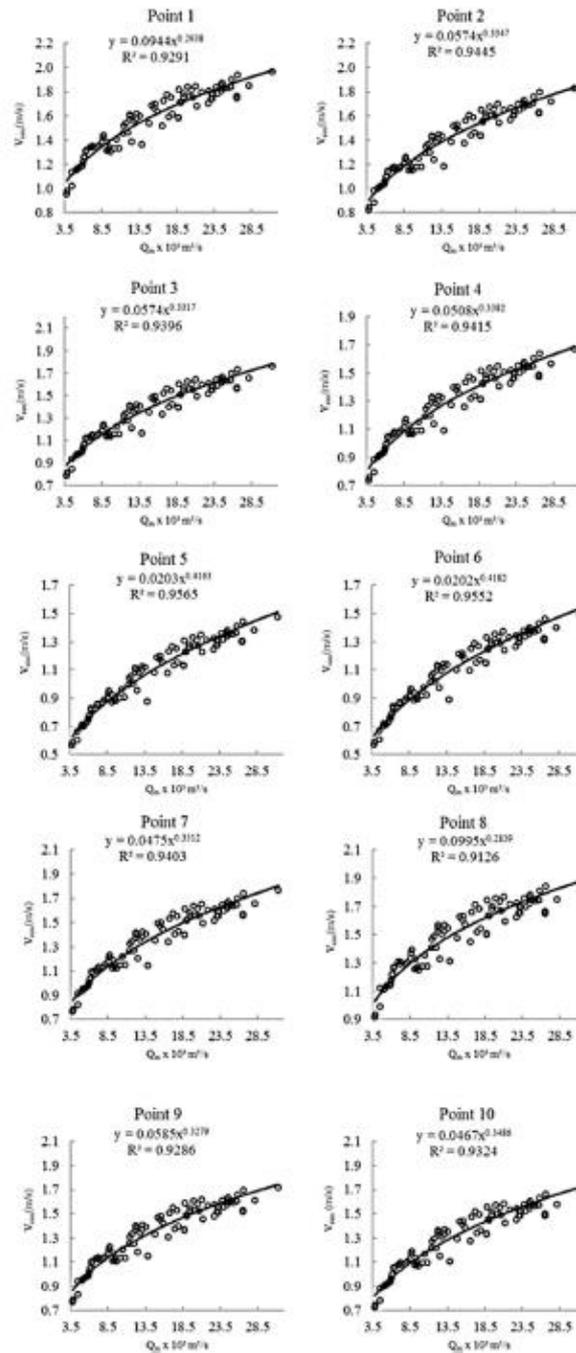


Fig. 12. Measured flow rates and simulated velocities at the 10 points in the channel downstream of the UHE Tucuruí Reservoir.

The design rotation without the occurrence of cavitation at the operational point was 20 rpm. According to the manufacturers, the efficiencies of the generator and the multiplier were 93.7% and 98%, respectively. Fig. 11 shows the variations of the power and rotation of the turbine as a function of the velocity of the river.

4.7. Power generation

To calculate the power generation at the 10 points that were selected for the installation of the designed turbine, it is necessary to determine the flow velocity and the variation characteristics of the flow rate. Based on the model validation (Fig. 5), 10 power

correlations were assessed, which represent the correlation between the measured flow rates ( $Q_m$ ) and the simulated velocities ( $V_{sim}$ ) at each point (Fig. 12). Notably, all of the correlations were greater than 90%, which explained the velocities based on the measured flow rates. Thus, the correlations were used for each point to simulate the design velocity as a function of the measured flow rates between 2008 and 2013.

Fig. 13 shows the power generation during the analysed period at points 1 and 5. The energy calculations were performed using the data in Fig. 12. Fig. 13 illustrates the seasonal nature of the flow rates (Fig. 8) and velocities, which are reflected in the amounts of energy generated. The average annual energy generated by the 10

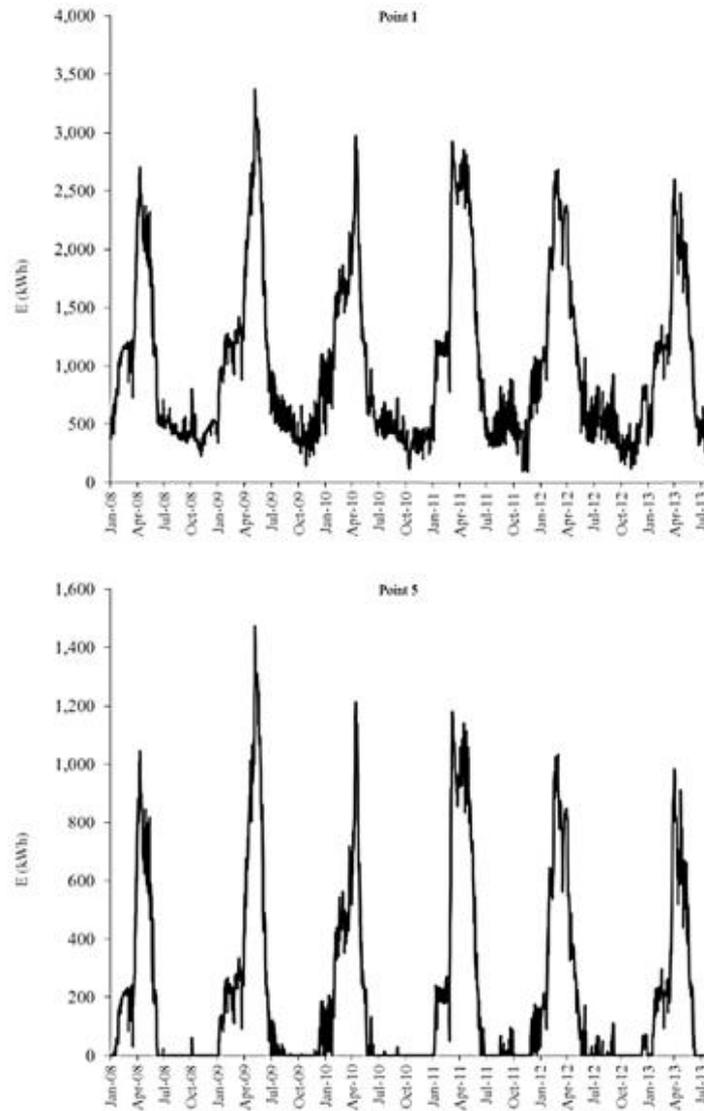


Fig. 13. Energy generated by the turbines at point 1 and point 5.

turbines between 2008 and 2013 was calculated to be 2.04 GWh/year.

## 5. Conclusion

The methodology presented in this paper was used to evaluate the remaining energy potential of large hydroelectric power plants, such as the UHE Tucuruí plant, which has the fourth largest installed capacity in the world. The main channel downstream of the reservoir, where the highest stream velocities occur, was analysed for the generation of energy using hydrokinetic turbines. An analysis of the river stretch between the dam and the output of the locks was performed. This limitation was due to the use of the Tocantins River for fluvial transportation. In this area, the implementation of a hydrokinetic farm that can increase utilisation of the remaining energy was evaluated. The design configuration was obtained from the frequency of the current velocity and the energy density at the location where the turbine was to be installed based on historical series of the river's flow rate, the depth of the river at each point and the available manufacturing technology. A set of hydrokinetic turbines that generates 2.04 GWh/year was designed, which represents a considerable value for an unused energy resource.

Although the presented methodology is a useful tool for designing hydrokinetic projects to utilize the remaining energy potential of hydroelectric power plants, the problem is more complex and must be regarded as an optimisation problem in a more complete analysis because the turbines will decrease the useful head of the hydroelectric power due to the downstream elevation. Two other important components in the optimisation of the hydrokinetic farm include analyses of the costs and the environmental impact, which should be performed to assess the sustainability of such projects. These items are currently being investigated to obtain a more robust methodology for the assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants.

## Acknowledgements

The authors thank Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) of the Brazilian Ministry for Science and Technology for a doctoral scholarship and the companies ELETRONORTE/ELETRONORTE, PROPESP/UFPa and FADESP/UFPa for their financial support.

## References

- [1] M.J. Khan, G. Bhuyan, M.T. Iqbal, J.E. Quainance, Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: a technology status review, *Appl. Energy* 86 (2009) 1823–1835.
- [2] M.S. Güneş, K. Kaygusuz, Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14 (2010) 2996–3004.
- [3] D. Kumar, S. Sarkar, A review on the technology, performance, design optimization, reliability, techno-economics and environmental impacts of hydrokinetic energy conversion systems, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 58 (2016) 796–813.
- [4] Y. Liu, D.J. Packey, Combined-cycle hydropower systems – the potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations, *Renew. Energy* 66 (2014) 228–231.
- [5] M.L.C. Barros, M.J.S. Sena, A.L.A. Mesquita, C.J.C. Blanco, Y. Secretan, A water flow pattern analysis of Guajará Bay: Amazon-Brazil Estuary, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 33 (2011) 79–85.
- [6] C.J.C. Blanco, M.J.S. Sena, A.L.A. Mesquita, M.D.C. Furtado Filho, Y. Secretan, Hydrodynamic evaluation of a flood embankment in the Amazon estuary region – Brazil proceedings of the institution of civil engineers, *Civ. Eng.* 166 (2013) 49–55.
- [7] P.S. Holanda, C.J.C. Blanco, A.L.A. Mesquita, A.C. Cunha, E.N. Macêdo, Y. Secretan, Hydrodynamic modeling downstream of Tucuruí hydroelectric power plant for analysis of sites to set up of hydrokinetic turbines, in: COBEM 2013-22nd International Congress of Mechanical Engineering, Ribeirão Preto, 2013.
- [8] GRE-EHN, Group for Research and Studies in Numeric Eco-hydraulic. Available in: <http://www.gre-ehn.etc.inrs.ca/H2D2>. (Accessed 16 June 2015).
- [9] L.S. Blunden, A.S. Bahaj, Initial evaluation of tidal stream energy resources at Portland Bill, UK, *Renew. Energy* 31 (2006) 121–132.
- [10] R. Carballo, G. Iglesias, A. Castro, Numerical model evaluation of tidal stream resources in the Ria de Muros (NW Spain), *Renew. Energy* 34 (2009) 1517–1524.
- [11] L.L. Lago, F.L. Ponta, L. Chen, Advances and trends in hydrokinetic turbine systems, *Energy Sustain. Dev.* 14 (2010) 287–296.
- [12] G. Iglesias, M. Sánchez, R. Carballo, H. Fernández, The TSE index: a new tool for selecting tidal stream sites in depth-limited regions, *Renew. Energy* 48 (2012) 350–357.
- [13] V. Ramos, G. Iglesias, Performance assessment of tidal stream turbines: a parametric approach, *Energy Convers. Manag.* 69 (2013) 49–57.
- [14] A. Vazquez, G. Iglesias, LCOE (levelised cost of energy) mapping: a new geospatial tool for tidal stream energy, *Energy* 91 (2015) 192–201.
- [15] H. Akimoto, K. Tanaka, K. Uzawa, A conceptual study of floating axis water current turbine for low-cost energy capturing from river, tide and ocean currents, *Renew. Energy* 57 (2013) 283–288.
- [16] V.B. Miller, A.B. Laudis, L.A. Schaefer, A benchmark for life cycle air emissions and life cycle impact assessment of hydrokinetic energy extraction using life cycle assessment, *Renew. Energy* 36 (2011) 1040–1046.
- [17] P. Duvoyn, H. Toniolo, HYDROKAL: a module for in-stream hydrokinetic resource assessment, *Comput. Geosci.* 39 (2012) 171–181.
- [18] N. Hlizola, E. Melo, E. Armijos, J. McGlynn, Preliminary Analysis of Potential of River Hydrokinetic Energy Technologies in the Amazon Basin, IDB - Inter American Development Bank, 2015. IDB-TN-891 Report.
- [19] J. Righin, C. Daskiran, J. Jonas, W.C. Schleicher, A. Öztekin, Hydrokinetic turbine array characteristics for river applications and spatially restricted flows, *Renew. Energy* 97 (2016) 274–283.
- [20] E. Lalander, M. Leijon, In-stream energy converters in a river: effects on upstream hydropower station, *Renew. Energy* 36 (2011) 399–404.
- [21] J. Petrie, P. Diplas, M. Gutierrez, S. Nam, Characterizing the mean flow field in rivers for resource and environmental impact assessments of hydrokinetic energy generation sites, *Renew. Energy* 69 (2014) 393–401.
- [22] P. Pumys, I. Adamonyte, A. Kvaraciūtis, E. Martinaitis, G. Vyciene, E. Kasiulis, Riverine hydrokinetic resource assessment. A case study of a lowland river in Lithuania, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50 (2015) 643–652.
- [23] R.D.M. Ramirez, F.J. Cuervo, C.A.M. Rizo, Technical and financial valuation of hydrokinetic power in the discharge channels of large hydropower plants in Colombia: a case study, *Renew. Energy* 99 (2016) 136–147.
- [24] V.T. Chow, *Open Channel Hydraulics*, McGraw-Hill, New York, 1959.
- [25] Y. Secretan, M. Leclerc, Modélleur: a 2D hydrodynamic GIS and simulation software, in: Proceedings of the Hydroinformatics-98, Copenhagen, Denmark, 1998, pp. 1–18.
- [26] W. Rodi, *Turbulence Models and Their Application in Hydraulics: a State of the Art Review*, 3 ed, Balkema Taylor & Francis, 1993.
- [27] D. Kim, M. Muste, Multi-dimensional representation of river hydrodynamics using ADCP data processing software, *Environ. Model. Softw.* 38 (2012) 158–166.
- [28] H.V. Gupta, H. Kling, K.J. Yilmaz, G.F. Martinez, Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modeling, *J. Hydrol.* 377 (2009) 80–91.
- [29] M. Vis, R. Knight, S. Pool, W. Wolfe, J. Seibert, Model calibration criteria for estimating ecological flow characteristics, *Water* 7 (2015) 2358–2381, <http://dx.doi.org/10.3390/w7052358>.
- [30] A.L. Amarante Mesquita, A.L.A. Mesquita, A.C. Palheta, J.R.P. Vaz, M.V.G. Moraes, C. Gonçalves, A methodology for the transient behavior of horizontal axis hydrokinetic turbines, *Energy Convers. Manag.* 87 (2014) 1261–1268.

**ANEXO 2 - CAPÍTULO DO LIVRO *FRONTIERS OF SCIENCE AND TECHNOLOGY*. 1ED. DE GRUYTER. BERLIN/BOSTON**

Patrícia da Silva Holanda, Claudio José Cavalcante Blanco,  
André Luiz Amarante Mesquita, Cleidson da Silva Alves,  
Antonio Cesar Pinho Brasil Junior, Marcio de Pinho Bittencourt,  
Maurício André Nunes, Yves Secretan

## Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants in the Tietê River Basin, São Paulo State, Brazil

**Abstract:** Fluvial hydrodynamic modeling has been widely used as a computational tool to estimate the hydrokinetic potential of downstream reservoirs of hydropower plants, i. e., taking advantage of the remaining energy. In that case, the design of the rotor diameter and velocity of hydrokinetics turbines are fundamental and depend on the depth and velocity of the river, respectively. Thus, the present study evaluated the potential of two hydropower plants (Ibitinga and Bariri) located in the Tietê River Basin, São Paulo state, Brazil. The velocities and depths were simulated using the Saint-Venant model. Data were collected from topo bathymetry to elaborate the terrain elevation model; substrate data to obtain the Manning coefficient; and flow and water level data for the boundary conditions. The model for the two hydropower plants was calibrated with observed and simulated flows rates. Velocities and depths of the two downstream reservoirs were simulated for the maximum, average, and minimum flows observed in the period between 2010 and 2014. The velocity results point to a greater hydrokinetic potential for Ibitinga, since their maximum velocities, for the simulated flows, varied between 1.468 m/s (minimum flow) and 2.703 m/s (maximum flow). While the velocities for Bariri ranged from 0.949 m/s to 2.314 m/s. The good results achieved through the methodology applied suggest evaluation of the remaining energy of other hydropower plants.

**Keywords:** remaining potential of hydropower plants, hydrokinetic turbines, hydrodynamic modeling.

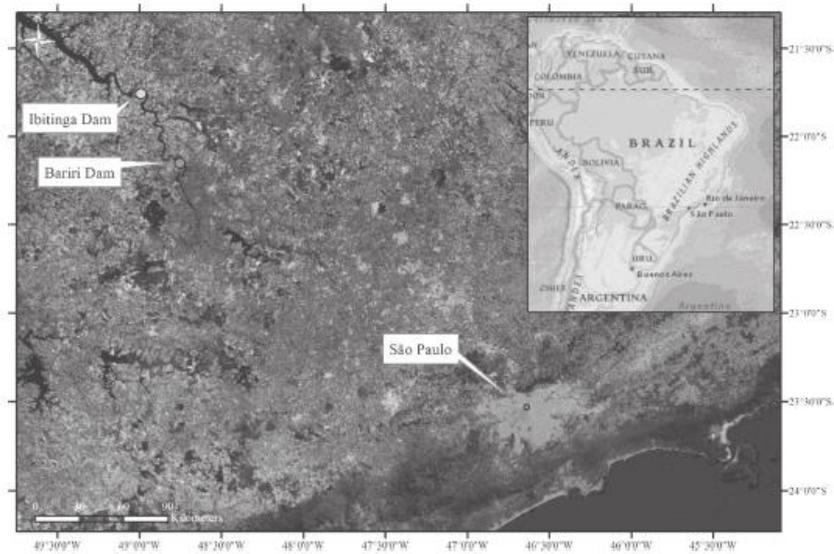
## 1 Introduction

In Brazil, water resources are economically decisive. The country has a large hydrographic network. In the state of São Paulo, more precisely on the Tietê River, there are five hydroelectric power plants (HPP) managed by AES Tietê (Figure 1). The present work has as main objective, the fluvial modeling of the reservoir of Ibitinga and Bariri HPP. The results of the modeling, i. e., velocities and depths, are important to set up

<https://doi.org/10.1515/9783110537680-005>

**Please check:**  
Runninghead left (authors) was too long. Please provide a shorter running-head.

**Please check:**  
Runninghead right (title) was too long. So OK?



**Fig. 1:** Location of the study area.

hydrokinetic turbines to exploit the remaining postpass energy through turbines and spillway of the mentioned HPP.

Exploration of the energy of streams, commonly called hydrokinetic energy, has been a well-explored alternative for generating electricity using the potential of rivers and oceans (Guney and Kaygusuz, 2010). The use of the remaining energy in the hydrokinetic potential downstream of hydropower plants in rivers was analyzed by Liu and Packey (2014) and Holanda et al. (2016). In any of its applications, the exploitation of hydrokinetic energy is seen as a process of conversion of energy of low environmental impact, which represents an increase of the energy potential generated by countries, mainly developing ones, i. e., that need energy to challenge themselves to become developed.

## 2 Methodology

### 2.1 The eco-hydraulics software system H2D2

The H2D2 program (GRE-EHN, 2016) used in this model is composed of a pre and postprocessor of finite elements. The program performs all stages of integration of the various field data for the design of the Terrain Elevation Model (MET) supported by a Finite Element mesh. Through the Finite Element Method (MEF), hydrodynamic simulations are performed based on the Saint-Venant Model. H2D2 is developed by

the Group of Research and Studies in Numerical Eco-Hydraulics (GRE-EHN) of the INRS-ETE of the University of Quebec – Canada. Some studies have demonstrated the application potential of the shallow water type 2DH model (Barros et al., 2011, Blanco et al., 2013, Holanda et al., 2016).

## 2.2 Experimental data for assessment of hydrokinetic energy resources

Data required for fluvial hydrodynamic modeling are topographic dimensions of the river channel and margins (topo bathymetry); substrate and water, and/or flow rates. Depth data were measured by the AES Tietê team in Ibitinga and Bariri HPP, which were associated with the water level data also recorded by the AES Tietê team. The data were used to calculate the topographic dimensions of the areas analyzed.

In projects to set up hydrokinetic plants, it is necessary to know the velocities and depths. In large rivers, the use of ADCP (acoustic Doppler current profiler), which uses the Doppler effect, i. e., scanning large areas of the river sections through the emission of acoustic waves by the vibration of piezoelectric ceramic materials. The waves propagating from the surface to the bottom of the river are reflected by the material suspended in the water. Thus, the velocity of the particles is measured by a Doppler effect, and the velocity of the water being considered equal to the velocity of the particles. With knowledge of the velocities in a section of a river, the best places to set up the hydrokinetic plants can be selected, as long as the depth is known, since the ADCP also has sonar. However, for the analysis of large sections, fluvial hydrodynamic modeling is the most interesting, since it is a method that is capable of evaluating velocities and depths in a global way.

The equipment used in the data collection was an ADP-M9 (acoustic Doppler profiler – similar to ADCP), coupled to the Q-boat (Figure 2b), with a velocity measuring range of  $\pm 20$  m/s, an accuracy of  $\pm 0.2$  cm/s, and a resolution of 0.001 m/s. In the case of depths, the equipment has a measuring range of 0.06–80 m, an accuracy of 1%,

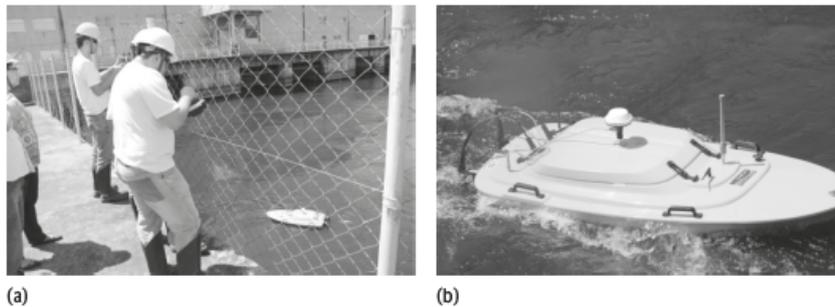
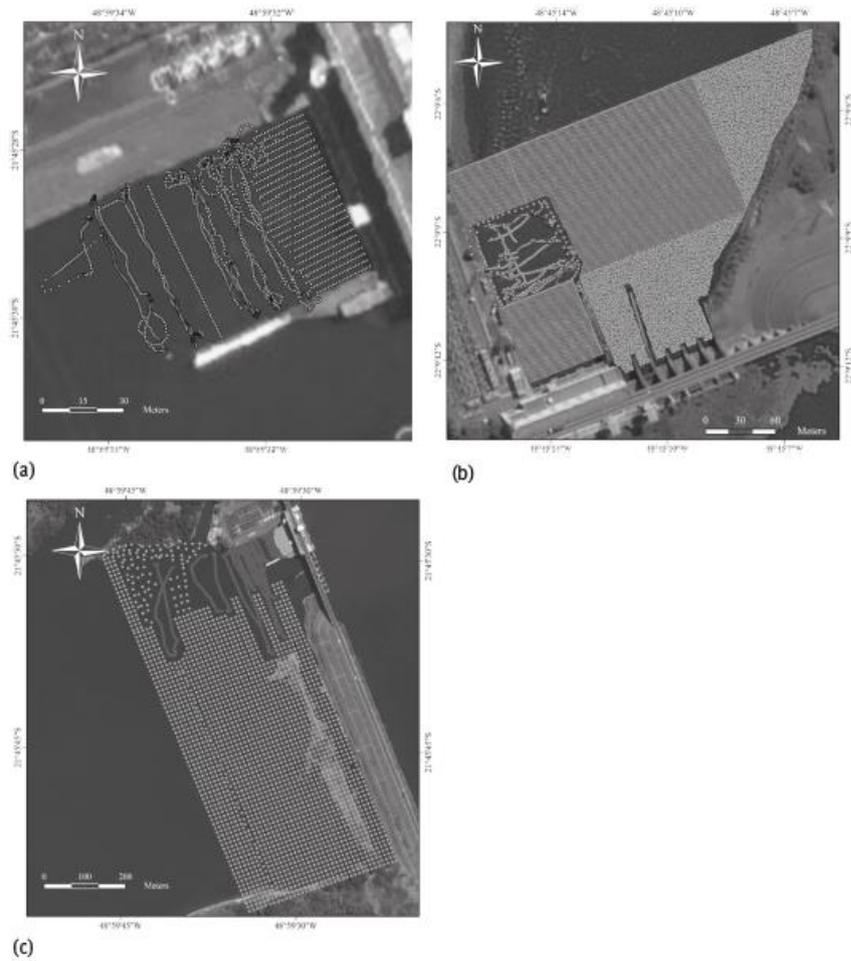


Fig. 2: AES Tietê team measuring velocities and depths with ADCP installed in the Q-boat at the Ibitinga HPP.

and a resolution of 0.001 m. Data measured in the field are georeferenced (WGS84 22S) in UTM coordinates and projected on a satellite image of the region in question. Testing the methodology at the Ibitinga HPP, the flow was first simulated in the area near the turbines exit (Figure 3a). Then the entire reservoir was simulated (Figure 3c).



**Fig. 3:** Topo-bathymetric data of the simulation domains in Ibitinga HPP (a and c) and Bariri HPP (b). Substrate data comes from the information contained in a technical drawing provided by AES Tietê, in which there are rock formations in the dissipation basins of both Ibitinga and Bariri HPP. This information was extrapolated to the rest of the downstream reservoirs.

In the case of the Bariri HPP (Figure 3b), the entire reservoir was simulated first hand, due to the experiences in Ibitinga HPP.

### 2.3 Gross topo bathymetry data of the river

The gross topo bathymetry was determined from the depth data measured by AES Tietê and estimated by the UFPA team. The topographic dimensions were determined by Equation (1), with water levels of 382.775 m (Ibitinga HPP) and 408.500 m (Bariri HPP):

$$\text{altitude} = \text{water level} - \text{depth} \quad (1)$$

Altitude, water level, and depth are measured in meters.

### 2.4 Boundary conditions used in reservoirs downstream of HPP

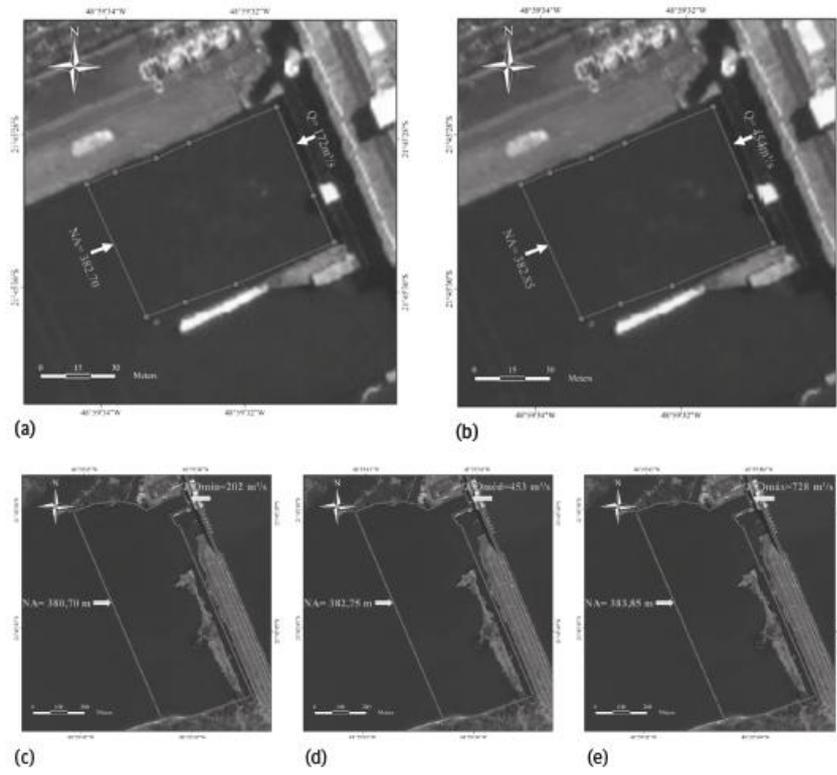
In addition to topo bathymetric and substrate data, flow rate and water level condition data are also required. These were provided by AES Tietê for the period between 2010–2014 (Ibitinga) and for Bariri between 2011–2015. Figure 4(a–b) shows the boundary conditions imposed for the simulations in Ibitinga for minimum and maximum flow, respectively, in the smaller simulation domain; and Figure 4(c–e) for minimum, mean, and maximum flow, respectively, in the larger simulation domain. In this case, the water levels were supplied to the downstream borders, and flow to the upstream ones.

Figure 5(a–c) shows the boundary conditions for the minimum, mean, and maximum flow rates, respectively, used in the flow simulations of Bariri HPP.

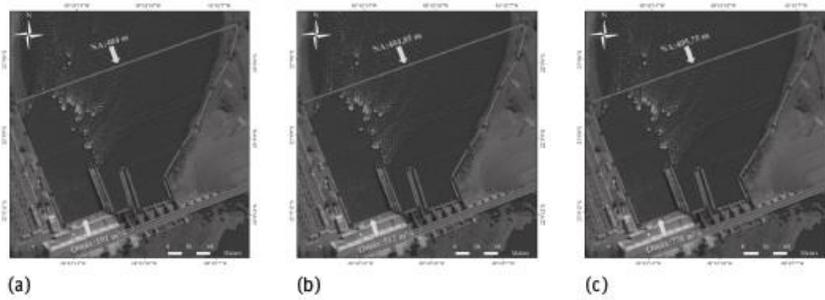
### 2.5 Fluvial hydrodynamic model to simulate velocities and depths

This study used a 2D longitudinal transverse hydrodynamic model, and the velocities,  $v(x, y)$ , are averages in the  $z$  direction. The mass and momentum conservation equations were integrated in the vertical direction. This integration is favored by the hypothesis that the gradients in the  $x$  and  $y$  directions are more important than that in the  $z$  direction. For a shallow water model, other hypotheses are considered, including:

- The water column is mixed in the vertical direction, and the depth of the river is small compared to the width and length.
- The waves have a small amplitude and a long period. The vertical acceleration component is negligible, which allows the hydrostatic pressure to be approximated.



**Fig. 4:** Boundary conditions for the Ibitinga HPP smaller simulation domain (a–b) and the larger simulation domain (c–e).



**Fig. 5:** Boundary conditions for Bariri HPP (Qmin (c), Qmed (d), and Qmax (e)).

Using this 2D model to study the hydrodynamic behavior of the Tocantins River is justified by the absence of thermal stratification, the small variations in salinity, and the small vertical velocity components. These characteristics allow the Saint-Venant or shallow water model to be used to simulate the flow rates of the Tietê River. In this case, Equation (2) is conservation of mass, while Equations (3) and (4) are the conservation of momentum:

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

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

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

where  $q_x$  and  $q_y$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) are the flow rates in the Cartesian coordinates  $x$  and  $y$ , respectively;  $t$  ( $s$ ) is time;  $h$  ( $m$ ) is the water level;  $H$  ( $m$ ) is the depth of the water column, and  $F_x$  and  $F_y$  ( $N$ ) are forces in the  $x$  and  $y$  directions, respectively. The terms on the right sides of Equations (3) and (4) are given by Equations (5) and (6), respectively:

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

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

where  $g$  is the acceleration of gravity ( $\text{m}/\text{s}^2$ );  $n$  is the Manning coefficient;  $|\bar{q}|$  is the magnitude of the specific flow rate ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  $\rho$  is the density of water ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $F_{cx}$  and  $F_{cy}$  are the components of the Coriolis force ( $N$ );  $F_{wx}$  and  $F_{wy}$  are the force components due to wind ( $N$ ); and  $\tau_q$  is the Reynolds stress ( $N/\text{m}^2$ ):

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

where  $\bar{U}_i$  is the average velocity component in the  $i$  direction ( $\text{m}/\text{s}$ ); and  $\nu$  is the kinematic viscosity. This study uses the mixing length as the turbulence model, which considers the distance from the wall at which the size of the turbulent structures is

not influenced by the wall (Rodl, 1993). In this case, the turbulent viscosity is given by Equation (8):

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

where  $D_{ij}$  is the strain rate tensor of the average movement, and:

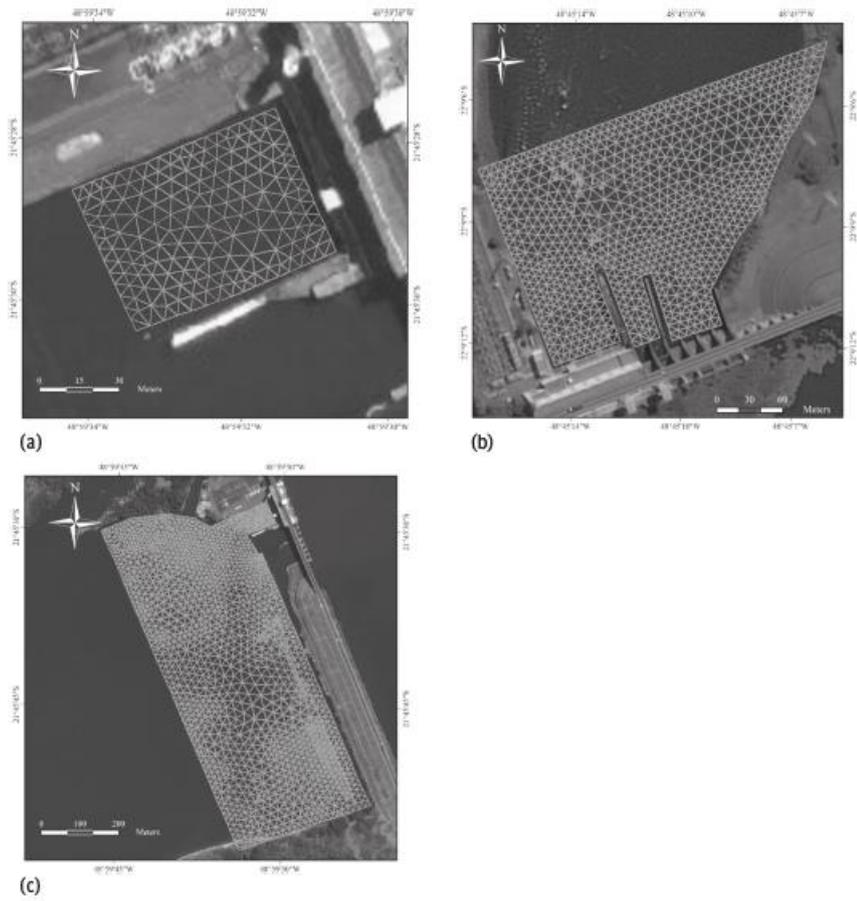
$$D_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

This study considered a stationary hydrodynamic regime, which is a good hypothesis because the water levels and flow rates of the analyzed stretch of the Tietê river are more strongly influenced by the operation of the HPP. The influence of wind was not considered. The effect of the Coriolis force was also neglected.

## 2.6 Calibration and mesh study of the fluvial hydrodynamic model

The mesh stores all input required data to solve the Saint-Venant equations, as well as the resulting data from the simulation of the two-dimensional flow (velocities  $x$  and  $y$ , depth, and water level). The input data considered in the model are:  $x$ ,  $y$ , and  $z$  coordinates, interpolated via MEF (finite element model); the calculated mean roughness; and the boundary conditions defined previously and transferred to the mesh.

The model was calibrated varying the Manning coefficient to obtain a good correlation between the measured and simulated flow rates, determining a Manning coefficient of 0.025. This allowed a mesh study in which a more refined mesh with (5 m) vertices was used at the exit of the turbines (Figure 6(a-c)). While for the rest of the domains a mesh partitioning was done, in which the vertices varied between 5 and 10 m for Ibitinga HPP. Figure 6(a-c) shows the mesh for the smaller domain, with 305 triangular elements and 668 nodes; and the mesh for the larger domain, with 959 triangular elements and 2032 nodes for Ibitinga. Figure 6(b) shows the finite element mesh with 3244 nodes, 1533 elements, and a vertex greater than 7 m used for the simulations in Bariri. The meshes were generated from a frontal isotropic algorithm that uses a single-spacing parameter and tries to generate the most regular triangles possible (Secretan et al., 2000). The relative percentage error between the simulated and observed flows for both Ibitinga and Bariri HPP was lower than 1.0 %.

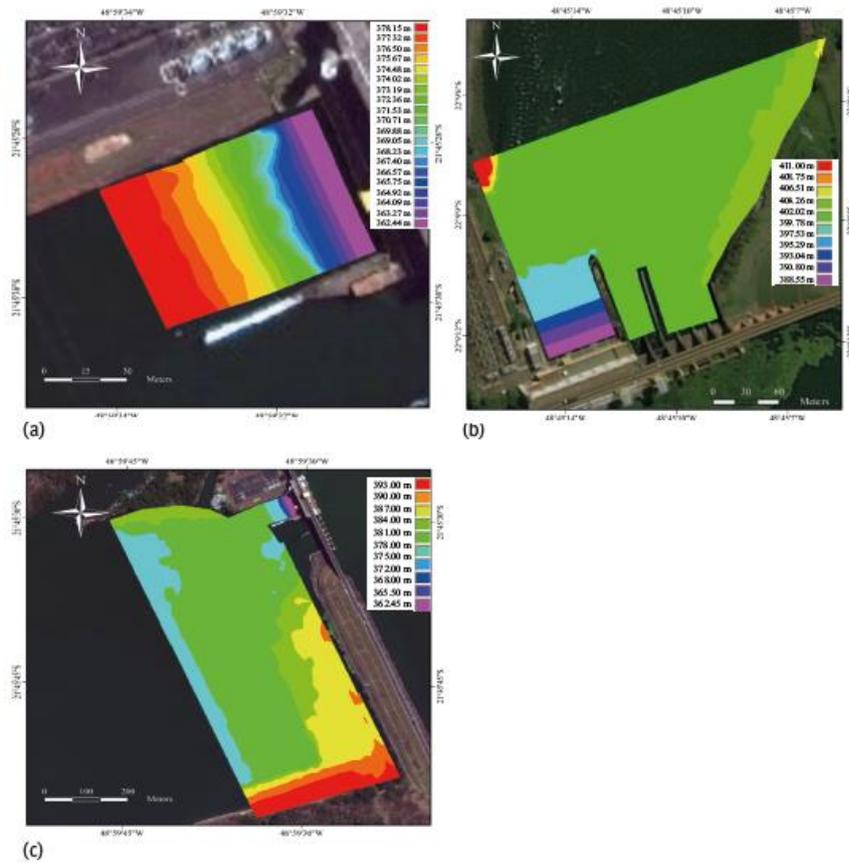


**Fig. 6:** Finite element hydrodynamic mesh used in the simulations: Ibitinga minor domain (a), Bariri (b), and Ibitinga major domain (c).

### 3 Results

#### 3.1 Terrain elevation model in reservoirs downstream of HPP

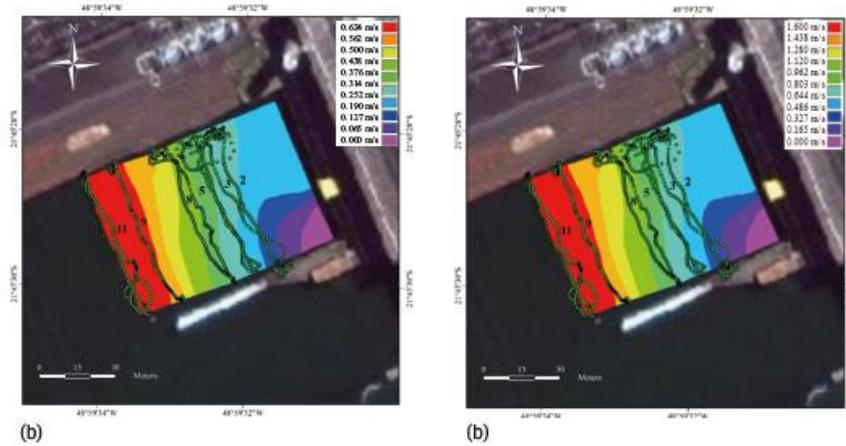
Figure 7(a–c) shows the isosurfaces of the interpolated terrain elevation model using the finite element method.



**Fig. 7:** Terrain elevation model: Ibitinga minor domain (a), Bariri (b), and Ibitinga major domain (c).

### 3.2 Measured and simulated velocities in Ibitinga HPP (minor domain)

In Figure 8(a, b), the simulated velocity fields for  $Q_{\min}$  and  $Q_{\max}$  for the minor domain in Ibitinga are shown. Analyzing the figure, one can observe the operation of the Ibitinga HPP, in which generating unit 3 was in maintenance, i. e., at its exit the flow was zero, in region to the southeast of the velocity fields. Aiming at the setup of hydrokinetic turbines, the velocities at the end of the dissipation basin are more interesting, being larger due to restricted access at the end of the basin slope. Figure 8 shows the transects of the Q-boat for the velocity and depth measurements, which were used for validation of the modeling.



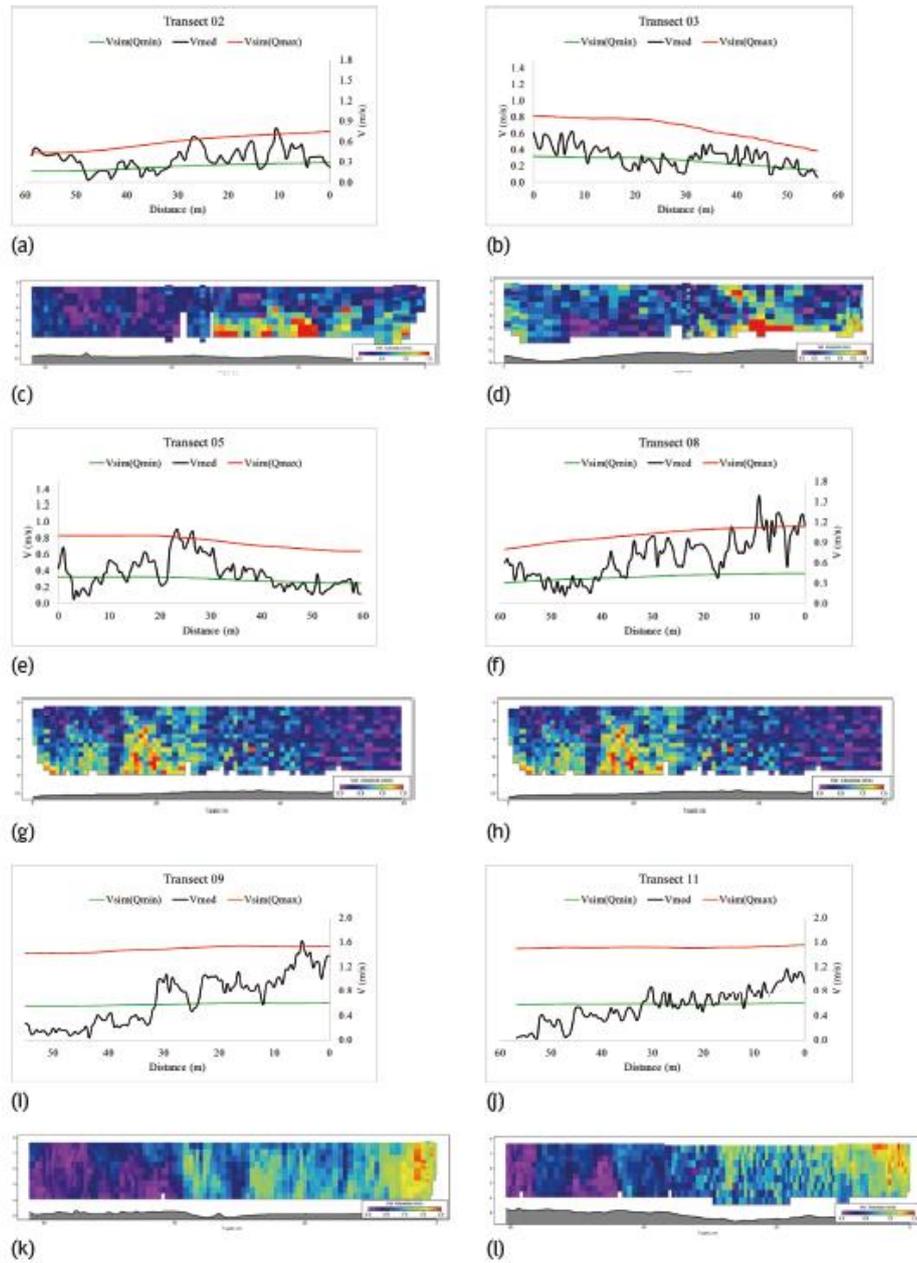
**Fig. 8:** Velocity isosurfaces for  $Q_{min}$  (a) and  $Q_{max}$  (b); and transect in the smaller area of Ibitinga.

Figure 9(a, b, e, f, i, j) shows the vertical velocities measured by ADP and simulated by the model as a function of the transects. In Figure 9(c, d, g, h, k, l) the cross sections with the measured velocities (In the ADP measurement cells) are presented as a function of the transects.

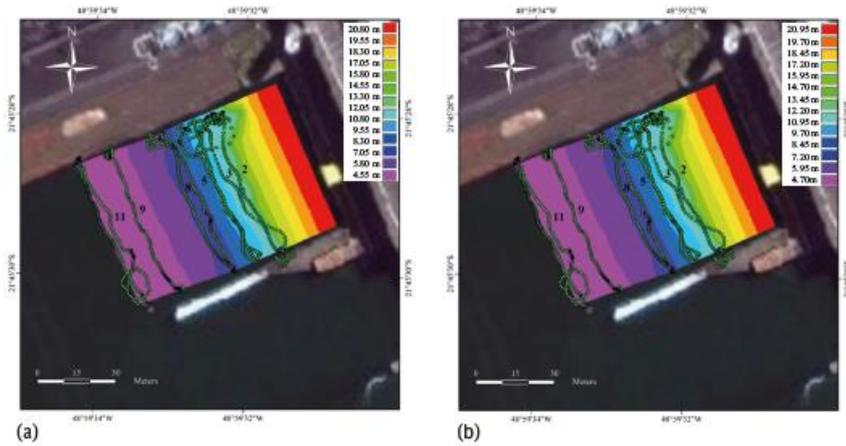
To validate the model, it is observed that the velocities measured confirm the higher simulated velocities on the right side of the exit channel (Figure 8), since on the left side one of the generating units was in maintenance on the measurement day. The velocities measured also confirm the higher simulated velocities at the end of the dissipation basin, due to the restricted access of the flow, because, as seen in the terrain elevation model, the dissipation basin is shaped like a slope. A high fluctuation in the velocity measurements is observed, which the model could not reproduce, since as a boundary condition it must have a flow not too far from the fluvial (laminar). However, at the beginning of the simulation domain, one has a flow with torrential (turbulent) characteristics as a consequence of the post turbine flow. However, although this boundary condition is unfavorable to the model, it did not prevent it from simulating the maximum mean velocities vertically with reasonable agreement with respect to the measurements (Figure 9 a, e, f, i).

### 3.3 Measured and simulated depths in Ibitinga HPP (minor domain)

Figure 10 shows the simulated depth fields for  $Q_{min}$  and  $Q_{max}$  and the Q-boat transects for depth and velocity measurements.



**Fig. 9:** Mean velocities measured in the vertical of the transects and simulated for  $Q_{\min}$  and  $Q_{\max}$  for the smaller domain of Ibitinga.



**Fig. 10:** Isosurface depths and transects for  $Q_{min}$  (a) and  $Q_{max}$  (b) in the smaller domain of Ibitinga.

Analyzing Figure 11(a–b), transects 02 and 03, important differences between the measured and simulated depths are observed. A plausible explanation for these differences is the estimates made for the terrain bathymetry by the UFPA team (Figure 3), aiming to increase the computational domain and improve the convergence of the model. For the other transects, shown in Figure 11(c–d–e–f), the simulated depths closely approximate the depths measured. Thus, the analysis of the hydrokinetic potential of the exit channel of the Ibitinga HPP can be completed for the two boundary conditions explored. It is assumed that the best location to set up a hydrokinetic turbine is on the right side of the outlet channel with vertical average maximum velocities of approximately 1.6 m/s and depths, on average, of up to 5 m. It can be considered that the end of the dissipation basin is the best place to set up hydrokinetic turbines, due to the restricted access of the flow, which increases the velocities in the area, resulting in higher power and energy generated.

### 3.4 Simulated velocities in Ibitinga HPP (major domain)

With the good results of the simulations in the smaller domain, simulations were elaborated for a larger part of the reservoir domain downstream of the Ibitinga HPP. In Figure 12(a–c), the velocity isosurfaces, are presented, considering the minimum flows ( $Q_{min}$ ), mean ( $Q_{med}$ ), and maximum ( $Q_{max}$ ), respectively, observed in the study area.

Analyzing Figure 12, it is observed that the higher velocities are to the north, near the end of the exit channel of the turbines. This location is the most appropriate for hydrokinetic turbine set up, depending on the velocities, for minimum, medium, and maximum flow.

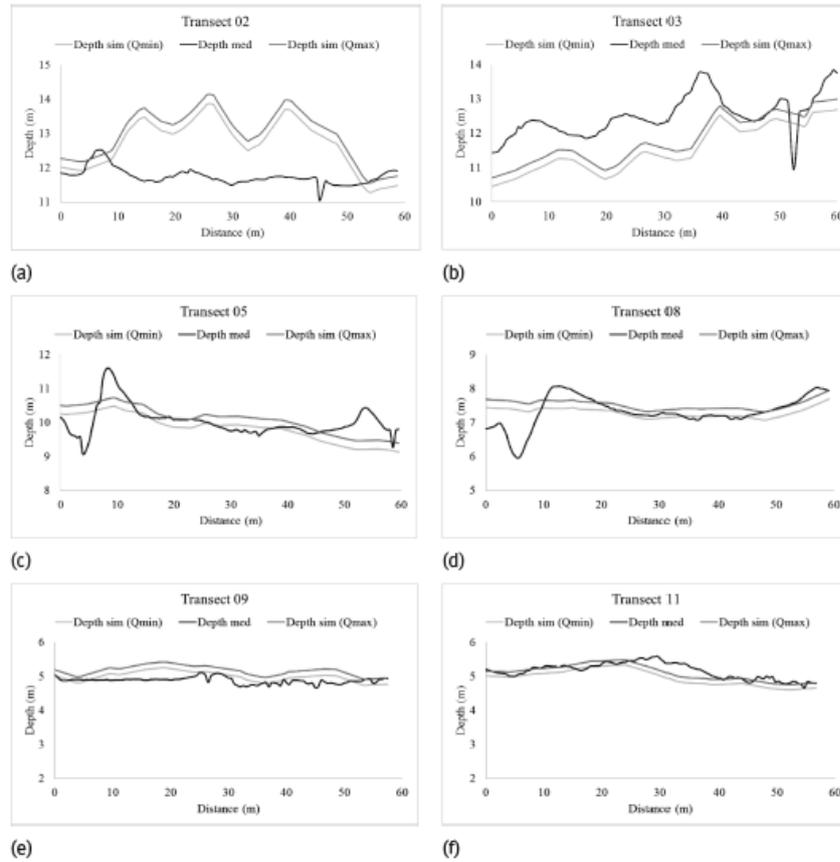


Fig. 11: Measured and simulated depths for  $Q_{\min}$  and  $Q_{\max}$  in the minor domain of Ibitinga

### 3.5 Simulated depths in Ibitinga HPP (major domain)

In Figure 13(a–c), the depth isosurfaces are presented, for the minimum, medium, and maximum flows, respectively. Analyzing Figure 13, it can be observed that the major depths are in the section just after the turbine's exit. However, this region is not favorable to set up hydrokinetic turbines, since there is strong turbulence with a strongly torrential flow, which is not captured by model. Thus, considering the velocities simulated in Figure 12 and the depths simulated in Figure 13, it can be stated that the best hydrokinetic site of the downstream reservoir of the HPP analyzed is to the north, near the end of the turbine outlet channel. In this case, for the simulated flows, velocities vary between 2.703 m/s and 1.468 m/s; and the depths vary between 4 m and 7 m.

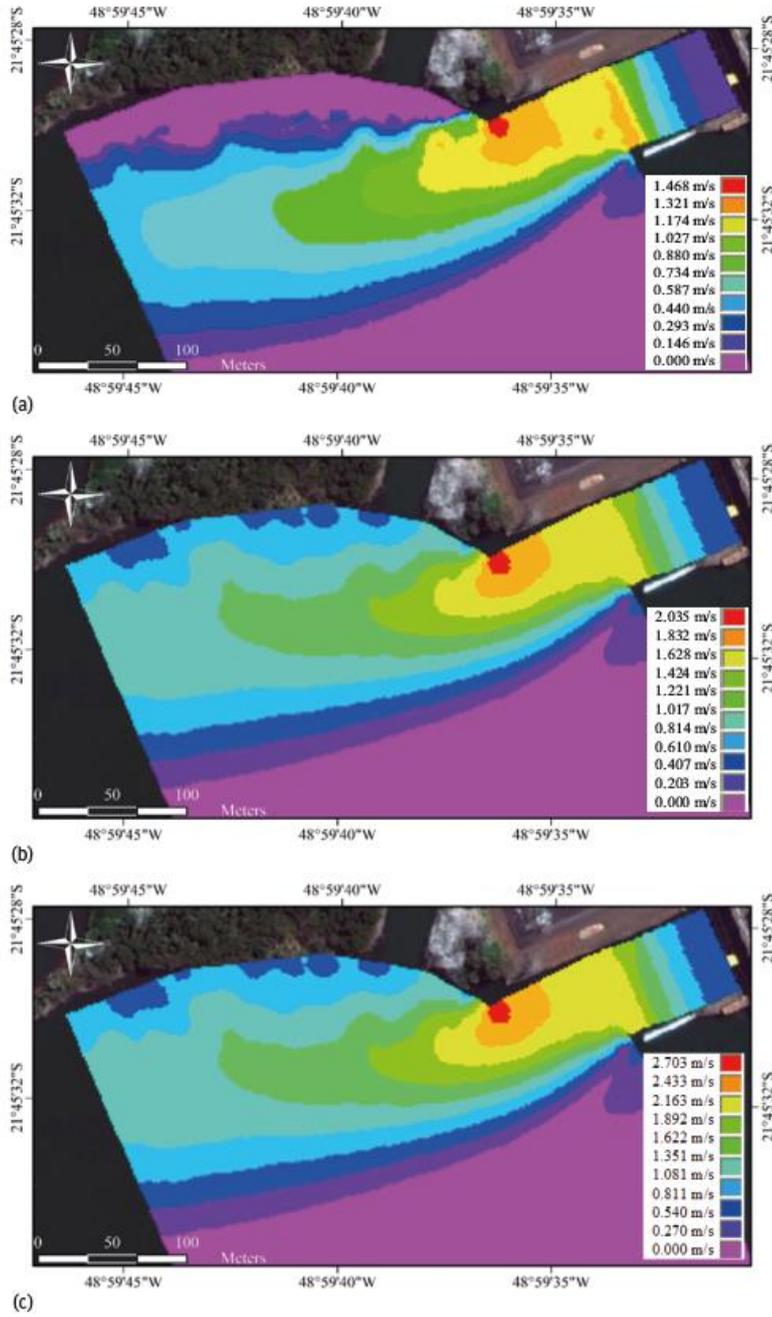


Fig. 12: Velocity Isosurfaces for  $Q_{min}$ , (a),  $Q_{med}$ , (b), and  $Q_{max}$ , (c) in the larger Ibitinga domain.

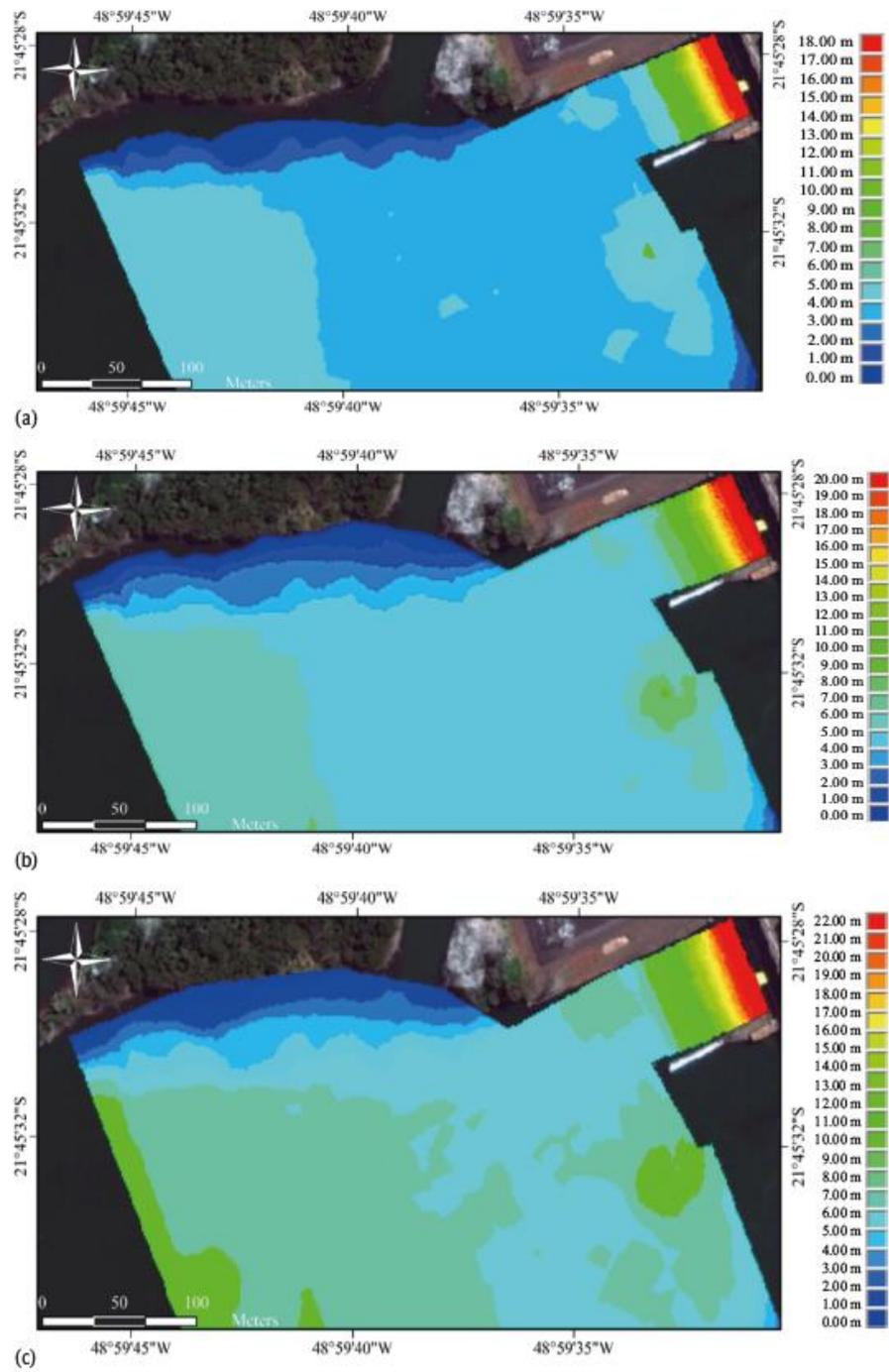


Fig. 13: Depth Isosurfaces for  $Q_{min}$  (a),  $Q_{med}$  (b), and  $Q_{max}$  (c) in the larger Ibitinga domain.

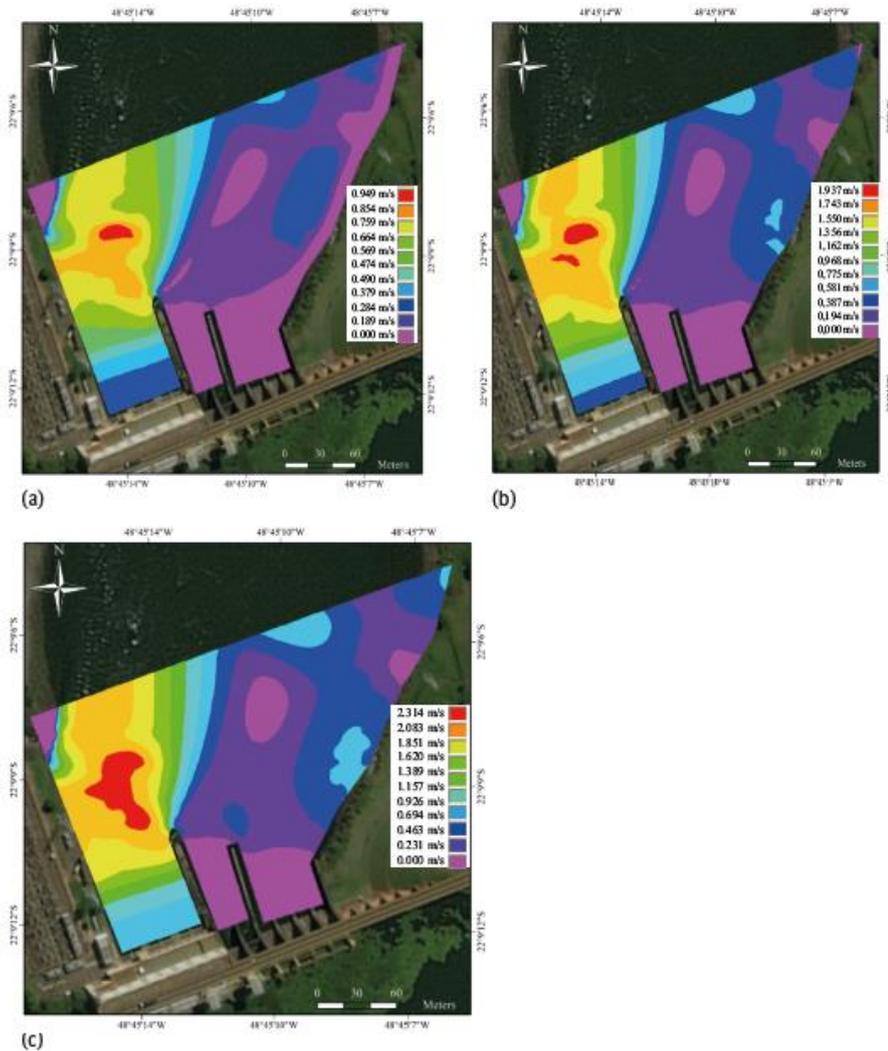


Fig. 14: Velocity isosurfaces for  $Q_{\min}$  (a),  $Q_{\text{med}}$  (b) and  $Q_{\max}$  (c) - Bariri.

### 3.6 Simulated velocities in Bariri HPP

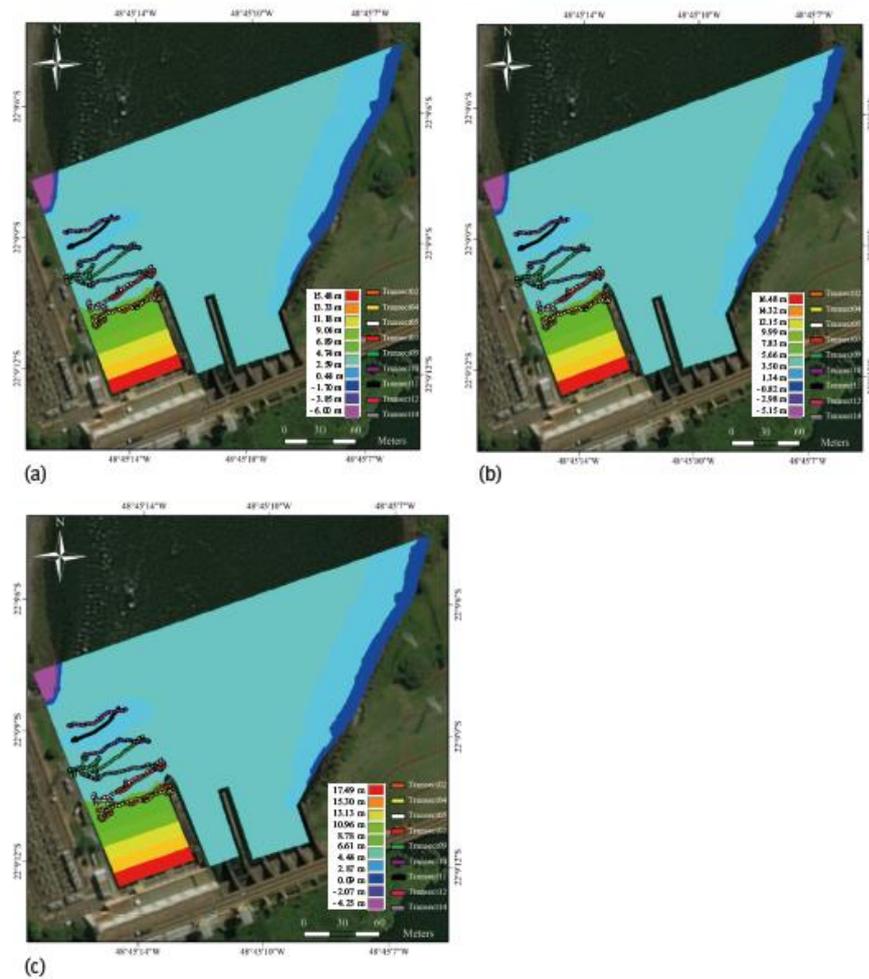
Figure 14(a–c) shows the isosurfaces of simulated velocities for  $Q_{\min}$ ,  $Q_{\text{med}}$ , and  $Q_{\max}$ , respectively, in Bariri.

In this case, the higher velocities are found after the dissipation basin (shown in red). Therefore, this region is highlighted in Bariri for the possible set up of hydrokinetic turbines that, besides good velocities, have depths between 2.59 and 6.61 m (Figure 15).

### 3.7 Measured and simulated depths in Bariri HPP

Figure 15(a-c) shows the isosurfaces of simulated depths for  $Q_{min}$ ,  $Q_{med}$ , and  $Q_{max}$ , respectively; and the transects routes made for measurements with the Q-boat.

The depths measured (Figure 16) through an ADP-M9 performed in field work along the downstream reservoir of the HPP were compared to the depths simulated by the Saint-Venant model.



**Fig. 15:** Depth Isosurfaces for  $Q_{min}$  (a),  $Q_{med}$  (b), and  $Q_{max}$  (c); and transects routes made with the Q-boat – Bariri.

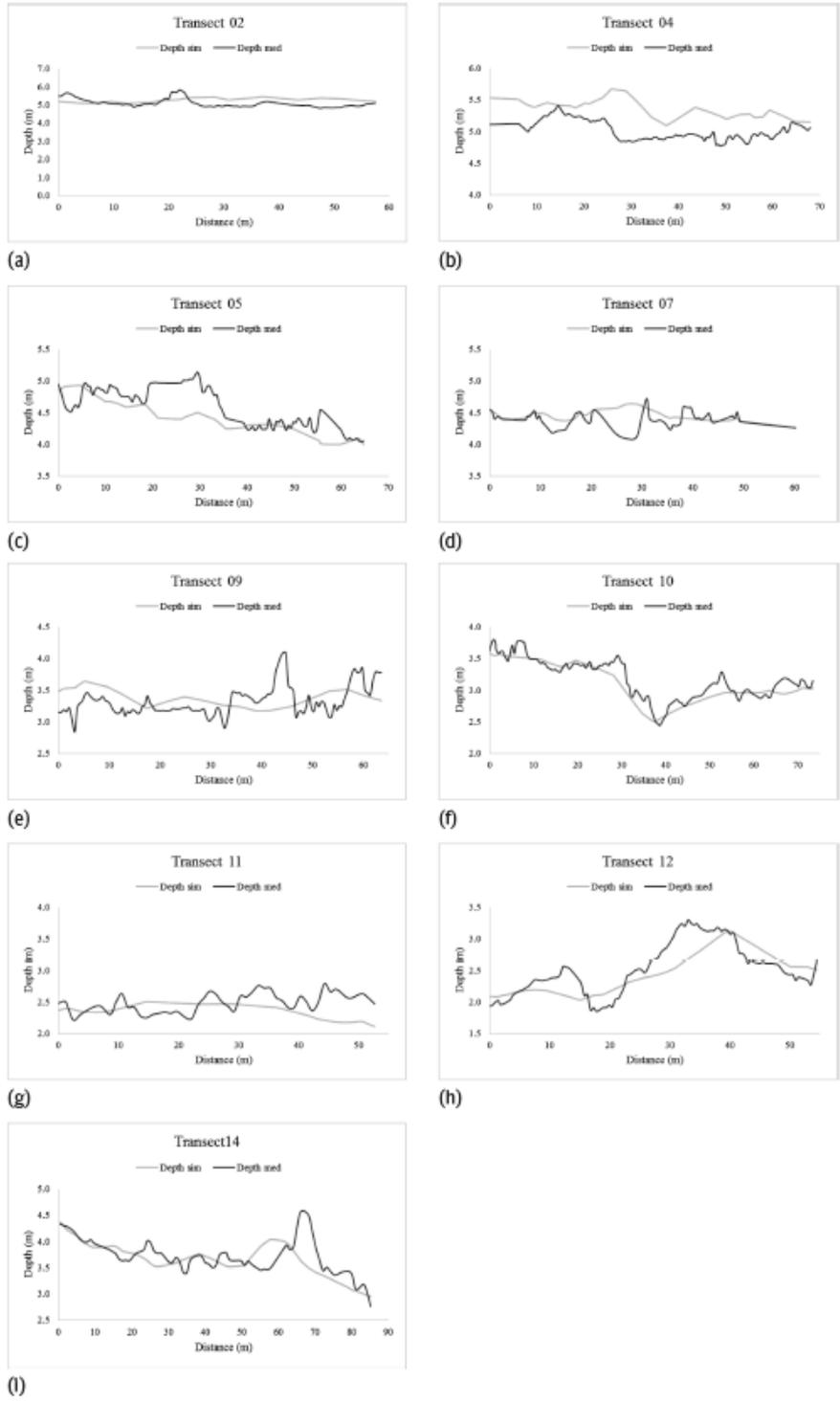


Fig. 16: Measured and simulated depths in Bariri HPP.

Analyzing Figure 16(a–l), differences between the simulated and measured depths are observed. However, it is noted that the model captured the standard variation of the depths measured. The differences shown may be due to mesh refining, i. e., 7 m. A more refined mesh would reduce the differences between the simulated and measured depths, but would require a longer computational time.

## 4 Conclusion

The downstream reservoirs of Ibitinga and Bariri HPP have remaining energy potential, which can be exploited by hydrokinetic turbines. Simulations were performed at minimum, medium, and maximum flows to determine the annual variation of velocities and depths. The model was calibrated by varying the Manning coefficient to obtain a good correlation between the measured and simulated flow rates. The results showed that the possibly favorable areas to set up hydrokinetic turbines, both in Ibitinga and Bariri HPP, are located in the region after the outlet of the dissipation basin, since the velocities reach their maximum values there, which results in higher power and energy generated. The good results achieved through the methodology applied suggest evaluating the remaining energy of other HPP.

## 5 Acknowledgment

The authors are grateful to CNPq for the financing of a PhD grant, process nº 155003/2010–0; and AES Tietê for its partnership in the R&D&I – HydroK project, together with UnB and UFPA.

## 6 References

- 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, Research Group on Numerical Eco-Hydraulics, Available In: <http://www.gre-ehn.ete.inrs.ca/H2D2>. Access: 17 March 2016.
- 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.; Brasil Junior, A. C. P.; Figueiredo, N. M.; Macêdo, E. N.; Secretan, Y. (2016), Assessment of hydrokinetic energy resources downstream of hydropower plants. *Renewable Energy*, v. 217, p. 1203–1214.

- Khan, M. J., Bhuyan, G., Iqbal, M. T., Qualcoe, 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.
- Liu, Y.; Packey, D. J. (2014). Combined-cycle hydropower systems - The potential of applying hydrokinetic turbines in the tailwaters of existing conventional hydropower stations. *Renewable Energy*, vol. 66, 228–231.
- 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.

**ANEXO 3- Planilha de dados de Vazão, Nível de Água para o estudo de caso da UHE  
TUCURUÍ**

DIA	NÍVEL MONTANTE (m)	NÍVEL JUSANTE (m)	Q (MEDIDA)	Q (SIMULADA)	V (SIMULADA)
05/11/2008	4,70	4,31	3772,00	3998,00	0,902
13/11/2012	4,90	4,50	3841,00	4260,00	0,924
24/10/2012	4,55	4,09	4492,00	4133,00	0,970
18/10/2012	4,35	3,76	4502,00	4352,00	1,075
19/08/2008	5,05	4,49	5034,00	5130,00	1,091
25/09/2012	5,40	4,85	5116,00	5553,00	1,100
22/11/2012	4,90	4,31	5380,00	5047,00	1,108
02/01/2008	5,10	4,52	5380,01	5274,00	1,112
08/06/2012	5,30	4,72	5666,00	5544,00	1,122
03/06/2007	5,50	4,93	5780,00	5777,00	1,123
02/07/2008	5,75	5,18	5886,00	6131,00	1,135
17/10/2008	5,55	4,95	5923,00	5977,00	1,153
28/06/2010	5,35	4,73	6014,00	5774,00	1,160
22/06/2010	5,48	4,83	6026,00	6080,00	1,193
22/07/2008	5,50	4,85	6131,00	6110,00	1,194
19/06/2008	5,85	5,17	6342,00	6766,00	1,236
21/06/2008	5,92	5,23	6360,00	6919,00	1,248
23/07/2010	5,40	4,65	6854,00	6327,00	1,268
10/01/2008	6,14	5,44	7132,01	7321,00	1,268
11/12/2012	6,10	5,38	7212,00	7341,00	1,282
20/05/2007	6,76	6,09	7884,00	8230,00	1,281
01/01/2014	6,94	6,26	8100,44	8600,00	1,298
18/12/2012	6,90	6,19	8582,00	8687,00	1,322
19/12/2012	6,95	6,20	8612,00	8984,00	1,358
20/12/2012	7,05	6,28	8722,00	9273,00	1,379
14/05/2007	7,30	6,68	9075,00	8892,00	1,260
05/01/2014	7,52	6,84	9170,60	9666,00	1,325
08/01/2014	7,66	7,05	9344,40	9473,00	1,267
09/01/2014	7,79	7,17	9509,48	9782,00	1,280
10/01/2014	7,86	7,27	9615,68	9700,00	1,253
11/01/2014	8,00	7,39	10124,48	10105,00	1,279
13/01/2014	8,15	7,47	10461,20	10895,00	1,353
15/01/2014	8,22	7,62	10737,64	10450,00	1,280
27/05/2008	8,20	7,47	11264,00	11339,00	1,400
06/05/2012	8,30	7,51	11416,00	11948,00	1,457
08/05/2012	8,35	7,54	11656,00	12185,00	1,477
26/01/2009	8,45	7,73	11952,01	11798,00	1,404
04/02/2011	8,50	7,66	12190,00	12714,00	1,509
07/03/2008	8,65	7,77	12202,00	13316,00	1,549
30/05/2008	8,70	7,84	12224,00	13305,00	1,535
06/02/2009	8,75	8,12	12442,00	11735,00	1,330
20/03/2009	8,85	8,05	12742,00	13246,00	1,495
16/02/2011	8,90	8,03	13070,00	13845,00	1,555

27/04/2012	9,00	8,18	13106,00	13737,00	1,519
30/04/2012	9,10	8,26	13496,00	14117,00	1,541
26/05/2011	9,20	8,34	13801,00	14500,00	1,563
13/04/2012	9,50	8,75	14784,00	14369,00	1,484
25/04/2012	9,70	8,80	15166,00	16049,00	1,625
20/04/2012	9,80	8,93	15524,00	16077,00	1,606
21/04/2012	9,85	8,95	15534,00	16440,00	1,634
20/02/2010	9,95	9,12	15809,00	16137,00	1,579
21/03/2010	10,10	9,4	16524,00	15337,00	1,466
08/02/2010	10,30	9,39	16722,00	17721,00	1,665
24/02/2010	10,35	9,39	17161,00	18265,00	1,708
26/03/2008	10,35	9,59	17457,00	16521,00	1,536
15/04/2012	10,40	9,47	17690,00	18160,00	1,687
27/03/2008	10,40	9,62	17875,00	16837,00	1,557
11/02/2012	10,60	9,86	18674,00	16953,00	1,529
12/02/2012	10,70	9,97	18734,00	17102,00	1,523
23/05/2011	10,80	9,82	18814,00	19711,00	1,749
04/02/2012	10,85	9,99	18954,00	18779,00	1,650
07/04/2012	10,90	10,05	19085,00	18822,00	1,644
14/02/2012	11,00	10,10	19371,00	19571,00	1,693
09/02/2012	11,10	10,18	19444,00	20042,00	1,716
06/04/2007	11,33	10,36	19899,00	21188,00	1,768
30/03/2010	11,35	10,47	20214,00	20379,00	1,692
19/03/2012	11,35	10,41	20464,00	20965,00	1,744
05/04/2007	11,40	10,53	20651,00	20420,00	1,685
15/03/2007	11,75	10,79	20964,00	22364,00	1,777
25/04/2007	11,79	11,01	21205,00	20545,00	1,617
19/04/2008	11,80	10,9	21806,00	21902,00	1,728
16/03/2012	11,90	11,10	22714,00	21085,00	1,641
14/03/2007	12,05	11,15	22738,00	22649,00	1,739
26/03/2007	12,05	11,22	23080,00	21863,00	1,675
24/04/2007	12,10	11,23	23171,00	22466,00	1,714
30/03/2007	12,25	11,43	23237,00	22329,00	1,674
18/04/2008	12,30	11,44	23273,00	22951,00	1,714
05/05/2011	12,35	11,43	23774,00	23789,00	1,771
28/05/2009	12,35	11,49	23902,00	23101,00	1,716
08/03/2012	12,40	11,47	24428,00	24057,00	1,782
27/03/2012	12,45	11,57	24464,00	23637,00	1,739
28/03/2012	12,50	11,60	24514,00	24025,00	1,760
30/03/2012	12,55	11,61	24584,00	24640,00	1,798
12/03/2012	12,55	11,65	24844,00	24178,00	1,762
03/04/2008	12,65	11,76	25240,00	24368,00	1,757
20/02/2012	12,80	11,91	25723,00	24835,00	1,764
27/02/2012	12,90	11,95	25804,00	25874,00	1,823
03/03/2012	13,00	12,21	26518,00	24160,00	1,678

12/04/2008	13,05	12,25	26530,00	24446,00	1,689
14/04/2011	13,10	12,12	26590,00	26886,00	1,858
24/05/2009	13,60	12,74	28151,00	26989,00	1,770
04/05/2009	13,65	12,67	31274,00	28748,00	1,883

**ANEXO 4- Planilha de dados de Vazão, Nível de Água para o estudo de caso da UHE  
Bariri**

Dia	Nível Jusante (m)	Q (medida)	Q (simulada)	V (simulada)
01/01/2016	40575	770,00	771,00	2,097
31/12/2015	40570	761,00	768,00	2,091
03/12/2015	40560	759,00	766,00	2,123
02/07/2013	40555	744,00	751,00	2,101
07/04/2013	40550	738,00	745,00	2,099
06/07/2012	40545	736,00	743,00	2,117
02/04/2013	40540	730,00	737,00	2,116
07/08/2013	40535	697,00	703,00	2,038
07/10/2013	40530	691,00	697,00	2,040
16/06/2013	40525	676,00	682,00	2,017
04/12/2015	40520	665,00	671,00	2,004
24/09/2011	40515	667,00	673,00	2,029
24/01/2012	40510	622,00	628,00	1,915
05/03/2012	40505	617,00	623,00	1,919
16/06/2011	40500	598,00	604,00	1,880
14/09/2011	40495	530,00	535,00	1,690
27/04/2011	40490	519,00	524,00	1,672
06/01/2013	40485	512,00	517,00	1,668
20/11/2011	40480	499,00	504,00	1,639
24/11/2015	40475	494,00	499,00	1,637
09/04/2011	40470	477,00	482,00	1,599
11/03/2014	40465	457,00	461,00	1,551
14/01/2015	40460	450,00	454,00	1,545
13/09/2015	40455	420,00	424,00	1,460
25/05/2015	40450	392,00	396,00	1,381
14/04/2014	40445	344,00	347,00	1,229
09/03/2013	40440	376,00	380,00	1,356
24/06/2014	40435	333,00	336,00	1,218
02/09/2014	40430	323,00	326,00	1,197
14/12/2014	40425	286,00	289,00	1,075
25/10/2015	40420	276,00	279,00	1,050
11/07/2013	40415	229,00	231,00	0,884
30/08/2013	40405	203,00	205,00	0,805
13/09/2014	40400	191,00	193,00	0,768