

# INVESTIGAÇÃO DAS DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS DE MODELO FÍSICO E DE MODELOS COMPUTACIONAIS DO ESCOAMENTO EM UM TRECHO DO RIO PAUTE (EQUADOR)

*Márcio Froelich Friedrich<sup>1</sup>, Fernanda Barreto Bette<sup>2</sup>, Fernando Ribas Terabe<sup>3</sup> & José Junji Ota<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- O escoamento em um trecho do rio Paute, onde será construído o aproveitamento hidrelétrico Paute-Mazar (Equador), foi estudado em um modelo físico em escala 1:60 e em modelos computacionais 2DH e 3D no *software* Delft3D. Foram comparados perfis longitudinais de níveis de água e curvas de descarga ao longo do trecho. O modelo computacional Delft3D foi utilizado como ferramenta para investigar as discrepâncias entre as curvas de descarga obtidas por simulações 1D com o HEC-RAS, na fase de projeto da usina, e as curvas de descarga obtidas no modelo físico durante a calibragem da rugosidade do seu leito. Os modelos no Delft3D produziram resultados semelhantes aos do modelo físico usando-se coeficientes usuais de rugosidade e de turbulência.

**ABSTRACT** --- The flow at a reach of Paute River, at Paute-Mazar hydroelectric powerplant's site, was studied by means of an 1:60 scale physical model, a 2DH and a 3D Delft3D computational models. Longitudinal profiles and stage-discharge rating curves have been compared. The Delft3D computational model was used as a tool to investigate the differences between the rating curves derived from 1D HEC-RAS simulations, which were part of the powerplant's design, and the rating curves measured at the physical model during its bed roughness calibration phase. The Delft3D model results, set with usual roughness and turbulence parameters, were similar to those of the physical model.

**Palavras-chave:** modelo físico, modelo computacional hidrodinâmico, Delft3D.

---

1) Engenheiro civil, pesquisador do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR LACTEC. Centro Politécnico da UFPR, BR-116 s/n, Curitiba, PR, Caixa Postal 19067, CEP 81531-980. Tel.: (41) 3361-6295. E-mail: [mfi@lactec.org.br](mailto:mfi@lactec.org.br).

2) Engenheira ambiental, bolsista do Instituto tecnológico SIMEPAR. Centro Politécnico da UFPR, BR-116 s/n, Curitiba, PR, Caixa Postal 19100, CEP 81531-990. E-mail: [ferbbette@yahoo.com.br](mailto:ferbbette@yahoo.com.br).

3) Engenheiro civil, pesquisador do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR LACTEC. Centro Politécnico da UFPR, BR-116 s/n, Curitiba, PR, Caixa Postal 19067, CEP 81531-980. Tel.: (41) 3361-6298. E-mail: [terabe@lactec.org.br](mailto:terabe@lactec.org.br).

4) Engenheiro civil, pesquisador do Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR LACTEC. Professor Adjunto da Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR. Tel.: (41) 3361-6291. E-mail: [ota@lactec.org.br](mailto:ota@lactec.org.br).

## 1 - INTRODUÇÃO

Encontra-se em andamento, no Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza – CEHPAR, os estudos em modelo físico reduzido da UHE Paute-Mazar, sendo construída na região centro-sul do Equador. A Figura 1 ilustra o local do aproveitamento hidrelétrico.



Figura 1 – Rio Paute na região da implantação da barragem.

O modelo físico foi construído em escala geométrica horizontal e vertical de 1:60 e operado segundo o critério de semelhança de Froude; abrange os trechos de rio imediatamente anterior e posterior ao eixo da barragem, totalizando 1.500 m de extensão no protótipo. A Figura 2 ilustra o modelo físico na fase de calibragem da rugosidade do leito.



Figura 2 – Modelo físico do rio Paute – vista do trecho a jusante do eixo da barragem.

Durante o processo de calibragem da rugosidade do leito no modelo físico, foram enfrentadas dificuldades para se estabelecer, no modelo, os níveis de água indicados no projeto do aproveitamento. Os níveis de projeto haviam sido determinados através de um modelo computacional unidimensional desenvolvido no *software* HEC-RAS, elaborado a partir de um levantamento batimétrico realizado em seções transversais espaçadas de 460 metros, em média. Os níveis de água no modelo físico resultavam geralmente acima dos níveis indicados no projeto, dados pela modelagem em HEC-RAS.

Com o intuito de investigar os motivos dessas discrepâncias, foi elaborado um modelo computacional no *software* Delft3D-FLOW e seus resultados foram comparados com os resultados de modelo físico e com os níveis de água que se buscava impor no modelo físico, provenientes da modelagem 1D com HEC-RAS.

## 2 – DESCRIÇÃO RESUMIDA DO MODELO COMPUTACIONAL DELFT3D

O modelo Delft3D-FLOW simula escoamento transiente bidimensional horizontal (2DH) ou tridimensional (3D) e transporte de constituintes. Esses processos são forçados no modelo por marés, vazões fluviais, fenômenos meteorológicos e diferenças de densidade devidas a distribuições não-uniformes de temperatura e salinidade. O modelo pode ser usado para simular o escoamento em rios, oceano raso, áreas costeiras, estuários e reservatórios.

O Delft3D-FLOW resolve as equações de Navier-Stokes para um escoamento incompressível, assumindo as hipóteses de águas rasas e de Boussinesq. As acelerações verticais são desprezadas na equação da quantidade de movimento na direção vertical, conduzindo-a à equação da pressão hidrostática. Em modelos tri-dimensionais, as velocidades verticais resultam da equação da continuidade.

As escalas de movimento não resolvíveis pela grade tem seus efeitos considerados através da promediação temporal de Reynolds com aplicação do conceito de viscosidade turbulenta. O coeficiente de viscosidade horizontal  $\nu_H$  é considerado uma sobreposição de três partes: uma devida à viscosidade molecular (em geral desprezível), uma devida à turbulência 2D e uma devida à turbulência 3D. A parte 2D,  $\nu_{2D}$ , é associada à contribuição dos movimentos horizontais não-resolvíveis pela grade horizontal ("turbulência sub-grade"). O termo  $\nu_{3D}$  deve-se à turbulência tridimensional e é calculado por um modelo de turbulência escolhido pelo usuário. Portanto, no Delft3D-FLOW o coeficiente de viscosidade horizontal  $\nu_H$  é definido por:

$$\nu_H = \nu_{mol} + \nu_{2D} + \nu_{3D} \quad (1)$$

Na versão do Delft3D aqui utilizada não há parametrização para turbulência bidimensional sub-grade, ou seja, o coeficiente de viscosidade turbulenta  $\nu_{2D}$  (constante ou variável no espaço) precisa ser definido diretamente pelo usuário. O coeficiente de viscosidade vertical  $\nu_H$  é dado pela soma entre  $\nu_{3D}$  e  $\nu_{mol}$ , com  $\nu_{3D}$  constante ou calculado por modelos de ordem zero, primeira ordem ( $\kappa-L$ ) ou segunda ordem ( $\kappa-\epsilon$ ).

No modelo 2DH, a tensão tangencial no fundo é dada pela lei:

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho_0 g \vec{U} |\vec{U}|}{C_{2D}^2} \quad (2)$$

onde  $\vec{U}$  é a magnitude da velocidade promediada na profundidade. No modelo 3D, a tensão tangencial no fundo é dada pela lei:

$$\vec{\tau}_b = \frac{\rho_0 g \vec{u}_b |\vec{u}_b|}{C_{3D}^2} \quad (3)$$

sendo  $\vec{u}_b$  a velocidade horizontal na primeira camada acima do leito.

Os coeficientes  $C_{2D}$  e  $C_{3D}$  podem ser dados pelas formulações de Chézy e Manning, entre outras.

## 2.1 – Aspectos numéricos principais

O conjunto de equações diferenciais parciais juntamente com as condições iniciais e de contorno é resolvido no Delft3D-FLOW por uma grade de diferenças finitas em coordenadas ortogonais curvilíneas no plano horizontal. O tipo de grade empregado é usualmente chamado *staggered grid*, em que a pressão (ou nível de água) é definida no centro da célula e as velocidades nas faces da mesma (*Arakawa C-grid*). Na direção vertical é usado o sistema de coordenadas sigma, definido como:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (4)$$

onde:

$z$  é a coordenada vertical no espaço físico;

$\zeta$  é a elevação da superfície livre sobre o plano de referência ( $z=0$ );

$d$  é a profundidade da água abaixo do nível de referência;

$H$  é a profundidade total de água, dada por  $H = d + \zeta$ .

No fundo  $\sigma = -1$  e na superfície livre  $\sigma = 0$ . Portanto, o sistema de coordenadas  $\sigma$  tem seus contornos ajustados ao fundo e à superfície livre móvel e apresenta o mesmo número de camadas para todo o domínio.

A integração no tempo é feita através de um método misto chamado ADI (*Alternating Direction Implicit*), introduzido por Leendertse (1967, 1971, 1973) e Stelling (1984, *apud* Delft3D-FLOW, 2002b). O método divide o passo de tempo em dois estágios, cada estágio sendo metade de

um passo de tempo. Nos dois estágios todos os termos das equações são resolvidos de forma consistente com no mínimo precisão de segunda ordem no espaço. Para os gradientes de níveis de água e os termos de advecção, os estágios de tempo são alternados: se em um estágio um termo é calculado implicitamente no tempo, esse termo será calculado explicitamente no estágio seguinte. Para um passo de tempo completo, cada termo é integrado com precisão de segunda ordem no tempo. A vantagem do método é que as velocidades e níveis de água implicitamente integrados são acoplados ao longo de linhas de grade conduzindo a sistemas de equações de pequena largura de banda.

### 3 – ELABORAÇÃO DO MODELO COMPUTACIONAL NO DELFT3D

#### 3.1 – Geração da grade numérica

A grade utilizada tem 6308 células, com tamanhos variando entre 2 m e 9 m e aproximadamente 20 células distribuídas ao longo da seção transversal do rio (Figura 3). Algumas simulações preliminares foram realizadas em uma malha de células duas vezes maiores, ou seja, com a seção transversal do rio sendo representada por apenas 10 células. Tais simulações conduziram a resultados bastante diferentes dos resultados obtidos com a grade mais refinada e foram por isso abandonadas em favor das simulações com a grade detalhada.

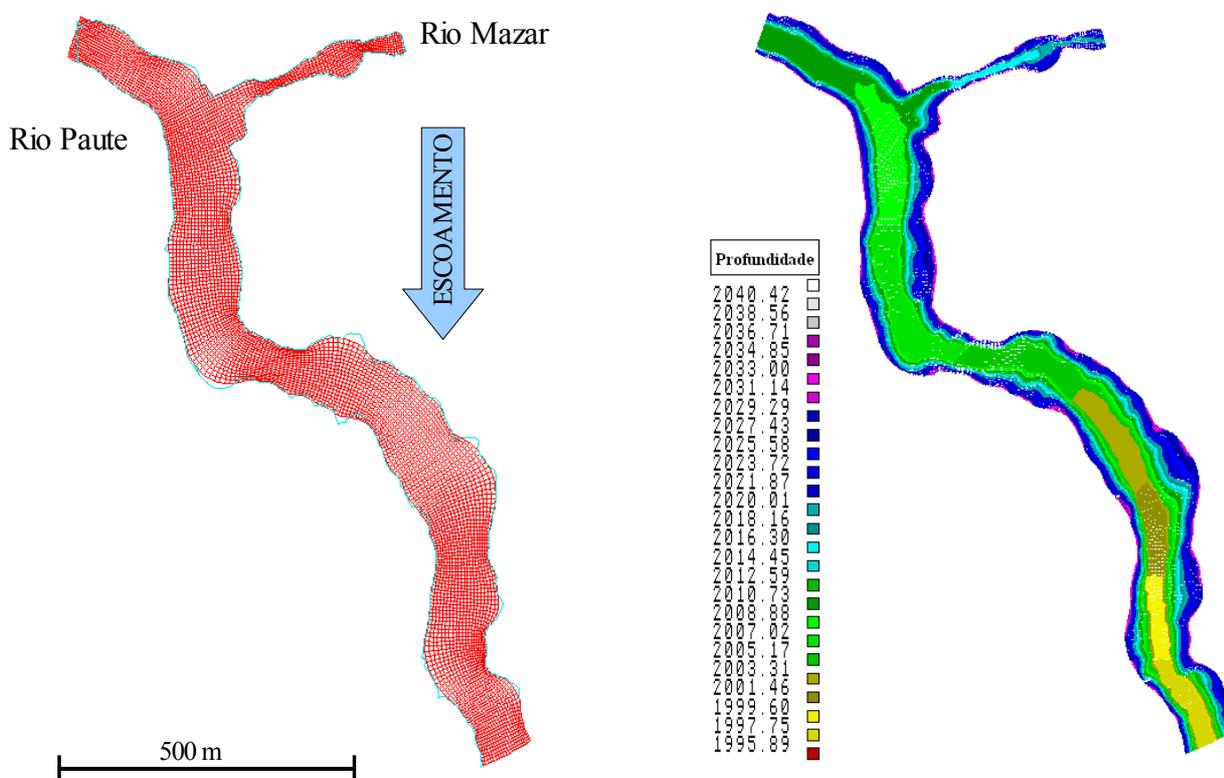


Figura 3 – Grade horizontal de diferenças finitas e batimetria do modelo Delft3D.

### 3.2 – Qualidade da grade numérica

A qualidade da grade do modelo foi verificada quanto aos seguintes aspectos:

- ortogonalidade;
- suavidade nas direções M e N.

A ortogonalidade é medida através do co-seno dos ângulos entre as linhas da grade nas suas direções M e N do sistema de coordenadas curvilíneas. Os valores obtidos do co-seno dos ângulos devem ser próximos de zero, o que caracteriza a ortogonalidade. O erro na direção calculada do termo de pressão no Delft3D é proporcional a esses valores. Em áreas abertas, os co-senos devem ser inferiores a 0,02; junto a contornos de terra, valores maiores são algumas vezes aceitáveis (WL | Delft Hydraulics, 2002 d).

A suavidade é medida pela razão entre as áreas dos elementos da malha nas direções M e N. A grade deve ser suave para minimizar erros de truncamento do esquema de diferenças finitas. O tamanho de células adjacentes deve variar menos de 20%, embora exceções localizadas sejam aceitáveis (WL | Delft Hydraulics, 2002a).

A Figura 4 apresenta a ortogonalidade e a suavidade da grade na direção do escoamento. Pode-se observar que a maioria dos valores de ortogonalidade são menores do que 0,02, alcançando 0,04 em algumas poucas áreas. A suavidade na direção M (eixo longitudinal do rio) resultou dentro da faixa de valores desejáveis, entre 0,80 e 1,20. Na direção N, os valores de suavidade mantiveram-se na mesma faixa.

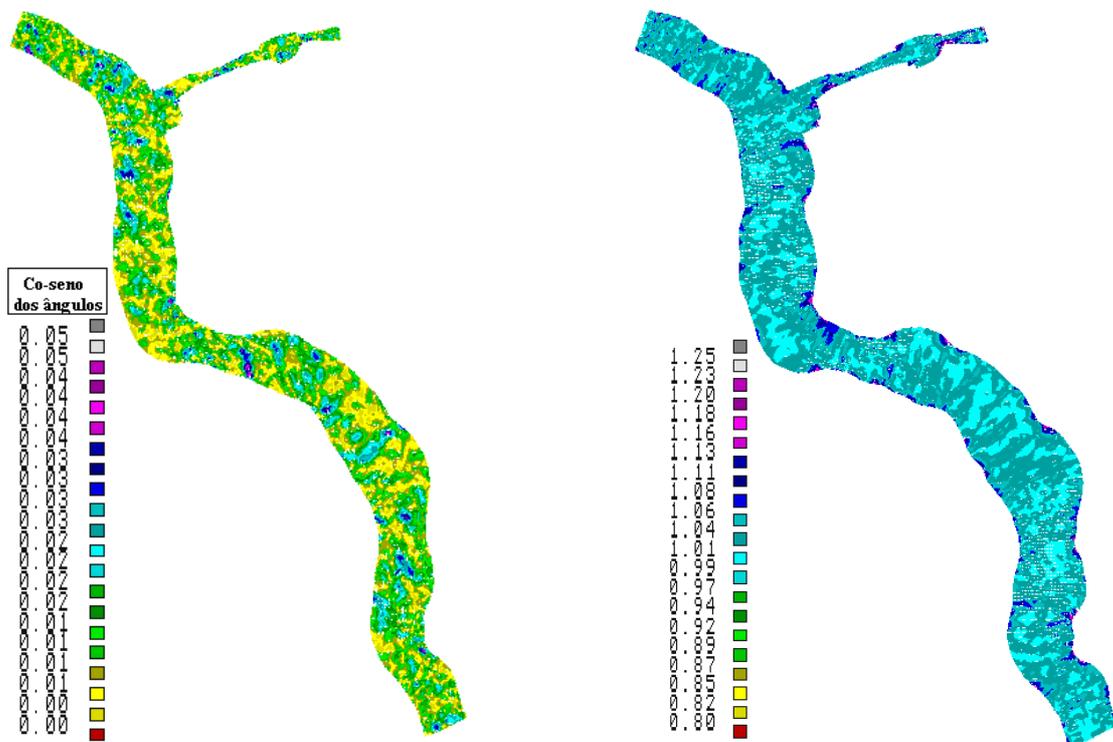


Figura 4 – Ortogonalidade e suavidade da grade numérica.

### 3.3 – Parâmetros adotados

O modelo computacional não foi efetivamente calibrado por não haver curvas de descarga medidas em campo. Os dados de modelo físico não poderiam ser utilizados na calibragem pois o que se buscava era, na realidade, uma confirmação de que o modelo físico havia sido corretamente implementado.

Portanto, foram escolhidos parâmetros físicos e numéricos para o modelo Delft3D consoantes com a experiência anterior em outros modelos (Friedrich, 2004; Terabe *et al.*, 2005) e com as sugestões encontradas na literatura para rugosidade de leitos de rio (Barnes, 1967). Para a rugosidade do fundo foi adotado um  $n$  de Manning igual a  $0,033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , valor usual para leito pedregoso. Barnes (1967), no relatório técnico da US Geological Survey, indica o rio da Figura 5 como um local onde foi verificado esse valor de Manning. No modelo físico foram colados, com base em observações de fotografias do rio Paute, pedregulhos com diâmetro médio  $d$  igual a  $0,33 \text{ m}$  ao longo de todo o rio e pedregulhos com  $d$  igual a  $0,96 \text{ m}$  espaçados de 6 a 9 metros<sup>1</sup>. Esses diâmetros conduzem, pela relação empírica deduzida por Strickler (Henderson, 1966):

$$n = 0,04 \cdot d^{1/6} \quad (5)$$

a valores de Manning de  $0,033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$  e  $0,040 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , respectivamente. Entretanto, a relação deduzida por Strickler considera pedregulhos posicionado lado a lado e não espaçados como no modelo físico. Assim, espera-se que os valores de Manning do modelo físico resultem inferiores aos valores dados pela relação de Strickler.



Figura 5 – Rio Clearwater, com  $n$  de Manning  $0,033 \text{ m}^{-1/3}\text{s}$ , segundo Barnes/USGS (1967).

<sup>1</sup> Dimensões em protótipo.

A viscosidade horizontal  $\nu_H$  foi escolhida igual a 1,6 m<sup>2</sup>/s, adotando-se os resultados de um estudo do rio Jacuí, realizado no CEHPAR, em que os perfis de velocidade em um modelo computacional 2DH foram calibrados com base em perfis de velocidades medidos no modelo físico. O modelo utilizado no rio Jacuí adota uma viscosidade  $\nu_H$  variável com a velocidade  $U$  e com o comprimento  $\Delta x$  de cada célula, segundo a relação constante  $\frac{U \Delta x}{\nu_H}$ . A partir do valor obtido para essa relação no rio Jacuí e de valores médios de  $U$  e de  $\Delta x$  no modelo do rio Paute, foi escolhido o valor para  $\nu_H$ .

No Delft3D, a precisão e a estabilidade numérica da simulação são, entre outros parâmetros, dependentes do número de Courant:

$$Cr = \frac{\Delta t \sqrt{gh}}{[\Delta x \Delta y]} \quad (6)$$

onde  $[\Delta x \Delta y]$  é uma dimensão característica, como o valor mínimo de discretização entre as duas direções. O Delft3D utiliza a diagonal da célula no cálculo de  $Cr$ .

Em geral, o número de Courant não deve exceder o valor 10, mas, em casos onde não há fortes gradientes no campo de velocidades, o número de Courant pode ser substancialmente maior (WL | Delft Hydraulics, 2002b). Para atender tal critério, foi adotado um passo de tempo computacional  $\Delta t$  de 0,6 segundos. A relação entre o tempo simulado em protótipo e o tempo computacional gasto foi de 4,06 no modelo 2DH e 0,38 no modelo 3D.

## 4 – RESULTADOS DOS MODELOS FÍSICO E COMPUTACIONAIS

### 4.1 – Simulações realizadas

Todos os ensaios no modelo físico e no Delft3D foram realizados para condições de escoamento permanentes, ou seja, vazão constante no contorno de montante e nível de água constante no contorno de jusante. No modelo Delft3D, as simulações foram iniciadas com nível de água constante e velocidades nulas em todo o domínio, sendo necessária menos de uma hora de simulação (tempo de protótipo) para que fosse atingida uma condição de escoamento permanente.

Foram realizadas simulações bidimensionais promediadas na vertical (2DH) e simulações tridimensionais (3D) com 5 camadas sigma<sup>2</sup> ao longo da profundidade, com as vazões de 100, 350, 1.500, 2.500, 5.000 e 7.000 m<sup>3</sup>/s.

---

<sup>2</sup> Distribuição das camadas sigma, do fundo para a superfície, em percentual da profundidade: 5%, 10%, 20%, 30% e 35%.

Foram instaladas no modelo físico as réguas linimétricas RL1, RL2 e RL3, presentes nos estudos com HEC-RAS. No modelo Delft3D foram fixados pontos de observação nas mesmas coordenadas das réguas, como indicado na Figura 6.

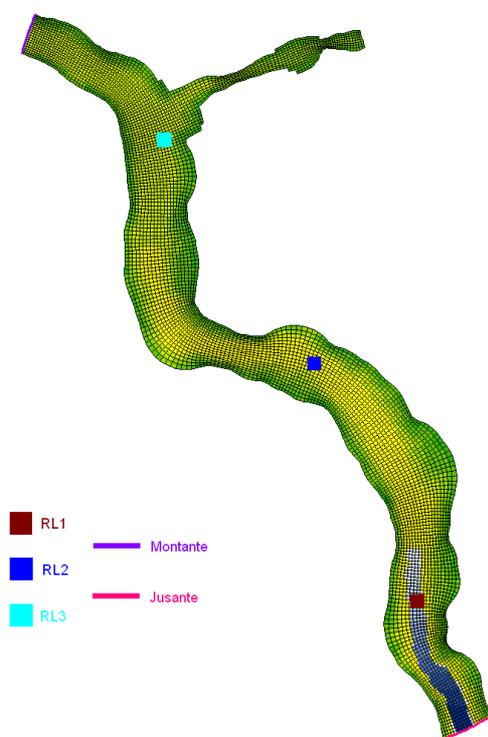
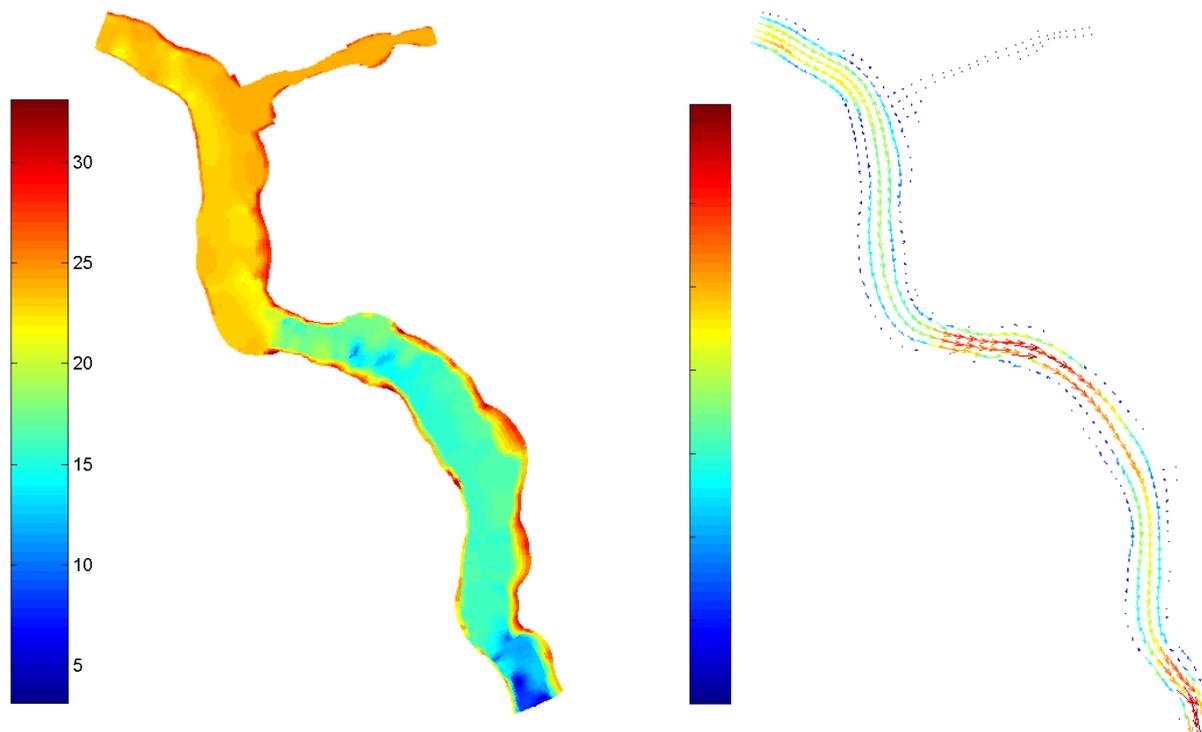


Figura 6 – Réguas linimétricas no modelo físico, indicadas sobre a grade do modelo Delft3D.

Nas simulações do modelo físico e do modelo Delft3D, procurou-se impor níveis de água no limite de jusante do modelo de tal forma que os níveis na régua linimétrica RL-1 (a régua posicionada mais a jusante no modelo físico) fossem os mesmos da curva de descarga indicada no projeto, do modelo 1D HEC-RAS. Isso foi possível, dentro da precisão desejada, nas vazões de 100, 350 e 1.500 m<sup>3</sup>/s. Nas vazões de 2.500, 5.000 e 7.000 m<sup>3</sup>/s, observou-se nos modelos físico e Delft3D a presença de um controle hidráulico entre a régua RL-1 e o final do modelo, que impedia a imposição dos níveis do HEC-RAS na régua RL-1. Portanto, nos modelos físico e Delft3D, a partir da vazão de 2.500 m<sup>3</sup>/s, o nível de água imposto a jusante deixou de controlar os níveis de água em praticamente todo o modelo.

#### 4.2 – Resultados obtidos

A título de ilustração, são apresentados na Figura 7 os níveis de água e as velocidades obtidas no modelo computacional 2DH na simulação de 5.000 m<sup>3</sup>/s.



Notas: - as áreas em vermelho indicam células fora da água;  
 - somar 2000 m aos níveis de água indicados na escala.

Figura 7 – Níveis de água (m) e vetores velocidade (m/s) obtidos no modelo computacional 2DH com vazão de 5000 m<sup>3</sup>/s.

O Quadro 1 apresenta os níveis de água resultantes em cada vazão nos modelos HEC-RAS 1D, físico, Delft3D 2DH e Delft3D 3D. As curvas de descarga correspondentes às réguas RL3, RL2 e RL1 estão nas figuras 8 a 10, respectivamente.

Quadro 1 – Níveis de água impostos (RL1) e resultantes (RL2 e RL3) nos modelos.

Vazão	Níveis de água resultantes (m)												N.A. Jusante (m)
	Régua RL3				Régua RL2				Régua RL1				
	HEC-RAS	Modelo Físico	Delft3D 2DH	Delft3D 3D	HEC-RAS	Mod. Físico	Mod. 2DH	Mod. 3D	HEC-RAS	Mod. Físico	Mod. 2DH	Mod. 3D	
100	2008,96	2008,92	2009,14	2009,20	2005,64	2005,01	2005,92	2005,97	2001,25	2001,26	2001,26	2001,31	2001,18
350	2010,5	2010,22	2010,48	2010,67	2006,89	2005,83	2007,11	2007,17	2002,88	2002,91	2002,91	2003,03	2002,82
1500	2014,32	2015,25	2014,98	2015,70	2010,31	2009,18	2010,21	2010,40	2006,75	2006,75	2006,79	2006,98	2003,80
2500	2016,58	2018,41	2018,09	2018,72	2012,47	2011,65	2012,05	2012,24	2008,98	2009,94	2009,94	2010,14	2005,00
5000	2020,84	2024,25	2023,69	2024,48	2016,76	2017,51	2015,50	2017,41	2013,15	2017,34	2016,05	2016,53	2006,00
7000	2023,58	2028,50	2026,79	2027,77	2019,62	2022,50	2019,97	2021,80	2015,78	2021,36	2020,09	2020,85	2007,00

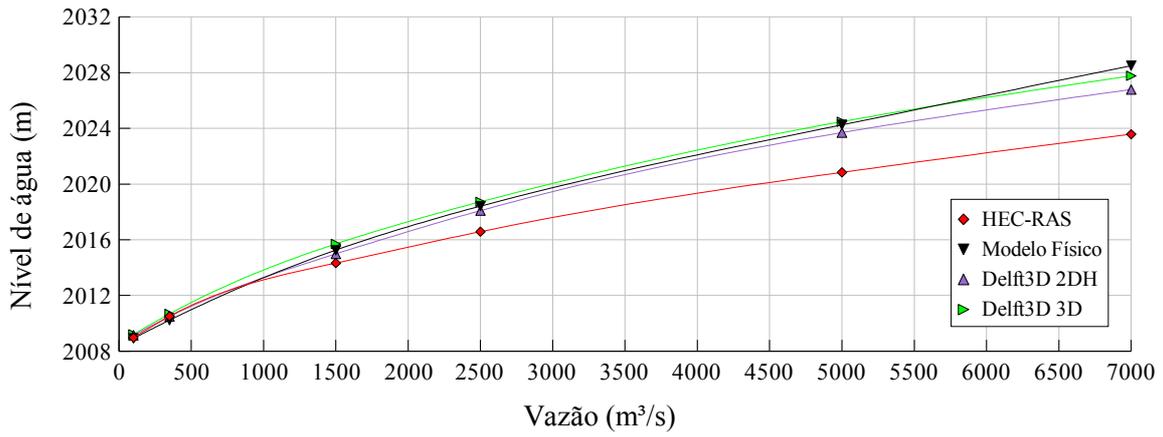


Figura 8 – Comparação entre as curvas de descarga na régua RL3 nos modelos.

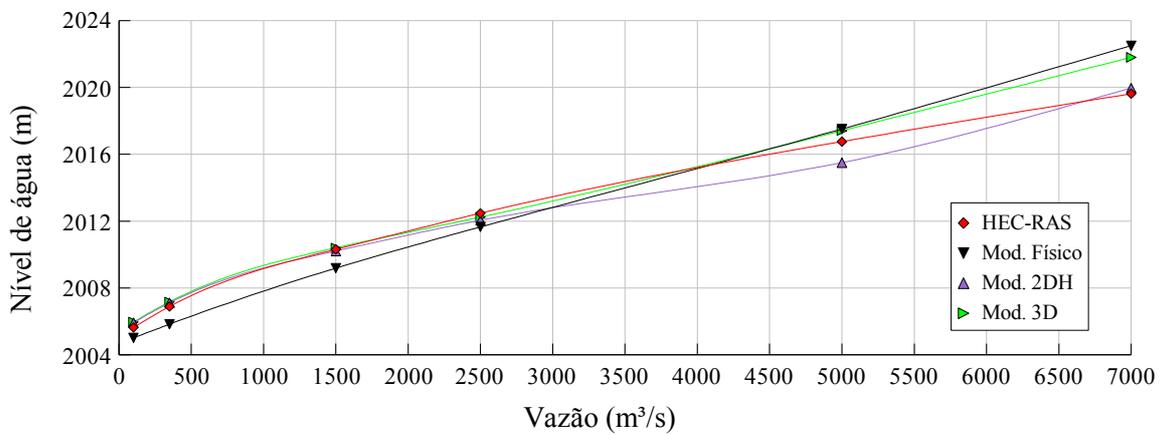


Figura 9 – Comparação entre as curvas de descarga na régua RL2 nos modelos .

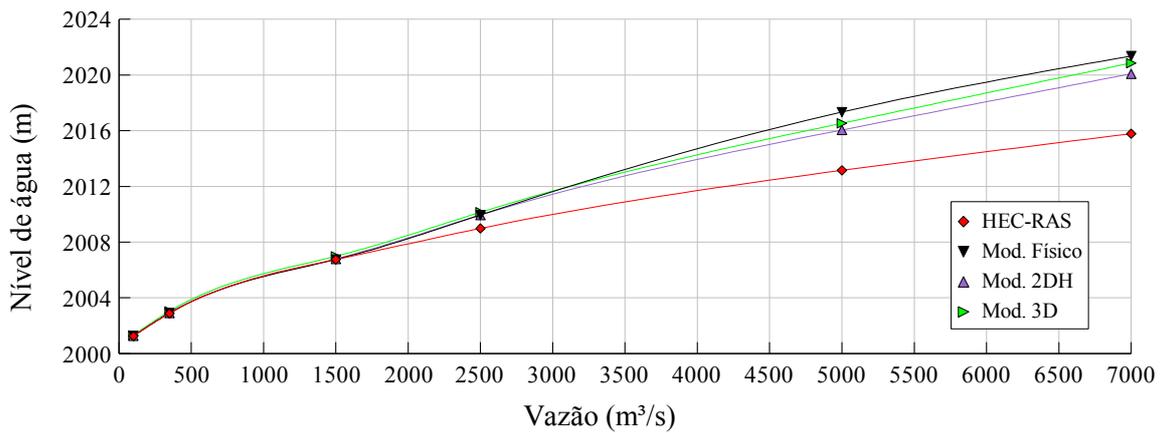


Figura 10 – Comparação entre as curvas de descarga na régua RL1 nos modelos.

Nota-se que os modelos físico e Delft3D apresentaram resultados semelhantes, com o modelo Delft3D 3D aproximando-se mais do modelo físico do que o modelo Delft3D 2DH nas vazões altas. As maiores diferenças são observadas na régua RL-2.

Para investigar as diferenças observadas na régua RL-2, foram lidos perfis longitudinais de níveis de água no modelo físico e nos modelos Delft3D em diversas vazões, ao longo do eixo e das duas margens do rio. As Figuras 11 e 12 ilustram perfis medidos no eixo do rio nas vazões de 1.500 m<sup>3</sup>/s e 4.500 m<sup>3</sup>/s.

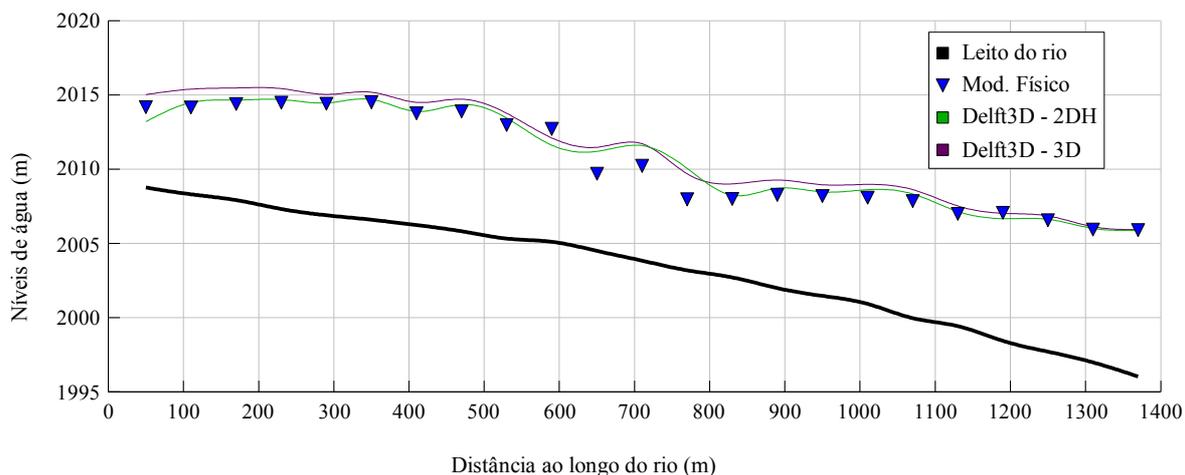


Figura 11 – Perfil de níveis de água no eixo longitudinal do rio com vazão de 1.500 m<sup>3</sup>/s.

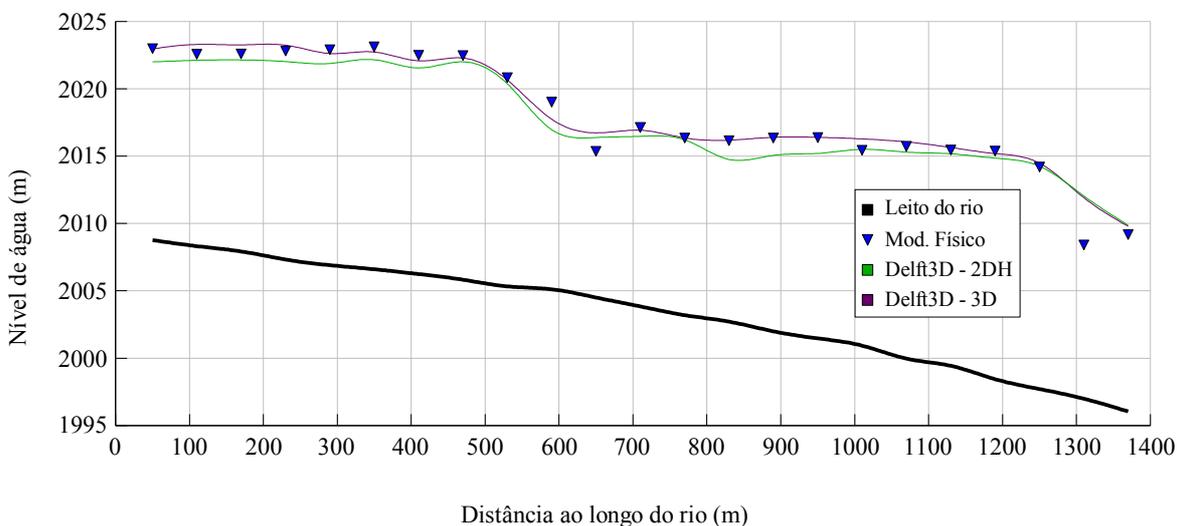


Figura 12 – Perfil de níveis de água no eixo longitudinal do rio com vazão de 4.500 m<sup>3</sup>/s.

A régua RL-2 encontra-se próxima da abscissa 700 m, em uma região de escoamento torrencial, em curva, a jusante de uma seção de controle hidráulico, onde as oscilações de nível de água no modelo físico eram da ordem de 2 m na vazão de 1.500 m<sup>3</sup>/s e 3 m na vazão de 4.500 m<sup>3</sup>/s. A Figura 13 apresenta o escoamento nessa região no modelo físico.



Figura 13 – escoamento na região da régua RL-2 no ensaio com vazão de 4.500 m<sup>3</sup>/s.

Os detalhes e o caráter transiente do escoamento na região da régua RL-2 estão além da capacidade do modelo Delft3D, embora o modelo tenha simulado adequadamente os efeitos do controle hidráulico sobre os níveis a montante dessa região.

Observa-se, na Figura 12, a grande declividade dos níveis de água junto à saída do modelo, na região da seção de controle entre a régua RL-1 e o final do modelo. Novamente, verifica-se que o modelo Delft3D, apesar de “perceber” a presença do controle, não reproduz adequadamente o escoamento na região do controle, como observado na abscissa 1.300 m da Figura 12.

O modelo HEC-RAS 1D, mesmo tendo utilizado um coeficiente de rugosidade de Manning de 0,050 m<sup>-1/3</sup>s indicava, em geral, níveis de água sistematicamente inferiores aos demais modelos (Figuras 8 a 10). Durante os trabalhos, verificou-se que essas diferenças devem-se à escassez de seções transversais na modelagem realizada com HEC-RAS, o que conduziu a uma representação do leito do rio sem o grau de detalhamento necessário, que incluísse os controles hidráulicos. Após os primeiros ensaios no modelo físico e no modelo Delft3D, novas simulações 1D foram realizadas com o modelo HEC-RAS pela empresa projetista da usina e pelo CEHPAR, utilizando-se um número maior de seções transversais. Essas simulações geraram níveis de água bem mais próximos dos níveis medidos no modelo físico. Nas simulações 1D HEC-RAS realizadas no CEHPAR, foram utilizadas seções espaçadas de 30 m em média e rugosidade  $n$  de Manning de 0,030 m<sup>-1/3</sup>s.

## 5 – CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os trabalhos de modelagem física, computacional 2DH e computacional 3D realizados para um trecho do Rio Paute no Equador. Os trabalhos apontaram alguma deficiência, por escassez de dados de campo, na modelagem 1D realizada em HEC-RAS, que deveria nortear os trabalhos em modelo físico.

O modelo computacional Delft3D foi elaborado com parâmetros comumente utilizados em escoamentos de rios, sem atravessar o processo usual de calibragem. Ainda assim, forneceu resultados semelhantes aos do modelo físico, usando-se um coeficiente de rugosidade compatível com a rugosidade implantada no modelo físico. É possível que um trabalho de refinamento dos coeficientes de rugosidade e turbulência conduzisse a resultados mais próximos entre os dois modelos, físico e computacional.

A modelagem computacional mostra-se, uma vez mais, uma ferramenta valiosa na definição de curvas de descarga de rios em estudos de aproveitamentos hidrelétricos. Todavia, deve ser empregada com cautela em situações onde os dados de campo são escassos, podendo conduzir a erros de julgamento como a simulação dos efeitos de controles hidráulicos através do aumento do coeficiente de rugosidade.

A quantidade de parâmetros a serem estimados e a influência destes sobre os resultados de uma simulação computacional diminuem na medida em que se passa de um modelo 1D para 2D e deste para 3D. Entretanto, a sofisticação da abordagem dimensional (1D→2D→3D) geralmente implica em maiores necessidades de informações batimétricas.

## BIBLIOGRAFIA

BARNES, H. H. (1967) *“Roughness Characteristics of Natural Channels”*. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 1849. Washington. 213 p.

FRIEDRICH, M. F. (2004) *“Aplicação de Modelagem Física e Computacional a um Escoamento Fluvial”*. Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal do Paraná, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Curitiba, PR. 183p.

HENDERSON, F. M. (1966) *“Open Channel Flow”*. Upper Saddle River. Prentice-Hall. 522 p.

TERABE, F. R.; FRIEDRICH, M. F.; OTA, J. J. (2005). *“Desenvolvimento de Modelo de Avaliação da Qualidade da Água e de Transporte de Sedimentos para Pequenas e Médias Centrais Hidrelétricas – Simulações no Modelo Hidrodinâmico”*, Relatório Técnico nº 5, CEHPAR LACTEC. Curitiba, PR. 42 p.

WL | DELFT HYDRAULICS, *“Delft3D-Flow introductory course”*, versão 2.3, 2002a.

WL | DELFT HYDRAULICS, *“Delft3D-Flow user manual”*, versão 3.2, 2002b.

WL | DELFT HYDRAULICS, “*QUICKIN user manual*”, versão 3.17, 2002c.

WL | DELFT HYDRAULICS, “*RGFGRID user manual*”, versão 3.17, 2002d.

Quadro 2 – Símbolos utilizados.

Símbolo	Significado	Dimensão
$Cr$	número de Courant	[1]
$C_{2D}$ e $C_{3D}$	coeficientes de rugosidade do leito nos modelos 2D e 3D	$[L^{1/2}T^{-1}]$
$d$	profundidade da água abaixo do nível de referência	[L]
$d$	diâmetro médio do pedregulho no leito	[L]
$g$	aceleração da gravidade	$[LT^{-2}]$
$H, h$	profundidade total de água, dada por $H = d + \zeta$	[L]
M	direção do sistema de coordenadas curvilíneas	[1]
N	direção do sistema de coordenadas curvilíneas	[1]
$n$	coeficiente de rugosidade de Manning	$[L^{1/3}T^{-1}]$
$\vec{u}_b$	vetor velocidade horizontal na primeira camada acima do leito	$[LT^{-1}]$
$\vec{U}$	vetor velocidade média na vertical (2DH)	$[LT^{-1}]$
$z$	coordenada vertical no espaço físico	[L]
$\Delta t$	passo de tempo computacional	[T]
$\Delta x$	comprimento da célula na direção x	[L]
$\Delta y$	comprimento da célula na direção y	[L]
$\epsilon$	taxa de dissipação da energia cinética turbulenta	$[L^2T^{-3}]$
$\kappa$	energia cinética turbulenta	$[L^2T^{-2}]$
$\rho_0$	densidade da água	$[ML^{-3}]$
$\sigma$	coordenada vertical parametrizada	[1]
$\vec{\tau}_b$	vetor tensão tangencial no fundo	$[FL^{-2}]$
$\zeta$	elevação da superfície livre sobre o plano de referência	[L]
$\nu_H$	viscosidade cinemática horizontal	$[L^2T^{-1}]$
$\nu_{mol}$	viscosidade cinemática molecular	$[L^2T^{-1}]$
$\nu_{2D}$	viscosidade cinemática 2D	$[L^2T^{-1}]$
$\nu_{3D}$	viscosidade cinemática 3D	$[L^2T^{-1}]$