

XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA  
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO HEC-RAS 1D EM RIO  
COM QUEDAS D'ÁGUA VARIANDO OS PARÂMETROS DO MÉTODO  
LOCAL PARTIAL INERTIA (LPI).**

*Erik Schmitt Quedi<sup>1</sup>, Juliana Andrade Campos<sup>1</sup>, Fernando Mainardi Fan<sup>1</sup>*

1) Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 950.  
erik.quedi@gmail.com

**RESUMO:** O uso da modelagem é uma prática muito útil para o entendimento de sistemas hidrodinâmicos. O modelo HEC-RAS 1D é aplicável para simulação de escoamentos que passam pelo regime crítico, incorporando simplificações no modelo para torna-lo mais robusto e estável. O método do *Local Partial Inertia* (LPI) pode ser utilizado no modelo, em que este realiza uma simplificação da equação da quantidade de movimento em função do número de Froude. Fez-se um estudo em um trecho de rio com quedas d'água sequenciais, realizando sucessivas simulações no HEC-RAS 1D e avaliou-se os resultados em termos de estabilidade numérica e variáveis hidráulicas altura da lâmina d'água e velocidade. Os resultados sugerem que dependendo da escolha dos parâmetros do LPI, a estabilidade do modelo é melhorada, tanto em baixas e altas vazões e tem o método influência nas variáveis altura hidráulica e velocidade de forma mais suave, podendo-se perceber diferenças nas variáveis em regiões críticas.

**ABSTRACT:** The use of modeling is a very useful practice for the understanding of hydrodynamic systems. The HEC-RAS 1D model is applicable for simulation of flows that go through the critical regime, incorporating simplifications in the model to make it more robust and stable. The Local Partial Inertia (LPI) method can be applied in the model, in which it performs a simplification of the equation of the momentum as a function of the Froude number. A study was carried out in a river section with sequential waterfalls, performing successive simulations in the HEC-RAS 1D and the results were evaluated in terms of numerical stability and variations on hydraulic variables such as water depth and velocity. The results suggest that, depending on the choice of LPI parameters, the stability of the model is improved both at low and high flow rates and the method has influence on the variables hydraulic height and velocity in a smoother way, being possible to perceive differences in the variables in regions critical.

**PALAVRAS CHAVE:** HEC-RAS 1D, Local Partial Inertia.

## INTRODUÇÃO

A modelagem de escoamentos em rios é uma ferramenta importante para compreensão de sistemas hidrológicos e hidráulicos. Com esta abordagem é possível analisar em uma situação simulada os níveis d'água, perfis de velocidades, entre outras variáveis do escoamento.

O modelo desenvolvido pelo *Hydrologic Engineering Center-Analysis System* (HEC-RAS) simula escoamentos variados e não variados, em 1D e 2D, resolvendo em cada iteração as equações da continuidade e conservação do momentum, comumente denotadas de equações de Saint-Venant.

Nos escoamentos, em certas situações ocorre a transição de regimes subcrítico para supercrítico, e nestes casos a simulação hidrodinâmica deve ser capaz de abranger as perturbações que acontecem ao longo do fluxo. Embora os modelos numéricos empregados no HEC-RAS sejam capazes de resolver as equações de Saint-Venant em situações complexas, são assumidas algumas aproximações e, com isso, surgem algumas limitações (Toombes e Chanson, 2011).

A modelagem de escoamentos não permanentes com regimes transitórios pode ser uma tarefa complicada. Os algoritmos que resolvem as equações se tornam instáveis quando o escoamento passa pela altura crítica (mudança de regime), causando a instabilidade da simulação (USACE, 2016). Para resolver este problema o modelo HEC-RAS possui um artifício matemático, desenvolvido por Fread et. al. (1986), denominado método LPI (*Local Partial Inertia Technique*), que propõe um fator de redução aplicado aos termos inerciais da equação da conservação do momentum conforme o número de Froude local.

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho do modelo HEC-RAS 1D utilizando o método *Local Partial Inertia (LPI)* na simulação de um rio com altas declividades, caracterizado por quedas d'água sequenciais. Para isso foram realizadas sucessivas simulações, em dois cenários de vazões (alta e baixa), variando os parâmetros do método LPI.

## REVISÃO DE LITERATURA

Sharkey (2014) aponta em estudos de escoamentos dinâmicos que o modelo HEC-RAS pode fornecer resultados irreais e chama a atenção para a necessidade de um tratamento dos dados de entrada adequado. Este autor também propõe em seu estudo uma investigação de fatores causadores da instabilidade da simulação em rio e fornece um guia de protocolos para simulações de sistemas hidráulicos.

Toombes e Chanson (2011) simularam escoamentos turbulentos nos modelos HEC-RAS, MIKE11, MIKE21 e FLOW-3D, comparando os resultados com modelos físicos. Estes autores concluíram que a simulação no HEC-RAS apresentou resultados bons, em termos de perfil hidráulico em vazões baixas. E para vazões altas, apresentou diferenças entre o modelo observado e o simulado. Neste trabalho foi demonstrada a capacidade do modelo HEC-RAS 1D para previsão das ocorrências de turbulências no escoamento, como ressaltos hidráulicos, com uma precisão razoável.

Jowhar e Jihan (2012) utilizaram o modelo HEC-RAS para previsão da ocorrência de ressaltos, comparando os resultados com o modelo ADH (Adaptative Hydraulics). Observou-se neste estudo que o HEC-RAS 1D é capaz de determinar a localização dos ressaltos, embora o outro modelo comparado apresentou melhor acurácia.

Ainda neste contexto Rao e Hromadka (2016) publicaram em uma nota técnica uma comparação de dados numéricos dos modelos HEC-RAS 1D e o WSPG com dados experimentais em um canal com declividades variadas ao longo do trecho. Estes autores concluem que os dados numéricos resultantes dos modelos são satisfatórios e que ambos detectaram os ressaltos. Os autores também apontam que os modelos são bastante sensíveis ao coeficiente de rugosidade manning e que este afeta apenas na localização dos ressaltos e tem influência mínima na altura hidráulica.

O método LPI é melhor descrito em Fread et. al. (1996) em que os autores apresentam este artifício incorporado a um modelo de propagação de vazões, o FLDWAV. Os autores afirmam que esta técnica permite a obtenção de uma solução numérica estável e mantém a acurácia de modelos dinâmicos. Também fazem uma análise de erros em vazões a partir de um estudo numérico onde

compararam um modelo dinâmico e outro com o método LPI. Concluíram que existem erros na propagação de vazões pequenos, cerca de 2%, na maioria dos casos de escoamentos e chegam a ordem de 6% em estudos da propagação de vazão oriunda rompimentos de barragem.

Em um estudo similar, Fread et. al. (1996) incorporou no modelo FLDWAV o método LPI para escoamentos transitórios e realizou um estudo de rompimento de barragem. Concluíram que esta abordagem trouxe estabilidade para o modelo, e foram obtidos bons resultados se comparados a um esquema explícito progressivo no tempo sem o filtro dos termos inerciais (LPI).

## MODELO HEC-RAS 1D

A simulação de escoamentos variados está baseada na solução das equações da continuidade (Equação 1) e quantidade de movimento (Equação 2). Estas equações possuem formas derivadas, que quando assumidas algumas suposições, chegam ao conjunto de equações usualmente chamadas de equações de Saint-Venant.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} + gAS_f - gAS_0 = 0 \quad (2)$$

$x$  é a distância na direção do escoamento;  $t$  é o tempo;  $A$  é a área molhada da seção transversal;  $Q$  é a vazão;  $h$  é a profundidade da lâmina d'água;  $g$  é a aceleração da gravidade;  $S_0$  é a declividade do fundo e  $S_f$  é a declividade da linha de energia.

A equação 2 pode ser descrita em função de seus termos (Fan et. al., 2014).

$$F1 = gAS_f \quad (\text{Força de Atrito}) \quad (3)$$

$$F2 = gAS_0 \quad (\text{Força Peso}) \quad (4)$$

$$F3 = gA \frac{\partial h}{\partial x} \quad (\text{Força de Pressão}) \quad (5)$$

$$F4 = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) \quad (\text{Inércia Advectiva}) \quad (6)$$

$$F5 = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (\text{Inércia Local}) \quad (7)$$

A modelagem de regimes transitórios pode levar a instabilidade numérica da simulação. Quando a altura hidráulica chega ao nível crítico (mudança de regime) as derivadas (variações no espaço e tempo) de velocidade e altura hidráulica assumem valores superestimados, causando oscilações numéricas na simulação (USACE, 2016).

## MÉTODOS LOCAL PARTIAL INERTIA (LPI)

Baseia-se na aplicação de um filtro numérico ( $\sigma$ ) aos termos inerciais da equação de conservação do momentum, de acordo com o Froude local. O método possui dois parâmetros, o Froude limiar ( $F_t$ ) e um fator exponencial  $m$ . O primeiro é o valor limite para o qual os termos inerciais serão considerados nos cálculos, ou seja, quando o Froude da seção transversal for superior ao limiar, o fator alfa é zero e os termos inerciais são totalmente negligenciados. A equação da conservação do movimento modificada pelo método LPI é mostrada na equação 3, o termo sigma ( $\sigma$ ) é apresentado nas equações 4 e 5.

$$\sigma \left[ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left( \frac{\partial Q^2}{A} \right)}{\partial x} \right] + gA \left( \frac{\partial h}{\partial x} + S_f \right) = 0 \quad (8)$$

$$\sigma = 1.0 - \left( \frac{F_r}{F_t} \right)^m \quad (F_r \leq F_t ; m \geq 1) \quad (9)$$

$$\sigma = 0 \quad (F_r \geq F_t) \quad (10)$$

$\sigma$  é o fator LPI multiplicador dos termos inerciais,  $F_t$  é o Froude limiar para o qual o fator LPI é igualado a zero,  $F_r$  é o número de Froude da seção transversal,  $m$  é um fator exponencial de redução que define a curva do valor  $\sigma$ ,  $h$  é a altura hidráulica,  $S_f$  é a declividade da linha de energia,  $Q$  é a vazão,  $A$  é área hidráulica e  $g$  é a gravidade.

As curvas característica de  $\sigma$  são apresentadas na figura 1, com Froude limiar igual a 1.

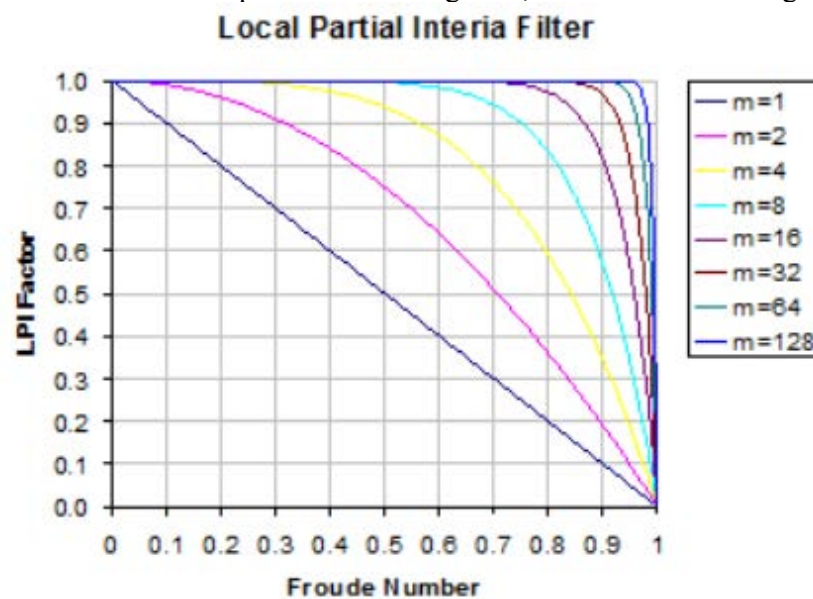


Figura 1.- Curvas características do LPI (USACE, 2016).

Mustafa et. al. (2009), salienta que o método *LPI* realiza a conversão da equação de conservação de movimento (*full momentum*) para equação de onda difusiva, quando o Froude se aproxima do valor crítico, por meio da eliminação dos termos de inércia (aceleração local e advecção). Segundo USACE (2016), quanto maior for os valores dos parâmetros, aumenta-se a acurácia em vista da depreciação da estabilidade da solução, e a redução destes tornam a solução mais estável e menos acurada.

## METODOLOGIA

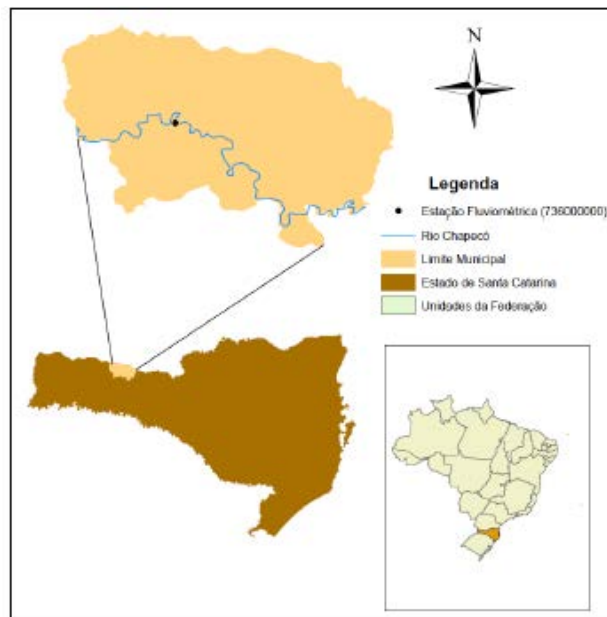
### Área de Estudo

A simulação foi realizada para um trecho do Rio Chapecó, localizado no município de Abelardo Luz, em Santa Catarina-SC (Figura 1). O trecho estudado está dentro da bacia hidrográfica do rio Chapecó, possui comprimento de 8,2 km, com característica de leito rochoso e irregular. Ainda no perímetro urbano do município de Abelardo Luz, o rio Chapecó possui uma sequência de quedas d'água, conforme Figura 2.

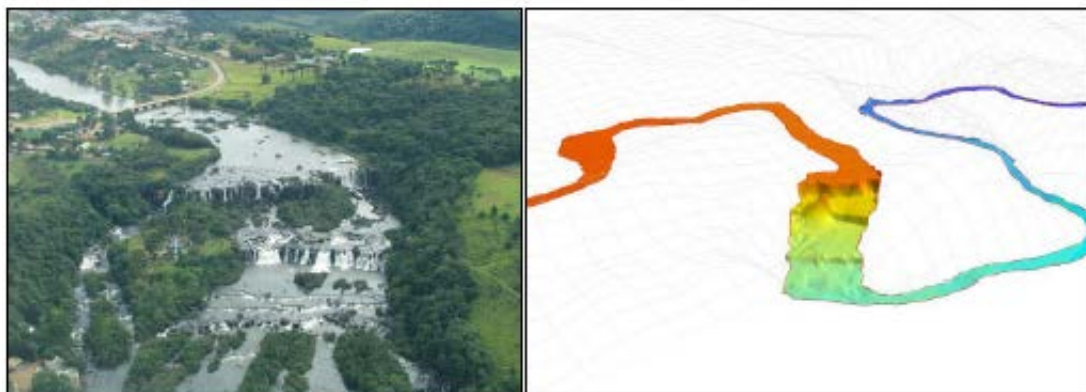
### Vazões Simuladas

As vazões usadas na simulação foram determinadas a partir de dados da estação fluviométrica Abelardo Luz (cód. 73600000). Foram utilizados 50 anos de dados de vazões diárias, sendo desconsiderados os dias que apresentaram falhas.

Em seguida determinou-se a curva de permanência a fim de simular as vazões referentes a Q10, Q20, Q30, Q50 e Q95 de permanência. Também se determinou a vazão máxima com TR de 10 anos utilizando distribuição de Gumbel para máximos.



**Figura 2.-** Localização da área de estudo.



**Figura 3(a).-** Quedas d'água – Rio Chapecó.

**Figura 3(b).-** Trecho Representado no MDT.

## Modelagem Hidrodinâmica

O desenvolvimento dos testes do método LPI ocorreu em etapas de pré-simulação, e simulações sequenciais no HEC-RAS, para uma mesma geometria. Foi utilizado como dado de elevação para a modelagem um MDT de resolução espacial 1m x 1m, disponibilizado no Sistema de Informações Geográficas de Santa Catarina (SIGSC).

Primeiramente foi desenvolvido o esquema geométrico da simulação em *software* SIG, por meio da extensão GeoHEC-RAS. Esta ferramenta permite a criação de todas as feições (ou *layers*) necessárias para simulação.

Devido à ausência de dados topo batimétricos, Brunner (2014) recomenda a inclusão de um canal piloto na seção do rio. A profundidade média do canal adotada foi de 1.5 metros abaixo do nível do modelo numérico.

Na modelagem a escolha do coeficiente de rugosidade Manning  $n$  deve ser tomada criteriosamente. Na análise de Sharkey (2014) este coeficiente também é determinante na estabilidade numérica do modelo e afirma que alguns valores típicos de referência podem subestimar os valores em trechos de rios rochosos, declivosos e similares. Brunner (2014) e Sharkey (2014) recomendam a utilização da Equação 11 de Robert Jarrett para trechos declivosos.



$$n = 0.39 S_f^{0.38} R_h^{-0.16} \quad (11)$$

$n$  é o coeficiente de rugosidade Manning;  $S_f$  é a declividade do fundo e  $R_h$  o raio hidráulico.

Foram estimados os valores de  $n = 0.035$  para trechos de rios sem obstáculos,  $n = 0.15$  para margens e  $n = 0.22$  para o trecho onde há as quedas d'água sequenciais.

A escolha dos passos espacial e temporal foi baseada em critérios de estabilidade. Brunner (2014) recomenda duas equações para o estudo do passo espacial ( $\Delta x$ ), a equação de Fread (12) e Samuals (13):

$$\Delta x \leq \frac{cT_t}{20} \quad (12)$$

$$\Delta x \leq 0.15D/S_0 \quad (13)$$

$\Delta x$  é o espaçamento recomendado entre as seções;  $T_t$  é o tempo de subida do hidrograma;  $c$  é a velocidade de propagação da onda de cheia;  $D$  é a profundidade média das seções;  $S_0$  declividade de fundo.

O passo temporal ( $dt$ ) é obtido pela análise da condição de estabilidade de Courant (HEC-RAS Manuals). Esta condição pode ser dada na forma:

$$C_r \leq V_w \leq 1.0 \quad (14)$$

$V_w$  é a velocidade da onda propagada.

Estas equações servem de guia para escolha, porém não garantem o valor ótimo. Neste estudo chegou-se a valores de  $dx$  igual a 3m e  $dt$  igual a 1s.

Neste estudo foi concebido dois cenários, em cada um foi simulado dois dias (48 horas) de escoamento. No primeiro cenário, propôs-se como condição de contorno à montante um hidrograma hipotético, com início na vazão de permanência Q30, com tempo de pico de 18 horas, sendo a vazão de pico igual a Q10, decrescendo um seguida até a vazão de permanência Q95. Na condição de contorno à jusante optou-se pelo uso da equação de Manning. Para o segundo cenário modificou-se apenas o hidrograma de montante, com o valor de pico igual a vazão máxima de tempo de retorno igual a 10 anos (TR 10).

Por conta de problemas de instabilidade da simulação, Sharkey (2014) e Brunner (2014) recomendam o estabelecimento de uma vazão mínima, ou seja, uma vazão permanente no trecho estudado. Foi adotada como mínima a Q95 referente a curva de permanência, igual a 12.4 m<sup>3</sup>/s.

## Hot Start e Warm Up

O modelo HEC-RAS permite o aproveitamento de simulações previamente realizadas como condição inicial para uma simulação posterior, este procedimento é chamado de Hot Start. Neste modelo é possível configurar um *warm up* da simulação, que são iterações prévias à simulação dos escoamentos variados. Nesta rotina são calculadas as equações hidrodinâmicas considerando as vazões do hidrograma de entrada como permanentes e uniforme em todas as seções, com isso o programa estabelece curvas de cota-vazão ao longo do trecho. Segundo USACE (2016) os procedimentos de *hot start* e *warm up* garantem uma simulação mais estável, contudo devem ser estudadas metodologias para a correta definição destas rotinas.

## Parâmetros e Tolerâncias

A correta definição de parâmetros e calibração de um modelo hidrodinâmico condiciona o sucesso da simulação. Neste estudo manteve-se em maior parte dos parâmetros do modelo HEC-RAS 1D nas configurações padrão (*default*).

### Mixed Flow Regime

Esta opção deve ser utilizada quando se sabe a priori que o escoamento em estudo transitará entre regimes, passando pela altura crítica. Com este parâmetro o modelo é capaz de simular numericamente situações que tipicamente são causas de instabilidade do modelo, como ressaltos hidráulicos e quedas abruptas do perfil d'água. Com este recurso habilitado pode-se calibrar os parâmetros do método LPI: Ft e m.

Fez-se então uma sequência de simulações combinando os parâmetros Ft e m, para os cenários 1 e 2. Os resultados das simulações foram analisados utilizando as ferramentas do próprio modelo, tais como a visualização de perfis, tabelas com as variáveis hidráulicas em cada seção e gráficos dinâmicos (múltiplas variáveis plotadas).

Foram escolhidos como objeto da análise 15 combinações de Ft e m, que correspondem ao Ft variando de 0.1 até 1.5 (valores testados) e o valor de m é o maior possível, para as soluções estáveis.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após 76 sucessivas simulações, observou-se que variando os parâmetros do LPI, o modelo pode apresentar melhora na estabilidade numérica, conforme tabelas 1 e 2.

Para o cenário 1 (vazões baixas) o modelo HEC-RAS 1D apresentou bom desempenho, já que o modelo foi capaz de convergir para uma solução numérica estável e aceitável, segundo os critérios de erros adotados, mesmo quando adotados parâmetros com valores altos.

No segundo cenário (vazões altas) se nota uma maior sensibilidade a estes parâmetros, principalmente quando o Ft se aproxima do valor crítico (igual à 1). Nesta região crítica o modelo foi capaz de convergir à solução mediante a adoção de valores de m pequenos, ou seja, maior parcela de redução nos termos inerciais da equação de quantidade de movimento.

As tabelas dos resultados da simulação em relação a sucessos e fracassos são apresentadas a seguir, em vermelho as tentativas em que o modelo não foi capaz de convergir a uma solução e em verde são as tentativas que se obteve soluções estáveis.

**Tabela 1.-** Sucessos (verde) e Fracassos (vermelho) da simulação do cenário 1.

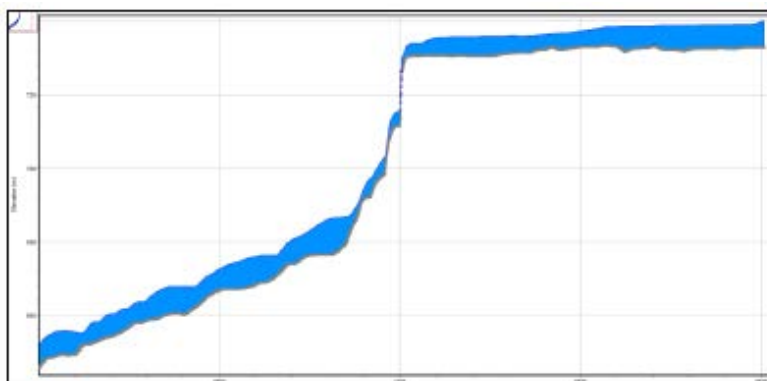
	Ft = 0.1	Ft = 0.2	Ft = 0.3	Ft = 0.4	Ft = 0.5	Ft = 0.6	Ft = 0.7	Ft = 0.8	Ft = 0.9	Ft = 1	Ft = 1.1	Ft = 1.2	Ft = 1.3	Ft = 1.4	Ft = 1.5
m=1															
m=2															
m=4		Verde		Vermelho				Verde		Verde			Verde		Vermelho
m=8															
m=16															
m=32							Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Verde	Verde	Verde
m=64															
m=128	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Vermelho	Vermelho		Vermelho					

**Tabela 2.-** Sucessos (verde) e Fracassos (vermelho) da simulação do cenário 2.

	Ft = 0.1	Ft = 0.2	Ft = 0.3	Ft = 0.4	Ft = 0.5	Ft = 0.6	Ft = 0.7	Ft = 0.8	Ft = 0.9	Ft = 1	Ft = 1.1	Ft = 1.2	Ft = 1.3	Ft = 1.4	Ft = 1.5
m=1									Verde						Verde
m=2										Verde				Verde	Verde
m=4									Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
m=8			Verde						Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
m=16			Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
m=32	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
m=64	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
m=128	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

É recomendado na literatura que se busque os maiores valores de Ft e m possíveis, em vista de uma maior precisão (USACE, 2016). Seguindo este critério, comparou-se no perfil hidráulico, as variáveis velocidade média do escoamento e altura da lâmina d'água, para os dois cenários e em duas situações, de maior altura d'água e menor altura d'água, ou seja, no tempo correspondente ao pico e o fim do hidrograma.

É apresentado a seguir a ilustração do perfil do trecho estudado, na figura com exagero vertical.

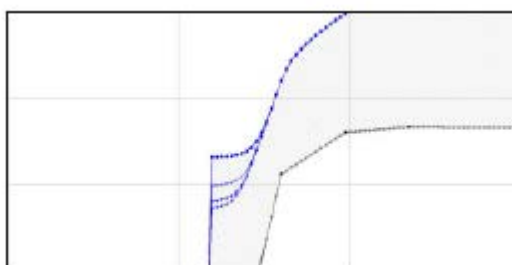


**Figura 4.-** Perfil hidráulico do trecho, para vazão de pico TR 10.

### Cenário 1: Altura da lâmina d'água

Na condição de maior elevação da lâmina líquida observou-se que ao alterar os parâmetros Ft e m, a altura da água variou entre 0.2 a 0.7 metros. Nos pontos onde a altura líquida se aproxima da altura crítica foram observadas as maiores variações.

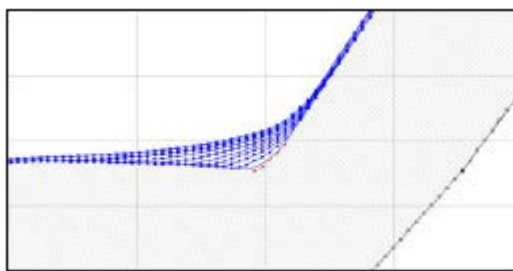
Observou-se que as maiores variações de coluna líquida ocorreram nas seções com as maiores quedas d'água, chegando a ordem de 0.7 metros entre os perfis Ft = 1.3; m = 32 e Ft = 0.2 e m = 128.



**Figura 5.-** Diferença de altura de lâmina d'água na queda d'água, de 0.7 metros.

Nos locais onde ocorreram ressaltos hidráulicos, esta diferença chega a 0.3 metros.





**Figura 6.-** Diferença de lâmina d'água na ocorrência de ressaltos.

Para a condição de menor elevação da lâmina, a análise foi similar a anterior, entre os perfis  $Ft = 1.3$ ;  $m = 32$  e  $Ft = 0.2$  e  $m = 128$ , contudo a magnitude foi inferior, da ordem de 0.5 metros. Nas regiões que ocorreram ressaltos, a magnitude foi de 0.1 metros e nas demais regiões a diferença foi de 0.05 metros anterior.

### **Cenário 1: Velocidades**

Na situação de maior altura hidráulica, as velocidades apresentaram diferenças de até 2,2 m/s entre os perfis  $Ft = 1.2$ ;  $m = 16$  e  $Ft = 1.4$  e  $m = 32$ . Ocorreu entre  $Ft = 1.4$ ;  $m = 32$  e  $Ft = 1.5$ ;  $m = 32$ , uma discrepância na ordem de 0.8 m/s, em média, este valor ocorreu em regiões com perturbação de fundo. Em geral as diferenças das velocidades entre os perfis analisados ocorrem de forma suave ao longo do trecho, ocorrendo variações pouco significativas nos trechos com fundo regular.

### **Cenário 2: Altura da lâmina d'água**

Neste cenário de vazões mais elevadas, a análise foi análoga ao cenário 1 em relação às tendências de variação na coluna líquida e velocidades, porém em maior magnitude. A maior diferença de altura foi de 1.1 m entre os perfis  $Ft = 1.3$ ;  $m = 8$  e  $Ft = 0.4$ ;  $m = 32$ .

Com relação a maior diferença de velocidade, ocorreu entre  $Ft = 1.1$ ;  $m = 2$  e  $Ft = 1.2$ ;  $m = 8$ , na ordem de 2 m/s.. Analogamente com a análise prévia, as perturbações no fundo do canal indicam as regiões de maiores diferenças.

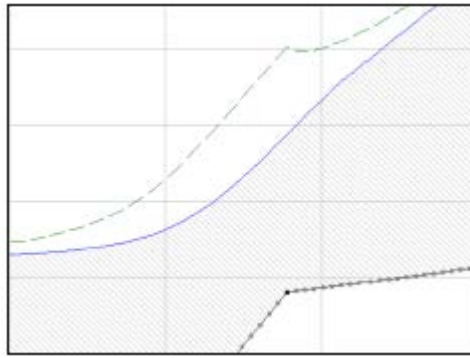
Na situação de menor elevação líquida o modelo apresentou um perfil hidráulico regular, para todos os perfis, sendo a maior diferença na ordem de 0.1 m. Neste caso constatou-se o maior número de ressaltos (ou alturas críticas) entre os cenários.

### **Cenário 2: Velocidades**

Entre os perfis analisados, a maior diferença de velocidades foi de 0.2 m/s, ocorrendo entre os perfis  $Ft = 1.2$ ;  $m = 8$  e  $Ft = 1.5$ ;  $m = 1$ . Também se verificou que as velocidades variam de forma regular sem mudanças significantes entre os perfis, para uma mesma seção.

A análise dos hidrogramas de entrada e propagados, nos dois cenários apresentaram erros insignificantes, na ordem de 0.015%.

Algumas soluções, embora numericamente estáveis, apresentaram um perfil hidráulico atípico, com picos (aclives) na linha de energia, de forma geral, nos locais onde a altura hidráulica está próxima à crítica, caso dos perfis  $Ft = 0.1$ ;  $m = 128$ ,  $Ft = 0.2$ ;  $m = 128$ ,  $Ft = 0.3$ ;  $m = 128$  do cenário 1. E no segundo cenário as soluções  $Ft = 0.3$ ;  $m = 8$ ,  $Ft = 1.3$ ;  $m = 4$ ,  $Ft = 1.5$ ;  $m = 1$ .



**Figura 7.-** Exemplo de pico (atípico) na linha de energia em escoamento livre.

## CONCLUSÕES

O estudo da hidrodinâmica se baseia nos princípios da conservação da massa, energia e movimento. Situações reais por muitas vezes são complexas para se resolver numericamente, sem que haja suposições e aproximações no esquema. É perigoso assumir que certos termos não são significantes no modelo, e confiar em um resultado numérico.

Neste estudo foi demonstrado que o modelo HEC-RAS 1D foi capaz de simular, de forma razoável, um modelo hidrodinâmico complexo, mesmo considerando as simplificações inerentes ao modelo.

Dentre estas simplificações, o modelo supõe que em uma seção transversal só há uma altura d'água, portanto este fato faz com que se perca a acurácia física do modelo estudado.

Embora não se comprovou os resultados deste trabalho com medições precisas de vazão e nível de água, pode-se compreender o funcionamento do método LPI na simulação do modelo e observou-se os efeitos dos parâmetros do método nas soluções.

Tanto o modelo HEC-RAS 1D como 2D possuem implementados a rotina de estabilização numérica da simulação de regimes transitórios (*Mixed Flow Regime*). Tornando este modelo robusto e aplicável a maioria das situações.

Neste estudo percebeu-se a complexidade de simular vazões em rios com declivosos, rochoso e com patamares (*steep and rifles*), estas características do rio simulado implicam em uma instabilidade do modelo devido trocas de regime, armazenamentos temporários ao longo do curso d'água, grandes variações nas seções transversais, subidas e descidas de nível, entre outros fatores descritos na literatura utilizada neste estudo. Atribui-se o sucesso das simulações a correta definição de alguns parâmetros e rotinas, como o *hot start*, *warm up*, vazão mínima de referência, bem como o uso do método LPI.

Não se pode atribuir a instabilidade numérica que ocorreram nas soluções apenas ao método LPI. Tanto a concepção do modelo e os dados base para simulação utilizados podem ser fontes de instabilidade numérica.

O método LPI por sua vez, demonstrou variações em nível da altura líquida e velocidades de forma amena em regiões com fundo suave e em locais pontuais, mais precisamente quando ocorre a aproximação do nível a altura crítica. Nestes pontos pode-se constatar variações na ordem de até 1,1 m em condições de vazões extremas, bem como velocidade variando na ordem de 2,2 m/s.

Com relação ao hidrograma propagado, a literatura sugere que uma aproximação dos termos inerciais tende a um achatamento (ou subestimação) deste. Contudo, com este estudo não se pode constatar este fato.

Nos testes realizados neste estudo, o método *Local Partial Inertia* se mostrou eficiente na estabilização das soluções

Recomenda-se em estudos posteriores elaborar outros testes dos parâmetros do LPI em um canal experimental com controles hidráulicos, conhecendo-se com maior acurácia as características hidráulicas do canal. Modelar este sistema hidrodinâmico em 1D e 2D, para que se possa

representar de forma mais fidedigna as regiões de patamares, onde pode haver múltiplas lâminas d'água.

Também realizar um estudo mais elaborado de vazões, hidrograma e batimetria do local a ser simulado, bem como coeficiente de rugosidade Manning.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES – Brasil pelas bolsas de mestrado e apoio financeiro concedido para realização desta publicação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Brunner G.** (2014). “Common Model Stability Problems When Performing an Unsteady Flow Analysis.” <http://www.nws.noaa.gov/oh/hrl/modelcalibration/6.%20%20Hydraulic> Engineers, Part 2, Research and Theory, 87, 571-582.
- Fan, M. F.; Pontes, P. R. M.; Paiva, R. C. D.** (2014). “Avaliação de um método de propagação de cheias em rios com aproximação inercial das equações de Saint-Venant”. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.19, Dez/2014.
- Fread, D. L., Jin, M., and Lewis, J.M.** (1996). “An LPI Numerical Implicit Solution for Unsteady Mixed-Flow Simulation”, “North American Water and Environment Congress '96, ASCE, Anaheim, California.
- Fread, D.L., Lewis, J.M.** (1993). “Selection of Dx and Dt Computational Steps for Four-Point Implicit Nonlinear Dynamic Routing Models” ASCE National Hydraulic Engineering Conference Proceedings, San Francisco, CA.
- Jin, M., and Lewis, J.M.** (1996). “An Application Of The LPI Solution Technique In NWS FLDWAV Model”, “North American Water and Environment Congress '96, ASCE, Anaheim, California.
- Mustafa S. Altinakar, Enrique E. Matheu, PhD, Marcus Z. McGrath.** (2009). “New Generation Modeling And Decision Support Tools For Studying Impacts of Dam Failures”, “ASDSO Dam Safety 2009 Annual Conference”, Florida.
- Prasada Rao, Theodore V. Hromadka** (2016). “Numerical modeling of rapidly varying flows using HEC RAS and WSPG models”.
- Samuels, P.G.** (1989). “Backwater lengths in rivers”, Proceedings -- Institution of Civil
- Sharkey, Jennifer Kay.** (2014). “Investigating Instabilities with HEC-RAS Unsteady Flow Modeling for Regulated Rivers at Low Flow Stages”. Master’s Thesis, University of Tennessee.
- Toombes L, Chanson H** (2011). “Numerical Limitations of Hydraulic Models”. The 34th International Association for Hydraulic Research World Congress, Brisbane, Australia, pp. 2322-2329.
- Jowhar RM, Jihan MQ** (2012). “Comparison of 1D HEC-RAS with 2D ADH for flow over trapezoidal profile weirs”. Casp J Appl Sci Res 1(6):1–12
- USACE HEC.** (2016). “HEC-RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0.3”. 411 pp., Downloadable <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-download.html>.
- USACE HEC.** (2016). “HEC-RAS River Analysis System User’s Manual Version 5.0.3”, 960 pp., Downloadable <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/hecras-download.html>.