

<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616007>

Uso de modelo hidrodinâmico para determinação da vazão a partir de medições de nível

Using hydrodynamic model for flow calculation from level measurements

Fernanda Almeida de Oliveira¹, Tatiane Souza Rodrigues Pereira¹, Alexandre Kepler Soares¹ e Klebber Teodomiro Martins Formiga¹

¹Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, Brasil

E-mails: fe.almeida09@gmail.com (FAO), tatiane.srp@hotmail.com (TSRP), aksoares@gmail.com (AKS), klebber.formiga@gmail.com (KTMF)

Recebido: Janeiro 06, 2016 - Revisado: Abril 23, 2016 - Aceito: Junho 21, 2016

RESUMO

O uso de modelos hidrodinâmicos para a determinação das vazões em cursos d'água tem crescido nos últimos anos devido aos problemas relativos à utilização do método da curva-chave para monitoramento das vazões. Este trabalho tem por objetivo desenvolver um método para determinação das vazões em canais abertos utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivos (NSGA-II) e medições de nível da superfície livre associadas a um modelo hidrodinâmico. Dados obtidos de ensaios em um canal experimental de laboratório foram utilizados para calibração e validação do modelo. O algoritmo de otimização NSGA-II apresentou excelentes resultados, obtendo-se coeficientes de Nash-Sutcliffe superiores a 0,99 tanto para a calibração quanto para a validação do modelo hidrodinâmico. As vazões calculadas pelo modelo hidrodinâmico apresentaram uma variação de até 150% para um mesmo nível quando comparadas às vazões estimadas pela curva-chave, o que demonstrou que o uso da curva-chave para medição de vazão em regime variável apresenta erros elevados.

Palavras-chave: Otimização multiobjetivo; Equações de Saint-Venant; Escoamento não permanente; NSGA-II; Curva-chave.

ABSTRACT

The use of hydrodynamic models to determine stream discharges has been grown in recent years due to the problems regarding the use of rating curve method for discharge estimating. This study aims to develop a method for determining discharges in open channels using multiobjective evolutionary algorithms (NSGA-II) and free surface level measurements associated with a hydrodynamic model. Data obtained from experiments on a laboratory experimental channel have been used for model calibration and validation. NSGA-II optimization algorithm presented excellent results and Nash-Sutcliffe coefficients greater than 0.99 have been obtained for both calibration and validation of the hydrodynamic model. Discharges calculated by the hydrodynamic model showed variations of up to 150% for the same level when compared to the discharges estimated by the rating curve, which showed that the use of rating curve for discharge measurements during transient flows results in high errors.

Keywords: Multiobjective optimization; Saint-Venant equations; Transient flow; NSGA-II; Rating curve.



INTRODUÇÃO

Vazões em cursos d'água são uma das mais difíceis variáveis da Hidrologia a serem obtidas, pois sua medição envolve procedimentos muitas vezes demorados, perigosos e de alto custo (CORATO et al., 2014). Mesmo com o uso de equipamentos modernos como ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*), ADV (*Acoustic Doppler Velocimeter*) e SRV (*Surface Radar Velocimeter*), a medição de vazão ainda apresenta problemas, principalmente em situações com rápida alteração do nível d'água, altas velocidades e acesso difícil.

Sendo assim, e na grande maioria dos casos, recorre-se a métodos indiretos para se determinar a vazão, sendo a relação cota-vazão (curva-chave) a mais empregada. No entanto, esse método apresenta sérios problemas e tem sido muito contestado na literatura (ARICÒ et al., 2009; DAMANGIR; ABEDINI, 2014). O primeiro problema da curva-chave é que ela considera que o regime de escoamento é permanente. Nesta situação, em um trecho de canal regular, a relação nível d'água x descarga líquida é unívoca, ou seja, apresenta o mesmo valor tanto para ascensão quanto para recessão do hidrograma. No entanto, os regimes nas cheias são transientes, com os termos de acelerações local e convectiva das equações de Saint-Venant não podendo ser desprezados (YANG et al., 2014). Por se tratar de um método baseado exclusivamente na interpolação de pontos, o uso da cota-vazão enfrenta problemas para estimativa das vazões altas, onde raramente se têm valores medidos em campo. Essas vazões são obtidas por meio da extrapolação da curva, com base em uma equação, geralmente potencial. Tal extrapolação não leva em conta as características da seção do rio e prevê que a tendência apresentada se repita para as cotas mais altas, o que geralmente não condiz com a realidade (SAHOO et al., 2014).

Uma das alternativas ao uso da curva-chave para medição de vazão é o emprego de modelos hidrodinâmicos que levam em conta as características hidráulicas da seção e do trecho de estudo. Este tipo de abordagem foi proposto inicialmente por Atanov et al. (1999). Por se tratar de um modelo, as equações hidrodinâmicas precisam ter os seus parâmetros ajustados. Isso pode ser feito com base em dois tipos de informação: medidas de velocidades na seção do rio e declividades da linha d'água obtidas diretamente ou empregando sensoriamento remoto, além das características físicas (batimetria) do trecho.

Dezenas de trabalhos têm sido desenvolvidos com o intuito de substituir a curva-chave na estimativa da vazão em cursos de água. De um modo geral, os trabalhos podem ser classificados de duas formas principais, sendo uma relacionada ao tipo de informação empregada e a segunda relacionada ao método utilizado para estimar a vazão. O primeiro tipo são os modelos que usam medidas de velocidades ou vazões. Eles requerem menos informações de batimetria, mas necessitam de informações de vazões e da seção para ajustar os parâmetros do modelo (CORATO et al., 2011; MORAMARCO et al., 2011). Informações de velocidades podem ser empregadas para este fim, mas deve-se considerar um perfil de velocidades para estimar a vazão (CHOO et al., 2013, 2014). Esses modelos precisam de poucos dados batimétricos adicionais, sendo que Aricò et al. (2010) indicam que 500 m de comprimento do trecho do curso d'água são suficientes. Outro tipo de abordagem é empregado nas situações em que as informações de vazões são

difíceis de obter, e, assim, utiliza-se a medição de nível em duas seções transversais distintas. Essas medições podem ser realizadas diretamente por meio de medidores de nível (ARICÒ et al., 2010; PERUMAL et al., 2010; YADAV et al., 2015) ou empregando sensoriamento remoto para estimar a declividade da linha d'água (DURAND et al., 2014). Para tanto, é preciso determinar as características do trecho por meio de um levantamento batimétrico mais detalhado.

Nos modelos hidráulicos, os parâmetros a serem obtidos são basicamente os coeficientes de perda de carga no trecho (Manning, Chézy ou Darcy-Weisbach). Para a estimativa desses coeficientes, algoritmos de otimização têm sido empregados (TANG et al., 2010). Por se tratar de uma simplificação da realidade e nem sempre incorporar todos os efeitos hidráulicos ou físicos, dificilmente existe uma única resposta para o conjunto de parâmetros do modelo (BEVEN, 2012), sendo recomendado o uso de métodos que possam fornecer diferentes soluções para o problema. Alguns dos métodos que têm sido empregados para a calibração de modelos empregam a otimização multiobjetivo, dos quais os algoritmos genéticos multiobjetivo tem se mostrado como mais promissores para resolução do problema (FORMIGA et al., 2003; DUNG et al., 2011).

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um método para determinação das vazões em canais abertos utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo e medição de nível em diferentes pontos associados a um modelo hidrodinâmico. A avaliação do modelo foi realizada em um canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás (EECA/UFG), onde foram obtidos dados de quatro eventos experimentais, sendo um deles empregado para a calibração e outros três utilizados para a validação do modelo.

MODELOS HIDRODINÂMICOS

As equações unidimensionais para águas rasas, também chamadas de Equações de Saint-Venant (SV), são muito utilizadas para modelagem do escoamento em canais abertos. Estas equações provêm uma descrição suficientemente precisa para escoamentos 1-D incompressíveis, onde a distribuição de pressão na vertical pode ser considerada como hidrostática (CHAUDHRY, 2010). As duas equações da conservação de massa (1) e da quantidade de movimento (2) podem ser escritas como:

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

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

em que 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 líquida, g é a aceleração da gravidade, S_0 é a declividade de fundo e S_f é a declividade da linha de energia. Assumindo que a perda de carga possa ser calculada pela equação de Manning, o valor de S_f pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$S_f = \frac{Q^2 n^2}{A^2 R_H^{4/3}} \quad (3)$$

As Equações 1 e 2 são matematicamente classificadas como diferenciais parciais hiperbólicas. Elas requerem para a sua solução duas condições de contorno e uma condição inicial para as variáveis do problema. Se o escoamento ocorre em regime supercrítico, são necessárias duas condições de contorno de montante, mas se o escoamento é subcrítico, é necessária uma condição de montante e outra de jusante (AKAN, 2006; ARICÒ et al., 2010). As condições de contorno de montante podem ser curva de descarga ou medidas de níveis (linigrama). Já as condições de jusante podem ser representadas por relações cota-vazão, medidas de níveis, estabelecimento de seções de controle, como em vertedores ou quedas bruscas, ou consideração de movimento uniforme no caso de canais com grande extensão longitudinal (AKAN, 2006).

Para a condição inicial, é preciso definir os valores das variáveis de estado do escoamento (Q e h) em todas as seções ao longo do canal, geralmente no escoamento permanente.

No entanto, a principal dificuldade em se estabelecer tanto as condições de contorno quanto a inicial se dá pelo fato de que não se conhecem em nenhuma seção em qualquer instante de tempo os valores das vazões.

O conjunto de equações representado pelas equações de SV e suas condições inicial e de contorno não tem resolução direta, sendo preciso recorrer a métodos numéricos. Diversos métodos e abordagens foram desenvolvidos e uma revisão pode ser encontrada em Chaudhry (2010). De um modo geral, os métodos explícitos, como o Lax Difusivo, requerem que se conheçam os valores de nível e vazão de montante, havendo dificuldade de se trabalhar apenas com valores de cota de montante. Assim, neste tipo de problema, é mais recomendado empregar métodos implícitos. O esquema de box ou de Preissman oferece uma boa estabilidade para escoamentos subcríticos, mas apresenta problemas para escoamentos transcíticos, conforme apontado por Negrão (2015).

Ao se desconhecer as informações hidráulicas do escoamento e tendo-se apenas dados dos níveis d'água de montante e uma condição de contorno de jusante, o problema torna-se indeterminado. Para a estimativa das características hidráulicas do modelo, é necessário conhecer uma informação adicional, como dados dos níveis d'água na seção de jusante do trecho de estudo. Tal determinação é realizada empregando-se técnicas de calibração (ARICÒ et al., 2009).

CALIBRAÇÃO DE MODELOS HIDRODINÂMICOS

Diferentemente da calibração de modelos hidrológicos, que têm um elevado nível de incertezas e simplificações assumidas, a calibração de modelos hidráulicos é um processo menos complexo, uma vez que o número de variáveis de decisão é geralmente menor.

Como em todo processo de calibração, o uso de apenas um critério de desempenho pode resultar em super-adaptação dos parâmetros do modelo a uma situação específica, principalmente quando se tem poucos eventos para avaliar. Para reduzir tal tendência é recomendado avaliar o ajuste do modelo utilizando mais de um critério. Desta forma, os métodos de determinação mais recomendados são os baseados em técnicas multicritérios, que buscam encontrar um conjunto de soluções Pareto-ótimas.

Embora a otimização multiobjetivo já venha sendo empregada na calibração de modelos hidrológicos desde os anos 1990, o seu uso na calibração de modelos hidráulicos de canais ainda é recente e pouco explorado (SHINMA, 2015).

Dentre as técnicas multicritérios, as que têm apresentado melhores resultados nos processos de calibração são as baseadas em Algoritmos Evolucionários Multiobjetivos. Destas, os algoritmos NSGA-II – *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II* – (DEB, 2001) têm se mostrado melhores e mais robustos para este tipo de problema (DUNG et al., 2011). As etapas dos algoritmos NSGA-II são: 1) geração da população inicial P1 com X indivíduos; 2) ordenação dos indivíduos baseada primeiramente na frente em que ele está localizado e, em caso de empate, na distância de aglomeração; 3) uma nova população P2 é gerada a partir da população P1 empregando um processo de seleção por torneio, recombinação de genes e mutação; 4) seleção da população de elite: as populações P1 e P2 são unidas e é feita uma nova ordenação conforme o passo 2, sendo escolhidos os X melhores indivíduos, que irão formar a população P1 na próxima iteração. Os passos 2 a 4 são repetidos até que o critério de parada seja atingido.

ESTUDO DE CASO

O procedimento para determinação da vazão foi aplicado ao canal experimental do Laboratório de Hidráulica da Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás. O trecho do canal estudado tem um comprimento de aproximadamente 4 m, tem suas paredes em acrílico e o fundo metálico, podendo as superfícies serem classificadas como lisas. O canal é retangular com seção de $0,205 \times 0,40 \text{ m}^2$ (Figura 1), tem a jusante um vertedor retangular de soleira delgada, sem contrações laterais, cuja altura da soleira foi estabelecida em 0,11 m. Todas os ensaios foram realizados com a mesma declividade de fundo.

As leituras das alturas das lâminas d'água para construção do linigrama foram realizadas empregando réguas calibradas posicionadas na frente de câmeras filmadoras. Foram usadas quatro câmeras operando com 25 quadros por segundo (25 Hz), intervalo satisfatório para capturar as variações da superfície livre da água durante os eventos simulados. Os vídeos foram sincronizados para que a aquisição dos valores das lâminas (H1, H2, H3 e H4) fosse realizada por observação de quadro a quadro, sendo as alturas

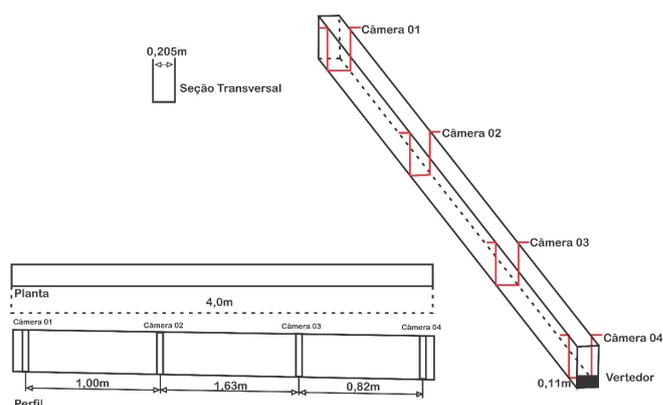


Figura 1. Layout do canal com os pontos de medição.

anotadas em arquivo digital. Posteriormente, os dados entre as câmeras foram compatibilizados a partir de um valor de tempo base. A precisão temporal aferida ficou na casa de centésimos de segundos, o que foi satisfatória para a precisão requerida.

Eventos

Foram simulados 4 eventos no canal, sendo 2 eventos de diminuição de vazão – rápido (E1) e lento (E2) – e 2 eventos de aumento da vazão – rápido (E3) e lento (E4), apresentados na Figura 2. Um evento foi empregado para a calibração do modelo e os outros três foram utilizados para validação. Vale ressaltar novamente que, diferentemente dos modelos hidrológicos, não há necessidade de se ter uma grande quantidade de eventos para o ajuste do modelo hidrodinâmico, pois o meio físico é bem conhecido e as variáveis do problema são poucas.

O evento E1 resultou do desligamento abrupto da bomba que alimenta o canal, provocando um deplecionamento rápido da lâmina d'água, que ocorreu em 15 s; o E2 foi ocasionado pelo fechamento manual da válvula a jusante da bomba, o que

acarretou em uma diminuição mais lenta da lâmina d'água, com uma duração de quase 50 s para a estabilização; o E3 foi resultado da abertura da válvula e teve uma duração de 30 s; enquanto que o evento E4 foi provocado pelo acionamento brusco da bomba, ocasionando uma onda de cheia rápida e estabilidade das lâminas após 18 s. Os valores das lâminas em cada seção dos eventos e a sua evolução no tempo podem ser observados na Figura 2.

Condição inicial

De um modo geral, apenas a altura da superfície livre da água em uma seção de controle ou de medição é conhecida inicialmente no problema de modelagem hidrodinâmica para a determinação da vazão de um canal. O estabelecimento da condição inicial de escoamento no trecho simulado indica a necessidade de se ter conhecimento tanto da altura quanto da vazão em todas as seções do trecho. Como não se conhecem os valores das vazões, as condições não podem ser determinadas diretamente, sendo preciso recorrer a um processo iterativo.

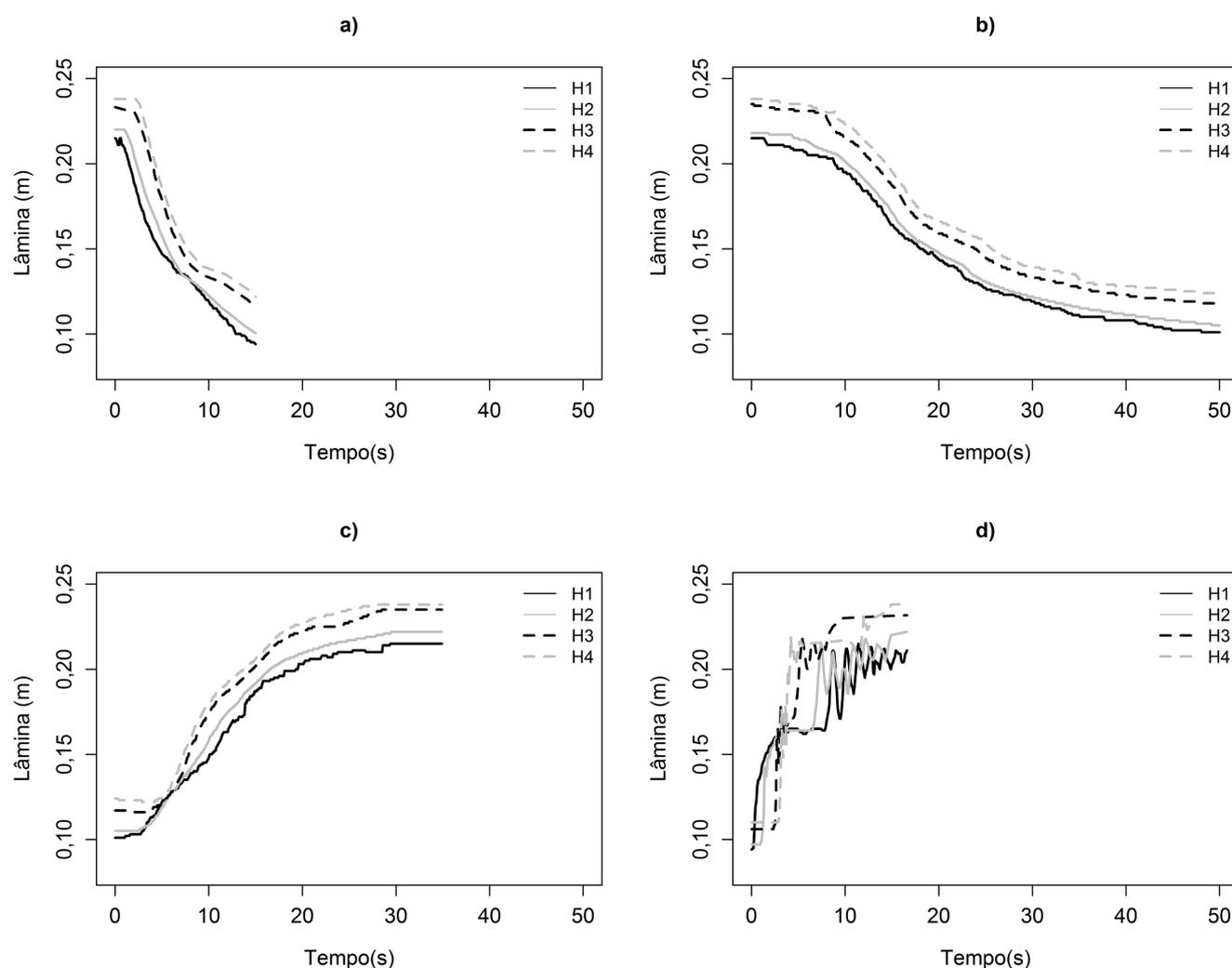


Figura 2. Lâminas d'água observadas nas réguas (H1, H2, H3 e H4) para os eventos avaliados na calibração (E1) e validação (E2, E3 e E4).

O método empregado neste trabalho é baseado no *Step Method* empregando um algoritmo Newton-Raphson para o cálculo dos valores da altura (AKAN, 2006; CHAUDHRY, 2008). O procedimento tem as seguintes etapas: 1) indicação de um valor inicial para a vazão no trecho; 2) cálculo da altura da lâmina d'água na seção de jusante, empregando a condição de contorno do problema; 3) determinação das lâminas d'água no trecho empregando o *Step Method*+Newton-Raphson; 4) comparação dos valores das cotas observada e calculada na condição de contorno de jusante; 5) ajuste da vazão empregando um algoritmo de busca local - neste trabalho, empregou-se o método da secante.

Condições de contorno

As condições de contorno de montante foram obtidas a partir da leitura da régua, apresentadas na Figura 3. Ela entra no método de Preissmann a partir da determinação do resíduo na seção de montante (r_0) para altura de água, e é dado por:

$$r_0 = h_0 - H_0 \quad (4)$$

em que h_0 é a lâmina d'água calculada pelo modelo; e H_0 , a lâmina d'água do linigrama de entrada (Figura 3), ambas em m.

A condição de jusante válida para todos os eventos é representada pela equação de um vertedor retangular de soleira delgada, sem contrações laterais, que, para as condições do canal, resulta em uma condição de contorno para o problema conforme a equação:

$$Q_v = 0,461(h_v - 0,11)^{3/2} \quad (5)$$

sendo Q_v a vazão do vertedor em m^3/s ; h_v a altura da lâmina d'água em m. Esta condição entra no problema a partir do cálculo do resíduo na seção do vertedor (r_N):

$$r_{N+1} = h_{N+1} - (Q_v / 0,461)^{2/3} + 0,11 \quad (6)$$

sendo N o número de seções internas em que o canal foi discretizado.

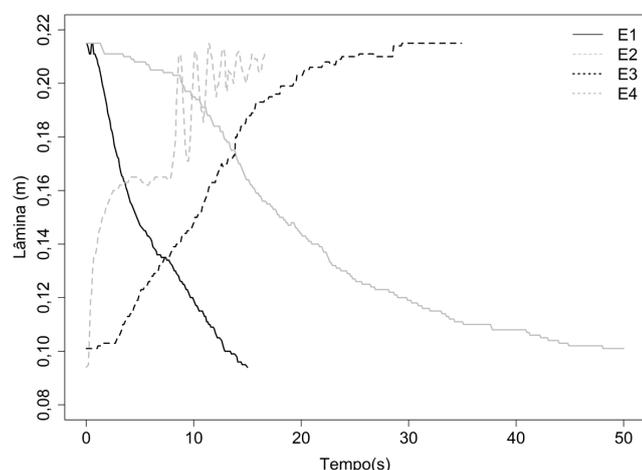


Figura 3. Lâminas d'água na régua 1 (montante do canal).

Calibração e validação

O processo de calibração é representado no fluxograma apresentado na Figura 4. A calibração foi feita considerando o evento E1 (Figura 2a). Foram consideradas 3 funções objetivo para o problema, uma para cada uma das régua intermediárias do canal. As funções objetivo são definidas pelo coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe:

$$FO_x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (Hobs_{i,x} - Hcalc_{i,x})^2}{\sum_{i=1}^t (Hobs_{i,x} - Hobs_x)^2} \quad (7)$$

em que, $Hobs_{i,x}$ é a altura da lâmina d'água observada no tempo i na seção x ; $Hcalc_{i,x}$ é a altura da lâmina d'água calculada no tempo i na seção x ; $Hobs_x$ é a altura da lâmina d'água média na seção x e t é o número de intervalos de tempo.

Os parâmetros do Algoritmo NSGA-II empregados foram:

- Tamanho da população: 100
- Número de Gerações: 100
- Tipo de seleção: torneio de 3 participantes
- Tipo de mutação: uniforme
- Taxa de mutação: 1%
- Tipo de recombinação: 2 pontos
- Taxa de recombinação: 80%
- Tamanho da população de elite: 50%

As variáveis de decisão empregadas no canal experimental são n (coeficiente de rugosidade de Manning) e S_0 (declividade de fundo). O valor de n foi devido ao objetivo específico do estudo de calibrar o parâmetro em questão, e o de S_0 devido à ausência de equipamento de medição com precisão necessária em relação às dimensões do canal. O modelo foi ajustado para os dados do canal considerando como parâmetro o coeficiente de Manning das paredes, pois, como os materiais do fundo e da parede são hidráulicamente lisos, considerou-se um único valor de n para toda a seção.

Para a validação do modelo foram empregados 3 eventos – E2, E3 e E4 (Figura 2).

Escolha da alternativa

A abordagem multiobjetivo envolve, no final, a escolha de uma alternativa dentre aquelas encontradas pelo algoritmo de geração da frente Pareto. Considerando que no resultado da otimização se obtenham apenas soluções não dominadas, ou seja, que tem matematicamente o mesmo grau de importância, já que todas são soluções ótimas, não se pode, a priori, dizer que uma alternativa é melhor do que outra. É preciso então empregar um método que possa diferenciar essas soluções. Neste trabalho, foi proposto um método de melhor compatibilidade ou compromisso, em que os valores das funções objetivo das soluções Pareto-ótimas

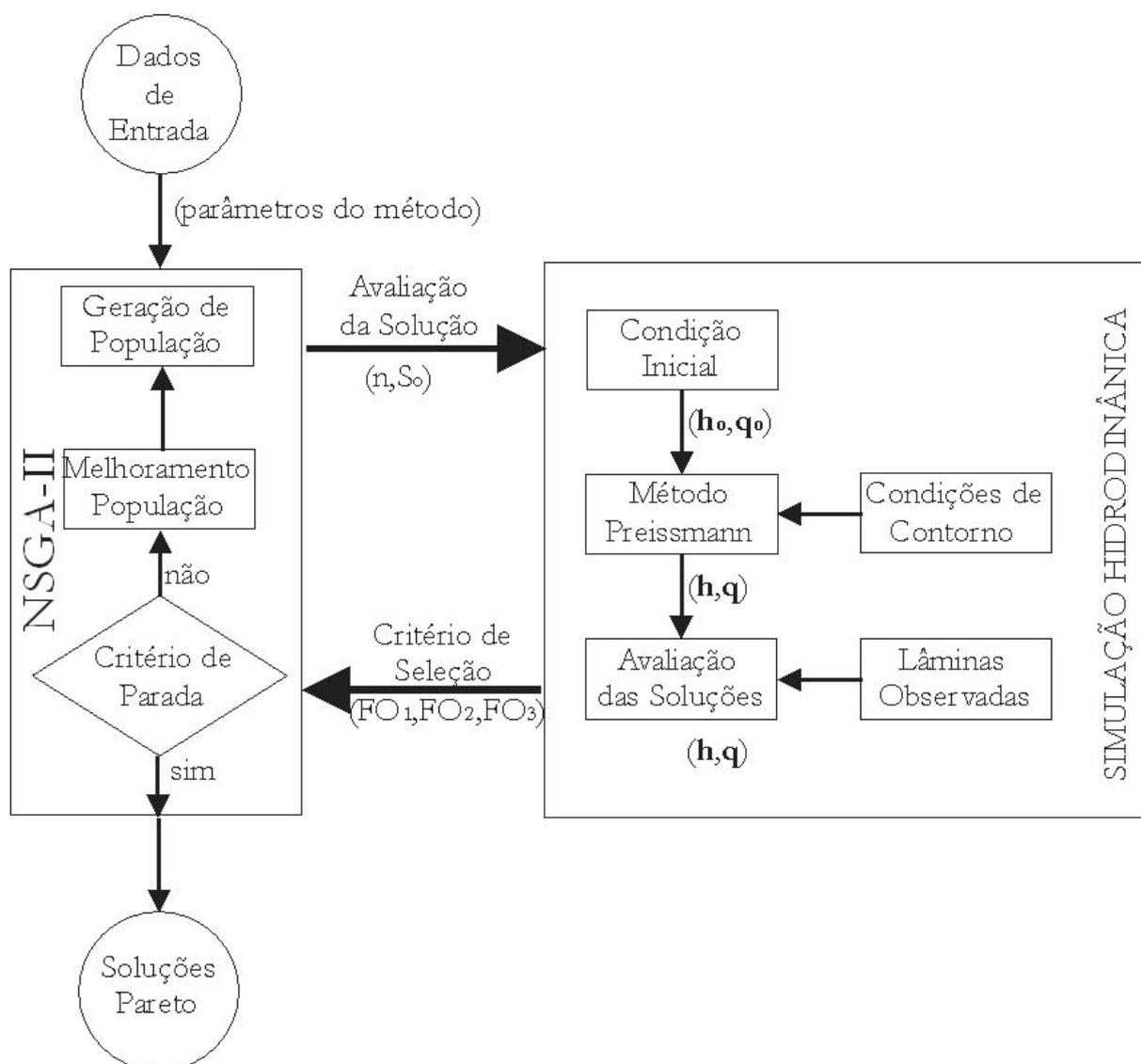


Figura 4. Fluxograma da calibração do modelo hidrodinâmico.

encontradas são normalizadas com relação à média e o desvio pelas expressões abaixo:

$$\|FO_i\| = \frac{FO_i - \overline{FO}_i}{\sigma_{FO_i}} \quad (8)$$

sendo $\|FO_i\|$ o valor normalizado da função objetivo; \overline{FO}_i a média dos valores das funções objetivo i do conjunto de soluções encontrado; σ_{FO_i} o desvio padrão dos valores funções objetivo i do conjunto de soluções encontrado.

A compatibilidade (C) é então fornecida pela soma das funções normalizadas, em que quanto maior o seu valor mais compatível é a alternativa.

RESULTADOS

Os resultados deste trabalho são apresentados em 3 partes. Na primeira, é realizada a calibração do modelo considerando o evento E1, seguida da determinação da solução de maior compatibilidade. Na segunda parte, o modelo é validado para os

outros eventos (E2, E3 e E4). Com os dados do modelo ajustado, as vazões para cada um dos eventos são calculadas.

Calibração

Foram realizadas 10 otimizações independentes, e as frentes Pareto resultantes foram comparadas. Foi escolhido o conjunto que obteve melhor dominância. Esse procedimento é necessário quando se trabalha com algoritmos evolucionários, pois, por não serem métodos determinísticos, os resultados tendem a ter variação. Neste caso, em 5 das 10 simulações, os resultados foram iguais, indicando que o tamanho da população e o critério de parada empregados para o NSGA-II foram adequados.

O tempo de simulação gasto em um processador i7 4970k foi de 15 min para um total de 100 indivíduos e 100 gerações. A Figura 5 apresenta os valores das métricas de distância (5a) e de espalhamento (5b) da frente Pareto ao longo das gerações. Pode-se verificar que elas estabilizam próximo de 40 gerações e,

ao final das 100 gerações, a frente resultante era composta por 35 soluções não dominadas.

Os resultados para as frentes Pareto e variáveis de decisão são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Pode-se verificar que houve uma convergência para valores muito próximos tanto

no espaço das funções (Figura 6) quanto no espaço das soluções (Figura 7). Isto denota que o nível de incerteza encontrado para o evento calibrado foi pequeno, principalmente para n , que teve uma variação dentro do conjunto não dominado de soluções de apenas 0,2%, enquanto que a declividade apresentou uma faixa

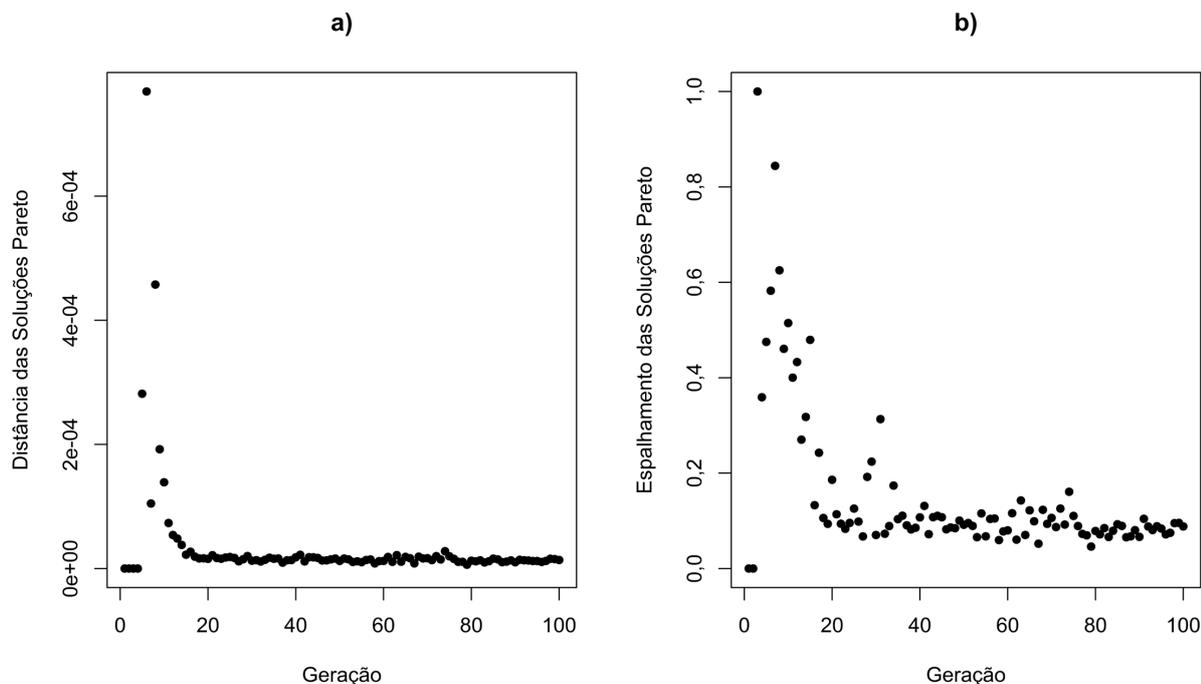


Figura 5. Valores das métricas relativas à qualidade da frente Pareto.

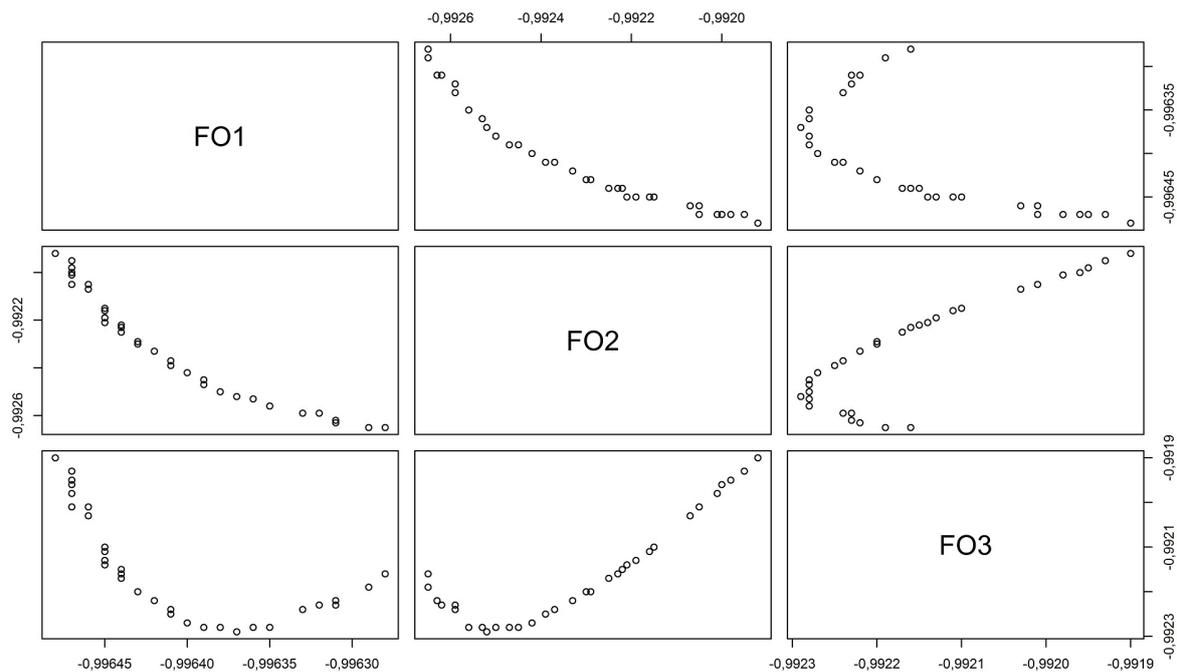


Figura 6. Resultados das soluções Pareto para as 3 funções objetivo do problema.

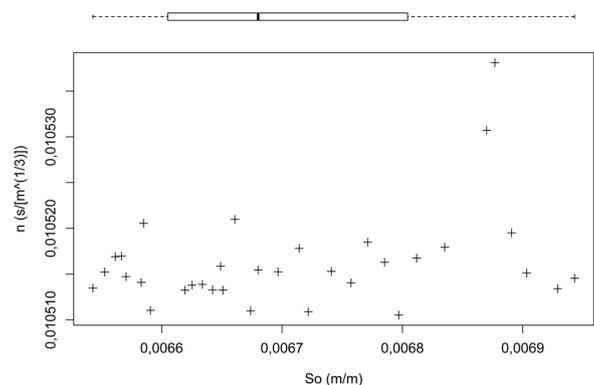


Figura 7. Valores do coeficiente de Manning e da declividade de fundo do canal encontrados no conjunto Pareto, com gráficos boxplot indicando as distribuições destas variáveis.

de alterações em torno de 6%. A frente apresentou ainda uma boa distribuição dos indivíduos no espaço das soluções, não permitindo a existência de grandes aglomerações e havendo um bom espalhamento das soluções.

Os valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe foram muito altos para todas as soluções encontradas, e em todas as régua de observação, com índices sempre superiores a 0,99, o que indica que os valores simulados foram muito próximos dos observados, na etapa de calibração.

Após encontrar a frente Pareto, aplicou-se o processo de escolha de uma solução de maior compatibilidade, obtendo-se os seguintes valores para as variáveis: $n = 0,0105$ e $S_o = 0,00684$ m/m. Os valores do coeficiente de Manning ficaram próximos dos encontrados na literatura para superfícies lisas que variam de 0,009 a 0,010 (CHAUDHRY, 2008).

O bom ajuste encontrado pelo processo de otimização pode ser comprovado ao se analisar os linigramas observados e calculados (Figura 8), que mostram valores praticamente coincidentes. A Figura 8 mostra ainda que à medida que se distancia da seção de montante, ocorre uma tendência de antecipação da onda de cheia, sendo que na régua 4, esse valor é de quase 1 s. Isto pode ser decorrente das simplificações do modelo hidrodinâmico, que fica evidente principalmente nos períodos de mudanças mais rápidas.

O erro apresentado nas Régua 3 e 4 também aumentam à medida que se distancia do ponto inicial de medida no canal, sendo que os maiores erros relativos foram encontrados próximos dos pontos de lâminas mais altas e no momento que ocorre a inflexão da curva na parte inferior do linigrama. Na Régua 2 os erros maiores são ocasionados nesta região de inflexão da curva no final da descida, sendo que o modelo se adaptou melhor ao início da descida.

Validação

Os parâmetros calibrados foram aplicados a outros três eventos que consistem em uma redução lenta da vazão (E2), aumento lento da vazão (E3), e aumento rápido da vazão (E4). Os resultados da validação do modelo são apresentados nas Figuras 9-11.

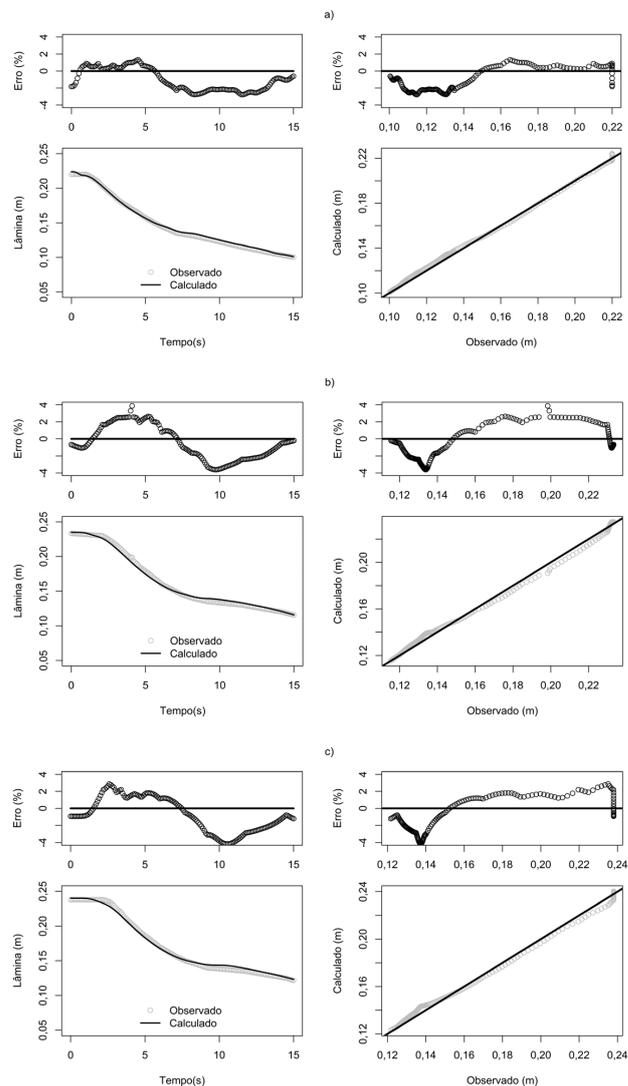


Figura 8. Valores das lâminas observadas e calculadas para o evento E1 e os erros em função do tempo e dos valores observados.

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores das funções objetivo e dos erros médios e máximos para o evento de calibração e os três eventos utilizados na validação.

Verifica-se nas Figuras 9 e 10 que o modelo apresentou um excelente ajuste, fato corroborado pelos valores do coeficiente de Nash-Sutcliffe, que resultou, para os dois eventos de mudanças mais lentas (E2 e E3), valores superiores aos obtidos na calibração (E1). Nos eventos mais lentos, as simplificações das equações de SV, principalmente a distribuição de pressão hidrostática, são mais representativas do escoamento. Por esse motivo, mesmo na etapa de calibração, o comportamento observado foi mais próximo do teórico. Para estes dois eventos, o modelo conseguiu descrever bem a variação dos níveis d'água em todos os pontos de observação. O ajuste na descida (E2) praticamente coincidiu com o observado em todos os pontos, o que se reflete no erro médio muito baixo, principalmente na Régua 2 (Figura 9a). Na Régua 3 (Figura 9b), houve um adiantamento na descida pelo modelo, resultando no ponto onde ocorreu o maior erro observado, por

volta de 4%, e a região em que ocorre maior desvio dos valores observados. Na Régua 4 (Figura 9c), os erros são mais distribuídos ao longo do tempo, ocorrendo uma pequena antecipação no início da descida. Para o evento de subida lenta (E3), observa-se

que, embora tenha reproduzido bem o escoamento, ocorreu um pequeno descolamento entre os valores observados e calculados, sendo estes últimos menores em praticamente todo o tempo, que fica evidente principalmente na Régua 4 (Figura 10c).

Tabela 1. Resumo dos valores das funções objetivo e erros médios e máximos para os eventos de calibração e validação.

		Evento			
		E1	E2	E3	E4
FO	FO ₁	0,9963	0,9976	0,9966	0,8728
	FO ₂	0,9927	0,9946	0,9901	0,8442
	FO ₃	0,9924	0,996	0,9902	0,9251
Erro Medio (%)	R ₂	1,471	1,226	1,129	5,428
	R ₃	1,812	1,199	1,801	7,216
	R ₄	1,866	1,145	1,682	4,632
Erro Máximo (%)	R ₂	2,787	3,081	3,816	27,81
	R ₃	3,874	4,58	5,275	39,817
	R ₄	4,17	3,925	5,234	40,728

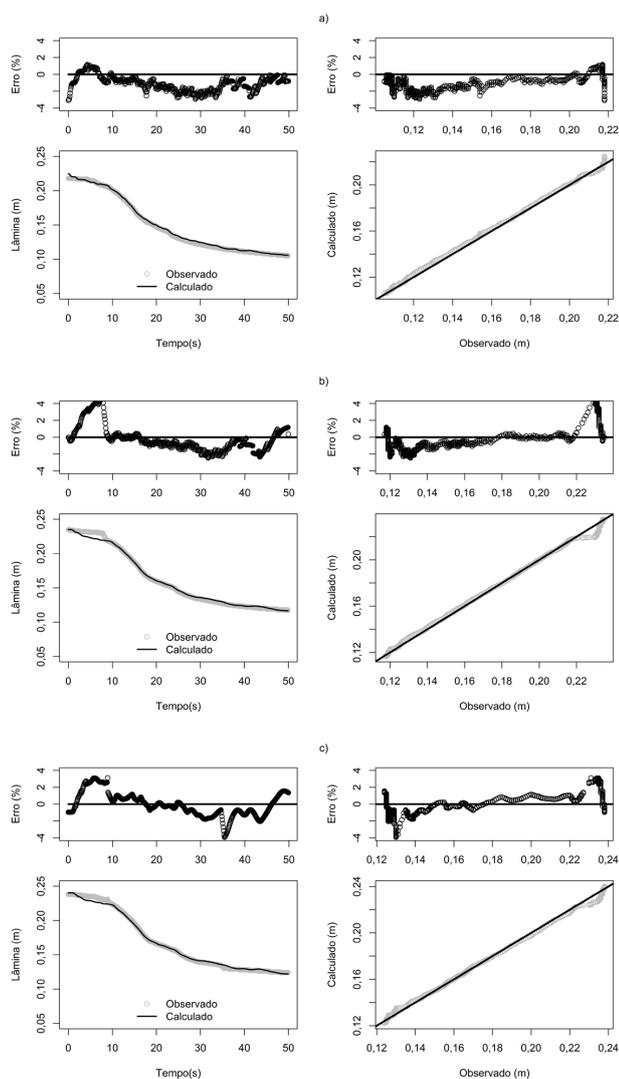


Figura 9. Valores das lâminas observadas e calculadas para o evento E2 e os erros em função do tempo e dos valores observados.

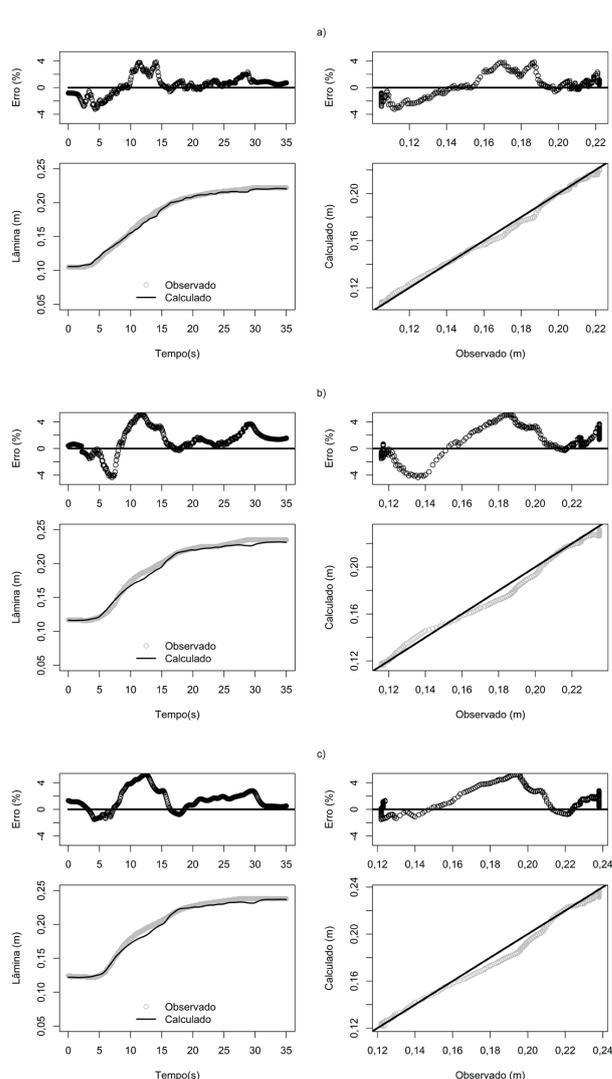


Figura 10. Valores das lâminas observadas e calculadas para o evento E3 e os erros em função do tempo e dos valores observados.

O evento E4 considera um aumento repentino da vazão, em que o nível d'água aumenta rapidamente, provocando uma onda que se propaga em todo o canal (Figura 12a). A onda, ao chegar ao vertedor, é rebatida e volta na direção contrária ao fluxo (Figura 12b), que é um fenômeno de reflexão da onda. Esse tipo de escoamento apresenta características como pressão não hidrostática, que não são consideradas nas equações de SV. Assim, e como pode ser observado na Figura 11, o comportamento físico do escoamento no canal não pode ser bem reproduzido pelo modelo, pois este não é capaz de trabalhar com a propagação de ondas inferentes e deferentes, o que só seria possível empregando um modelo baseado na formulação de Boussinesq, com a adição das fronteiras físicas do vertedor como superfície de reflexão. A partir do momento que ocorre o retorno da onda, por volta de 7 s, o modelo deixa completamente de representar o sistema e o erro chega a ser superior a 40%. No entanto, mesmo não sendo capaz de representar os detalhes que ocorrem, as equações de Saint-Venant conseguiram representar o comportamento geral da linha d'água, principalmente nas Régua 2 e 4 (Figura 11a, c).

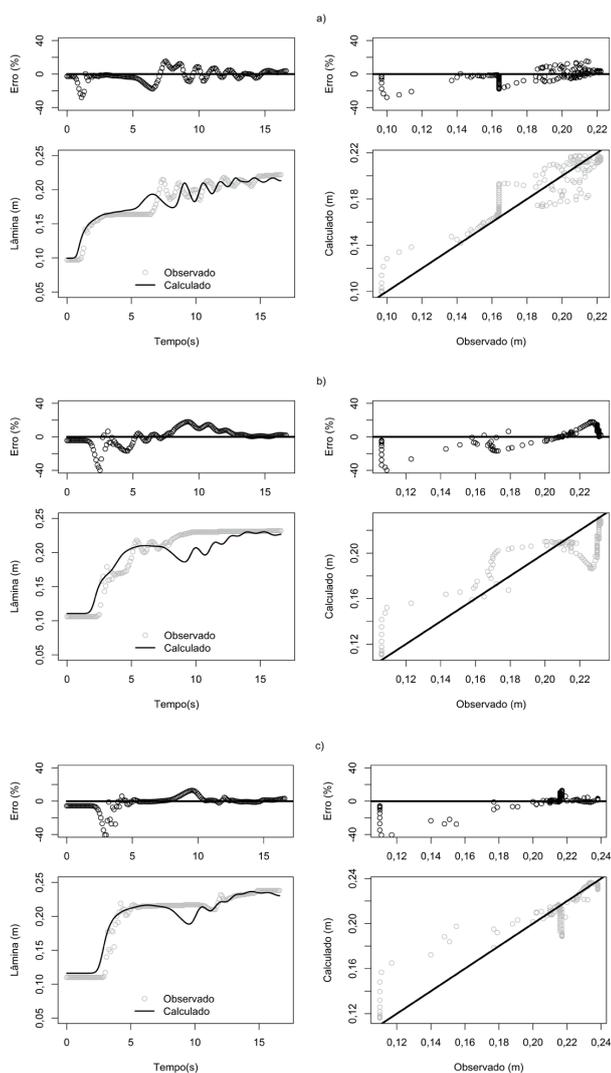


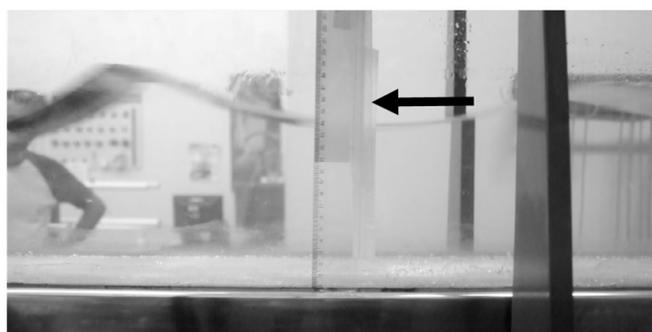
Figura 11. Valores das lâminas observadas e calculadas para o evento E4 e os erros em função do tempo e dos valores observados.

Estimativa da vazão escoada

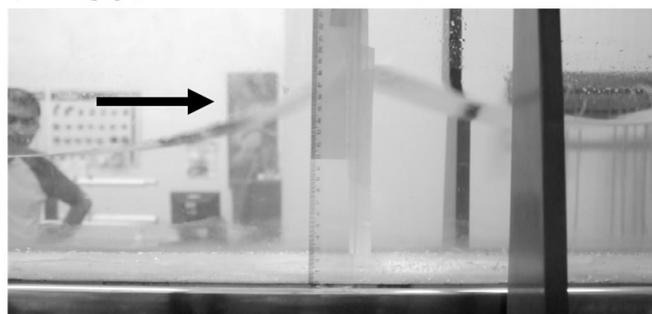
Após o modelo ter sido calibrado e validado para os valores de lâmina d'água, ele pôde ser empregado para a determinação da vazão considerando as alturas d'água medidas e uma condição de contorno de jusante. As vazões foram calculadas diretamente pelo modelo e, como este conseguiu reproduzir o nível de água, a outra variável conjugada (vazão), tem seus valores também confiáveis, uma vez que as condições do escoamento satisfazem às restrições de validade das equações de SV. Desta forma, e conhecendo-se as duas condições de contorno do problema, foi possível determinar as vazões em qualquer seção do canal. A Figura 13 apresenta os hidrogramas para os eventos E1, E2 e E3 na seção da Régua 1.

Caso o escoamento estivesse ocorrendo em regime permanente, seria possível construir uma curva-chave, que relacionaria para cada nível na régua uma vazão. Entretanto, nas condições de escoamento não permanente, com variações significativas nos valores das vazões em pouco período de tempo, a condição de escoamento permanente não é mais satisfeita. Para avaliar o efeito do transitório na relação, foram confrontados os dados de lâmina d'água e vazão para a seção de entrada (Figura 14). Foram considerados os dados dos eventos E1, E2 e E3, uma vez que o evento E4 não conseguiu ser corretamente reproduzido pelo modelo e, assim, as relações entre cota e vazão não seriam confiáveis.

Com base na Figura 14, pode-se constatar que existe uma grande diferença entre as vazões nos eventos de subida e descida lentas (E2 e E1, respectivamente). Por exemplo, para uma lâmina d'água de 0,15 m tem-se uma vazão de 0,004 m³/s na recessão do hidrograma enquanto que na ascensão este valor é 3 vezes maior, chegando a 0,012 m³/s. Assim, a utilização de um dado de entrada baseado na curva-chave em condições de mudança rápida do



a) Propagação da onda montante-jusante



b) Propagação da onda jusante-montante

Figura 12. Ondas geradas pela subida rápida de nível.

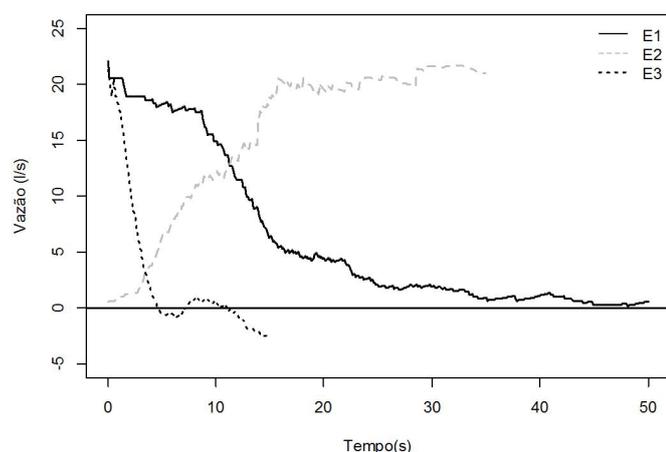


Figura 13. Hidrogramas obtidos pelo modelo hidrodinâmico a partir das lâminas observadas na Régua 1.

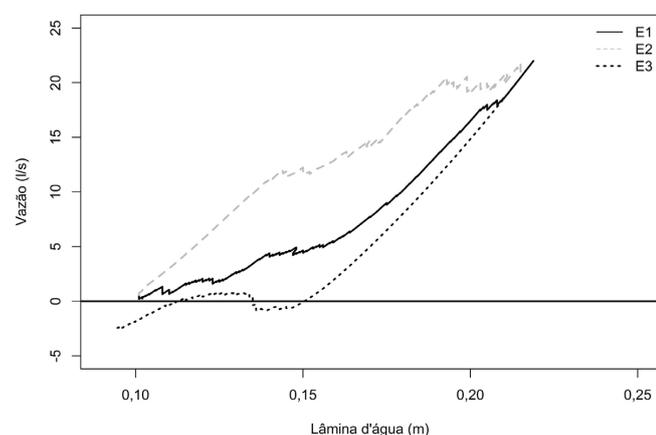


Figura 14. Relação entre as vazões calculadas e as lâminas observadas na Régua 1 para diferentes eventos.

escoamento, como nas cheias, pode trazer grandes incertezas dos reais valores de vazões e, implicando em erros para modelos que utilizam esta informação, principalmente os modelos hidrológicos.

O modelo conseguiu, ainda, identificar o processo de refluxo que ocorre na diminuição rápida da vazão (E3), em que vazões negativas são observadas (jusante para montante do canal). Este fenômeno acontece porque a taxa de decaimento da energia na seção de montante é maior do que a propagação (celeridade) da sua diminuição ao longo do canal. Desta forma, a energia da seção de montante, e o nível da água, ficam menores que aqueles à jusante, ocasionando subsequentemente uma mudança no sentido do escoamento. Assim, o modelo, mesmo em situações mais complexas, mas que ainda mantêm as simplificações originais, conseguiu representar bem os fenômenos envolvidos.

CONCLUSÕES

Curvas-chave, embora sejam úteis no auxílio ao monitoramento de vazões, têm grandes limitações conceituais, pois pressupõe-se escoamento permanente em locais onde ocorrem grandes variações de vazões e lâminas d'água, como em cursos d'água urbanos. Neste

trabalho, o modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Saint-Venant mostrou-se robusto para tratar este tipo de problema, desde que calibrados. Entretanto, em rápidas mudanças de regime com ocorrência de reflexão de ondas, o modelo, como esperado, não apresentou bom ajuste, sendo recomendado, nestas situações, o uso de modelos que tenham por base as equações de Boussinesq.

Na calibração do modelo, o algoritmo de otimização NSGA-II conseguiu uma convergência da frente Pareto em cerca de 40 gerações, sendo que a frente apresentou uma boa distribuição dos indivíduos. Como o ajuste do modelo foi muito bom, o *trade-off* entre as funções objetivo foi pequeno, uma vez que os resultados tenderam para uma região específica do espaço de soluções, pois estas apresentaram pequenas variações.

O uso de um modelo de ajuste de parâmetros (rugosidade e declividade de fundo do canal) baseado em técnicas de otimização multiobjetivo permitiu encontrar uma faixa de valores para diferentes eventos. Esse procedimento apresenta uma maior confiabilidade para os parâmetros encontrados. Para a definição da melhor solução das frentes Pareto, um processo de maior compatibilidade foi proposto com o uso de funções objetivo normalizadas.

O problema do uso do conceito da curva-chave em escoamentos transientes fica evidente quando se observa a diferença de vazões para a mesma cota que chegou a ser de aproximadamente 150% neste estudo. Isso denota que, ao se adotar uma curva-chave fixa como forma para determinação da vazão em um evento transiente, erros significativos podem ser introduzidos na modelagem hidráulico-hidrológica.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela bolsa de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora (processo nº 310389/2012-7) concedida ao primeiro autor. À CAPES, pela bolsa de estudos concedida ao segundo autor. À FINEP, pelo suporte financeiro para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AKAN, A. O. *Open channel hydraulics*. Amsterdam: Elsevier, 2006.
- ARICÒ, C.; CORATO, G.; TUCCIARELLI, T.; MEFTAH, M. B.; PETRILLO, A. F.; MOSSA, M. Discharge estimation in open channels by means of water level hydrograph analysis. *Journal of Hydraulic Research*, v. 48, n. 5, p. 612-619, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/00221686.2010.507352>.
- ARICÒ, C.; NASELLO, C.; TUCCIARELLI, T. Using unsteady-state water level data to estimate channel roughness and discharge hydrograph. *Advances in Water Resources*, v. 32, n. 8, p. 1223-1240, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advwatres.2009.05.001>.
- ATANOV, G.; EVSEEVA, E.; MESELHE, E. Estimation of roughness profile in trapezoidal open channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 125, n. 3, p. 309-312, 1999. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1999\)125:3\(309\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:3(309)).

- BEVEN, K. J. *Rainfall-runoff modelling: the primer*. 2nd ed. Hoboken: Wiley-Blackwell, 2012.
- CHAUDHRY, M. H. *Open channel flow*. 2nd ed. Englewood Cliffs: Springer-Verlag, 2008.
- CHAUDHRY, M. H. Modeling of one-dimensional, unsteady, free-surface, and pressurized flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 137, n. 2, p. 148-157, 2010. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000295](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000295).
- CHOO, T. H.; CHAE, S. K.; YOON, H. C.; CHOO, Y. M. Discharge prediction using hydraulic characteristics of mean velocity equation. *Environmental Earth Sciences*, v. 71, n. 2, p. 675-683, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-013-2468-y>.
- CHOO, T. H.; YOON, H. C.; LEE, S. J. An estimation of discharge using mean velocity derived through Chiu's velocity equation. *Environmental Earth Sciences*, v. 69, n. 1, p. 247-256, 2013. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-012-1952-0>.
- CORATO, G.; AMMARI, A.; MORAMARCO, T. Conventional point-velocity records and surface velocity observations for estimating high flow discharge. *Entropy (Basel, Switzerland)*, v. 16, n. 10, p. 5546-5559, 2014. <http://dx.doi.org/10.3390/e16105546>.
- CORATO, G.; MORAMARCO, T.; TUCCIARELLI, T. Discharge estimation combining flow routing and occasional measurements of velocity. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 9, p. 2979-2994, 2011. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-2979-2011>.
- DAMANGIR, H.; ABEDINI, M. J. System identification and subsequent discharge estimation based on level data alone—Gradually varied flow condition. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 36, p. 24-31, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.01.002>.
- DEB, K. *Multi-objective optimization using evolutionary algorithms*. Chichester: John Wiley & Sons, 2001.
- DUNG, N. V.; MERZ, B.; BÁRDOSSY, A.; THANG, T. D.; APEL, H. Multi-objective automatic calibration of hydrodynamic models utilizing inundation maps and gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 4, p. 1339-1354, 2011. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-1339-2011>.
- DURAND, M.; NEAL, J.; RODRÍGUEZ, E.; ANDREADIS, K. M.; SMITH, L. C.; YOON, Y. YOON, Y. Estimating reach-averaged discharge for the River Severn from measurements of river water surface elevation and slope. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, v. 511, n. 16, p. 92-104, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.12.050>.
- FORMIGA, K. T. M.; CHAUDHRY, F. H.; CHEUNG, P. B.; REIS, L. F. R. Optimal design of water distribution system by multiobjective evolutionary methods. *Lecture Notes in Computer Science*, v. 2632, p. 677-691, 2003. http://dx.doi.org/10.1007/3-540-36970-8_48.
- MORAMARCO, T.; SALTALIPPI, C.; SINGH, V. P. Velocity profiles assessment in natural channels during high floods. *Hydrology Research*, v. 42, n. 2-3, p. 162-170, 2011. <http://dx.doi.org/10.2166/nh.2011.064>.
- NEGRÃO, A. C. *Modelagem hidrodinâmica unidimensional da passagem de onda de cheia em um córrego urbano considerando escoamento transcrito*. 2015. 176 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- PERUMAL, M.; MORAMARCO, T.; SAHOO, B.; BARBETTA, S. On the practical applicability of the VPMS routing method for rating curve development at ungauged river sites. *Water Resources Research*, v. 46, n. 3, p. W03522, 2010. <http://dx.doi.org/10.1029/2009WR008103>.
- SAHOO, B.; PERUMAL, M.; MORAMARCO, T.; BARBETTA, S. Rating Curve Development at Ungauged River Sites using Variable Parameter Muskingum Discharge Routing Method. *Water Resources Management*, v. 28, n. 11, p. 3783-3800, 2014. <http://dx.doi.org/10.1007/s11269-014-0709-9>.
- SHINMA, T. A. *Avaliação de incertezas na calibração automática do modelo SWMM*. 2015. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.
- TANG, H.; XIN, X.; DAI, W.; XIAO, Y. Parameter identification for modeling river network using a genetic algorithm. *Journal of Hydrodynamics. Ser. B*, v. 22, n. 2, p. 246-253, 2010. [http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058\(09\)60051-2](http://dx.doi.org/10.1016/S1001-6058(09)60051-2).
- YADAV, B.; PERUMAL, M.; BARDOSSY, A. Variable parameter McCarthy-Muskingum routing method considering lateral flow. *Journal of Hydrology (Amsterdam)*, v. 523, p. 489-499, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.01.068>.
- YANG, T. H.; HO, J. Y.; HWANG, G. D.; LIN, G. F. An indirect approach for discharge estimation: a combination among micro-genetic algorithm, hydraulic model, and in situ measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*, v. 39, p. 46-53, 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2014.07.003>.

Contribuição dos autores

Fernanda Oliveira de Almeida: Contribuiu na concepção do trabalho, execução dos experimentos, aquisição e tratamento dos dados, discussão e escrita do artigo.

Tatiane Souza Rodrigues Pereira: Participou da execução dos experimentos, aquisição e tratamento dos dados, discussão e escrita do artigo.

Alexandre Kepler Soares: Contribuiu na concepção, discussão, análise dos dados, revisão e escrita do artigo.

Klebber Teodomiro Martins Formiga: Contribuiu na concepção, discussão, análise dos dados, revisão e escrita do artigo.