

Modelação da Propagação de Cheias Ocasionadas por Rompimento de Barragens na Cadeia de Geração do Rio Paranapanema

Rui P. dos Santos, Duke-Energy, Wagner V. F. Ferreira, Duke-Energy, Pedro N. Pereira, Duke-Energy, J. Rodolfo S. Martins, FCTH, Francisco M. Fadiga Jr., FCTH e Raquel C. P. dos Santos, FCTH.

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados dos estudos para desenvolvimento e implantação do modelo matemático de suporte à decisão destinado à simulação e análise da propagação de ondas de cheia ocasionadas pelo rompimento de barragens na cadeia de geração hidrelétrica do rio Paranapanema. Este modelo baseia-se na simulação do escoamento hidrodinâmico unidimensional completo em rios e reservatórios em cascata, sujeitos ou não ao controle de estruturas hidráulicas. A metodologia adotada para tanto contemplou a revisão bibliográfica do estado da arte no aspecto de ruptura de barragens e modelação da propagação da onda decorrente, bem como a avaliação dos modelos e ferramentas para este tipo de análise existentes no Brasil e no mundo. O modelo desenvolvido foi comparado, através dos resultados da aplicação na cascata do rio Paranapanema, com modelos matemáticos consagrados, amplamente utilizados nos Estados Unidos.

PALAVRAS-CHAVE

Barragens – cheia – modelo matemático - Paranapanema – rompimento.

I. INTRODUÇÃO

A engenharia hidráulica tem demonstrado nas últimas décadas um interesse crescente no estudo de propagação de ondas geradas por ruptura de barragens (também conhecido como “estudo de *dam-break*”). Este interesse surge da observação de uma série de acidentes ocorridos no passado e, sobretudo, de suas conseqüências, envolvendo numerosas perdas de vidas humanas e prejuízos materiais consideráveis, além de graves impactos sociais e econômicos às comunidades de jusante.

Neste particular, o emprego de modelos matemáticos associados a suportes informáticos tem sido largamente

utilizado nos Estados Unidos e Europa como uma ferramenta de suporte à decisão na avaliação dos efeitos do rompimento de estruturas hidráulicas, sendo, porém, ainda pouco difundido no Brasil. A modelação matemática já comprovou ser indispensável no campo da engenharia hidráulica, principalmente quando o estudo das situações transitórias do escoamento em canais é necessário.

Modelar matematicamente um fenômeno significa representar um processo físico através de equações que, por meio de seus parâmetros, permitam a determinação numérica de uma grandeza representativa do fenômeno. O modelo matemático estende-se, assim, além do conceito de algoritmo de cálculo de um parâmetro, sendo representado pelo conjunto de equações básicas, simplificações adotadas, rotinas de solução, dados básicos e qualidades dos resultados produzidos.

II. METODOLOGIA

A. Concepção do Modelo Matemático

De modo geral, a simulação dos cenários de operação e rompimento de uma cascata de barragens pode ser esquematizada de acordo com a figura 1.

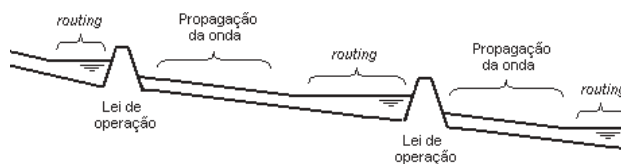


FIGURA 1. Fluxo de cálculo do modelo matemático.

Nos trechos correspondentes aos reservatórios componentes do sistema, emprega-se um modelo de balanço de massas (*routing*) de modo a considerar a variação do nível d'água no reservatório.

A vazão efluente das estruturas de controle, por sua vez, é simulada de acordo com um contorno específico, que depende das condições operacionais definidas para as usinas, ou ainda de uma lei que dependa do cenário de rompimento, em que as variações de vazão e nível d'água decorrem da hipótese de ruptura adotada.

Nos trechos intermediários em que o escoamento

Rui P. dos Santos é engenheiro da Duke-Energy International - Geração Paranapanema (e-mail: rpires@duke-energy.com).

Wagner V. F. Ferreira é engenheiro da Duke-Energy International - Geração Paranapanema (e-mail: wfferreira@duke-energy.com).

Pedro N. Pereira é engenheiro da Duke-Energy International - Geração Paranapanema (e-mail: pnpereira@duke-energy.com).

J. Rodolfo S. Martins é pesquisador da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (e-mail: rodolfo@fcth.br).

Francisco M. Fadiga Jr. é pesquisador da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (e-mail: fadiga@fcth.br).

Raquel C. P. dos Santos é pesquisadora da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (e-mail: raquel@fcth.br).

se dá através da calha do rio principal, utiliza-se um modelo de propagação de ondas baseado na formulação hidrodinâmica unidimensional do escoamento em canais.

A concepção do modelo seguindo estes critérios permite que cada uma das metodologias empregadas possa ser vinculada diretamente ao problema em questão. Seguindo este conceito de encapsulamento, pode-se modificar ou mesmo substituir uma determinada metodologia por outra, garantindo que seja possível contar com o melhor conjunto de ferramentas de acordo com o cenário a ser estudado.

B. Formulação Matemática

a) O modelo matemático desenvolvido neste estudo fundamenta-se na simulação do escoamento hidrodinâmico unidimensional a fundo fixo em canais, cujo tratamento genérico se baseia na utilização das Equações Básicas de Saint-Venant, que combinam os princípios da conservação da massa (1) e da quantidade de movimento (2):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + B \frac{\partial y}{\partial t} = q_L \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} \right) + g A \frac{dy}{dx} + g A S_f = q v \cos \gamma \quad (2)$$

onde: x=coordenada longitudinal; t=tempo; Q=vazão líquida; y=cota do nível d'água; p=perímetro molhado; A=área molhada; B=largura à superfície livre; b=coeficiente de quantidade de movimento; q_L =vazão líquida de contribuição lateral específica; S_f = inclinação da linha de energia; v=velocidade da contribuição lateral líquida; g=ângulo da contribuição lateral com o eixo do canal (SI).

Para a solução das equações de Saint-Venant, é empregado esquema numérico de diferenças finitas de quatro pontos, conhecido como Esquema Implícito de Preissmann. Neste esquema, os termos diferenciais de (1) e (2) são transformados em diferenças finitas, e o problema se resume à solução de um sistema de equações algébricas, sob as condições iniciais e de contorno previamente conhecidas.

b) No tocante à modelação da formação de brechas (ou seja, a abertura formada em uma estrutura hidráulica em situação de colapso ou ruptura), foram estabelecidos critérios específicos relacionados às barragens estudadas quanto ao tempo de formação e configuração geométrica da brecha, em função dos princípios hidráulicos e geotécnicos que condicionam os possíveis mecanismos de rompimento.

O modelo desenvolvido admite que o rompimento de uma barragem ocorre com a abertura de uma brecha trapezoidal, que se inicia no topo da crista do barramento e cresce progressivamente em direção ao pé da estrutura ao longo do tempo. O fluxo através da brecha é calculado a partir da equação do escoamento em soleiras espessas conforme [2]:

$$Q = C_d C_a (b y_c + z y_c^2) \sqrt{2g(H - y_c)} \quad (3)$$

onde: Q=vazão líquida através da soleira; b=largura da base da soleira; z=inclinação dos taludes da seção trapezoidal; C_d =coeficiente de descarga; C_a =coeficiente de submergência; y_c =profundidade crítica sobre a soleira; H=carga hidráulica sobre a soleira; g=aceleração gravitacional (SI).

c) O modelo emprega, ainda, rotinas para a modelação digital de terrenos, visando o traçado e delimitação das áreas inundadas em decorrência dos cenários de rompimento em análise.

C. Base de Dados

Para a aplicação do modelo matemático na cadeia de geração hidrelétrica do rio Paranapanema, foi realizado um exaustivo trabalho de recuperação da documentação de projeto das usinas existentes e ainda por construir, dos estudos referentes à definição das regras operacionais nas situações normais e de emergência e, ainda, dos dados referentes à base cartográfica necessária ao mapeamento de áreas inundáveis. Foram também realizados levantamentos de campo, envolvendo a coleta de dados batimétricos para a obtenção das características geométricas das seções transversais do escoamento e o cadastramento das pontes ao longo do rio Paranapanema.

A base de dados assim levantada foi implantada em sistema GIS - *Geographic Information System*. A principal vantagem na utilização do sistema GIS consiste na gestão integrada das informações, possibilitando um ágil manuseio dos dados, bem como a geração de novas informações de maneira simples e com resultados confiáveis.

Como resultado da implantação deste sistema, tem-se disponível um banco de dados geo-referenciado que conta com os principais dados referentes à cadeia do rio Paranapanema, entre eles os dados hidrometeorológicos e hidráulicos, a posição e características dos barramentos, estradas, municípios, áreas dos reservatórios, hidrografia e topografia, bacia de drenagem e imagens de satélite.

III. RESULTADOS OBTIDOS

A. Aplicação à Cascata do Rio Paranapanema

O modelo desenvolvido foi aplicado na simulação de diversos cenários de ruptura na cascata de reservatórios do rio Paranapanema, dentre os quais se destacam a ruptura do dique lateral em solo da UHE Jurumirim em decorrência do fenômeno de *piping* e a ruptura das barragens de terra nas usinas de Chavantes e Capivara em decorrência de um galgamento ou "*overtopping*". Nestas simulações, tomou-se como hipótese a não ocorrência de ruptura das estruturas de concreto na cadeia (como é o caso da barragem de Salto Grande). Observa-se que, exceto na simulação de ruptura da UHE Jurumirim, o rompimento de uma barragem da cascata ocasiona o galgamento e ruptura de todas as estruturas situadas a jusante.

As figuras 2, 3 e 4 apresentam os hidrogramas calculados pelo modelo em cada usina ao longo da cascata, nos três estudos de caso destacados. Na tabela 1, sumarizam-se os resultados obtidos nestas simulações, apresentando a área inundada máxima decorrente do cenário simulado e as vazões máximas atingidas nas usinas em que se verificou a ocorrência de ruptura.

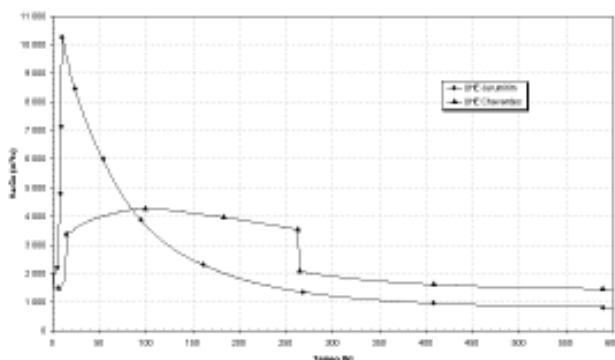


FIGURA 2 - Hidrogramas efluentes resultantes da simulação de ruptura da UHE Jurumirim por piping

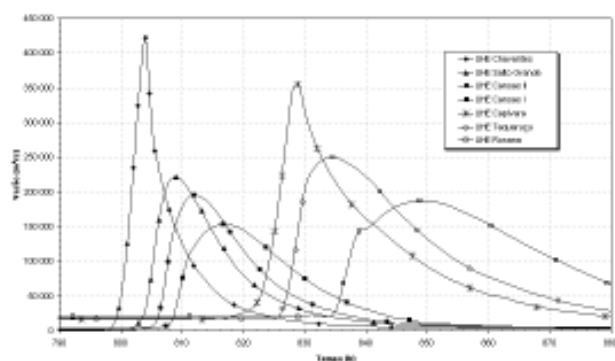


FIGURA 3 - Hidrogramas efluentes resultantes da simulação de ruptura da UHE Chavantes por overtopping

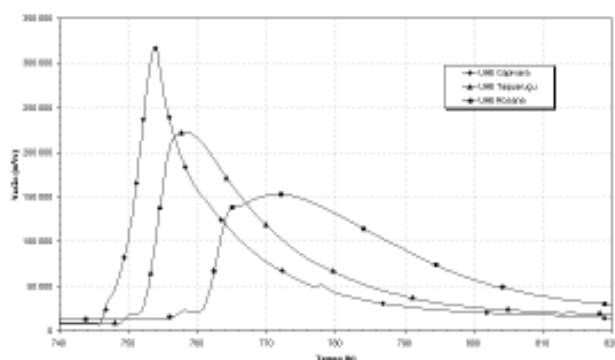


FIGURA 4 - Hidrogramas efluentes resultantes da simulação de ruptura da UHE Capivara por overtopping

TABELA 1

Área inundada máxima e vazões de pico resultantes ao longo da cascata do rio Paranapanema.

Estudo de Caso	Ruptura da UHE Jurumirim	Ruptura da UHE Chavantes	Ruptura da UHE Capivara
Área Inundada Máxima (km ²)	2 667	5 893	4 859
UHE Jurumirim	10 294	—	—
UHE Chavantes	—	445 899	—
UHE S. Grande	—	221 952 *	—
UHE Canoas II	—	205 179	—
UHE Canoas I	—	154 041	—
UHE Capivara	—	370 011	317 679
UHE Taquaruçu	—	250 049	222 444
UHE Rosana	—	187 660	152 941

Legenda: (—) barragem de terra que não sofreu ruptura.

(*) barragem de concreto que, por hipótese, não sofreu ruptura.

B. Comparação com Modelos Similares de Referência

Dentre os modelos matemáticos já desenvolvidos para a simulação da propagação de ondas ocasionadas por rompimento de barragens, destacam-se o modelo FLDWAV, do *National Weather Service*, e o modelo DAMBRK, implementado pela *Boss International*. Estes modelos foram utilizados como padrão de referência para validação do modelo matemático desenvolvido, e também como base para comparação dos resultados obtidos.

Na figura 5, estabelece-se uma comparação entre os resultados obtidos pelo modelo proposto e o modelo BOSS DAMBRK na simulação de ruptura da UHE Jurumirim por piping, destacando-se o hidrograma efluente e o limnograma a montante do barramento de Jurumirim. Em ambos os casos, observa-se uma ótima concordância entre as curvas calculadas pelos modelos comparados, confirmando a validação e aplicabilidade do modelo proposto.

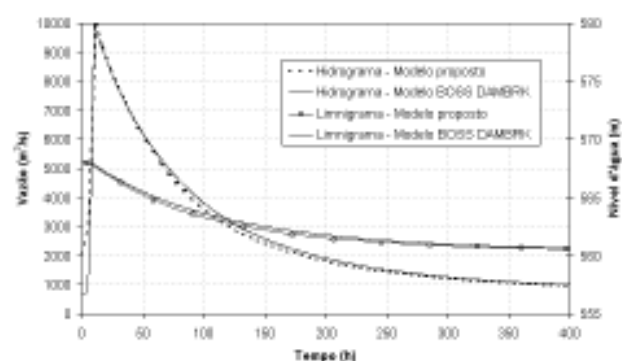


FIGURA 5. Hidrograma efluente e limnograma a montante da UHE Jurumirim resultantes da simulação de sua ruptura por piping.

IV. CONCLUSÕES

O modelo matemático desenvolvido neste projeto constitui um instrumento de suporte à decisão calibrado e ajustado para as condições da cadeia de estruturas hidro-energéticas do rio Paranapanema. Os estudos de caso realizados mostraram a aplicabilidade do modelo às situações críticas de iminência e eventual ocorrência de colapso das estruturas da cadeia.

Em função de sua concepção, este modelo se constitui em uma ferramenta completamente genérica, podendo ser aplicado em quaisquer cenários que envolvam a propagação de ondas de cheia, tanto naturais quanto daquelas provocadas por acidentes que venham a causar ruptura de estruturas.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio da direção da Duke-Energy International – Geração Paranapanema e da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica para o desenvolvimento deste trabalho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

LIVROS:

- [1] M.B. Abbot, *Computational hydraulics: elements of the theory of free surface flows*. London, Pitman, 1979. 324p. (Monographs and Surveys in Water Resources Engineering, 1).
- [2] M. G. Bos, J. A. Replogle e A. J. Clemmens, *Aforadores de caudal para canales abiertos*, International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI, Publicação 38.
- [3] V. T. Chow, *Open-channel hydraulics*. McGraw-Hill, New York, 1959. 680p

Relatórios Técnicos:

- [4] CADAM - Concerted Action on Dambreak Modelling. *Final Report*. Disponível: www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/index.html.
- [5] CADAM - Concerted Action on Dambreak Modelling, *Dambreak Modelling Guidelines & Best Practice*. Disponível: www.hrwallingford.co.uk/projects/CADAM/CADAM/index.html.

ARTIGOS EM ANAIS DE CONFERÊNCIAS (PUBLICADOS):

- [6] J. R. S. Martins e F. M. Fadiga Jr, “Rompimento de Barragens. Cálculo Adimensional da Propagação da Enchente Efluente”, in *Congresso Latino Americano De Hidráulica*, AIRH, 13º, Foz do Iguaçu, 1989, pp. 561-573.

DISSERTAÇÕES E TESES:

- [7] J. R. S. Martins, “Hidrodinâmica bidimensional: estudo em modelo matemático”, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1989.
- [8] J. P. Cintra, “Contribuições ao Estudo de Representações de Superfícies com o Auxílio do Computador”, Tese de Doutorado, EPUSP, 1984.
- [9] S. C. L. Ribeiro, “Automação Fotogramétrica e Geração de Modelos Digitais de Terreno (MDTs)”, Dissertação de Mestrado, EPUSP, 1995.

MANUAIS DE SOFTWARES:

- [10] D.L. Fread e J. M. Lewis, “NWS FLDWAV Model - Theoretical Description & User Documentation”, Hydrologic Research Laboratory, Office of Hydrology, National Weather Service, NOAA, Novembro 1998. Disponível: www.nws.noaa.gov/oh/trl/rvrmech/modeldam.htm.
- [11] Boss International, “BOSS DAMBRK - Manual do Usuário”, 1998/1999.