

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

MODELAGEM NUMÉRICA COMO FERRAMENTA PARA PLANEJAMENTO DE AÇÕES EMERGENCIAS EM APROVEITAMENTOS HÍDRICOS

Elisa Patricio Macedo¹; José Rodolfo Scarati Martins²; Marcelo Mendes de Castro³; Rodrigo Martins Lucci⁴;

RESUMO – A preocupação com o tema segurança de barragens é crescente, tendo em vista a nova legislação e os recentes acidentes. Assim, o estudo da situação de emergência é importante, sendo realizado por meio de modelos matemáticos. Logo, a ideia principal desse estudo é melhor compreender modelos que podem ser acoplados e utilizados para verificar a possibilidade de ocorrência de uma emergência e estudar essas situações. Na primeira etapa do processo é utilizado o modelo atmosférico, ETA, que realiza a previsão para cinco dias de precipitação. Essa informação alimenta o modelo chuva-vazão, SMAP, para determinar as contribuições nos rios e reservatórios. Por fim, o modelo CLiv+/Dambreak realizará os cálculos hidrodinâmicos no canal e no reservatório, realizando a translação da onda de cheia proveniente dos eventos previstos e, em caso de emergência, o impacto decorrente da situação de ruptura da barragem. Essa interação de modelos será utilizada para analisar as barragens sob administração da AES Tietê ao longo dos rios Tietê, Grande, Mogi-Guaçu e Pardo, uma vez que a classificação dessas barragens quanto às consequências provocadas por sua ruptura é "muito alta", exigindo a elaboração de um plano de ação emergencial, de acordo com a nova legislação.

ABSTRACT– The concern with dam safety is increasing due to its new legislation in Brazil and also due to recent failures. Thus, the study of emergency situations is important, being done using mathematical models. The main idea of this study is to better understand models that gathered are used to verify the possibility of occurrence of an emergency situation and to perceive this situation. The first part of the process is formed by the forecast model, ETA. This information is the input of the hydrologic model to determine the flow in channels and reservoirs. Finally, the CLIV+ model will process these information in order to define the impact of such flow in channels and reservoirs and perform the translation of the flood wave and, in case of an emergency, determine the impact due to the dam failure. This interaction between models will be used to study and analyze dams under AES Tietê administration, located among rivers Tietê, Grande, Mogi-Guaçu and Pardo. This process will be carried out in these structures because their classification considering the consequences of their failure is “very high”, requiring the elaboration of an emergency plan, in accordance to the new legislation.

Palavras-Chave – Segurança de barragem, Modelagem Matemática, Planos de Ação Emergencial.

¹Engenheira, Mestranda em Engenharia Hidráulica da EPUSP, Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. Fone (11)3039-3171. Email: elisapmacedo@usp.br

²Professor Doutor da EPUSP. Av. Prof. Luciano Gualberto, tr 3, nº 380, 05508-970 São Paulo, SP. Fone: (11) 3091-5581. Email: scarati@usp.br

³ Mestre em Engenharia Hidráulica, Engenheiro da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3171. Email: marcelo.castro@fcth.br

⁴Engenheiro da FCTH. Av. Prof. Lucio Martins Rodrigues, nº 120, 05508-020 São Paulo. Fone: (11) 3039-3163. Email: rodrigo@fcth.br

INTRODUÇÃO

As barragens têm grande importância na gestão dos recursos hídricos tendo em vista seus impactos em diversas atividades. Dentre os impactos positivos gerados por elas pode-se destacar a geração de energia, regularização de vazão e armazenamento para abastecimento público.

Com relação aos impactos negativos, estes foram agrupados em três ordens segundo Almeida (2001). O impacto de primeira ordem é relativo à inundação na região de montante, na área de seu reservatório, podendo implicar na realocação de populações. O impacto de segunda ordem é caracterizado pelas modificações decorrentes das variações no regime natural de cheias ou da variação de vazão resultante da operação das barragens. O impacto de terceira ordem é relacionado à situação de falha ou ruptura, sendo o vale de jusante ameaçado.

Dentre as ordens apresentadas acima, é de grande importância os impactos de segunda e terceira ordem. Isso ocorre, pois, uma vez construída, a barragem regulariza as vazões na região de jusante, reduzindo os impactos nessa área. Esse fato gera uma maior sensação de segurança na população dos vales, de forma que há um aumento da ocupação dessa região que ocorre, por vezes, de maneira irregular. Como resultado, tem-se que essa ocupação é de grande risco, uma vez que pode existir a necessidade de liberação de grandes vazões ou pode ocorrer o colapso da estrutura, comprometendo a região de jusante.

Desta maneira, percebe-se que acidentes em barragens podem levar a situações de emergência, no sentido de ocorrência de qualquer situação crítica ou acidente imprevisto que coloque em perigo a segurança da barragem ou do vale segundo Almeida (2001). As situações de emergência nas barragens podem constituir uma séria ameaça à segurança dos vales à jusante, sendo eles desde danos materiais até a perda de vidas humanas de acordo com Balbi (2008). Assim, apenas a possibilidade dessa ocorrência já é justificativa suficiente para o estudo dessa situação, tendo em vista a altíssima responsabilidade associada ao evento. Essa responsabilidade abrange diversos agentes, desde os técnicos responsáveis pelo projeto, controle e operação da barragem até as autoridades públicas, que atuam e fornecem recursos econômicos e humanos necessários à gestão. Como não existe a situação da inexistência do risco, faz-se necessário gerenciar esse risco, de forma que esteja em níveis aceitáveis para sociedade.

A preocupação com relação à ocorrência de acidentes em barragens tem crescido devido aos grandes problemas gerados na área de jusante e também devido à ocorrência de acidentes em diversos países. Com relação aos recentes acidentes, podemos destacar dois no Brasil sendo o primeiro ocorrido em maio de 2009 na barragem dos Algodões no Piauí, na divisa com o estado do

Ceará, inundando a região de jusante atingindo alturas de nível d'água até 20 m acima no nível do terreno.



Figura 1 – Rompimento da barragem de Algodões – PI – (Fonte: Jornal 180 Graus, 17 set. 2010)

O segundo, mais recente, ocorreu em janeiro de 2012, sendo este o rompimento de um dique na região dos Campos de Goytacazes no estado do Rio de Janeiro. Este rompimento aconteceu nas margens da BR-356, abrindo uma cratera de aproximadamente 20 m na rodovia.



Figura 2 – Rompimento do dique próximo à região dos Campos de Goytacazes (Fonte: UOL notícias, 05 jan. 2012)

Outro acidente recente, fora do Brasil, no entanto, foi o rompimento da barragem de Fujinama no Japão em 2011, decorrente de um terremoto. Isso ocorreu uma vez que o reservatório se encontrava cheio quando da ocorrência do terremoto, de forma que ocorreu o galgamento da

barragem, acarretando na formação de uma brecha no maciço. Outro caso de grande repercussão foi o alagamento e posterior rompimento dos diques que protegiam a cidade de Nova Orleans (EUA) em agosto de 2005, devido ao furacão Katrina. A passagem do furacão resultou no rompimento de mais de cinquenta diques o que levou ao alagamento de 80% da cidade.

Outro ponto que tem trazido o tema de segurança de barragens à grande exposição é a recente legislação aprovada sobre o tema no Brasil. Assim, grandes progressos têm ocorrido. Em setembro de 2010 a lei nº 12.334 foi criada, estabelecendo a Política Nacional de Segurança de Barragem (PNSB) e criando o Sistema Nacional de Segurança de Barragens (SNSB). Após o sancionamento da lei, duas resoluções foram regulamentadas para a complementação de aspectos da lei. A primeira Resolução N°742, em 17 de outubro de 2011, trata dos vários aspectos relacionados às inspeções de segurança regulares de barragem. A segunda Resolução N° 91, em 02 de abril de 2012, detalha aspectos do Plano de Segurança de Barragem e da Revisão Periódica de Segurança de Barragem.

A lei nº12.334 estabeleceu os instrumentos da PNSB, sendo eles o sistema de classificação de barragens por categoria de risco e por dano potencial associado, o Plano de Segurança de Barragem, o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens (SNISB), o Sistema Nacional de Informações sobre o Meio Ambiente (Sinima), o Cadastro Técnico Federal de Atividades e Instrumentos da Defesa Ambiental, o Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais e o Relatório de Segurança de Barragens. Dentre estes instrumentos, destaca-se o Plano de Segurança de Barragem, sendo esse de responsabilidade do empreendedor e cujo conteúdo deve ser mais completo conforme maior for o risco de acordo com a classificação da barragem.

Assim, quando exigido, o PSB deve conter o Plano de Ações Emergenciais (PAE). Este deve conter a identificação e análise de possíveis situações de emergência, procedimentos de identificação e notificação de mau funcionamento ou de condições potenciais de ruptura, procedimentos preventivos e corretivos a serem adotados em situação de emergência e estratégia, meio de divulgação e alerta para as comunidades potencialmente afetadas na ocorrência de uma emergência. Assim, para este plano devem ser realizados estudos relacionados à operação em caso de eventos extremos e de rompimento da barragem. Isso porque esses eventos são estudados de forma a possibilitar o planejamento de ações de emergência.

Assim, uma importante ferramenta utilizada nesse estudo é a modelagem computacional. Isso porque é possível representar um processo físico por meio de um modelo matemático uma vez que se admitem parâmetros que resultam na determinação de uma grandeza relacionada ao fenômeno de interesse.

A modelagem do evento de emergência é complexa devido aos vários fatores que devem ser contemplados além das incertezas associadas aos dados de entrada. Alguns exemplos desses diversos fatores são a modelagem da onda de ruptura, modelagem do evento transiente, transporte de sedimentos e sua influência nas propriedades do fluido e incertezas quanto à formação da brecha. Com relação aos dados de entrada, as incertezas estão relacionadas aos hidrogramas de entrada e à caracterização das seções de jusante.

Tendo em vista o objetivo do estudo de rompimento de barragens, modelos foram criados variando as equações consideradas, os métodos de soluções dessas equações, o número de dimensões considerado, a divisão da região de estudo entre outros.

Em junho de 2010, teve início o projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, denominado “Gerenciamento de Ações Emergenciais da Geração AES Brasil (SGAE)”, para unificar e dar sequência aos estudos anteriores relacionados ao gerenciamento de ações emergências da AES Tietê. Este estudo vem sendo desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH) para a AES Tietê S/A, através de convênio mantido com a ANEEL, dentro dos princípios estabelecidos por esta agência, relativos ao desenvolvimento e aperfeiçoamento tecnológico do setor elétrico brasileiro.

A ideia principal do projeto é unir diversos modelos para estudar situações emergenciais e prever sua ocorrência. Assim, inicialmente, tem-se o modelo atmosférico ETA que gera os dados de previsão de chuva para cinco dias. Tendo essa informação, será utilizado o modelo chuva-vazão SMAP para determinar as contribuições nos rios e reservatórios. Com esses dados, o modelo CLiv+ indicará a translação da onda de cheia proveniente dos eventos previstos e, em caso de emergência, o impacto decorrente da situação de ruptura da barragem.

Assim, o presente estudo tem como objetivo estudar os modelos envolvidos no sistema acima descrito, de forma a melhor compreender como o sistema foi concebido e quais os limites de sua aplicação.

MODELO ATMOSFÉRICO – ETA

O início do processo de simulação se dá na previsão da precipitação. As informações de previsões de cinco dias de precipitação diária são fornecidas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE) que utiliza o modelo atmosférico ETA.

O modelo ETA foi desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia e se tornou operacional no National Center for Environmental Prediction (NCEP) (Mesinger *et al.*, 1988). Nos anos oitenta, o código do modelo ETA foi

associados por meio de interpolações verticais de geopotencial de superfícies de pressão sigma, que podem gerar erros significativos no gradiente de pressão nas redondezas de superfícies íngremes.

O cálculo da coordenada η é fundamentado na normalização da pressão, proporcionando vantagens na solução de equações. Seu cálculo é realizado por meio da equação a seguir:

$$\eta = \frac{p - p_t}{p_s - p_t} \left[\frac{p_{ref}(Z_s) - p_t}{p_{ref}(0) - p_t} \right] \quad (1)$$

onde p_t é a pressão no topo do domínio do modelo, 50hPa no caso do modelo ETA; p_s e Z_s , são pressão e altitude na camada inferior; e p_{ref} é a pressão de referência da atmosfera, sendo essa uma função da distância acima do nível do mar, sendo utilizado o conceito de uma atmosfera padrão.

O modelo foi configurado em 38 camadas, sendo que a camada mais baixa possui a configuração de aproximadamente 20 m da atmosfera padrão. As camadas superiores são mais próximas nos níveis mais baixos e de menor resolução conforme o aumento da altitude até a alta troposfera e, a partir daí, diminui novamente. Essa distribuição resulta em um máximo próximo a tropopausa que ocorre com o objetivo de representar as regiões baroclínicas, como correntes de jato, de melhor maneira.

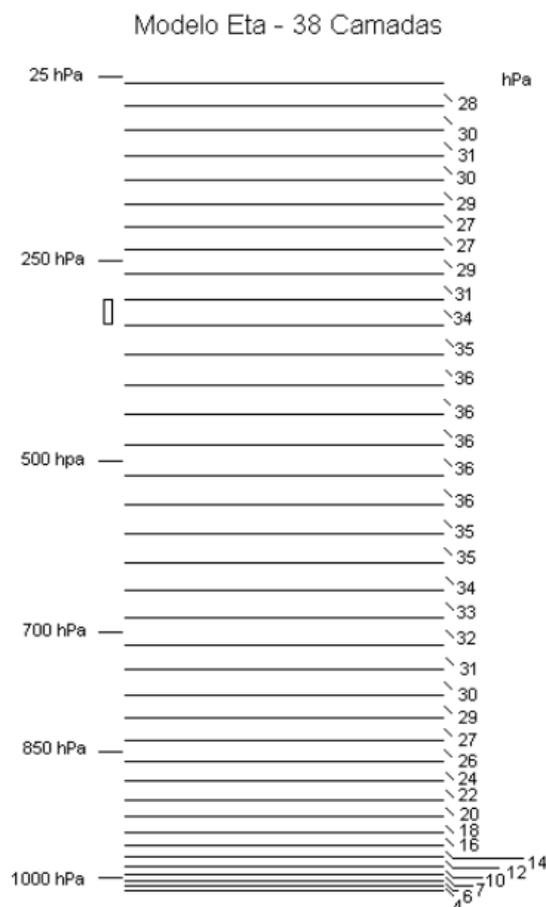


Figura 4 – Distribuição vertical das camadas atmosféricas no modelo Eta de 38 níveis. Fonte: Adaptado de Black(1994).

A topografia do modelo é representada como degraus discretos cujo topo coincide exatamente com as interfaces da camada do modelo. Para a determinação das elevações, cada grade horizontal é inicialmente subdividida em 16 subgrades. Com os valores conhecidos de elevações do terreno em cada subgrade é realizada uma média para cada uma. Analisando cada fileira, determina-se o valor de média de elevação de subgrade máximo de cada linha e em cada coluna, chegando-se a um total de oito valores. Com estes oito valores é realizada uma média que representa a altura intermediária da grade. Uma vez que as alturas das camadas já foram previamente determinadas, baseada na atmosfera padrão e na distribuição da resolução vertical, a elevação de cada degrau é encontrada movendo a altura intermediária para cima ou para baixo até a camada mais próxima. A figura a seguir apresenta essas camadas.

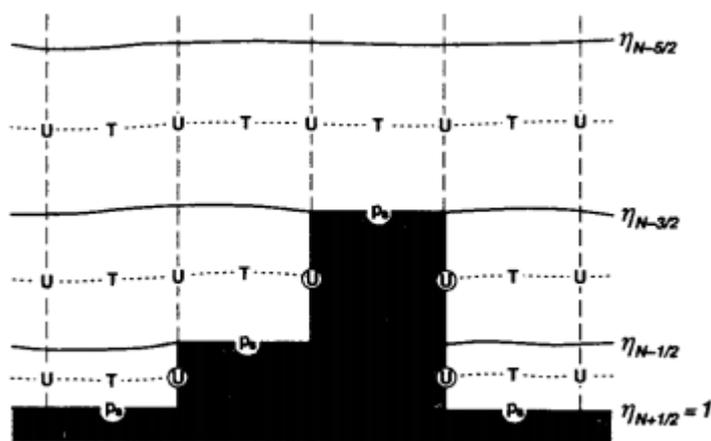


Figura 5 – Seção vertical do modelo ETA. Fonte: Black(1994)

Entre as camadas do modelo variáveis de massa são calculadas, representadas na figura pela letra T. A letra U representa as componentes horizontais do vento e p_s é a pressão na superfície.

A condição inicial do modelo é obtida a partir de uma análise cíclica, onde a estimativa inicial é ajustada de acordo com as observações do horário da análise pelo sistema de análise regional RPSAS (Regional Physical Space Analysis System). Os erros entre as observações e as estimativas iniciais são minimizados por meio de interpolação estatística. O modelo também é alimentado com condições iniciais geradas a partir da análise do modelo global gerando previsões para 5 dias. Nos contornos laterais, o modelo é atualizado também com os dados do modelo global, a cada 6 horas. As tendências nas bordas são interpoladas linearmente a cada intervalo de 6 horas. Os contornos possuem duas fileiras que são excluídas da integração do modelo.

Com relação aos processos físicos, o modelo utiliza-se do esquema de Betts-Miller modificado para parametrizar a convecção (Janjic, 1994). A condensação de larga escala é

caracterizada quando a umidade relativa excede 95%. Os processos turbulentos na atmosfera livre são tratados através do esquema de Mellor-Yamada nível 2.5 que calcula a energia cinética turbulenta e os fluxos verticais. O esquema Mellor-Yamada 2.0 é utilizado na primeira camada do modelo para representar a turbulência na camada superficial. O esquema de parametrização de radiação de ondas longas é o Fels e Schwarzkopf (1975) e para as ondas curtas é o Lacis e Hansen(1974).

MODELO CHUVA-VAZÃO – SMAP

O modelo SMAP (Lopes *et al.*, 1982), (SoilMoistureAccounting Procedure) é um modelo hidrológico determinístico, apresentando uma estrutura simples que separa os escoamentos baseando-se nos parâmetros do método do SoilConsevation Service(SCS). Sua estrutura inicial considera um intervalo de tempo diário para simulação. No entanto, esse modelo já foi desenvolvido também para intervalos de tempo mensais e horários.

Esse modelo considera as regiões por onde passam os escoamentos, como camadas do solo, com um funcionamento similar ao de um reservatório. Assim, os parâmetros calibrados regulam o tamanho de cada reservatório e os processos envolvidos na passagem do volume de um reservatório para o outro. Os reservatórios considerados são **Rsolo**, reservatório do solo na zona aerada, **Rsup**, reservatório da superfície da bacia e **Rsub**, reservatório subterrâneo na zona aerada. O escoamento através desse reservatório é realizado considerando as seguintes interações entre variáveis:

$$R_{solo(t)} = R_{solo(t-1)} + P_{(t)} - E_{s(t)} - E_{r(t)} - Rec_{(t)} \quad (2)$$

$$R_{sup(t)} = R_{sup(t-1)} + E_{s(t)} - Ed_{(t)} \quad (3)$$

$$R_{sub(t)} = R_{sub(t-1)} + Rec_{(t)} - Eb_{(t)} \quad (4)$$

onde **P** é a chuva, **Es** é o escoamento superficial, **Ed** é o escoamento direto, **Er** é a evapotranspiração real, **Rec** é a recarga subterrânea e **Eb** é o escoamento básico. A interação dos reservatórios e a separação dos escoamentos pode ser melhor entendida analisando-se a figura a seguir.

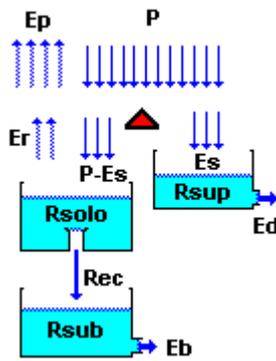


Figura 6 – Processos modelados no SMAP em sua versão diária

Sua inicialização é realizada considerando-se as seguintes equações:

$$R_{solo(0)} = \frac{T_{uin}}{100} \cdot Str \quad (5)$$

$$R_{sup(0)} = \frac{Supin}{(1 - 0,5^{1/K2t})Ad} 86,4 \quad (6)$$

$$R_{sub(0)} = \frac{Ebin}{(1 - 0,5^{1/Kkt})Ad} 86,4 \quad (7)$$

onde **Tuin** é o teor de umidade inicial, **Supin** é a vazão superficial inicial, **Ebin** é a vazão básica inicial e **Ad** é área de drenagem.

Aplicando o método SCS para a separação do escoamento superficial, tem-se uma sequência de procedimentos que descrevem as funções de transferência do modelo. Iniciando-se pela precipitação, tem-se que se esta for maior que a abstração inicial A_i , então:

$$S = Str - R_{solo(t-1)} \quad (8)$$

$$E_{s(t)} = \frac{(P_{(t)} - A_i)^2}{P_{(t)} - A_i + S} \quad (9)$$

onde **Str** é a capacidade de saturação do solo. Caso a precipitação for menor que a abstração inicial, então o escoamento superficial será nulo.

Continuando a análise, tem-se que se a diferença entre a precipitação e o escoamento superficial for maior que a **Ep**, evaporação potencial utilizando o tanque classe A, então a **Er**, evapotranspiração real, será igual a evaporação potencial. Caso contrário a seguinte equação é utilizada pra o cálculo:

$$Er_{(t)} = (P_{(t)} - Es_{(t)}) + (Ep_{(t)} - (P_{(t)} - Es_{(t)}))xTu_{(t)} \quad (10)$$

$$Tu = \frac{Rsolo_{(t-1)}}{Str} \quad (11)$$

Com relação à recarga subterrânea, **Rec**, tem-se que se $Rsolo > (Capc * Str)$, sendo **Capc** a capacidade de campo e **Str** é a capacidade de saturação do solo, logo:

$$Rec_{(t)} = Crec * Tu * (Rsolo - (Capc * Str)) \quad (12)$$

caso contrário a recarga é nula.

Com relação ao cálculo dos escoamentos, os mesmos são obtidos por meio das seguintes equações:

$$Ed_{(t)} = Rsup_{(t-1)}(1 - 0,5^{1/K2t}) \quad (13)$$

$$Eb_{(t)} = Rsub_{(t-1)}(1 - 0,5^{1/Kkt}) \quad (14)$$

onde **K2t** é a constante de recessão do escoamento superficial e **Kkt** é a constante de recessão do escoamento básico. Se ocorrer o transbordamento de um dos reservatórios, este é computado como escoamento superficial.

Tendo definido as equações de transferência, o último cálculo é realizado com vistas a obter a vazão para aquele instante de tempo utilizando a equação a seguir:

$$Q_{(i)} = \frac{(Ed_{(t)} + Eb_{(t)})Ad}{86,4} \quad (15)$$

MODELO HIDRODINÂMICO –CLIV+

A etapa que compreende a modelagem do escoamento nos canais e reservatórios, da operação dos mesmos e da possível ocorrência de ruptura é complexa, e exige uma ferramenta que auxilie na obtenção de resultados. Para tanto, o modelo CLiv+ foi escolhido para a simulação do escoamento, permanente e não-permanente, unidimensional em canais, simulação de *routing* em reservatórios, modelagem da formação de brecha e do escoamento através da mesma. Assim, cada um desses aspectos será analisando com mais detalhe a seguir.

Simulação do escoamento Unidimensional em Canais

A simulação do escoamento em canais pode ser dividida para análise em escoamento permanente e não-permanente. O primeiro ocorre quando as grandezas hidráulicas variam ao longo do espaço apenas em função da mudança dos dados de geometria do canal e das condições das extremidades. No segundo tipo, ocorre a variação das condições da extremidade ao longo do tempo, representando hidrogramas de cheia, por exemplo. Para esse caso o escoamento em canais baseia-se nas equações de Saint-Venant que são derivadas da aplicação das equações de Navier-Stokes para uma dimensão, combinadas com os princípios de conservação de massa e da quantidade de movimento.

Combinando-se essas equações chega-se a (Souza et al., 1991):

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{Q^2}{A} \frac{\partial \beta}{\partial x} + 2\beta \frac{Q}{A} \frac{\partial Q}{\partial x} + gA(1 - \beta F_r^2) \frac{\partial y}{\partial x} - \beta \frac{Q^2}{A^2} \frac{\partial A}{\partial x} \Big|_{y=const} + gAS_f = qvc \quad (16)$$

onde

$$F_r^2 = \frac{Q^2 B}{gA^3} \quad (17)$$

onde x é a coordenada longitudinal, t é o tempo, Q é vazão líquida, y é a cota do nível d'água, p é o perímetro molhado, A é a área molhada, B é a largura à superfície livre, β é o coeficiente de quantidade de movimento, S_f é a inclinação da linha de energia, v é a velocidade da contribuição lateral líquida e γ é o ângulo da contribuição lateral com o eixo do canal.

Assim, quando essa equação é simplificada considerando que não há variação ao longo do tempo e nem contribuições laterais, chega-se ao seguinte resultado:

$$2\beta \frac{Q}{A} q + gA(1 - \beta F_r^2) \frac{\partial y}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (18)$$

As equações são resolvidas, no caso do regime permanente, em todas as seções, adotando-se um método numérico que permite a determinação dos valores do nível d'água em cada ponto. O método numérico utilizado é o das diferenças finitas.

Com relação ao algoritmo de solução, inicialmente é realizado um processo de classificação dos canais de acordo com suas declividades. Assim, são calculadas as profundidades normais e críticas de cada trecho entre seções. Desta maneira, sendo o nível d'água superior à profundidade crítica, o escoamento é fluvial de forma que os cálculos são realizados de jusante para montante. No caso do nível d'água ser inferior à profundidade crítica, trata-se de um escoamento torrencial e então, os cálculos são realizados de montante para jusante. Nos casos onde ocorre a troca de regime, o cálculo de compatibilidade de escoamento é realizado por meio das expressões de profundidade

crítica e das alturas conjugadas no ressalto hidráulico. No caso do regime não-permanente, o modelo emprega o algoritmo implícito de Preissmann.

Com resultado nos dois casos, encontra-se o valor de NA. Assim, cruzando esta informação com os valores de cota do terreno é possível determinar as manchas de inundação, separando-as em zonas de acordo com a profundidade alcançada pela água.

Routing nos Reservatórios

Quando a onda de cheia transita por um reservatório, esta sofre um efeito de amortecimento devido ao fato do reservatório reter parte dessa vazão, de maneira que a vazão efluente é menor que a afluyente. Esse amortecimento ocorrerá de acordo com as características do reservatório e da operação hidráulica das estruturas de controle.

Para solucionar o problema de *routing*, utiliza-se a equação da continuidade com os termos reorganizados, que é apresentada a seguir:

$$Q_{E1} + Q_{E2} + \frac{V_1}{\Delta t / 2} - Q_{S1} = Q_{S2} + \frac{V_2}{\Delta t / 2} \quad (19)$$

onde Δt é intervalo de tempo considerado para os cálculos, Q_{E1} , Q_{E2} são as vazões afluentes no início e no fim do intervalo, Q_{S1} e V_1 são a vazão efluente e o volume armazenado no início do intervalo considerado.

Dessa maneira, as incógnitas Q_{S2} e V_2 podem ser expressas em termos do NA do reservatório uma vez que se considera a superfície da água horizontal. Assim, o volume pode ser encontrado por meio da curva cota x volume; e as vazões de saída, como as vazões vertidas e turbinadas, são definidas em função do nível. Reescrevendo as equações em função do NA, verifica-se que por meio da interpolação é possível encontrar o NA final e, através deste, calcular a vazão de saída e o volume do reservatório final.

Formação da Brecha

A formação da brecha em uma barragem ocorre quando esta estrutura está em situação de colapso. Os mecanismos de formação da brecha, tanto em barragens de concreto como nas de terra ainda não são bem consolidados. Assim, o conhecimento da formação e evolução da brecha é limitado.

O início da formação da brecha ocorre quando o nível d'água excede em um certo valor h_f , a crista da barragem. Desta maneira, pode ocorrer a situação de *overtopping* (galgamento) sem que se inicie a formação da brecha.

O modelo considera a formação da brecha de acordo com algumas variáveis. A brecha é desenvolvida dentro de um intervalo de tempo finito T e terá um formato final de acordo com a

largura final na base da brecha **B** e formato variável de acordo com a inclinação **Z**. A figura a seguir apresenta de forma clara as variáveis citadas.

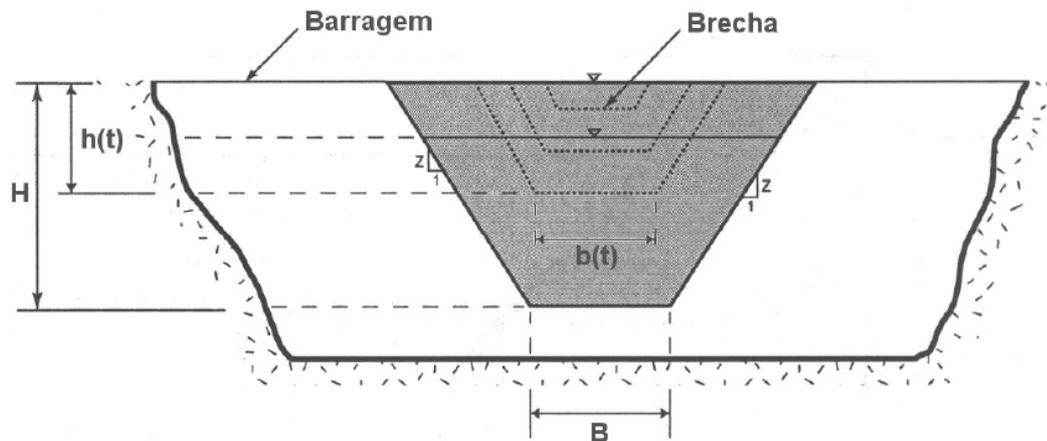


Figura 7 – Formação da brecha Fonte: FCTH (2004)

O sistema considera que a brecha se inicia na crista da barragem e cresce, em uma taxa que pode ser ou não linear, durante o período de falha até que a largura da base da brecha tenha atingido seu tamanho final além de sua altura final. A largura da parte inferior da brecha é simulada em função do tempo, conforme a equação a seguir:

$$b(t) = B \left(\frac{t}{T} \right)^{\rho} \quad (20)$$

onde t é o tempo decorrido desde o início da formação da brecha e ρ é um parâmetro que especifica o grau de não linearidade, sendo que seu valor varia de 1 a 4, no entanto, a taxa linear é a mais utilizada. Para o cálculo da altura da brecha tem-se:

$$h(t) = H \left(\frac{t}{T} \right)^{\rho} \quad (21)$$

onde H é a altura máxima da brecha.

O cálculo da vazão que passa pela brecha é realizado considerando a brecha como um dispositivo de soleira espessa de seção trapezoidal.

APLICAÇÃO

A AES Tietê administra e opera dez usinas hidrelétricas ao longo dos rios Tietê, Grande, Mogi Guaçu e Pardo. Além destas 10 usinas, ainda estão sendo readequadas duas PCH's no Rio Jaguari-Mirim. A Tabela 1 apresenta essas usinas, o corpo hídrico no qual estão localizadas e as coordenadas geográficas em latitude e longitude de cada uma das usinas. A Figura 8 apresenta um desenho esquemático com a localização de cada uma das usinas.

Tabela 1: Usinas contempladas no estudo.

Usina	Corpo Hídrico	Latitude	Longitude
Barra Bonita	Tietê	22° 31' 90'' S	48° 32' 04'' O
Bariri	Tietê	22° 09' 11'' S	48° 45' 09'' O
Ibitinga	Tietê	21° 45' 33'' S	48° 59' 26'' O
Promissão	Tietê	21° 17' 50'' S	49° 46' 60'' O
Nova Avanhandava	Tietê	21° 07' 03'' S	50° 12' 04'' O
Caconde	Pardo	21° 34' 36'' S	46° 37' 27'' O
Limoeiro	Pardo	21° 37' 30'' S	47° 00' 34'' O
Euclides da Cunha	Pardo	21° 36' 11'' S	46° 56' 56'' O
Mogi-Guaçu	Mogi-Guaçu	22° 22' 47'' S	46° 54' 01'' O
Água Vermelha	Grande	19° 52' 04'' S	50° 20' 44'' O
São José	Jaguari Mirim	21° 56' 02'' S	46° 49' 00'' O
São Joaquim	Jaguari Mirim	21° 52' 26'' S	46° 53' 34'' O

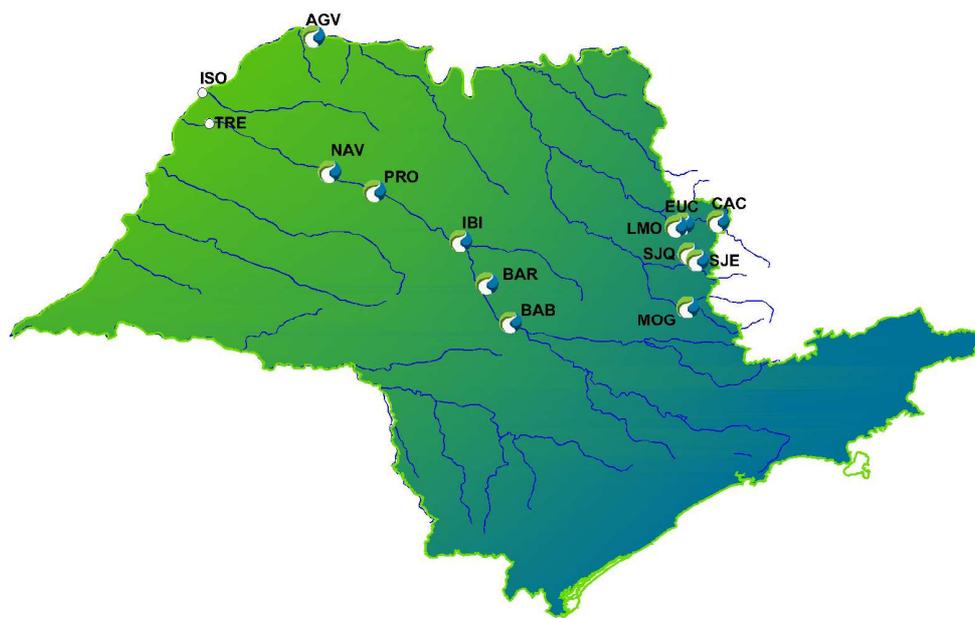


Figura 8: Localização das usinas contempladas no estudo. Fonte: AES Tietê (2012)

Com a ocupação de áreas ribeirinhas a jusante das barragens, houve a necessidade da adoção de restrições operativas e de controle de vazão efluente, as quais visaram compatibilizar as necessidades de ocupação do solo e geração de energia. Além disso, a classificação dessas barragens quanto às consequências provocadas pela ruptura, é "muito alta" de acordo com CBDB (1999). Dessa maneira, faz-se necessário a criação de PAEs.

Para melhor entender a situação de emergência e, conseqüentemente, poder planejar a ação em caso de emergência, conforme determinado pela nova legislação, faz-se necessária a simulação de diversos cenários a fim de gerar manchas de inundação e verificar quais pontos serão impactados.

A integração dos modelos descritos será realizada tendo em vista a simulação de eventos excepcionais para a criação do PAE. Assim, serão simulados os cenários de ocorrência da cheia decamilar, ruptura por *overtopping* e por *piping*. Para cada um desses cenários serão geradas manchas de inundação que determinarão diferentes zonas, de acordo com a profundidade atingida. Assim, de acordo com a zona na qual o ponto impactado se encontra, alertas e ações de evacuação serão planejados.

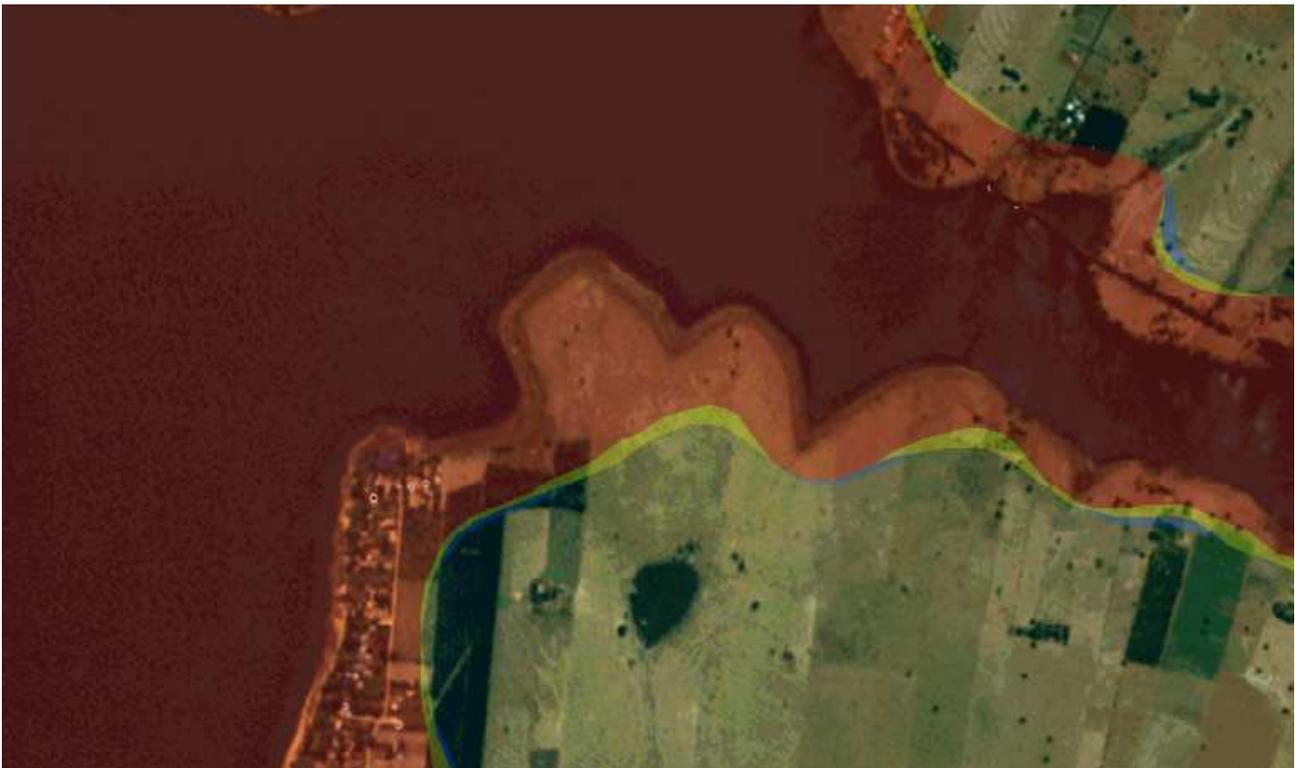


Figura 9 – Manchas de Inundação. Fonte: AES Tietê (2012)

Além disso, por meio da previsão de precipitação fornecida pelo modelo ETA, será possível verificar a provável ocorrência de uma situação de emergência, podendo notificar a população localizada nos vales de jusante com maior antecedência.

CONCLUSÕES

Analisando-se a crescente preocupação com o tema de segurança de barragens, percebe-se que faz-se necessário um maior estudo das situações de emergência. Para isso, o trabalho conjunto dos modelos apresentados acima é possível e surge, então, como uma importante ferramenta para o planejamento e previsão de ações de emergência.

A aplicação desse método na região dos rios Grande, Pardo e Mogi Guaçu é de grande importância, não só para validar a utilização da integração dos modelos, mas também tendo em vista a segurança da região envolvida. Isso porque as consequências provocadas pela ruptura das barragens caracteriza a região como de alto risco, sendo esse estudo necessário para essa região com vistas à formulação dos PAEs de cada barragem.

Cabe ressaltar, no entanto, que os modelos apresentados possuem restrições, de forma que cada situação analisada deve ser estudada criteriosamente. Desta maneira, deve-se estudar especificamente cada barragem, analisando-se suas especificidades e a caracterização de região onde se encontra verificando a possibilidade de utilização do modelo e quais ressalvas devem ser feitas.

BIBLIOGRAFIA

ALMEIDA, A. B. (2001) *“Emergência e gestão de risco, in Curso de Exploração e Segurança de Barragens. Capítulo 7.* Lisboa: Instituto Nacional da Água (INAG). 104p.

AES TIETÊ (2012). *Gerenciamento de Ações Emergenciais da Geração AES Brasil (SGAE)*. São Paulo, p. 273. Março, 2012. (RP-05-1063-12 R0). Relatório Parcial.

ARAKAWA, A.; LAMB, V.R. (1977) *“Computational design of basic dynamical process of the UCLA general circulation model”*. Methods Comput. Phys., 17. PP. 173-265.

BALBI, D. A. F (2008). *“Metodologias para a Elaboração de Planos de Ações Emergenciais para Inundações Induzidas por Barragens. Estudo de Caso: Barragem de Peti – MG”*. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 336.

BLACK, T. L. (1994) *“The new NMC mesoscale Eta Model: Description and forecast examples”*. Weather Forecasting, 9, 265-278.

BRASIL (2010). *Lei nº 12.334, de 20 de setembro de 2010. Estabelece a Política Nacional de Segurança de Barragens destinadas à acumulação de água para quaisquer usos, à disposição final ou temporária de rejeitos e à acumulação de resíduos industriais, cria o Sistema Nacional de Informações sobre Segurança de Barragens e altera a redação do art. 35 da Lei no 9.433, de 8 de janeiro de 1997, e do art. 4o da Lei no 9.984, de 17 de julho de 2000.* Diário Oficial da União., Brasília, 21 de set. 2010, p.1.

BRASIL (2011). Agência Nacional de Águas. *Estabelece a periodicidade, qualificação da equipe responsável, conteúdo mínimo e nível de detalhamento das inspeções de segurança regulares de*

barragem, conforme o art. 9º da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010. Resolução nº742, de 17 de outubro de 2011. Diário Oficial da União, Brasília, 27 de out. 2011, seção 1.

BRASIL (2012). Agência Nacional de Águas. *Estabelece a periodicidade de atualização, a qualificação do responsável técnico, o conteúdo mínimo e o nível de detalhamento do Plano de Segurança de Barragem e da Revisão Periódica de Segurança da Barragem, conforme o art. 8º, 10 e 19 da Lei nº 12.334 de 20 de setembro de 2010*. Resolução nº91, de 02 de abril de 2012. Diário Oficial da União, Brasília, 11 de abr. 2011, seção 1.

CARVALHO, C.; PARAJARA, F. *Barragem de Algodões se rompe e água atinge 20 metros de altura em cidade do Piauí*. O Globo. 25 mai. 2009. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/pais/barragem-de-algodoes-se-rompe-agua-atinge-20-metros-de-altura-em-cidade-do-piaui-3123058>> Acesso em: 23 abr., 2012.

CASTRO, M. M. de; MARTINS, J. R. S.; LUCCI, R. M.; JACOBSEM, F. R. dos S. (2011). “*Concepção de um Sistema de Gerenciamento de Ações Emergenciais em Barragens*” in Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió, Nov. 2011.

CBDB. (1999) “*Guia Básico de Segurança de Barragens*”. São Paulo, p. 78.

FCTH.(2004) “*CLiv + Software para Simulação de Escoamentos em Canais e Reservatórios – Manual do Usuário*”. São Paulo, p. 98.

JANJIC, Z. I. (1984). “*Nonlinear advection schemes and energy cascade on semi-staggered grids*”. Mon. Wea.Rev., 112, pp.1234-1245.

JANJIC, Z. I. (1994). “*The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes*” .Mon. Wea. Rev.,122, pp.927-945.

FELS, S. B.; SCHWARZKOPF, M. D. (1975) “*The simplified exchange approximation: A new method for radiative transfer calculations*”. J. Atmos. Sci.,32, pp. 1475-1488.

LACIS, A. A.; HANSENJ.E.(1974) “*A parameterization of the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere*”.J. Atmos. Sci.,31, pp. 118-133.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L (1982). *SMAP - a simplified hydrological model, applied modelling in catchment hydrology*.[S.l.]: Ed. V.P.Singh: Water Resources Publications, 1982.

MESSINGER, F.; JANJIC, Z. L; NICKOVIC, S.; DEAVEN, D. G (1988).*The step-mountain coordinate: Model description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment*. Monthly Weather Review, v. 116, p. 1493-1518, Jan 1988.

TEIXEIRA, R. *Água começa a invadir Campos (RJ) após rompimento de dique; local deve ficar alagado por meses*. UOL. 05 jan. 2012. Disponível em: <<http://noticias.uol.com.br/cotidiano/ultimas-noticias/2012/01/05/agua-comeca-a-invadir-campos-rj-apos-rompimento-de-dique-diz-defesa-civil.htm>> Acesso em: 23 abr., 2012.

SOUZA, P.A.; MARTINS, J.R.S.; FADIGA JR, F.M. (1991). Curso Básico de Métodos Computacionais para Engenharia Hidráulica. Ed. FCTH, 1991. São Paulo. 320p.