



**SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

GGH - 32
16 a 21 Outubro de 2005
Curitiba - Paraná

**GRUPO I
GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA - GGH**

**ELABORAÇÃO DE PLANO DE AÇÃO EMERGENCIAL – PAE
ESTUDO DE CASO DO RESERVATÓRIO DA USINA GOVERNADOR PARIGOT DE SOUZA UHE-GPS**

Antonio Carlos Borges * Laertes Munhoz da Cunha Daniele Zandoná Luiz A. Lacerda Mauricio Müller

COPEL GERAÇÃO

LACTEC

LACTEC

LACTEC

LACTEC

RESUMO

A ocorrência de incidentes com barragens, a consciência de que os aproveitamentos existentes estão envelhecendo, bem como a constatação da ocupação das regiões ribeirinhas quando do surgimento de novas usinas, motivam a estruturação de um Plano de Ações Emergenciais – PAE, voltado à segurança de barragens. O enfoque, no presente caso, está direcionado aos aspectos hidrológicos, hidráulicos e estruturais relacionados ao empreendimento. Neste trabalho definem-se os procedimentos de monitoramento, de fluxo de informações e de ações específicas a serem adotados pelo órgão responsável pela operação do reservatório quando da possibilidade de ocorrência de situações críticas, inclusive considerando o rompimento da barragem.

PALAVRAS-CHAVE

Enchentes, Segurança de Barragens, Mapas de Inundação, Propagação de Cheias.

1.0 - INTRODUÇÃO

Não há legislação ou norma brasileira que defina exigências específicas relativas à elaboração de um PLANO DE AÇÕES EMERGENCIAIS - PAE, voltado à segurança de barragens, porém, dispõe-se de bibliografia enfocando o aspecto de segurança associado à ruptura do maciço. Com base neste material foi elaborado um PAE visando a identificação dos riscos, a identificação dos órgãos públicos ou privados e de pessoas com responsabilidades no caso de acidentes, a definição do fluxo de informações para o monitoramento de situações críticas, a identificação das áreas potencialmente afetadas em situações de enchentes e a definição de procedimentos que possam contribuir para minimizar os danos causados na área de influência do reservatório.

Como estudo de caso, neste trabalho a análise abordou os aspectos hidrológico, hidráulico e estrutural, considerando o reservatório da Usina Hidrelétrica Governador Parigot de Souza (Figura 1), UHE-GPS. Foram avaliados os efeitos, no vale a jusante do reservatório, decorrentes da ocorrência de enchentes naturais de diversas recorrências, e da onda de cheia causada pela hipotética ruptura da barragem.

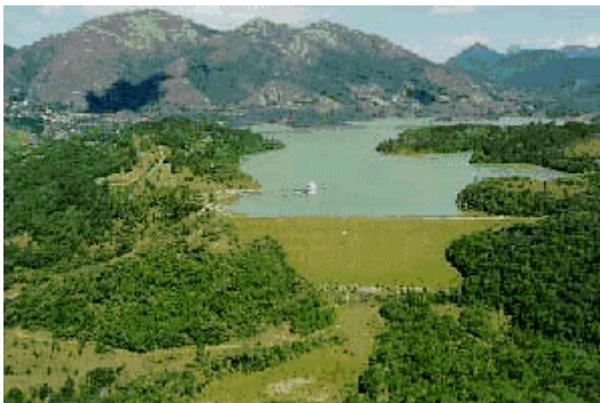


FIGURA 1 – Reservatório Capivari

2.0 - DADOS E INFORMAÇÕES SOBRE O APROVEITAMENTO

2.1 Descrição do Aproveitamento

A Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza possui a potência de 260 MW, e está situada no município de Antonina-PR, já seu reservatório está localizado às margens da Rodovia BR-116 (trecho Curitiba - São Paulo) no município de Campina Grande do Sul - PR, a 50 km de Curitiba, conforme Figura 2.

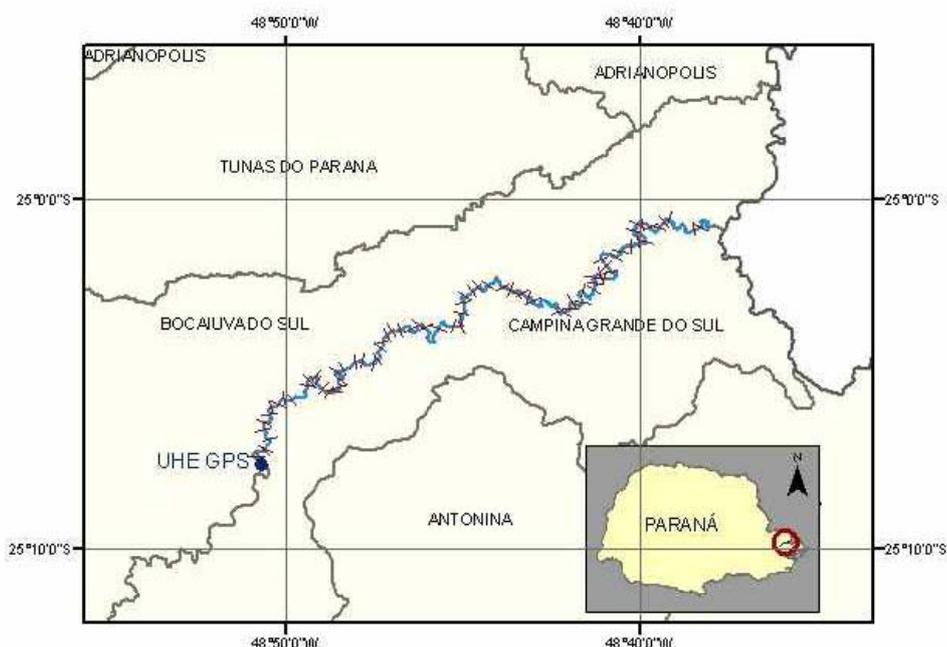


FIGURA 2 – Situação da UHE GPS

A barragem do Capivari, parte integrante do aproveitamento hidroelétrico da Usina Governador Parigot de Souza, também conhecida como Usina Capivari-Cachoeira, construída no rio Capivari, drena uma área de 945 km², apresentando uma vazão média afluyente ao seu reservatório da ordem de 19 m³/s. Possui vertedouro de superfície, dotado de duas comportas radiais, com capacidade total de descarga de 764 m³/s, considerando o Nível de Água no Reservatório - N.A.R. no nível máximo maximorum. A capacidade de vertimento é complementada por um descarregador de fundo, também com duas comportas radiais, que permite liberar a vazão máxima de 250m³/s totalizando um vertimento da ordem de 1000m³/s, considerada a vazão de projeto. Na geração hidrelétrica, a vazão turbinada máxima, captada no reservatório Capivari, é da ordem de 36m³/s e transposta para o rio Cachoeira, encosta abaixo e localizado na bacia litorânea.

A barragem, com comprimento total de 360,0 m e altura máxima de 60,00 m, é uma obra de terra do tipo homogênea com volume total de 1.300.000 m³. A drenagem interna é constituída de filtro vertical, tipo Chaminé, e de um tapete horizontal de areia com espessura média de 2,0 m. Com a função de assegurar o escoamento de água percolada pela barragem e pela fundação, foi implantado um dreno de pé constituído de enrocamento. Considerada conservadora para os dias atuais, a seção típica da barragem possui taludes médios à montante e à jusante de 4(H):1(V) e 2,7(H):1(V), respectivamente. No leito do rio, a barragem está assente sobre rocha fraturada (granito/gnaiss), com permeabilidade da ordem de 10⁻⁴ cm/s. Nas ombreiras, a fundação da barragem é constituída de solo residual com permeabilidade da ordem de 10⁻⁵ cm/s. O maciço da barragem foi construído com solo de alteração de gnaiss e é constituído de silte argiloso com permeabilidade média de 10⁻⁶ cm/s, aproximadamente. No filtro vertical e tapete horizontal, foi utilizada areia natural dos depósitos no vale do rio Capivari, apresentando permeabilidade média de 1,6 x 10⁻² cm/s, para compacidade relativa (CR) de 70%.

2.2 Dados Topográficos

A qualidade dos resultados gerados a partir do modelo matemático, no que diz respeito às análises espacial e temporal das ondas de enchente, depende fundamentalmente da base de dados disponível. Para este estudo, foram adquiridos dados topográficos de alta precisão através de Mapeamento Digital a Laser.

O mapeamento digital a laser consiste em um sistema de sensoriamento remoto ativo que permite a coleta de dados espaciais, tanto da topografia do terreno, como das estruturas verticais presentes na superfície. Seu princípio de funcionamento está baseado na tecnologia LIDAR (*Light Detection and Ranging*), através da emissão de feixe infravermelho em direção à superfície terrestre. Na superfície, estes feixes são refletidos por obstáculos (construções, vegetação ou o próprio terreno) e captados pelo sensor. Para cada feixe emitido é registrado o tempo de percurso aeronave – obstáculo – aeronave, permitindo ao sistema realizar o cálculo da distância.

Utilizando unidades de medições auxiliares, tal como o GPS (*Global Position System*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*), que registram a posição e a atitude da aeronave durante o voo, torna-se possível determinar a posição tridimensional de pontos na superfície, numa fase de pós-processamento. A Figura 3 apresenta os componentes do sistema.

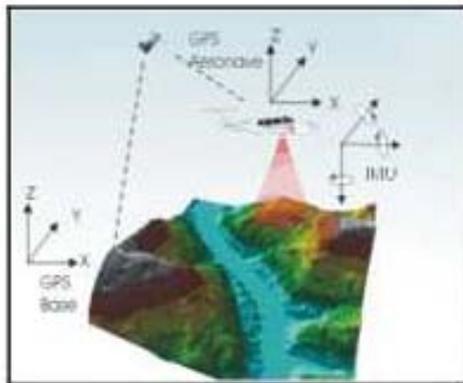


FIGURA 3 - Componentes do sistema

O sistema possui a habilidade de registrar informações do primeiro retorno do pulso laser (referente ao topo dos objetos), do último retorno (referente à superfície do terreno) e um valor de intensidade do pulso refletido para cada ponto mapeado.

A precisão do sistema é de 15 cm na altimetria e 50 cm na planimetria. Com estes dados é possível gerar Modelos Digitais de Terreno - MDT e Modelos Digitais de Elevação – MDE densos e precisos. Nos Modelos Digitais de Terreno todas as estruturas verticais são removidas através de algoritmos de classificação. A precisão do MDT é fortemente influenciada pela classificação adequada dos pontos e pelo percentual de pontos que atingem a superfície do terreno. Uma das alternativas para que se garanta uma maior quantidade de pontos para a modelagem do terreno é a redução do ângulo de varredura e da altura de voo.

Uma das principais vantagens que os sistemas de mapeamento a laser oferecem, em relação a tecnologias tradicionais, como a fotogrametria, é a habilidade de medir diretamente pontos no terreno em áreas de florestas (1). Parte dos pulsos emitidos pelo sensor encontra espaços entre as folhagens e consegue penetrar até o solo, ou encontra vegetação em estratos inferiores. Este conjunto irregular e disperso de pontos correspondentes ao terreno, são utilizados, em conjunto com métodos apropriados de interpolação, para derivar os modelos digitais de terreno de alta precisão.

Com a obtenção destes dados tornou-se possível a modelagem geométrica do canal a jusante da barragem do rio

Capivari, para o qual foram extraídas 78 seções transversais, ao longo de um trecho de aproximadamente 60km.

3.0 - AVALIAÇÃO DE RISCO

3.1 Risco Hidrológico

O risco hidrológico projetado para o reservatório do Capivari, em operação desde 1970, é inferior a 0,01%, tendo em vista a capacidade de vertimento total, considerando o descarregador de fundo e o vertedor de superfície, ser da ordem de 1000m³/s, superior a cheia decamilar estimada em 880m³/s. Adicionalmente, na barragem dispõe-se de uma borda livre de 4,50m acima do nível máximo máximo, o que aumenta a confiabilidade operacional. De qualquer forma, a existência do reservatório do Capivari expõe a população à jusante da barragem a riscos muito pequenos, mas não desprezíveis, de um colapso em suas estruturas. Esta situação de risco estrutural é analisada isoladamente e também associada à ocorrência de eventos hidrológicos extremos. Como comentado, na operação do aproveitamento hidrelétrico do Capivari-Cachoeira, do qual o reservatório do Capivari é parte integrante, a vazão turbinada, captada neste reservatório, é transposta para o rio Cachoeira, encosta abaixo e localizado na bacia litorânea, ensecando, por grande período de tempo, o vale logo a jusante do reservatório. Apesar de ser uma região de preservação ambiental e população ribeirinha quase inexistente, pode ocorrer a ocupação inadequada das margens do rio Capivari, expondo as pessoas e seus pertences a diferentes graus de risco, conforme a origem da onda de cheia liberada (risco hidrológico e risco estrutural). Assim, sob o aspecto hidrológico, foram consideradas apenas enchentes naturais laminadas pelo reservatório, seguindo as regras de operação formuladas e adotadas pela COPEL e, simultaneamente, as enchentes no vale a jusante.

3.2 Risco Estrutural

No que se refere a modelagem da ruptura, a mesma foi realizada com a utilização de um modelo computacional desenvolvido pelo "National Weather Service" denominado BREACH. Este modelo simula apenas a ruptura de barragens de terra, como a da UHE-GPS. O tipo de mecanismo de rompimento considera duas hipóteses básicas da ruptura: entubamento (piping) ou galgamento (overtopping) – adotado nesse estudo. A partir deste ponto e com dados construtivos da barragem (por exemplo: curva granulométrica, dimensões, características geométricas da barragem, características mecânicas do material, núcleo, curvas cota x volume x área) o modelo determina um hidrograma de ruptura, onde as principais características são o volume escoado, o pico de vazão e o tempo para atingir este pico; o tempo total será dado a partir do escoamento total do volume da barragem.

No aspecto estrutural, à luz dos dados atuais disponíveis, não se identificam riscos de ruptura do barramento. A estabilidade de uma barragem de terra é fortemente influenciada pelo funcionamento adequado da drenagem interna e da variação do nível do reservatório. Na barragem Capivari, drenagem interna é constituída de filtro vertical e de um tapete horizontal de areia. Para avaliar o risco de ruptura do talude de jusante, foi estudada a capacidade drenante dos filtros internos. Dois limites foram estabelecidos: filtros com características de projeto e filtros colmatados. A estabilidade do talude de montante foi analisada para a situação de rebaixamento do nível de reservatório, considerando uma situação crítica de velocidade de rebaixamento em função da capacidade de vazão do vertedouro e do descarregador de fundo. A fim de avaliar o desempenho da barragem de terra, dispõe-se de um sistema de instrumentação, que monitora o estado da estrutura. Esse sistema inclui medidores de nível d'água, piezômetros Casagrande, medidores de vazão e medidores de recalque, os quais devem ser acompanhados continuamente pelo pessoal de operação da usina. O projeto de instrumentação da barragem consiste de duas seções na máxima altura no leito do rio e uma na ombreira direita, denominadas de AA, BB e CC (Figura 4).

Nestas três seções estão instalados 12 medidores de recalque telescópicos, 10 piezômetros Casagrande e 32 medidores de nível d'água. Medidores de nível d'água também estão instalados nas ombreiras direita e esquerda, no terreno à jusante e na área junto à calha do vertedouro. Para o estudo do colapso dos taludes de montante e jusante da barragem são necessárias informações sobre as propriedades geotécnicas dos materiais constituintes. Tendo em vista a indisponibilidade de determinadas informações, os valores de alguns parâmetros foram ajustados de acordo com dados do monitoramento.

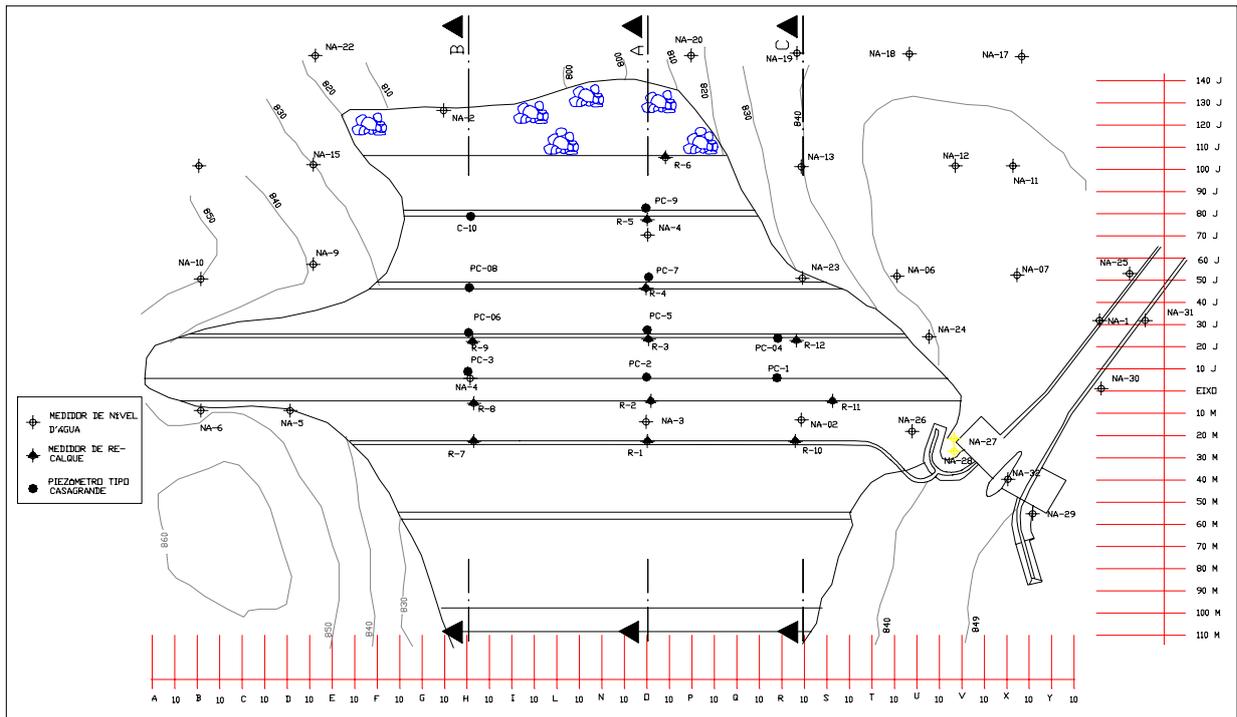


FIGURA 4 – Locação dos instrumentos.

4.0 - IDENTIFICAÇÃO DE EMERGÊNCIAS POTENCIAIS

4.1 Modelagem Hidrodinâmica

Para identificação das emergências foram determinados níveis de água ao longo do rio, com o uso de modelo hidrodinâmico aplicado a escoamentos não permanentes, considerando condições de contorno de montante fornecidas pelos hidrogramas defluentes obtidos pela operação do reservatório, supondo a ocorrência de hidrogramas afluentes de diferentes tempos de recorrência e a associação destes com o hidrograma de ruptura da barragem. Sob o ponto de vista operacional sugere-se adotar o estado do reservatório, representado pelo nível de água no reservatório (N.A.R.) e pela vazão afluente atual, como indicador da condição de risco conforme apresentado na Figura 5.

A condição de contorno de jusante, seção que delimitou o trecho de rio em estudo, consistiu no chamado Salto do Inferno, localizado no rio Capivari a aproximadamente 4km a montante da confluência deste com o rio Pardo. Assim, emergências identificadas restringiram-se a este trecho de rio de cerca de 60km. Saliente-se que esta limitação deve-se ao estabelecimento de condição crítica do escoamento em seção logo a montante do Salto, criando condições favoráveis ao estudo hidrodinâmico do escoamento. Além deste ponto, é provável o maior abatimento da onda de cheia, o que permite o desencadeamento de ações preventivas mais seguras em função do tempo disponível para eventuais sobrelevações significativas do nível da água. Os hidrogramas responsáveis pela contribuição lateral, ao longo da bacia a jusante da barragem, são assumidos proporcionais ao hidrograma afluente, o que significa considerar preservada a vazão específica para toda a bacia em estudo.

Existem vários modelos hidrodinâmicos para propagação de vazões em rios, todos eles utilizando as equações completas de Saint-Venant. O que difere são as técnicas de solução das equações, e algumas opções de cálculo. Neste trabalho foi utilizado o modelo denominado DAMBRK, cujo uso em recursos hídricos está consagrado e que já foi utilizado com sucesso em modelagens hidrodinâmicas inclusive em casos de estudos de propagação de vazões em rupturas hipotéticas de barragens.

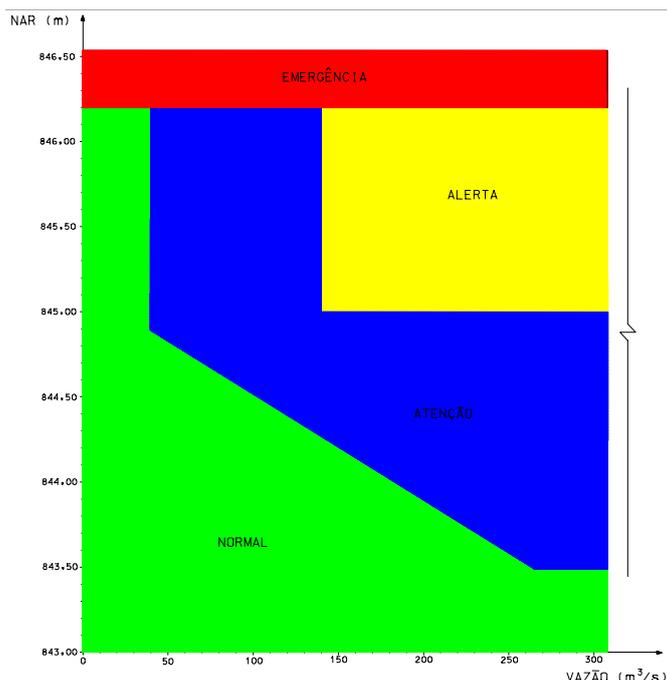


FIGURA 5 – Estado do Reservatório Capivari – Risco Hidrológico

O modelo DAMBRK foi desenvolvido por FREAD (2) e foi concebido com o objetivo de simular rupturas de barragem, mas que pode ser utilizado com sucesso na propagação de vazões. Um exemplo do uso do DAMBRK em propagação de vazões em rios é o projeto HG-79 – Análise do escoamento em regime não-permanente no rio Iguaçu entre Fluviópolis e Foz do Areia, desenvolvido no Centro de Hidráulica e Hidrologia Prof. Parigot de Souza - CEHPAR (3) e mais recentemente o projeto HL-109 – Estudo da hipotética ruptura da barragem de Dona Francisca, também desenvolvido no CEHPAR (4).

O trecho em estudo do rio Capivari tem uma extensão aproximada de 60km. Para o estudo de propagação de vazões foram utilizadas as seções transversais definidas a partir dos dados obtidos com o Mapeamento a Laser. Foram utilizadas 78 seções transversais que se transformaram no modelo em 1142 seções de cálculo.

A rugosidade adotada para o trecho analisado foi de $0,12 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ para o canal principal e de $0,50 \text{ m}^{1/2} \cdot \text{s}^{-1}$ para a planície de inundação. Esses valores foram adotados após análises de eventos de enchente disponíveis, das curvas de descarga de estações fluviométricas na região, de dados históricos de operação da barragem, e de valores apresentados em estudos localizados em regiões com características semelhantes. A região do estudo corta uma região rica em vegetação atlântica, com trechos de mata bastante fechada nas margens do rio. Essa constatação corrobora as rugosidades altas encontradas nas análises.

4.2 Mapas de Inundação

Para a visualização e análise dos resultados, utilizou-se Sistema de Informações Geográficas - SIG. O uso associado de modelos matemáticos, ferramentas de geoprocessamento e dados digitais de alta precisão, têm como principal vantagem a gestão integrada das informações, contextualizadas dentro de uma realidade geográfica, facilitando o manuseio dos dados e permitindo à avaliação espacial dos fenômenos, como a determinação de áreas alagadas e infra-estruturas atingidas. Desta forma tornou-se possível simular diferentes cenários e gerar novas informações de maneira simples e com resultados confiáveis, provendo, às autoridades e entidades interessadas, subsídios de apoio para definição de planos de contingência. Foram definidos os mapas de inundação para tempos de recorrência, ou TR's, de 100, 1000 e 10.000 anos, para cheias naturais e associadas à ruptura da barragem.

A Figura 6 apresenta o mapa de inundação para um tempo de recorrência de 10.000 anos associado à ruptura da barragem.

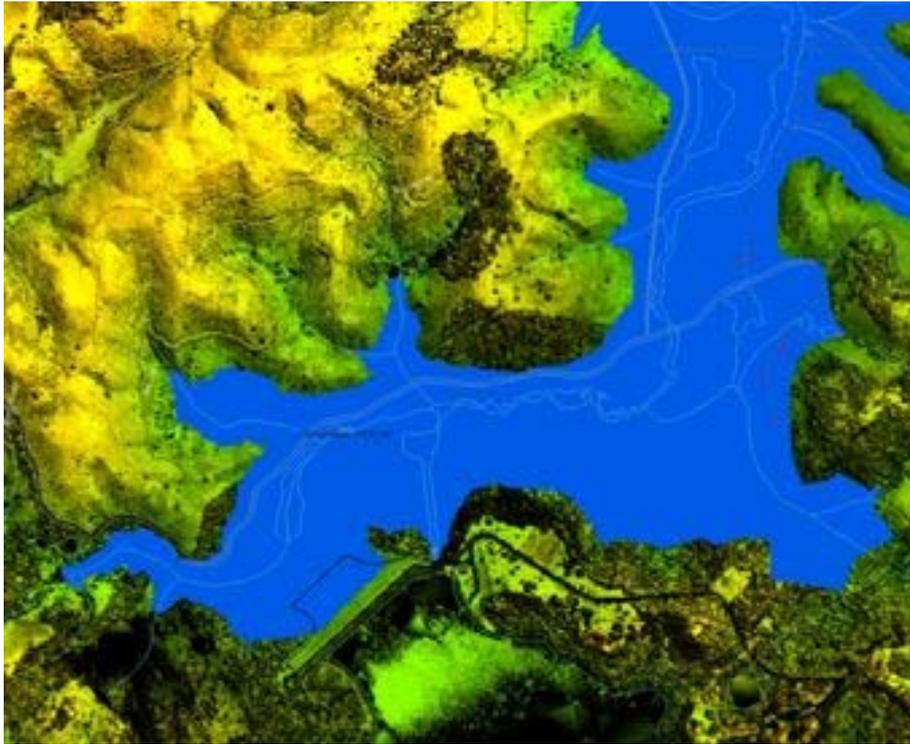


FIGURA 6 – Mapa de Inundação (TR = 10.000 com ruptura da barragem)

4.3 Avaliação Estrutural

A situação das estruturas da barragem, nos trechos de barramento, do vertedouro, e da tomada de água será avaliada através da leitura dos instrumentos de auscultação e de inspeções periódicas. Como parte da avaliação do comportamento e desempenho da barragem, é necessário estabelecer um sistema de controle envolvendo todos os instrumentos de monitoramento da barragem. O monitoramento da barragem fornece informações para que se possa, dentro deste contexto de atuação e interface com o sistema de segurança da UHE Governador Parigot de Souza, acionar os níveis de ação considerados como Normal, Atenção e Alerta. Por exemplo, uma situação que aciona o nível de alerta, desencadeando uma série de procedimentos, é o aumento significativo das vazões de infiltração com carreamento de material sólido, dando indícios de problemas graves com a barragem. Em termos práticos, a definição dos níveis de ação pode ser efetuada em função da instrumentação da barragem, considerando o valor de referência para cada equipamento, como os respectivos valores máximos observados no histórico de medições, conforme mostra a Tabela 1.

TABELA 1 - Definição dos Níveis de Alerta.

Equipamento	Abaixo do valor de referência	Acima do valor de referência
Medidor de nível d'água	NORMAL	ATENÇÃO
Medidor de vazão	NORMAL	ALERTA
Piezômetro	NORMAL	ATENÇÃO

5.0 - ORGÃOS ENVOLVIDOS E FLUXO DE INFORMAÇÕES

As informações a serem transmitidas à Defesa Civil ou a qualquer outra entidade envolvida nas ações emergenciais devem ser claras, de tal forma a, com a implantação do PAE, ficar perfeitamente definido quem são os responsáveis pela geração da informação, o que será disponibilizado, em que frequência serão transmitidas as informações, quais os meios de comunicação e quem são os responsáveis por receber as informações, de modo a subsidiar ações efetivas de prevenção e socorro às eventuais vítimas. Informações prematuras, inexatas ou disponibilizadas a pessoas despreparadas, podem causar especulações e pânico, dificultando qualquer tipo de ação mitigadora.

A empresa responsável pela operação da UHE Governador Parigot de Souza, no caso a COPEL – Companhia Paranaense de Energia, deverá indicar as pessoas responsáveis em cada fase do processo, mantendo inclusive o treinamento contínuo sobre os procedimentos a serem adotados em cada caso. Na fase de implantação do PAE, os órgãos municipais, estaduais e federais também deverão ter pessoas formalmente indicadas para o engajamento no processo, garantindo o auxílio às comunidades potencialmente afetadas pelo reservatório. Neste caso está previsto o envolvimento de entidades dos estados do Paraná e São Paulo para atuação de defesa civil conjunta com o governo federal.

6.0 - CONCLUSÕES

6.1 A importância de um PAE

A importância da existência de Planos de Ações Emergenciais - PAE, quer para usinas hidrelétricas, quer para outras estruturas que coloquem a vida e o patrimônio de pessoas em risco, está cada vez mais evidenciada. Desastres naturais ocorrem diariamente em todo o planeta, variando a sua magnitude de mínima a catastrófica.

6.2 As usinas hidrelétricas no Brasil

No Brasil existem diversas usinas hidrelétricas com mais de 30 anos de operação, localizadas em bacias que sofreram modificações ao longo do tempo, em função do crescimento econômico e populacional do país. A urbanização criou restrições que elevam os riscos de perdas humanas e do patrimônio público e privado. Novos empreendimentos hidrelétricos, pela sua própria natureza, também podem impor riscos à comunidade.

6.3 Avanços tecnológicos

Novas tecnologias, como o mapeamento a laser, a modelagem hidrodinâmica e a possibilidade de trabalhar com séries hidrológicas mais longas, permitem uma análise mais precisa dos riscos envolvidos.

6.4 Responsabilidades

É dever do Estado e das empresas proprietárias destes empreendimentos garantir a segurança da comunidade potencialmente afetada e minimizar os prejuízos porventura inevitáveis. Neste contexto insere-se o PAE e todos os seus desdobramentos.

6.5 Produtos de um PAE

A elaboração de um PAE colabora de forma importante na quantificação dos riscos envolvidos sejam eles hidrológicos, hidráulicos ou estruturais, fornecendo o mapeamento das estruturas existentes no vale a jusante, quantificando o tempo disponível para a tomada de ações na área de influência do reservatório e determinando os níveis esperados de água a serem atingidos. Mais importante no entanto, é criar-se condições para o envolvimento dos órgãos e das pessoas que passam, antecipadamente, a conhecer e reconhecer suas responsabilidades por ocasião de ocorrência de eventos de risco.

6.6 O estudo de caso

Com a disponibilidade de modelos matemáticos sofisticados, que buscam reproduzir os fenômenos físicos de maneira mais precisa, com os recursos computacionais atualmente disponíveis e com ferramentas de mapeamento de alta precisão, pode-se realizar um PAE de qualidade e garantir benefícios a sociedade. O estudo de caso apresentado nesse trabalho exemplifica essa afirmação.

7.0 - BIBLIOGRAFIA

- (1) POPESCU, S. Estimating Plot-Level Forest Biophysical Parameters Using Small-Footprint Airborne Lidar Measurements. 155p Dissertação (Doutorado). Blacksburg, Virginia, 2002.
- (2) CEHPAR. Projeto HG-79 - Análise de escoamento em regime não-permanente no rio Iguaçu entre Fluivípolis e Foz do areia. Relatório Técnico nº 5. Curitiba, 1996.
- (3) LACTEC CEHPAR. Projeto IG – 11 – Seções Transversais a Jusante da barragem do Capivari. Curitiba, 2004.
- (4) CEHPAR. Projeto HL-109 - Estudo da hipotética ruptura da barragem de Dona Francisca. Curitiba, 2001.
- (5) MASCARENHAS, FLÁVIO C. B. Modelação matemática de ondas provocadas por ruptura de barragens, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, 291 pg., 1990.
- (6) FABIANI, ANDRÉ L. T. Contribuição ao estudo das ondas geradas pela ruptura de barragens, Universidade Federal do Paraná, dissertação de mestrado, 193 pg., 1995.
- (7) SILVEIRA, JOÃO F. A. A análise de risco aplicada a segurança de barragens, in Revista do Comitê Brasileiro de Barragens, edição especial, nov/99, pg. 1, 1999.