

IX SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

BH/GPH/18

BELO HORIZONTE - MG - BRASIL 1987

GRUPO I - PRODUÇÃO HIDRÁULICA - (GPH)

MÉTODOS DE CÁLCULO DE CHEIA DE PROJETO DE VERTEDORES

J. KELMAN, J. M. DAMÁZIO, J. P. COSTA, N. L. C. DIAS

F. C. ALBUQUERQUE

CEPEL

ELETRORÁS

RESUMO

A ELETRORÁS ao constatar a necessidade de uma avaliação da aplicabilidade de diversos métodos de cálculo para a cheia de projeto de vertedor de barragens do Setor Elétrico, para as condições existentes no Brasil, solicitou ao CEPEL que realizasse uma pesquisa metodológica sobre o assunto. As atividades de investigação foram iniciadas no Departamento de Sistemas do CEPEL em meados de 1982, sendo acompanhadas pelo Departamento de Recursos Energéticos da Diretoria de Engenharia e Planejamento da ELETRORÁS e por um Comitê Assessor, formado por hidrólogos de notória competência no estudo de Cheias. Este artigo reporta os principais resultados obtidos.

1. INTRODUÇÃO

A ELETRORÁS ao constatar a necessidade de uma avaliação da aplicabilidade dos diversos métodos de cálculo para a cheia de projeto de vertedor de barragens do Setor Elétrico, para as condições existentes no Brasil, solicitou ao CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - que realizasse uma pesquisa metodológica sobre o assunto. Este esforço deveria concluir com a redação de um guia(1), cujo objetivo é auxiliar o engenheiro projetista na definição dos padrões de segurança e na escolha da metodologia para cálculo da cheia de projeto adequada a cada situação específica.

As atividades de investigação foram iniciadas no Departamento de Sistemas do CEPEL em meados de 1982, sendo acompanhadas pelo Departamento de Recursos Energéticos da Diretoria de Engenharia e Planejamento da ELETRORÁS e por um Comitê Assessor, formado por hidrólogos de notória competência (ver tabela 1) no estudo de Cheias. Este artigo reporta os principais resultados obtidos.

2. DIRETRIZES PRINCIPAIS

O estudo sugere que as cheias de projeto de vertedores de grandes barragens sejam dimensionadas de forma a tornar irrisória a chance de rompimento por efeito de cheias. Considera-se que este objetivo é alcançado quando a cheia de projeto é calculada adotando-se como critério o tempo de recorrência de 10.000 anos para a cheia ou para a chuva de projeto ou quando se adota a FMP.

Em condições específicas em que os prejuízos decorrentes da ruptura da barragem não são elevados considera-se viável a realização de estudos econômicos para o que podem ser consideradas as seguintes condições:

- O custo do vertedor seja uma porcentagem significativa do custo total da obra ($\geq 10\%$).
- A contribuição do aproveitamento para a energia firme do sistema interligado seja pequena ($\leq 2\%$).
- Sejam moderados os prejuízos adicionais causados pelo colapso da barragem em relação àqueles que ocorreriam de qualquer forma pela passagem de cheia excepcional na hipótese de inexistência do aproveitamento. Esta situação pode existir quando o volume armazenado pelo reservatório é pequeno em relação ao volume da cheia.

2.1 Armazenamento à montante

A existência de grandes quantidades de água armazenadas a montante do aproveitamento cria a possibilidade de, por efeito de cheias ou não, ocorrer a ruptura das barragens de montante gerando escoamentos rápidos destas massas líquidas em direção ao aproveitamento em questão. Deve-se sempre considerar a possibilidade de que os vertedores dos barramentos à montante tenham sido projetados com critérios de segurança inferiores aos admitidos no aproveitamento em questão e não resistam à ocorrência dos eventos agora considerados. Nestes casos aplicam-se análises que consideram as características da situação específica, determinando-se qual a melhor solução para que se tenha no conjunto a segurança desejada.

2.2 Alterações do uso dos solos

A cheia de projeto estabelecida para um aproveitamento deve representar, com a maior fidelidade possível, o estado mais provável que existirá na bacia hidrográfica durante a vida útil do empreendimento, sendo conveniente que os efeitos que advirão do futuro desenvolvimento do próprio vale do rio principal e tributários de maior porte sejam considerados.

Atenção especial deve ser dada aos casos em que as vazões máximas possam ser majoradas devido à eliminação de grandes acumulações diárias em várzeas.

2.3 Métodos preferenciais

A escolha dos métodos para cálculo de cheias de projeto deve considerar a fase do projeto, a disponibilidade de dados e as condições hidrológicas específicas da área de drenagem em questão.

Na fase de inventário considera-se suficiente o uso de métodos diretos, (métodos que utilizam apenas registros fluviométricos) através do estudo de frequência de cheias associadas às condições naturais da bacia. É desejável que os estudos disponham de informações sobre as curvas-chave dos postos, extrapolações, seções transversais e extravasamentos que permitam avaliar a qualidade das séries. São interessantes ainda informações provenientes de uma pesquisa de marcas de cheias na região.

Já nas fases de projeto de viabilidade, básico e executivo torna-se importante a caracterização dos efeitos no potencial de cheias do desenvolvimento do vale, destacando-se a construção e operação de reservatórios (notar que o próprio reservatório do aproveitamento pode provocar efeitos importantes devidos a chuva direta no lago, a alteração da velocidade de propagação das cheias e a eventual perda do armazenamento natural do vale). Nos casos em que as alterações possam ser significativas, incluindo-se aí a possibilidade de rompimento de barragens de montante, pode-se fazer uso dos métodos indiretos (métodos que usam o conceito de "chuva de projeto" já que em geral o regime de chuvas intensas não é afetado. Outra alternativa é o uso de geração de séries sintéticas de vazões incrementais, ou ainda a reconstituição das cheias na condição de lago implantado, utilizando-se modelos hidrológicos de propagação de vazões (routing invertido, por exemplo).

A disponibilidade de dados é um dos fatores importantes na escolha dos métodos para cálculo de cheias de projeto. A discussão deste fator em parte é óbvia. Por exemplo, não se pode fazer um estudo de frequência de vazões máximas anuais sem o uso de métodos regionais de transferência especial de informação quando não existe posto fluviométrico no local de interesse. Por outro lado, a não existência de longuíssimos registros (mais de 100 anos) faz com que, devido a possíveis variações amostrais, torne-se menos conveniente o uso de distribuições de máximos anuais com mais de dois parâmetros (embora seja possível).

Quanto à questão da especificidade das condições hidrológicas, o projetista antes de se decidir pela aplicação de uma dada técnica deve se certificar das condições para as quais ela foi desenvolvida e da generalidade da sua aplicação. Alguns princípios hidrológicos são universais, tais como o balanço hídrico. Outros no entanto são válidos apenas para as condições em que foram derivados.

Uma prática bastante apropriada consiste em calcular cheias de projeto por mais de um método. No caso de se obter cheias muito disparas segundo os diversos enfoques metodológicos explorados, as análises acerca da seleção da cheia de projeto deverão ser precedidas por pesquisas minuciosas a respeito das possíveis causas que conduziram às diferenças. Uma alternativa é projetar

o vertedouro a partir da menor das cheias de projeto, mas garantindo-se ainda a passagem da maior delas, considerando-se possíveis descargas de fundo e sem a segurança adicional da borda livre usualmente calculada para evitar a sobre-elevação devida à ventos.

3. MÉTODOS DIRETOS

Nos métodos diretos, a cheia de projeto resultante está associada a uma certa probabilidade de ser ultrapassada, sendo usualmente obtida através da análise de frequência de séries de vazões máximas anuais. Diversos aspectos práticos para a realização destas análises são abordadas no estudo, tais como: homogeneidade da série, escolha da distribuição, técnicas de regionalização, uso de informações oriundas de marcas d'água e uso de hidrogramas típicos. Dentre estes itens destacam-se os problemas da homogeneidade da série e da escolha da distribuição, descritos a seguir.

3.1 Homogeneidade das séries

Para que se possa utilizar com sucesso uma série de vazões máximas anuais é necessário que todos os seus valores se referenciem a anos nos quais não ocorrem interferências importantes nas condições naturais determinantes do regime de cheias na bacia. Idealmente, a identificação de séries não-homogêneas deve se basear no conhecimento das datas, duração e intensidade das principais interferências ocorridas na bacia. Na falta deste tipo de informação a identificação pode ser feita através de testes estatísticos. Estes testes são úteis ainda quando o projetista está em dúvida quanto à capacidade da interferência de alterar o regime de cheias. Muitas vezes pode-se reconstituir as vazões médias diárias que teriam ocorrido caso não houvesse a interferência, usando-se por exemplo os dados operacionais dos reservatórios. Deve-se sempre verificar o sucesso do método de reconstituição através de testes estatísticos, comparando a série de máximos anuais reconstituída com série de máximos anuais observados no local antes da reconstituição. O estudo apresenta em detalhes os testes de Mann-Kendall e de Smirnov.

3.2 Escolha da distribuição de probabilidades

A escolha da distribuição a adotar em estudos de frequência de cheias é um problema crítico em projetos de vertedouros de grandes barragens. Isto deve-se basicamente à necessidade de extrapolar a experiência empírica.

O método mais usado para a escolha de distribuição de eventos extremos consiste em se ajustar várias distribuições aos dados e escolher dentre elas a que forneça o melhor ajuste. No entanto alguns cuidados são necessários. A forma da real distribuição, por variação amostral, pode estar totalmente mascarada na amostra disponível e, neste caso, o ajuste "imperfeito" pode ser preferível. É por esta razão que se deve evitar o uso de distribuições de muitos parâmetros. Outro cuidado é o de se procurar apoiar a escolha da distribuição em testes de ajustes feitos nas séries de máximos anuais mais longas da região em estudo.

Outra alternativa para solucionar o problema é o uso dos chamados "estimadores robustos". Um modelo robusto é aquele capaz de estimar eventos extremos, qualquer que seja a população, sempre sem erros desastrosos. Uma abordagem consiste em se definir cenários que representam o processo de

ocorrência de eventos extremos e produzir registros sintéticos de máximos com os quais as diversas distribuições são testadas e, com base em índices tais como o erro médio absoluto da estimativa, uma distribuição é escolhida.

Durante o estudo procedeu-se a uma investigação com o objetivo de definir os métodos mais robustos de análise de frequência tendo em vista a determinação de cheias de projeto de vertedores. A pesquisa indicou a distribuição exponencial de dois parâmetros. Esta conclusão é baseada na hipótese de que a assimetria de população situa-se entre 1,0 e 2,5. Caso o hidrólogo tenha convicção de que a assimetria da população sob estudo esteja próxima ao limite inferior do citado intervalo, a distribuição Gumbel deverá ser considerada. Outras distribuições de dois parâmetros poderão ser também consideradas, mas em nenhum caso alguma distribuição com mais de dois parâmetros se mostrou competitiva.

3.3 Modelos de séries temporais

Outra alternativa para a determinação de cheia de projeto para vertedores com período de retorno definido é a modelagem estocástica de séries temporais. O uso das séries sintéticas de vazões diárias pode ser visto como uma alternativa capaz de fazer uso de todas as informações contidas nos registros pluviométricos, possivelmente reduzindo a variação amostral. Este método tem a vantagem adicional de facilitar a análise de cheias concomitantes em sub-bacias, bem como suplantando o problema de definição de hidrógrafas de projeto. Ou seja, ao se escolher um pico e um volume, ambos com período de retorno de 10.000 anos, o hidrograma resultante de se admitir a coincidência dos dois eventos poderá ser pouco plausível.

3.4 Limitações

Foram apontadas diversas fontes de erro a que estão sujeitas as hidrógrafas de projeto obtidas a partir da análise direta.

A primeira fonte ocorre nos registros de vazões provenientes de medidas de nível durante as cheias excepcionais. Estas vazões estão sujeitas a erros por envolverem grandes extrapolações de curva-chave.

Outro tipo de erro de grande importância é o chamado erro amostral que ocorre na estimativa dos principais parâmetros do modelo usado.

A alternativa de se adotar curvas de frequência regionais pode minorar este efeito mas está sujeita a erros adicionais na própria definição das regiões homogêneas.

Os modelos estocásticos de vazões diárias são uma aquisição recente da Hidrologia e por esta razão o projetista deverá utilizá-los com cautela.

4. MÉTODOS INDIRETOS

Os métodos indiretos fazem uso de uma quantidade de informações muito superior à utilizada nos métodos diretos:

- Utilizam informações pluviométricas e meteorológicas para definir chuvas de projeto;
- Interpretam as peculiaridades da bacia hidrográfica na forma de um modelo de transformação de chuva em vazão.

4.1 Chuvas de projeto

A chuva de projeto pode ser definida a partir dos registros pluviométricos e de conhecimento sobre a meteorologia da região, levando em consideração o efeito da distribuição espacial e temporal da precipitação na geração e propagação das ondas de cheia ao longo dos afluentes e trechos do rio principal. Uma chuva de projeto é caracterizada pelo total de precipitação na bacia ao longo de uma dada duração de projeto e de seu padrão temporal e espacial.

O conceito mais utilizado para a definição da chuva de projeto dos vertedores de grandes hidrelétricas é o de "Precipitação Máxima Provável - PMP", definida como a "máxima precipitação de uma dada duração meteorologicamente possível de ocorrer em uma particular bacia numa certa época do ano, sem levar em conta tendências climáticas de longo prazo" (2). Na prática, conforme observa o próprio manual da WMO, não há suficiente conhecimento dos processos atmosféricos para uma avaliação quantitativa precisa da máxima altura de chuva numa bacia, para uma dada duração. Os métodos existentes propõem-se a estimar a PMP através de análise quantitativa de séries históricas de dados hidrometeorológicos (tipicamente dados de chuva e de umidade atmosférica) bem como do conhecimento qualitativo que o meteorologista possui dos processos de formação de precipitações na bacia. Os métodos mais utilizados para a maximização de eventos históricos e obtenção da PMP tem sido:

- 1- Transposição de tempestades ocorridas em outras bacias;
- 2- Maximização da umidade disponível em uma precipitação histórica;
- 3- Obtenção da sucessão de tempestades críticas para a formação de cheias na bacia (maximização sequencial);
- 4- Modificação da localização das tempestades dentro da bacia (maximização espacial).

Chuvas de projeto associadas explicitamente a alguma probabilidade de ocorrência pré-especificada podem ser obtidas através de métodos estatísticos. Esta alternativa corresponde à aplicação das técnicas de análise de frequência de cheias aos registros pluviométricos. Usualmente emprega-se séries de máximos anuais de altura ou de intensidade de chuva. O primeiro passo consiste em se obter o hietograma de precipitações diárias na bacia a partir dos dados pontuais nas estações pluviométricas dentro e nas vizinhanças da bacia. Tanto o método de Thiessen quanto o das isoietas fornecem bons resultados. A partir deste hietograma são obtidas as séries de máximos anuais para as durações desejadas. A escolha da distribuição de probabilidades a ser adotada para estimar a chuva de período de retorno desejado é um problema crítico (tanto quanto nos métodos diretos), sendo recomendada a abordagem de utilizar distribuições robustas. Uma vez definido o período de retorno do projeto, os totais de precipitação para cada duração são obtidos usando a distribuição de probabilidades adequada para cada duração. O padrão temporal espacial para cada duração pode ser obtido com base nas grandes tempestades ocorridas na área em estudo. Na pesquisa adotou-se a distribuição exponencial para a duração um dia, normal para duração igual a estação chuvosa e para durações intermediárias a distribuição gama, já que ela tem como casos particulares a distribuição exponencial e normal.

uma abordagem alternativa para a definição da chuva de projeto consiste em se encarar a precipitação na bacia como um processo estocástico no tempo e no espaço. Uma vez caracterizadas as propriedades deste processo, fica-se em condições de, a partir de um modelo, produzir milhares de "precipitações sintéticas". O uso de um modelo de geração estocástica de precipitação permite que se analise a distribuição de vazões em pontos onde se tenha pouca disponibilidade de registros pluviométricos, desde que se tenha suficiente informação pluviométrica. Os modelos para geração podem ser classificados como:

- 1- Modelos pontuais: geram seqüências de alturas precipitadas em um único ponto. Esses modelos tem aplicação limitada a bacias com áreas de drenagem $\leq 10000 \text{ km}^2$.
- 2- Modelos multivariados: consideram várias estações pluviométricas simultaneamente e visam a preservar a estrutura de covariância das precipitações históricas existentes entre estas estações.
- 3- Modelos multidimensionais: tem por objetivo caracterizar a precipitação em todos os pontos sobre a bacia.

Cabe ressaltar que os modelos do tipo 2 e 3 podem ser empregados para bacias com qualquer área de drenagem.

4.2 Transformação chuva-vazão

Uma vez definida a chuva de projeto, o passo seguinte consiste em calcular a correspondente cheia afluyente à barragem cujo vertedor se quer projetar.

Existem à disposição do projetista diversos métodos desenvolvidos para transformar chuva em vazão, desde os métodos empíricos até os modelos determinísticos que procuram representar detalhadamente os diversos processos físicos envolvidos na fase terrestre do ciclo hidrológico. Como exemplo pode-se citar o modelo SSARR - Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation - desenvolvido pelo U.S. Army Corps of Engineers. A versão atual deste modelo inclui 21 parâmetros bem como relações entre as variáveis hidrológicas de forma a caracterizar o comportamento hidrológico da bacia. A escolha de qual modelo usar depende principalmente de três fatores: tipo de resultado desejado, disponibilidade de dados, disponibilidade de programa de computador (dependendo do modelo selecionado) e limitações do modelo.

Para se fazer uso de um modelo de simulação da bacia é necessário calibrá-lo, isto é, encontrar um conjunto de parâmetros tal que o modelo reproduza, com determinado grau de precisão, a resposta da bacia em estudo. O primeiro passo consiste em definir uma função objetivo a ser minimizada e que expresse o erro existente no uso do modelo. A função objetivo deve espelhar a aplicação que se pretenda dar à série estimada. Assim, no caso de cheias, a ênfase deve ser dada na minimização dos desvios entre vazão observada e estimada para os altos valores, sendo de pouca importância os eventuais desvios ocorridos na estiagem. Uma vez estabelecido o critério de adequação de ajuste, os procedimentos para calibração são: tentativa e erro, otimização automática ou uma combinação entre os dois anteriores de forma a se ter uma primeira aproximação dos valores dos parâmetros e em seguida refinar esta aproximação através de uma busca automática su-

jeita a restrições. Uma vez calibrado o modelo, é preciso avaliar o seu desempenho. Em geral, isto é feito comparando-se a resposta fornecida para um conjunto de dados históricos não utilizado no processo de calibração. Esta é uma maneira de verificar o comportamento do modelo sob condições diferentes daquelas usadas para obtenção dos parâmetros.

Para se obter a hidrógrafa de projeto afluyente ao local de interesse, é preciso definir o estado hidrológico da bacia no período imediatamente anterior à ocorrência da chuva de projeto, comumente conhecido como condições antecedentes. O procedimento mais usual para tal determinação consiste em definir uma precipitação para este período (digamos com período de retorno de 100 anos), de forma que, no processo de simulação da bacia, as condições de umidade alcancem valores considerados representativos.

4.3 Limitações

Foram apontadas várias fontes de erros a que está sujeita a abordagem de obter a cheia de projeto através do método indireto. Além dos erros de medida e dos erros amostrais, deve-se ter em conta os erros na descrição espacial dos fenômenos, bem como os erros do modelo.

Erros na descrição espacial dos fenômenos: é comum estarem disponíveis séries de medidas pontuais de grandezas tais como: altura de chuva, temperatura e umidade do ar, pressão atmosférica, infiltração, etc. A utilização dos métodos indiretos pressupõe alguma forma de considerar a distribuição espacial dessas grandezas, e o uso de informações pontuais para inferir a distribuição espacial dessas grandezas sempre envolve erros inerentes do método adotado. Naturalmente, quanto mais densa for a rede de coleta de informações, melhor será a descrição espacial dos fenômenos.

Erros do modelo: todo modelo é uma representação da realidade e, portanto, inclui na sua construção simplificações em relação aos processos que realmente ocorrem na natureza. Tanto na obtenção da chuva de projeto, quanto na sua transformação em vazão, se lança mão de modelos que se constituem apenas em aproximações ao mundo real. Além disso, não se tem nenhuma garantia de que o modelo reproduzirá de maneira adequada o fenômeno quando submetido à condições muito diferentes daquelas para as quais foi calibrado e aferido. Cabe ao projetista ter em mente que o erro total que terá ao empregar o método indireto é composto de todos os erros que ocorrem nas diversas fases, sendo sua avaliação muito difícil.

5. CONCLUSÕES

O cálculo da cheia de projeto de vertedores de grandes barragens envolve considerável grau de incerteza devido às extrapolações inerentes ao evento que se deseja determinar. Também é, de considerável monta a responsabilidade do engenheiro tendo em vista as possíveis consequências do rompimento das barragens. O Guia para Cálculo de Cheia de Projetos de Vertedores, (1), certamente deve se tornar uma referência útil a todos que se defrontarem com o problema, na medida em que constatacritérios e métodos validados por investigações realizadas no CEPEL e pela experiência profissional de diversos técnicos que trabalham na área.

REFERÊNCIAS

- (1) CEPEL, ELETROBRÁS - Cheia de projeto para vertedouros, Relatório Técnico CEPUL 497/86, 1986.
- (2) World Meteorological Organization -Manual for Estimation of Probable Maximum Precipitation, Operational Hydrology Report, nº 1, 193pg, Genebra, 1973.

Tabela 1 - Participação nos Trabalhos

CEPEL	ELETROBRÁS
Jerson Kelman (Coordenador)	Alcides Lyra Lopes
Joari Paulo da Costa	Fernando Campelo de Albuquerque
Jonatas Costa Moreira (1982-1983)	Nelson da Franca dos Anjos
Jorge Machado Damázio	Sérgio Barbosa de Almeida
Nelson Luis da Costa Dias	
COMITÊ ASSESSOR	
Erton Carvalho	
Heinz Dieter Fill	
Lineu Asbahr	
Marco Augusto Siciliano (1)	
Nelson L.S.Pinto	
Ricardo Kern	
Sérgio Augusto de Arruda Camargo	
Valter Hernandez	
Vasco Gil de Almeida Santos (2)	
(1) Falecido em dezembro de 1985	
(2) Membro do Comitê até 1985	