

XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HIDRÍCOS DO NORDESTE

ESTIMATIVA DO ARMAZENAMENTO INICIAL MÁXIMO NECESSÁRIO PARA SUPORTAR CHEIAS DE DIFERENTES PERÍODOS DE RETORNO

Felix Eusébio Banze¹; Robinson Ploszai² & Heinz Dieter Fill³

RESUMO – Barragens são estruturas construídas transversalmente a um rio, tendo como objetivos, geração de energia elétrica, controle de cheias, entre outros. Para garantir sua segurança, ferramentas que permitam a previsão dos impactos fazem parte das rotinas de projeto, construção e operação destas. Neste trabalho foi realizada uma simulação das vazões afluentes máximas para diferentes períodos de retorno, vazões defluentes e o armazenamento baseando-se no método da curva de diferenças acumuladas (princípio de conservação da massa) na Barragem de Cahora Bassa para uma dada regra de operação. O objetivo é determinar o armazenamento inicial máximo necessário para suportar cheias de diferentes períodos de retorno. Para tal, foram utilizadas vazões naturais máximas diárias entre 1955-2012 obtidas dos registros da estação E-320, localizada na província de Tete em Moçambique. Os resultados encontrados permitiram concluir que, a vazão máxima calculada a partir da distribuição de Gumbel situa-se entre 15.600 e 30.200 m³/s, para períodos de retorno de 50 a 10.000 anos. A regra de operação proposta nesta pesquisa é válida para assegurar as cheias analisadas no estudo. Torna-se necessário considerar o armazenamento inicial máximo igual a 400.000 m³/s.dia para os períodos de retorno de 50, 100 e 1.000 anos. Reservatório vazio para 10.000 anos.

ABSTRACT – Dams are structures building across wide a river, and their objectives, the electric power generation, flood control, and others. To ensure their safety, skills that allow the forecast of these impacts are part of the project routines, building and operation of these enterprises. This work contains a study of maximum simulation natural flows for different return periods, diffluent flows and the storage based on the differences accumulative curve method (mass conservation principle) at Cahora Bassa Dam for an operational rule. The aim is to determine the maximum necessary initial storage to support floods for different return periods. For that, were used maximum natural daily flows between 1955-2012 obtained from gauges of the E-320 station, located at Tete province, in Mozambique. The results found allow concluding, the maximum calculated flow by Gumbel's distribution were between 15,600 and 30,200 m³/s, for return periods between 50 and 10,000 years. The operational rule proposed on this study is true to guarantee that flood analyzed. It's necessary to consider the maximum initial storage equal of 400,000 m³/s/day for 50, 100 and 1,000 years return periods. The null reservoir is considered for 10,000 years.

Palavras-chave – Vazão máxima, vazão de projeto, regras de operação.

1) Estudante de Mestrado da Universidade Federal de Paraná – felixbanze@gmail.com

2) Estudante de Mestrado da Universidade Federal de Paraná – ploszai@ufpr.br

3) Professor emérito da Universidade Federal de Paraná – heinzfill@yahoo.com

INTRODUÇÃO

Mais da metade dos recursos hídricos moçambicanos tem origem fora de seu território. Moçambique tem uma vulnerabilidade hídrica resultante da alta dependência do compartilhamento de seus recursos hídricos com países vizinhos. Por isso, torna-se importante a gestão das bacias hidrográficas e das reservas à montante do seu território, para realizar a prevenção contra enchentes (ENARHM, 2007).

A preocupação com a segurança de barragens começou a surgir após a ocorrência de alguns acidentes graves no passado, em especial nas décadas de 60 e 70. Conseqüentemente, a necessidade de estabelecer regras que regulamentam sua operação e construção, bem como a concepção de planos de emergência aumentou (ICOLD, 1995).

Uma das técnicas mais antigas para aumentar a disponibilidade hídrica e o atendimento das demandas por água consiste no represamento dos rios. Sendo assim, o projeto de uma barragem requer fundamentalmente a análise e aplicação correta de dois itens relevantes relacionados à segurança da barragem. Estes consistem nos estudos hidrológicos (vazão máxima de cheia e o volume de armazenamento necessário à regularização da vazão) e nos estudos hidráulicos utilizados no dimensionamento do sistema vertedor (ADAM, 2014).

O conhecimento da vazão máxima é necessário para o dimensionamento dos vertedores das barragens. É importante o dimensionamento correto do vertedor para que não seja superdimensionado (elevando o custo) ou subdimensionado (aumento do risco de ruptura). A coleta, processamento e análise dos dados tornam-se importante para a previsão das vazões afluentes e a definição das regras de operação dos vertedores, com a finalidade do controle das cheias. Tais regras determinam a mitigação de danos à jusante sem prejuízo para a definição de vazões defluentes, considerando a segurança da obra. Essas regras são caracterizadas pelas afluências e nível de armazenamento do reservatório.

Os hidrogramas de cheias representam uma estimativa da evolução temporal de vazões máximas ao longo do tempo, sintetizando o regime de extremos hidrométricos numa determinada região geográfica. Um dos métodos para se obter o hidrograma de cheias consiste em utilizar as curvas envoltórias dos maiores eventos de cheias ajustando estas, às vazões máximas por análise de frequência das cheias.

Assim, a determinação dos hidrogramas de projeto é realizada a partir das seguintes etapas: escolha de postos fluviométricos; levantamento, análise e consistência dos dados; escolha das distribuições de probabilidade; estimativas dos seus parâmetros; obtenção dos quantis de cheia para os períodos de retorno selecionados; análise de séries históricas e construção dos hidrogramas

adimensionais; obtenção da envoltória destes e finalmente o ajuste da envoltória aos quantis obtendo assim o hidrograma de projeto.

Dado o hidrograma de projeto pode-se então estimar para uma vazão defluente máxima, uma regra de operação definida e para um dado período de retorno o volume máximo inicial, necessário para assegurar que a operação não comprometa a segurança da barragem.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Bacia do rio Zambeze

O Zambeze é o principal rio de Moçambique, sendo o quarto maior da África em extensão, possuindo o maior caudal entre os rios africanos que desaguam no Índico. A sua bacia ocupa uma área de 1.390.000 km². Nasce nas montanhas de Kalene, cerca de 1.500 m de altitude, na fronteira entre a República do Congo e Zâmbia. O mesmo se dirige para Angola, depois para sul e leste ao longo das fronteiras de Namíbia e Botswana, Zâmbia e Zimbábwe. Finalmente passa por Moçambique, desaguando no Oceano Índico, totalizando um percurso de aproximadamente 2.700 km (JESSEN E SILVA, 2008).

2.2. A Barragem de Cahora Bassa

Situa-se na província de Tete, sendo o primeiro grande empreendimento hidroenergético construído no território Moçambicano. Seu reservatório possui uma capacidade máxima de armazenamento de 65×10^9 m³ e capacidade útil de 52×10^9 m³ (equivalente a 602.000 m³/s.dia) de acordo com a Figura 1. Possui uma área de inundação de 2.900 km², com 270 km de comprimento e 30 km de largura máxima. A evaporação anual média é da ordem de $4,3 \times 10^9$ m³.

A barragem está provida de sistemas de segurança e exploração constituídos por oito descarregadores de meio fundo, com capacidade total de evacuação de 12.800 m³/s e um descarregador de superfície automático, com capacidade máxima de descarga de 600 m³/s. Possui cinco grupos geradores com engolimento de 455 m³/s cada um para uma queda bruta da ordem de 103,5 m. Totalizando assim a capacidade máxima de evacuação do sistema em 15.665 m³/s, quando todas as cinco turbinas estiverem em operação (JESSEN E SILVA, 2008).

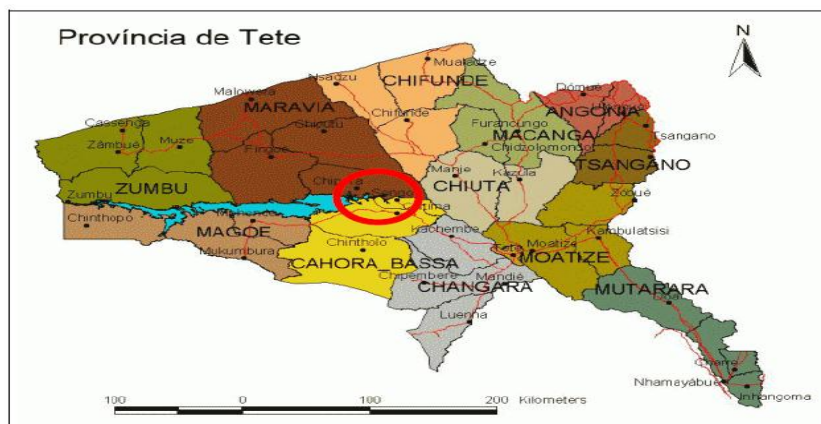


Figura 1 – Localização da barragem de Cahora Bassa em Songo (NIPPON E HCB, 2012).

2.3. Coleta de Dados e Preenchimento de Falhas

Para a determinação da vazão máxima na bacia do rio Zambeze, foram utilizadas séries naturais de vazão diárias obtidas da estação hidrométrica E-320. A mesma pertence à Direção Nacional de Águas (DNA), localiza-se na província de Tete nas coordenadas 16°09'S e 33°35'E, com altitude de 118 m. O período de observação foi de 58 anos (1955 a 2012). O preenchimento de falhas na análise hidrológica de eventos de vazões máximas tende a aumentar a incerteza da estimativa, diante disso, o preenchimento dessas foi baseado na regionalização hidrológica, amplamente discutida em Banze e Fil (2014).

2.4. Função de Distribuição de Probabilidade

Segundo Tucci (1993), uma função teórica de probabilidade é aquela que faz uma ponte entre a distribuição empírica (conhecida) e a distribuição populacional (a qual se deseja obter). Para Stedinger *et al.* (1993), as distribuições de probabilidade teóricas mais utilizadas em hidrologia na análise de eventos extremos são Gumbel, Log-Pearson tipo III, Log-Normal, Exponencial e Generalizada de Valores Extremos. Banze e Fill (2014) analisaram estas distribuições concluindo que a distribuição de Gumbel apresentou o melhor ajuste para a série histórica de máximas anuais na bacia do rio Zambeze.

Portanto a distribuição de Gumbel foi utilizada neste estudo para a estimativa da vazão máxima em diferentes tempos de retorno. Para verificar a aderência das vazões máximas, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de probabilidade. A função de densidade de probabilidade da distribuição de Gumbel é dada pela Equação (1):

$$f_X(x) = \frac{1}{\alpha} \exp \left[-\frac{x-\xi}{\alpha} - \exp \left(-\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad -\infty < x < \infty \quad (1)$$

Sendo ξ e α os parâmetros da distribuição. Estes foram estimados utilizando o método dos Momentos L como proposto por Stedinger *et al.* (1993).

A função acumulada de probabilidade é dada pela Equação (2):

$$F_X(x) = \exp \left[-\exp \left(\frac{x-\xi}{\alpha} \right) \right] \quad (2)$$

2.5. Tempo de Retorno

Segundo Naghettini e Pinto (2007), tempo de retorno é o valor esperado do intervalo de tempo entre eventos (falhas) consecutivos. Prova se que para eventos independentes é expresso em anos igual ao inverso da probabilidade que tal evento ocorra em um ano qualquer, considerando que o evento seja caracterizado por $X \geq x_T$ (exemplo: vazão igual ou maior que um valor x_T). Será dado pela Equação (3):

$$T_r = \frac{1}{1-F_X(x)} \quad (3)$$

Onde $F_X(x) = \text{Prob}(X \leq x)$ é a função acumulada de probabilidade dada pela Equação (2) para a distribuição de Gumbel.

2.6. Volume de Armazenamento Máximo

Uma das finalidades dos reservatórios é acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos, com o intuito de compensar as deficiências nos períodos de estiagens, atuando como regularizador das vazões naturais. O estudo de um reservatório de regularização exige o conhecimento de sua dimensão, vazões afluentes, demanda a ser suprida e das perdas que possam vir a ocorrer.

Outra finalidade é reter parte do volume afluente durante uma cheia reduzindo as vazões à jusante, liberando este volume após a passagem da onda de cheia.

Para determinar a maior capacidade útil de um reservatório suficiente para atender uma cheia de vários períodos de retorno (50, 100, 1.000 e 10.000 anos), no intervalo de 59 dias, foi realizada uma simulação atendendo o princípio de conservação de massa, utilizando o seguinte algoritmo:

$$S_0 = S_{inicial}$$

$$S(t)_{min} = \begin{cases} S(t-1) + Q_A(t) + Q_D(t) \\ S_{max} \end{cases} \quad (4)$$

Onde, $S_{inicial}$ é o volume inicial no tempo zero; $S(t)$ é o armazenamento no tempo t ; $Q_A(t)$ é o volume afluente no dia t e $Q_D(t)$ é o volume defluente no dia t . Os volumes afluentes e defluentes em m^3 são relacionados às vazões pela constante de 86.400 (número de segundos em um dia).

A regra de operação definida para responder as cheias de 50, 100, 1.000 e 10.000 anos é dada pela por:

$$X = \begin{cases} 2.800 \text{ se } S_{t-1} < 0,3 \times 10^6 \\ 5.000 \text{ se } 0,3 \times 10^6 < S_{t-1} < 0,4 \times 10^6 \\ 10.000 \text{ se } 0,4 \times 10^6 < S_{t-1} < 0,5 \times 10^6 \\ 15.000 \text{ se } 0,5 \times 10^6 < S_{t-1} < 0,595 \times 10^6 \\ q_t \text{ se } S_{t-1} > 0,595 \times 10^6 \end{cases} \quad (5)$$

O hidrograma de projeto determinado anteriormente pelo método das envoltórias para cada tempo de retorno foi utilizado como deflúvio afluente na simulação, para os períodos de retorno considerados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As principais estatísticas obtidas do estudo são: média igual a 6.570, Coeficiente de autocorrelação igual a 0,81, desvio padrão igual a 490 e coeficiente de assimetria igual a 1,02.

3.1. Aderência dos Modelos

Para realizar a análise de aderência foi utilizado o teste de Kolmogorov-Smirnov, onde a estatística do teste D é representada pela máxima diferença entre os valores de $F(x)$ teórico e empírico.

No caso $F(x)$ teórico é dado pela Equação (3) e $F(x)$ empírico é dado por m/N sendo m a ordem do valor de X na série observada. Esta estatística se for superior a um valor crítico revela pouca aderência da distribuição aos dados observados.

Assim, quanto menor for o valor de D , mais representativa será a distribuição teórica. O valor crítico de D é tabelado em função do tamanho da amostra e para $N > 40$ e nível de significância 0,05 vale $1,36/\sqrt{N}$ (NAGUETHINI E PINTO, 2007). Para $N = 58$ resulta $D_{crit} = 0,0178$. No caso da distribuição de Gumbel para a amostra disponível resultou em 0,076, ou seja, menor que D_{crit} . Assim a hipótese da distribuição de Gumbel não pode ser rejeitada.

Segundo Martins (2011) as distribuições de probabilidade Gumbel, são adequadas para estimar a vazão máxima para diferentes períodos de retorno. Neste trabalho não foram apresentadas as vazões máximas em períodos de retorno inferiores a 50 anos. Isto ocorreu devido os resultados revelarem um bom comportamento do reservatório, mesmo considerando o armazenamento inicial acima da metade de sua capacidade máxima útil. Sendo assim, os resultados das vazões máximas afluentes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Resultados da vazão máxima (m^3/s) estimada para diferentes períodos de retorno.

Distribuições	Método	Períodos de Retorno			
		50	100	1.000	1.0000
Gumbel	MML	15.600	17.500	23.900	30.200

A vazão máxima para estes períodos de retorno situa-se entre 15.600 m^3/s e 30.200 m^3/s para a distribuição de Gumbel. De acordo com Jessen e Siva (2008), a vazão máxima no período de retorno de 10.000 anos em Cahora Bassa, é da ordem de 30.000 m^3/s . Este registro praticamente coincide com o valor encontrado neste estudo.

Em Silva (2003), os resultados encontrados para o tratamento estatístico dos caudais afluentes a Cahora Bassa foram: 14.000, 17.000 e 28.000 m^3/s para os períodos de retorno de 50, 100 e 10.000 anos, respectivamente, próximos também aos valores encontrados no presente estudo.

3.2. Determinação do Hidrograma de Projeto

Para a determinação do hidrograma de projeto foram selecionadas as 10 maiores cheias (59 dias de duração), sendo obtidos os hidrogramas adimensionais para cada cheia. Foi traçada uma envoltória obtendo assim um hidrograma adimensional típico, conforme Figura 2. Este foi ajustado com a vazão

calculada para os períodos de retorno 50, 100, 1.000 e 10.000 anos, embasados na distribuição Gumbel, obtendo hidrogramas típicos dessas cheias. Os resultantes estão apresentados em Figura 3 e Figura 4.

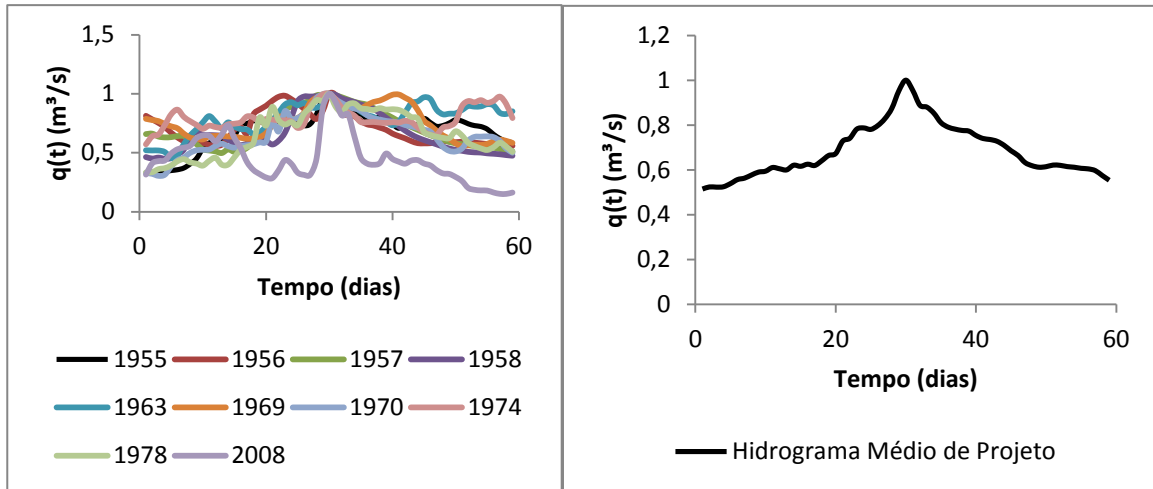


Figura 2 – Hidrogramas de Projeto para as cheias selecionadas e Hidrograma médio (Fonte: Os Autores, 2014).

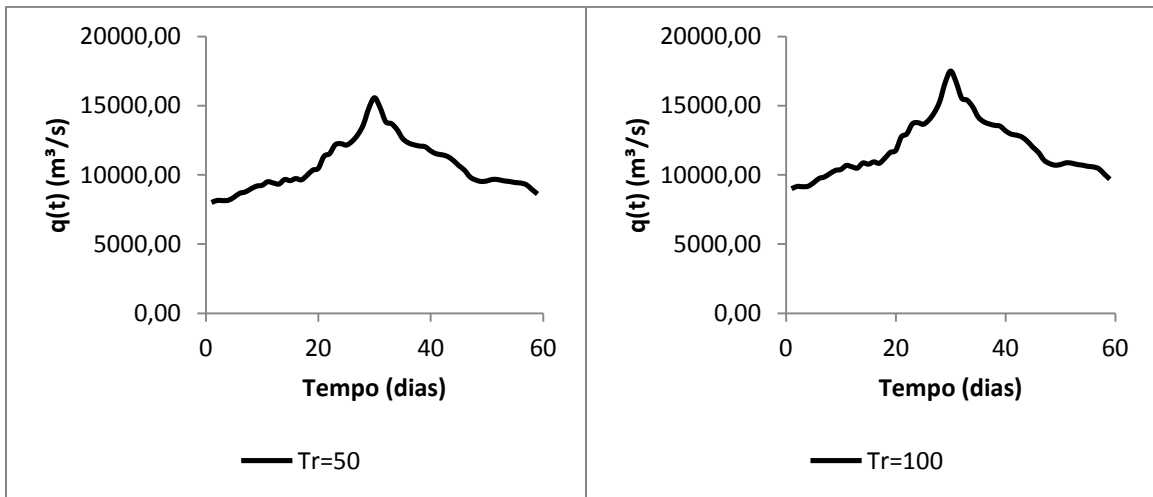


Figura 3 – Hidrogramas de Projeto para os períodos de retorno de 50 e 100 anos (Fonte: Os Autores, 2014).

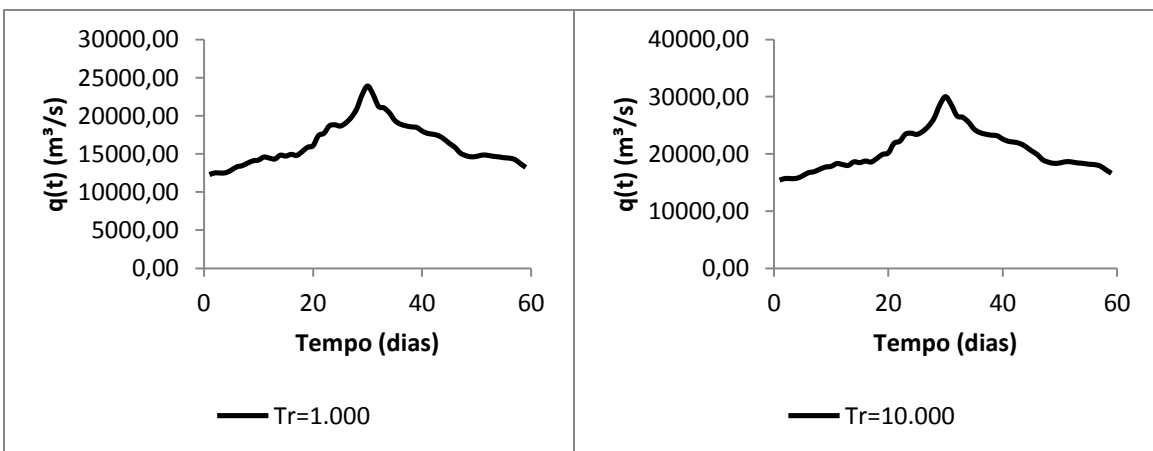


Figura 4 – Hidrogramas de Projeto para os períodos de retorno de 1.000 e 10.000 anos (Fonte: Os Autores, 2014).

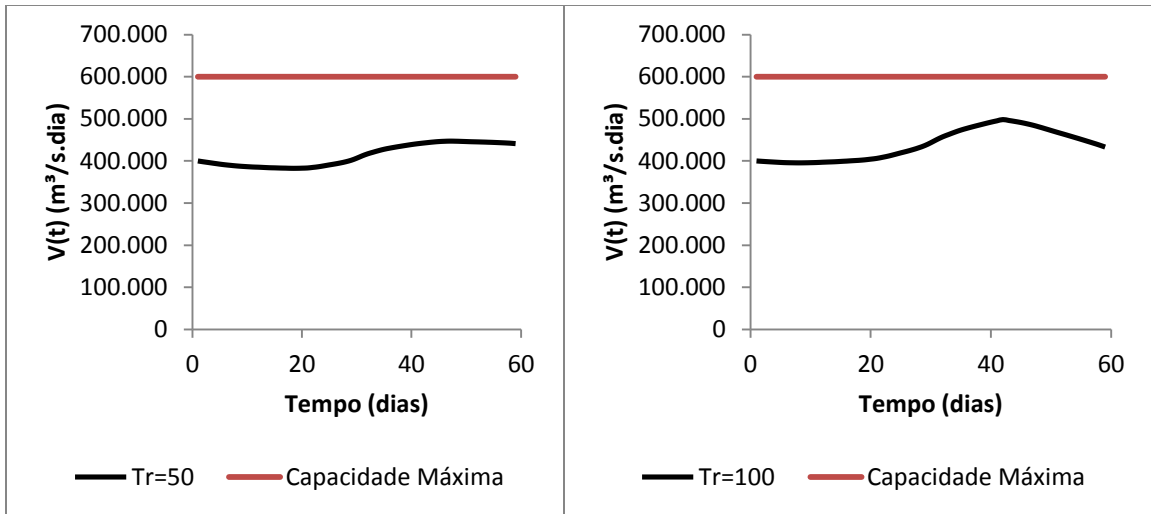


Figura 5 – Armazenamento inicial máximo (Fonte: Os Autores, 2014).

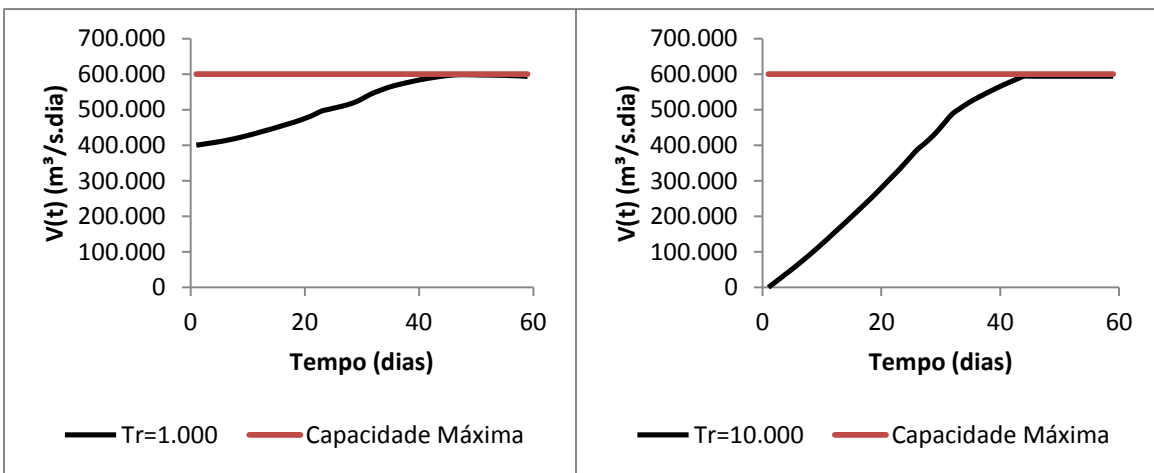


Figura 6 – Armazenamento inicial máximo (Fonte: Os Autores, 2014).

O armazenamento inicial a ser considerado na barragem de Cahora Bassa para assegurar uma cheia nos períodos de retorno de 50, 100 e 1.000 anos é da ordem de 400.000 m³/s.dia (equivalente a $34,56 \times 10^9$ m³). Este valor corresponde a 66,5% da capacidade máxima do reservatório. Para o período de retorno de 10.000 anos foi constatado que a operação deverá ser iniciada com o reservatório vazio. Para os períodos de retorno inferiores a 50 anos, a operação pode ser iniciada com o reservatório acima de 75% do seu armazenamento máximo. A regra de operação utilizada está sintetizada na Equação (5).

CONCLUSÕES

A vazão máxima local na bacia do rio Zambeze para os diferentes períodos de retorno em estudo oscila entre 15.600 a 30.200 m³/s. A regra de operação proposta é válida para o controle de cheias de períodos de retorno inferiores a 1.000 anos considerando um armazenamento inicial máximo igual a 400.000 m³/s.dia. Para um período de retorno de 10.000 anos, a operação deve iniciar com o reservatório vazio.

BIBLIOGRAFIA

ADAM, Atlas Digital das Águas de Minas - *Roteiro básico para o dimensionamento de pequenas barragens de terra no estado de MG*. 3^o edição. Disponível em: http://www.atlasdasaguas.ufv.br/exemplos_aplicativos/roteiro_dimensionamento_barragens.html Acesso em: 5 de maio de 2014.

BANZE, F. E.; FILL, H. D. O. A. (Em publicação). *Estimated of local maximum flow in watershed of Zambeze*. 6th International Conference on Flood Management. Setembro, 2014. São Paulo, Brasil.

ENARHM, Estratégia Nacional de Assistência para Recursos Hídricos em Moçambique (2007). *Fazer a Água Atuar para o Crescimento Sustentável e a Redução de Pobreza*. Agosto, 2007. AFTWR, Região Africana.

JESSEN, G.; SILVA, H. (2008). “*Gestão Hidrológica da Albufeira de Cahora Bassa em Períodos críticos (Cheias e Secas)*” - 5^o congresso de Luso - Moçambique de Engenharia 2^o Congresso de Engenharia de Moçambique, Songo-Mocambique, Setembro 2008.

ICOLD. International Commission of Large Dams. Dam Failures. *Statistical Analysis*. Paris: International Commission of Large Dams, 1995. Bulletin 99.

MARTINS, C. A. S.; ULIANA, E. M.; REIS, E. F. (2011). “*Estimativa da vazão e da precipitação máxima utilizando modelos probabilísticos na bacia hidrográfica do rio benevente*”. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer – Goiânia.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. (2007). *Hidrologia estatística*. Belo Horizonte: CPRM.

NIPPON, K.; HCB, Hidroelectrica de Cahora Bassa, Fevereiro (2012). *Estudo do Impacto Socio - Ambiental Projecto Cahora Bassa Central Norte*.

SILVA, H. (2003). “*O Impacto da Gestão da Albufeira de Cahora Bassa nos Domínios Social, Económico e Ambiental*” 3^o Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, Maputo 19-21 Agosto 2003.

STEDINGER, J. R.; VOGEL, R. M.; FOUFOULA, G. E. (1993). "Frequency analysis of extreme events-Chapter 18," Handbook of Hydrology, D. Maidment, ed., McGraw-Hill Book Co., New York, N.Y.

TUCCI, C. E. M. (1993). *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. EDUSP, Editora da UFRGS, ABRH, 952p.