

EFEITO AMORTECEDOR DO RESERVATÓRIO DE MANSO NA TRANSLAÇÃO DA ONDA DE CHEIA NA BACIA DO RIO CUIABÁ

Rafael Pedrollo de Paes¹ & João Luiz Boccia Brandão²

Resumo – As inundações periódicas na bacia hidrográfica do rio Cuiabá levaram a população a buscar meios para controlar as ocorrências de inundação, o que estimulou a construção da UHE Manso. O presente trabalho se propõe a avaliar a influência do reservatório de Manso na atenuação das cheias na bacia do rio Cuiabá, Mato Grosso. As três situações hidráulicas analisadas consideram os eventos extremos que ocorreram após a operação da usina na hipótese da inexistência do reservatório para o cálculo da translação da onda de cheia. Para tanto, o modelo hidrodinâmico CLiv foi utilizado. Entre os resultados, foi constatado que duas das ocorrências (2002 e 2004) não assumiriam grandes magnitudes mesmo sem a existência do reservatório. Entretanto, foi averiguado que uma das cheias (2006) atingiria as cotas de segurança a jusante, estipuladas pela Defesa Civil, e que o reservatório foi capaz de amortecê-la eficazmente. Apesar do amortecimento verificado, para que haja mitigação dos impactos de maneira racional, diversos outros cuidados devem ser tomados, em especial os relacionados ao planejamento para a ocupação apropriada das áreas de planície de inundação, a fim de que a segurança da população não dependa exclusivamente do reservatório.

Palavras-Chave – Hidráulica fluvial; simulação hidrodinâmica; controle de cheia.

FLOOD CONTROL EFFECT OF MANSO RESERVOIR IN THE FLOOD ROUTING IN CUIABA RIVER BASIN

Abstract – The constant floods in Cuiabá river basin had led population to seek ways to control the overflow occurrences, encouraging the construction of Manso hydroelectric powerplant. This study intends to evaluate the influence of the Manso reservoir on the attenuation of downstream flooding in Cuiabá basin, Mato Grosso state, Brazil. The three analyzed hydraulic situations consider the extreme events that had occurred after the powerplant operation in the case of non existence of the reservoir for the flood routing calculation. So, the hydrodynamic model CLiv was applied. Among the results, it was found that two of the occurrences (2002 and 2004) would not take large magnitudes even without the existence of the reservoir. However, it was examined that one of the floods (2006) would have reached the security limits in downstream basin, defined by the Civil Defense Authority, and that the reservoir was capable to control the flood. Despite the verified flood control, for the purpose of mitigating the impacts in wise manners, many other precautions must be taken, especially those related to planning for appropriate occupation in flood plain areas, so that population safety does not depend exclusively on the reservoir.

Keywords – Fluvial hydraulic, hydrodynamic model, flood control.

INTRODUÇÃO

A região metropolitana do Vale do Rio de Cuiabá assiste eventos cíclicos de enchente e estiagem ao longo do ano, consoante os períodos hidrológicos, que assim contribuem no estabelecimento da dinâmica fluvial da planície pantaneira. Pela frequência desses fenômenos, em especial os que atingem a população residente nas proximidades rios, a Superintendência de Defesa

¹ Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental / FAET / UFMT – rafael_paes1@yahoo.com.br.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento / EESC / USP – jlbb@sc.usp.br.

Civil de Mato Grosso (SUDEC/MT) considerou as experiências de áreas alagáveis a montante do Pantanal e estipulou níveis de referência (alerta, emergência e calamidade) a diversos rios do estado em localidades com potencial de inundação. Esses limites se tornaram o principal indicador de segurança para as comunidades da BHC no que diz respeito às enchentes. Na capital do estado esses níveis de referência e suas cotas ortométricas correspondentes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis de segurança do rio Cuiabá em Cuiabá (adaptado de SUDEC/MT e DE PAES, 2011)

Nível de segurança	Nível linimétrico (m)	Cota ortométrica (m)
Alerta	8,50	147,86
Emergência	9,50	148,86
Calamidade	11,00	150,36

Desde o início dos registros fluviométricos no rio Cuiabá, em 1933, o nível de água esteve por 19 vezes acima da cota de alerta, seis acima do nível de emergência. Shirashi (2003) constatou que a probabilidade de ocorrência de alturas de água acima dos níveis de alerta e de emergência eram, até então, a cada 5 e 15 anos, respectivamente. Para evitar maiores danos, a CARTA GEOTÉCNICA DE CUIABÁ (1990) definiu que os terrenos abaixo da cota ortométrica 150 m são considerados *planície de inundação do rio Cuiabá*. Entre outras recomendações, esses terrenos não devem ser ocupados por atividades de longa duração, como para edificações habitacionais.

O reservatório do Aproveitamento Múltiplo de Manso (APM Manso) foi construído com diversos intuítos, entre eles o da produção de energia elétrica, pela UHE Manso (210 MW), e o de regularizar as vazões do rio Manso, importante afluente do rio Cuiabá. A área inundada na cota máxima de trabalho é de 387 km², volume de 7,3 km³. Sua operação ocorre desde novembro de 1999 (FURNAS, 2002).

Neste trabalho, o efeito amortecedor do reservatório de Manso será analisado tendo em conta o armazenamento do reservatório e a translação da onda de cheia no percurso fluvial da UHE Manso, passando pelos municípios de Rosário Oeste e Acorizal, até Cuiabá. Para isso, foram escolhidos três eventos críticos observados na bacia hidrográfica do rio Cuiabá (BHC) que ocorreram após a construção do APM Manso; são as cheias de 2002, 2004 e 2006. Com exceção da ocorrência de fevereiro de 2010, essas foram as maiores cheias em Cuiabá desde as operações da UHE Manso. Apesar de o nível de água em 2010 ter sido maior em Cuiabá, os dados necessários para a simulação não estavam disponíveis em tempo para que a investigação fosse realizada.

SIMULAÇÃO HIDRODINÂMICA

A bacia do rio Cuiabá integra a região hidrográfica do Alto Paraguai. Sua área total é de aproximadamente 41.000 km², a qual é dividida em cinco sub-bacias: Manso, Alto Cuiabá, Médio Cuiabá, Coxipó e Baixo Cuiabá. O rio Cuiabá é formado a partir da confluência dos rios Cuiabazinho e Manso, onde se localiza a UHE Manso. Treze municípios compõem total ou parcialmente a BHC, os quais integram a região metropolitana do Vale do Rio Cuiabá. Entre os mais influenciados pelas cheias do rio Cuiabá são citados Rosário Oeste, Acorizal, e os dois mais populosos do estado: Cuiabá e Várzea Grande, que totalizam 800 mil habitantes segundo o IBGE.

O trânsito da onda de cheia efluente do reservatório foi simulado hidraulicamente com a aplicação do modelo hidrodinâmico unidimensional CLiv, desenvolvido pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica (FCTH, 2003). Sua aplicação possibilita obter dados de linha de água em canais naturais ou artificiais, em regime hidráulico permanente ou transitório, como a propagação de ondas de cheia, desde que de superfície livre. Para a simulação de modelos transitórios, o programa conta com o esquema implícito de Pressmann. As equações que permitem resolver a modelagem hidrodinâmica compõem o que é conhecido como *Equações de Saint Venant*. Elas são a *equação da continuidade*, ou, conservação de massa (Eq. 1) e da *quantidade de movimento* (Eq. 2).

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \quad \text{Eq. 1}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g.A \frac{\partial y}{\partial x} = g.A.(S_0 - S_f) \quad \text{Eq. 2}$$

Q = vazão [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]; A = área da seção molhada [m^2]; x = distância no sentido longitudinal [m]; t = tempo [s]; q = vazão por unidade de largura de contribuição lateral [$(\text{m}^3.\text{s}^{-1}).\text{m}^{-1}$]; g = aceleração da gravidade [$\text{m}.\text{s}^{-2}$]; y = lâmina de água [m]; S_0 = declividade do canal [$\text{m}.\text{m}^{-1}$]; S_f = declividade da linha de atrito [$\text{m}.\text{m}^{-1}$].

A alimentação do modelo hidrodinâmico foi baseada em dados geométricos e hidráulicos. Os dados geométricos consistem nas informações das seções topobatimétricas ao longo do canal estudado. Já os dados hidráulicos estão relacionados com os hidrogramas que definiram as condições de contorno interna e externas de montante e de jusante.

As principais informações hidráulicas dizem respeito aos hidrogramas de estações fluviométricas específicas no trajeto APM Manso-Cuiabá, que fornecem as séries históricas de vazão. Três estações foram consultadas: uma no rio Manso, uma no rio Cuiabazinho e uma no rio Cuiabá. A busca por registros permitiu a obtenção de informações simultâneas dessas estações entre os anos de 1999 (início da operação da usina) a 2009, com poucas falhas. Em seguida, foram selecionados os três maiores eventos desta série, e construídos os hidrogramas nas estações mencionadas. Como registros eram quase sempre diários, ou de no máximo três vezes por dia (7h, 12h e 17h), os hidrogramas passaram por processo de discretização linear horária.

De modo a simular a inexistência do efeito amortecedor do reservatório, os dados de afluência foram utilizados para alimentar o modelo hidrodinâmico. Foram mantidas as demais características de cada cheia, entre elas o hidrograma do rio Cuiabazinho (condição de contorno interna) e a vazão específica da bacia incremental. Como condição de contorno externa de jusante foi utilizada a curva-chave em Cuiabá, conforme Eq. 3 e Eq. 4, utilizada por Eletrobrás Furnas desde o início das operações da UHE Manso.

$$Q = 78,0306(\text{NA}+1,17)^{1,5618} \text{ se } -0,30 \text{ m} < \text{NA} < 2,64 \text{ m} \quad \text{Eq. 3}$$

$$Q = 59,975(\text{NA}+1,56)^{1,6391} \text{ se } \text{NA} \geq 2,64 \text{ m} \quad \text{Eq. 4}$$

Q = vazão [$\text{m}^3.\text{s}^{-1}$]; NA = nível de água lido em régua linimétrica [m].

Como mencionado, o modelo CLiv também foi carregado com os dados geométricos relativos às seções topobatimétricas do canal estudado. Eles foram obtidos por meio do PROCAD – Programa Nacional de Cooperação Acadêmica, em parceria entre a USP e a UFMT. Foram utilizados neste trabalho 13 seções topobatimétricas entre a estação fluviométrica da UHE Manso e o município de Cuiabá, ao longo de 285 km.

Existe vasta área entre o APM Manso e o município de Cuiabá. Isso dá importância à contribuição da bacia intermediária, que deve ser adicionada à efluência do reservatório de Manso na operação do modelo hidrodinâmico. Com esse fim, foi calculada a *vazão específica da bacia incremental*, representada em termos de vazão por unidade de comprimento do rio Cuiabá. A vazão específica incremental, relativa à zona de influência da estação Cuiabá, tem início a partir das estações fluviométricas dos rios Manso e Cuiabazinho, e termina na estação localizada a jusante do sistema estudado, em Cuiabá. A Figura 1 ilustra a parte da bacia do rio Cuiabá de modo a representar as zonas de influência dessas estações fluviométricas, bem como a localização de alguns municípios banhados pela BHC.

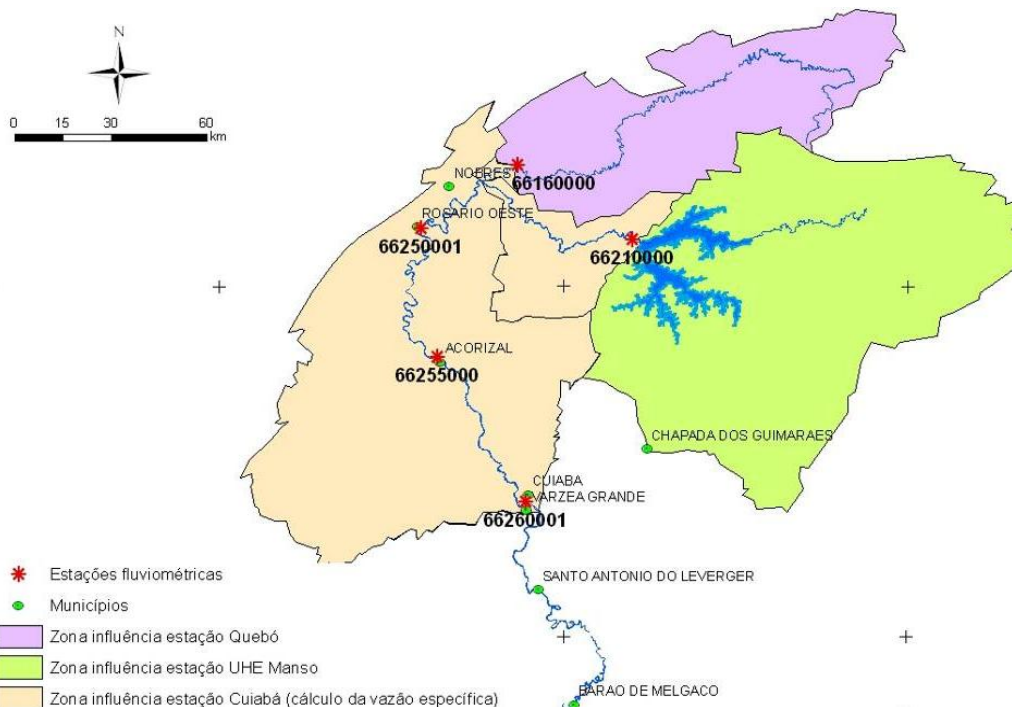


Figura 1 - Zonas de influência das estações fluviométricas da BHC

A vazão específica relativa a cada uma das três cheias foi encontrada pela Eq. 5. Para tanto, o tempo de percurso entre a estação fluviométrica da UHE Manso e Cuiabá foi considerado 48h, conforme estimado por SILVA e BRAGA (2000); e o do rio Cuiabazinho até Cuiabá 24h.

$$Q_{\text{espec. BMC}} = \frac{\sum [Q_{\text{Cbá.t}} - (Q_{\text{Quebó.t-24h}} + Q_{\text{UHE.t-48h}})]}{D_{\text{UHE Manso - Cbá}}} \quad \text{Eq. 5}$$

$Q_{\text{espec. BMC}}$ = Vazão específica da área intermediária entre a UHE Manso e Cuiabá relativa à sub-bacia do Médio Cuiabá [$L \cdot s^{-1} \cdot km^{-1}$]; $Q_{\text{Cbá.t}}$ = Vazão registrada na estação fluviométrica Cuiabá no tempo “t” [$m^3 \cdot s^{-1}$]; $Q_{\text{Quebó.t-24h}}$ = Vazão na estação Quebó no dia anterior (t - 24h) [$m^3 \cdot s^{-1}$]; $Q_{\text{UHE.t-48h}}$ = Vazão efluente ao APM Manso com relação a dois dias anteriores (t - 48h) [$m^3 \cdot s^{-1}$]; $D_{\text{UHE Manso - Cbá}}$ = Distância entre as estações fluviométricas da UHE Manso e Cuiabá, pelo rio principal, equivalente a 285,58 km.

Na calibração do modelo hidrodinâmico foram aferidos os resultados de vazões calculadas frente à alteração dos principais parâmetros do CLiv para analisar sua sensibilidade em cada uma das cheias. Foram realizadas quatro análises principais para a mensuração da aderência das curvas: (i) Comparação de picos entre os hidrogramas observados nas estações fluviométricas e calculados pelo modelo matemático através do erro porcentual da vazão de pico (EPVP); (ii) Erro quadrático relativo médio (EQRm), que prioriza valores máximos do hidrograma; (iii) Coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe; e (iv) Comparação visual dos hidrogramas observados e calculados. A Tabela 2 diz respeito aos valores obtidos pelas análises dos hidrogramas observados e calculados para a estação fluviométrica de Cuiabá, a mais distante entre as analisadas.

Tabela 2 - EPVP, EQRm e Nash-Sutcliffe entre os hidrogramas observados e calculados

Cheia	Ano	EPVP (%)	EQRm (%)	Nash-Sutcliffe
1	Mar/2002	12,80	11,20	0,65
2	Mar/2004	14,19	4,70	0,57
3	Abr/2006	11,06	1,30	0,54

RESULTADOS

A calibração pelo processo de tentativa e erro foi de fácil execução dentro das condições possíveis de calibração manual. Os parâmetros que melhor repercutiram foram a rugosidade de Manning e a Qespec.BMC. Os valores atribuídos para cada cheia estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Rugosidade de Manning e vazão específica aplicados à simulação

Cheia/ Parâmetro	Mar 2002	Mar 2004	Abr 2006
Rugosidade de Manning	0,06	0,06	0,06
Qespec.BMC (L.s ⁻¹ .km ⁻¹)	1791,1	1885,7	2508,8

Para representar a vazão que escoaria caso o APM Manso não existisse serão comparadas as informações relativas à afluência e à efluência do reservatório. Já os resultados da simulação hidrodinâmica estão dispostos em cota ortométrica atingida pelo nível de água. Eles são apresentados paralelamente aos limites de segurança definidos pela SUDEC/MT a cada município.

Caso 2002

O gráfico sobre o amortecimento real do reservatório está na Figura 2. Os hidrogramas ao longo do percurso fluvial, de acordo com o trânsito da onda de cheia, estão nas Figuras 3 a 5.

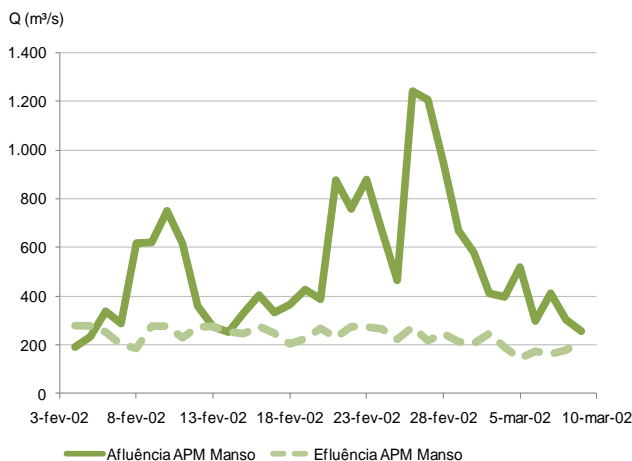


Figura 2 - Afluência e efluência no reservatório (2002)

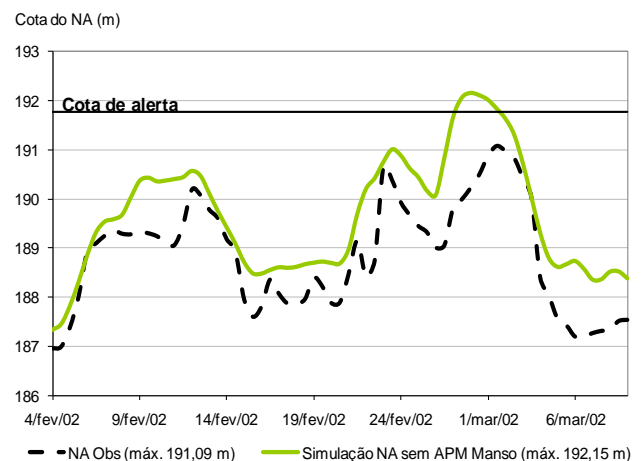


Figura 3 - Cotas de Rosário Oeste (2002)

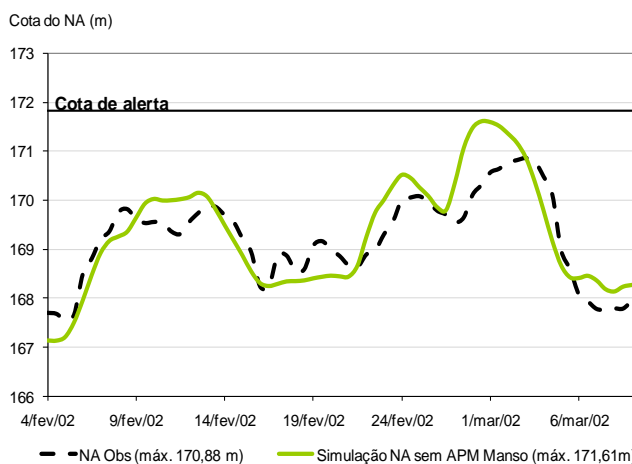


Figura 4 - Cotas de Acorizal (2002)

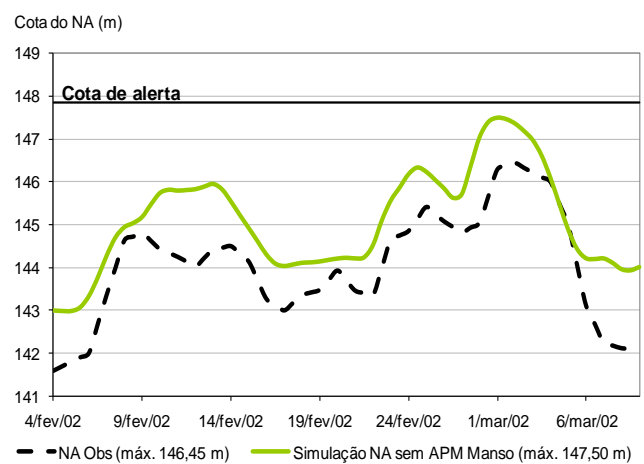


Figura 5 - Cotas de Cuiabá (2002)

Ficou evidente que o amortecimento do reservatório foi suficiente para eliminar o pico a máxima afluência. A redução de vazão no rio Manso foi de 1.243 m³/s, para 274 m³/s. Quanto às simulações hidrodinâmicas da inexistência do reservatório, foi apontado que o nível de alerta teria sido ultrapassado, durante curto período, em até 0,38 m no município de Rosário Oeste. Os níveis de água teriam se mantido pouco abaixo desse limite nos municípios de Acorizal e Cuiabá.

Caso 2004

A comparação entre a afluência e a efluência no reservatório e o resultado do trânsito da onda de cheia para a ocorrência de 2004 estão apresentados nas Figuras 6 a 9.

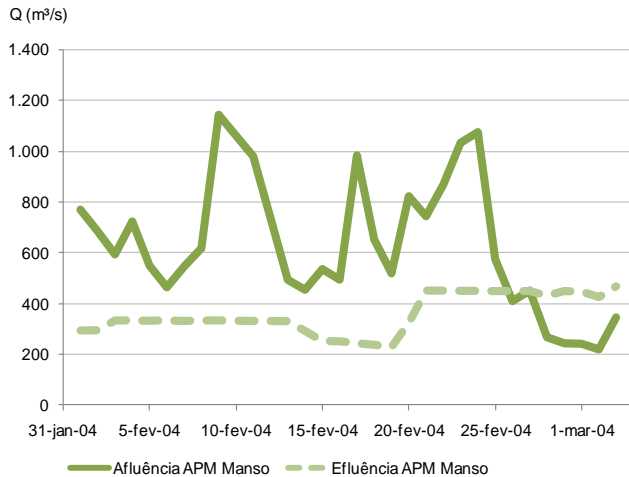


Figura 6 - Afluência e efluência no reservatório (2004)

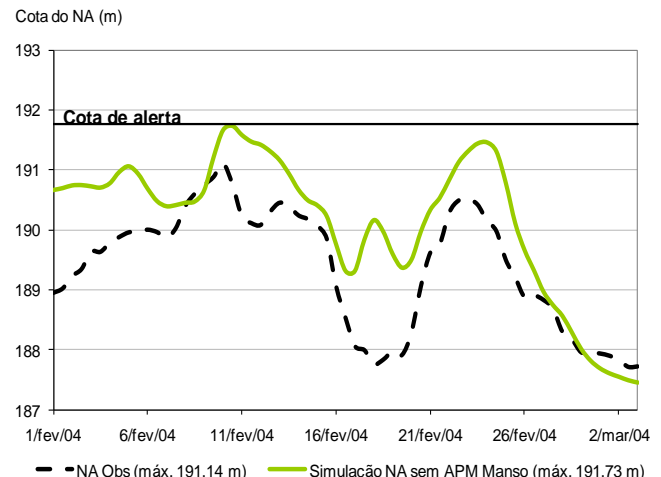


Figura 7 - Cotas de Rosário Oeste (2004)

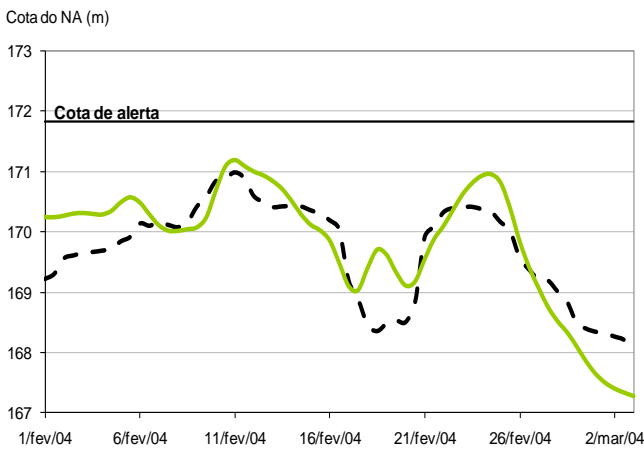


Figura 8 - Cotas de Acorizal (2004)

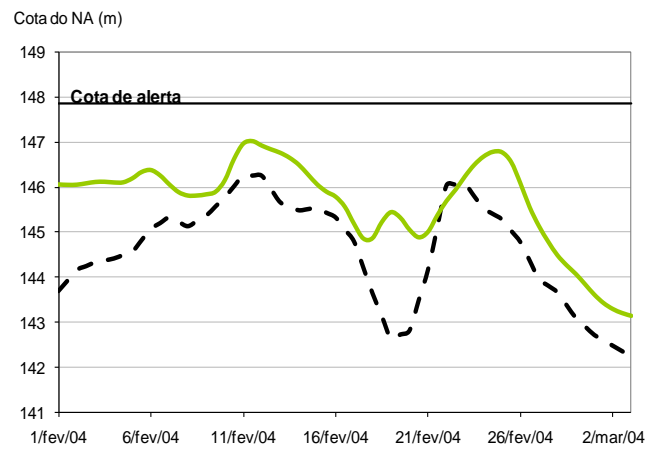


Figura 9 - Cotas de Cuiabá (2004)

O amortecimento da cheia ocorreu de modo semelhante ao caso anterior: houve constância na descarga do reservatório, e redução substancial da máxima. Pelos gráficos da simulação hidrodinâmica é possível observar dois picos maiores. Isso sugere que o hidrograma do rio Cuiabá tenha adquirido características do rio Cuiabazinho, importante contribuinte. Os valores máximos observados permaneceram abaixo da cota de alerta, mesmo em Rosário Oeste, onde o nível não atingiria esse limite por diferença de 0,04 m.

Caso 2006

A cheia de 2006 foi diferente das anteriores, pois foi suficiente para alarmar boa parte das comunidades que habitam a BHC. Em razão do excesso de chuva em toda a bacia, em especial na sub-bacia de Manso, houve acúmulo excessivo de água no reservatório, que seguindo sua regra operacional, precisou verter grandes quantidades de água, com perspectivas de aumento da efluência nos dias seguintes. Com o potencial de amortecimento reduzido, a ocorrência da cheia ficou diretamente condicionada pela pluviosidade a montante, que já estava elevada. Felizmente, devido à diminuição da precipitação nos dias seguintes, os níveis de água baixaram sem maiores prejuízos. Os resultados estão apresentados nas Figuras 10 a 13.

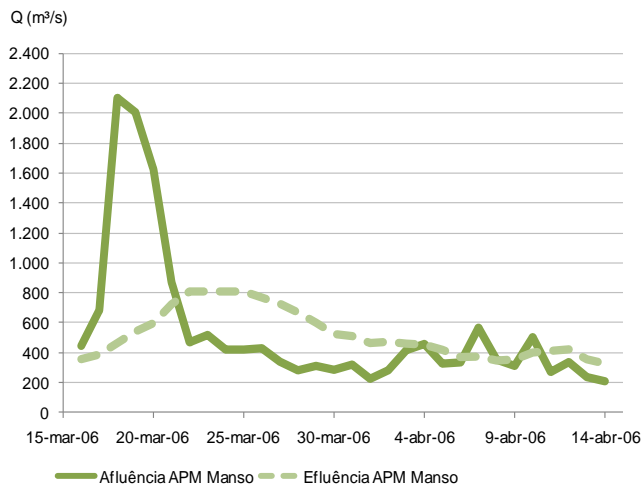


Figura 10 - Afluência e efluência no reservatório (2006)

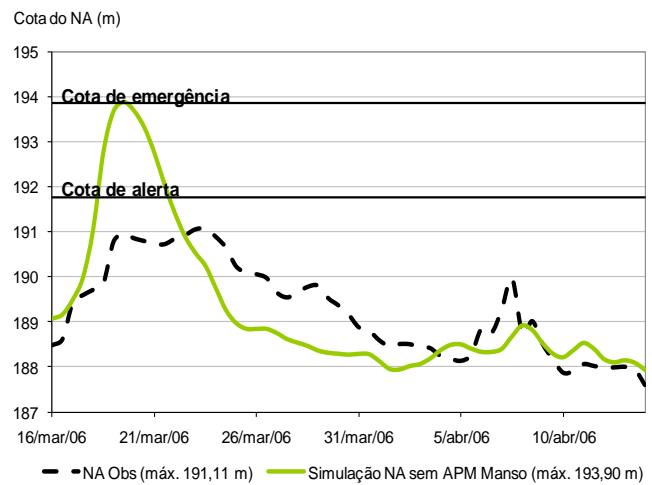


Figura 11 - Cotas de Rosário Oeste (2006)

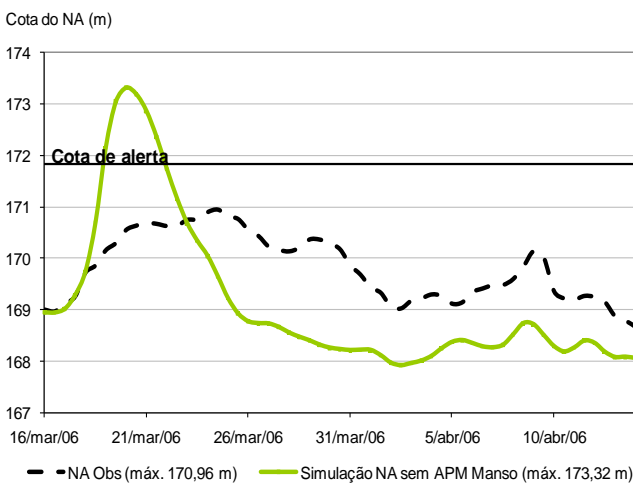


Figura 12 - Cotas de Acorizal (2006)

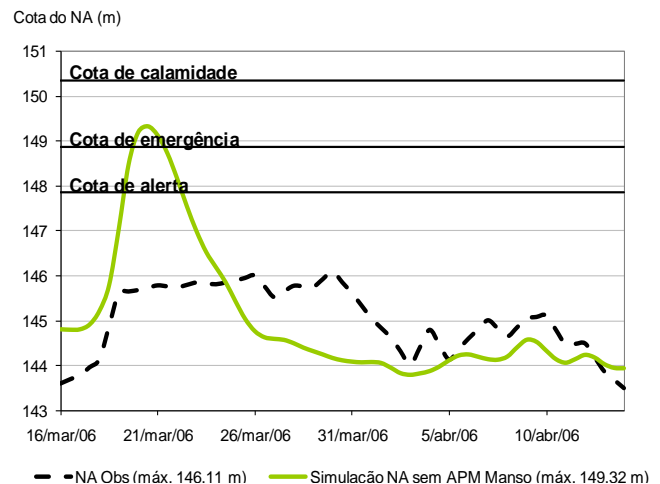


Figura 13 - Cotas de Cuiabá (2006)

O amortecimento propiciado pelo reservatório reduziu a máxima em 62%. Nas três cidades o nível de água ultrapassaria a cota de alerta, e excederia ainda a cota de emergência em Cuiabá. Comparados com a série histórica fluviométrica, os cálculos apontaram que caso o APM Manso não existisse a BHC seria testemunha de uma cheia proporcional às maiores já registradas na bacia.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É importante frisar que mesmo o alcance dos atuais níveis de alerta resultam em inundação em habitações instaladas na área de várzea. Considerando que a definição dessas cotas é de 1974, e a elevação do crescimento populacional, é possível que seus valores estejam desatualizados. Desde o funcionamento da UHE Manso não houve extravasamento da calha do rio Cuiabá nos três municípios estudados, embora o tenha havido em outras localidades, como em Barão de Melgaço. Por vezes, com níveis de água menores, o rio Cuiabá provoca o remanso de tributários urbanos, que por sua vez atingem moradias ribeirinhas em Cuiabá e Várzea Grande.

As simulações de 2002, 2004 e 2006 apontam significativa redução dos níveis de água do rio Cuiabá nas três seções analisadas. Nos anos de 2002 e 2004 provavelmente não haveria inundações que provocassem grandes prejuízos, ainda assim, o amortecimento proporcionado pelo reservatório foi suficiente para eliminar eventuais ocorrências. Diferentemente, a cheia de 2006 configurou verdadeiro teste aos responsáveis pela segurança dos habitantes da bacia, tanto no quesito de mobilização dos entes públicos, que envolveu as três esferas governamentais, quanto da operação do APM Manso. Na época, representantes públicos foram à imprensa dar instruções sobre como

proceder em caso de inundação. O sobreaviso gerado não pode ser considerado de todo inútil. Ele advém especialmente do fato de que pela primeira vez o reservatório exerceu o seu papel de amortecer as cheias na bacia do rio Cuiabá com forte influência, e, por isso, o seu desempenho foi questionado pela população.

A apreciação dos resultados indica que o reservatório de Manso tem importante papel na atenuação de enchentes na BHC, pelo menos até o município de Cuiabá, e que muitas cheias podem ser evitadas em decorrência do seu amortecimento.

Com a justificativa da atenuação das inundações em função do reservatório, a calha maior do rio Cuiabá passou a sofrer forte pressão exercida pela especulação imobiliária para ocupar a margem fluvial. Todavia, De Paes e Brandão (2011) constataram que em algumas situações o APM Manso não mantém o nível de água abaixo das cotas de segurança, como na cheia de janeiro de 1995, que resultou em grandes prejuízos, os quais ainda existiriam se o APM Manso já estivesse instalado.

De maneira sucinta, o APM Manso é capaz de aumentar o tempo entre duas grandes inundações, e, portanto reduzir a frequência desses acontecimentos. No entanto, essa capacidade é limitada pelo volume de espera do reservatório e pela vazão lateral que pode advir da vasta área incremental. Assim, em algumas circunstâncias as inundações se tornam inevitáveis.

Em síntese, o que não é racional é esperar que todos os problemas sejam resolvidos unicamente pelo amortecimento proporcionado pelo reservatório da UHE Manso sem que sejam tomadas outras medidas, sejam elas de cunho estrutural ou de planejamento, e que objetivem a ocupação apropriada do solo e a mitigação dos impactos à população.

REFERÊNCIAS

- CARTA GEOTÉCNICA DE CUIABÁ. (1990) Universidade Federal de Mato Grosso – UFMT / Prefeitura Municipal de Cuiabá. *Carta Geotécnica de Cuiabá – Módulo I. Cuiabá, MT.*
- DE PAES, R. P. (2011). *Análise do escoamento hidrodinâmico da vazão efluente do reservatório da UHE Manso na bacia hidrográfica do rio Cuiabá, Mato Grosso.* Dissertação de Mestrado pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento: EESC/USP. São Carlos, SP.
- DE PAES, R. P.; BRANDÃO, J. L. B. (2011). Simulação de amortecimento e translação de onda de cheia em inundações na bacia do rio Cuiabá, Mato Grosso. In: *Anais do XL Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola.* Cuiabá, MT.
- FCTH (2003) - Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica.. *CLiv – Software para simulação de escoamentos em condutos livres: manual do usuário.* Universidade de São Paulo, São Paulo, 109p. Disponível em: <http://www.fcth.br/pub/software/manual_cliv.pdf>. Acesso em 17 mar 2010.
- FURNAS (2002). Furnas Centrais Elétricas S. A. Aproveitamento Múltiplo Manso - *Memória técnica.* Rio de Janeiro - RJ.
- MATO GROSSO. Superintendência da Defesa Civil do estado de Mato Grosso - SUDEC/MT. Disponível em: <<http://www.defesacivil.mt.gov.br/default.aspx>>. Acesso em 27 julho 2010.
- SHIRASHI, F. K. (2003). *Avaliação dos efeitos da construção da APM Manso no controle das cheias nas áreas urbanas das cidades de Cuiabá e Várzea Grande - MT.* Tese de Mestrado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: COOPE/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ.
- SILVA, D. L. M.; BRAGA, R. S. (2000). Sistema de monitoramento hidrológico durante a fase de enchimento do reservatório do APM Manso. In: *Anais do I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro Oeste.* Brasília, DF.