

## IMPACTOS DA QUALIDADE DA MEDIÇÃO DE NÍVEIS D'ÁGUA NA OPERAÇÃO HIDRÁULICA DE RESERVATÓRIOS

*Homero Buba<sup>1</sup> & Anderson Nascimento de Araujo<sup>2</sup>*

**RESUMO** – Na operação hidráulica de reservatórios em tempo real, é imprescindível a determinação dos volumes armazenados, os quais dependem fundamentalmente do monitoramento dos níveis d'água, a partir dos quais pode-se estimar o armazenamento através das relações “cota x volume” (reservatórios profundos), ou através de outros métodos, para casos de reservatórios rasos com sensível efeito de remanso. Erros neste processo influenciam tanto o cálculo das afluências por balanço hídrico quanto a determinação das defluências resultantes dos processos de decisão (aplicação de regras operativas em sistemas de suporte de decisões). Neste trabalho demonstra-se através de uma análise formal, o efeito dos erros de avaliação de níveis d'água na operação hidráulica de reservatórios, propondo-se um índice  $\tau$  (tau) de sensibilidade, para comparação entre reservatórios de tamanhos diversos situados em diferentes bacias hidrográficas. Apresenta-se o caso prático do reservatório de Salto Caxias (UHE Governador José Richa, 1.240 MW), onde a avaliação do nível médio do reservatório é feita através da leitura simultânea de três linímetros de precisão, descrevendo-se métodos empregados na aferição e processamento das leituras e a melhoria de qualidade obtida no cálculo da vazão afluente.

**ABSTRACT** – In real time reservoir operation is essential to determine the storage, what is routinely made via water level readings using level versus storage relationships (deep reservoirs) or methods that consider backwater effects and channel storage (shallow reservoirs). Errors in this process are propagated to the inflow calculations, as well to the outflows decisions via the application of operation rules or DSS (Decision Support Systems). These errors are formally treated, proposing a sensibility index  $\tau$  (tau) for comparing reservoirs of different sizes in different watersheds. A practical case for Salto Caxias reservoir in Iguazu River Basin (South Brazil) is presented where the reservoir mean level is evaluated through the simultaneous readings of automatic precision water level stations installed in three distinct places, describing methods applied in calibration and measurement processing. The quality enhancement in short term inflow calculations is also presented.

**Palavras-Chave** – operação hidráulica, erros em medição de níveis d'água, ondas em reservatórios.

---

<sup>1,2</sup> Companhia Paranaense de Energia - COPEL, R. José Izidoro Biazetto, 158, Mossunguê, Bl. A, CEP 81.200-240, Curitiba/PR. Fone: (41) 3331-3326 - Fax: (41) 3331-3170, e-mail: homero@copel.com; anderson.araujo@copel.com.

## INTRODUÇÃO

A qualidade da operação hidráulica pode ser definida pelo grau de aderência a princípios de operação tacitamente aceitos por ampla maioria de projetistas e operadores de reservatórios, quais sejam:

- 1º. “A segurança da barragem é fundamental”;
- 2º. “Não causar efeitos piores na área de influência do reservatório do que aqueles que seriam observados em condições naturais”;
- 3º. “Se possível, minimizar efeitos danosos na área de influência do reservatório”.

Os “efeitos piores” do segundo princípio geralmente estão relacionados ao aumento da duração e do pico das cheias a jusante, às taxas de variação de vazão defluente maiores que as taxas de variação das vazões naturais e aos efeitos de remanso ocasionados pelo reservatório em áreas não desapropriadas a montante.

Em caso de conflito entre os princípios, pois nem sempre eles podem ser atendidos simultaneamente, por motivos óbvios, vale sempre o primeiro: a segurança da barragem.

Para atender aos princípios de operação são aplicados métodos de operação hidráulica envolvendo medidas técnicas e administrativas que garantam um grau de segurança aceito como adequado. Estes métodos são tão mais simples quanto maior for a simplicidade das estruturas de descarga (vertedores) dos reservatórios, tendo por caso limite os vertedores sem comportas ou dispositivos móveis de controle, onde a operação hidráulica se dá de forma totalmente automática, regida unicamente pelas curvas de descarga dos descarregadores.

Em geral a adequação de um método e seus parâmetros pode ser verificada através de simulações em computadores envolvendo a “cheia de projeto” e cheias obtidas a partir dos registros históricos de postos hidrométricos. Durante a operação hidráulica em tempo real uma das principais dificuldades na implementação dos métodos definidos na fase de planejamento se refere às imprecisões advindas das dificuldades de previsão das vazões afluentes e de avaliação dos níveis dos reservatórios e conseqüentemente dos seus volumes armazenados (Buba, 1993).

Este trabalho desenvolve o tema sob o aspecto das dificuldades de medição dos níveis e suas conseqüências, bem como apresenta a recente evolução obtida para o reservatório de Salto Caxias, o último da cascata do rio Iguaçu, cuja operação hidráulica se reflete diretamente no vale a jusante.

## BALANÇO HÍDRICO

Tanto nos métodos de operação hidráulica tipo “regra fixa”, amplamente utilizados no setor elétrico nacional, como nos métodos que se baseiam em otimizar uma função objetivo através de programação matemática (Buba, 1989), a relação fundamental para descrever o comportamento de reservatórios é a equação da continuidade, ou de conservação de massa, também conhecida por “balanço hídrico”, aplicada ao “volume de controle” (Daily e Harleman, 1966) correspondente ao reservatório. Neste caso podemos definir o volume de controle como sendo aquele volume delimitado pelo fundo do reservatório, por sua superfície livre e por estruturas de contenção, como barragens e diques. Ao contrário dos problemas clássicos de mecânica dos fluidos, onde o volume de controle é fixo no espaço e no tempo, este volume varia com o próprio nível de água no reservatório. Isto, no entanto, não traz dificuldades para as aplicações práticas.

Fazendo o balanço dos volumes de água que entram e saem do volume de controle em um determinado intervalo de tempo  $\Delta t$ , temos:

$$Q_a = Q_d + \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (1)$$

onde:

$Q_a$  é a vazão afluyente ao reservatório;

$Q_d$  é a vazão defluyente do reservatório.

Na prática de operação, esta equação geralmente é utilizada de forma simplificada, com a vazão defluyente sendo a soma das vazões vertidas, turbinadas e retiradas por bombeamento. A evaporação pela superfície livre, a precipitação direta, as trocas com o lençol freático e percolação pelas barragens e fundações não são consideradas explicitamente. O que se obtém é uma vazão afluyente ao volume de controle na qual já está considerada a diferença entre a precipitação direta na superfície livre e a evaporação. A percolação e as trocas com o lençol freático são geralmente insignificantes comparadas com a magnitude das vazões afluyentes. A vazão afluyente assim calculada não pode ser considerada como a vazão que seria observada em “condições naturais”, mesmo para um reservatório de cabeceira. Além disso, o próprio reservatório acelera a propagação das vazões na área inundada em relação às condições naturais e faz com que a precipitação direta na superfície livre se reflita instantaneamente na vazão afluyente.

A equação 1 também pode ser reescrita como:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = Q_a - Q_d \quad (2)$$

Tornando clara a relação existente entre o controle de nível do reservatório e as diferenças entre a vazão afluente e defluente: se o reservatório estiver sendo deplecionado teremos uma vazão defluente maior que a vazão afluente, ocorrendo o contrário em caso de enchimento. Se a depleção ocorrer no pico de uma cheia estaremos criando um “um pico de cheia artificial”, aumentando a vazão a jusante e infringindo o segundo princípio de operação hidráulica citado na introdução. Obviamente, numa operação real de controle de nível de um reservatório em torno de um nível pré-definido, não é possível manter o nível constante devido aos diversos erros e imprecisões existentes, o que não invalida a recomendação de se perseguir um bom controle de nível de forma a evitar picos de vazão defluente sensivelmente maiores que os picos de vazão afluente. Numa cascata de reservatórios poderemos ter um grande aumento de defluência a jusante se vários reservatórios estiverem simultaneamente rebaixando seus níveis. Além disso, nem todo erro de controle de nível é inócuo em relação à segurança da barragem: um significativo volume acumulado acima do nível máximo normal do reservatório quando se inicia a operação a lâmina livre, pode levar a um nível máximo superior ao que seria atingido se o nível de partida fosse inferior.

Em reservatórios com vertedores controláveis, a maioria dos métodos de operação hidráulica exige o monitoramento da vazão afluente ao reservatório, a qual pode ser estimada por dois modos: a) utilizando-se postos fluviométricos que controlem grande parte da bacia a montante; e b) utilizando-se os próprios dados operativos dos reservatórios (níveis, manobras de comportas, energia gerada) para estimar os termos da equação 1. O primeiro modo tem como principal desvantagem a impossibilidade de se controlar toda a área de drenagem a montante da barragem, levando ao emprego de hipóteses sobre a contribuição da área não controlada e sobre a precipitação direta sobre o reservatório, que nem sempre são adequadas. A segunda forma apresenta dificuldades quanto à avaliação das variações de volume, que dependem diretamente da avaliação dos níveis médios dos reservatórios, efetuadas geralmente através de medições pouco precisas, em apenas um ponto do reservatório. Ambos os processos podem sofrer com as imprecisões na avaliação das vazões: os postos fluviométricos podem ter suas curvas de descarga mal definidas, com efeito de remanso (“laços”) e extrapolações imprecisas; no caso de reservatórios podemos ter curvas de descarga de vertedores e de rendimento de turbinas pouco precisas, bem como problemas de medição de aberturas de comportas e da energia gerada, dentre outros. Naturalmente, a opção pelo método de cálculo das afluências está associada às características da bacia e dos reservatórios. Em bacias como a do Rio Iguaçu, sujeita a precipitações intensas diretamente sobre os reservatórios e em áreas adjacentes de alta declividade, o método do “balanço hídrico” é mais adequado, pois avalia

diretamente e integralmente a afluência da bacia a montante, sem a necessidade de hipóteses adicionais sobre a área não controlada por postos fluviométricos.

Neste ponto já deve ter ficado clara a importância de se obter uma precisão aceitável na avaliação dos níveis médios dos reservatórios, já que dela depende o cálculo dos volumes armazenados (através da curva cota x volume acumulado) e das variações de volume ( $\Delta V$ ). Uma demonstração formal da propagação destes erros no processo de cálculo das vazões afluentes por “balanço hídrico”, nas vazões afluentes previstas e nas decisões de defluência futura é feita a seguir.

## ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS ERROS DE ESTIMATIVA DOS VOLUMES DE RESERVATÓRIOS

A aplicação da equação 1 do “balanço hídrico” a um reservatório pode ser ilustrada pelo diagrama apresentado na figura abaixo:

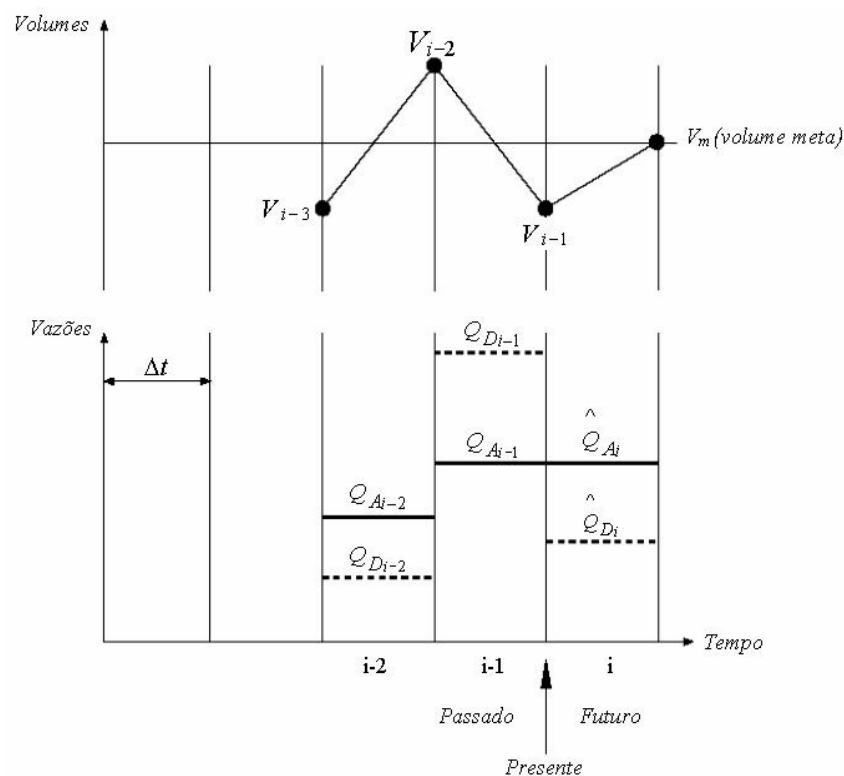


Figura 1 - Variáveis do Controle Hidráulico

A vazão afluente real a um reservatório para o último intervalo de tempo ( $i-1$ ) antes do instante de tempo presente, calculada a partir da equação 1, considerando a existência de erros ( $\mathcal{E}$ ), associados à avaliação imperfeita dos volumes armazenados ( $V$ ) ao final dos intervalos de tempo ( $i$ ), é:

$$Q_{A_{i-1}} = Q_{D_{i-1}} + \frac{V_{i-1} + \varepsilon_{i-1} - (V_{i-2} + \varepsilon_{i-2})}{\Delta t} \quad (3)$$

onde:

$i-1$  : é o índice associado ao último intervalo de tempo conhecido;

$Q_{A_{i-1}}$  : vazão afluente média real no intervalo  $i-1$ ;

$Q_{D_{i-1}}$  : vazão defluente média no intervalo  $i-1$ ;

$V_{i-1}$  : volume estimado no reservatório ao final do intervalo  $i-1$ ;

$V_{i-2}$  : volume estimado no reservatório ao final do intervalo  $i-2$ ;

$V_{i-3}$  : volume estimado no reservatório ao final do intervalo  $i-3$ ;

$\varepsilon_k$  : erro total na avaliação do volume estimado ( $V_k$ ), ao final do intervalo de tempo índice  $k$ ;

$\Delta t$  : duração dos intervalos de tempo, considerado constante.

A vazão defluente média ( $\hat{Q}_{D_i}$ ) necessária no intervalo de tempo  $i$  (primeiro intervalo de tempo futuro) para corrigir o nível do reservatório para um certo “nível de controle” (usualmente o nível máximo normal operativo ou o nível de volume de espera), correspondente a um “volume meta” ( $V_m$ ), ao final do intervalo de tempo  $i$ , pode ser obtida a partir do rearranjo da Equação 3 escrita para o intervalo de tempo  $i$ :

$$\hat{Q}_{D_i} = \hat{Q}_{A_i} + \frac{V_{i-1} + \varepsilon_{i-1} - V_m}{\Delta t} \quad (4)$$

Onde  $\hat{Q}_{A_i}$  é a vazão prevista para o intervalo futuro  $i$  e  $V_m$  o “volume meta” ou “de controle”, para o qual deseja-se que o volume convirja ao final do próximo intervalo de tempo ( $i$ ).

Numa operação real quase nunca se atinge exatamente o volume meta, pois além do erro de avaliação do último volume conhecido ( $\varepsilon_{i-1}$ ), há o erro de previsão de vazão ( $\hat{Q}_{A_i} \neq Q_{A_i}$ ), e na vazão defluente implementada ( $Q_{D_i} \neq \hat{Q}_{D_i}$ ), decorrente de erros de quantificação das vazões vertidas e turbinadas, bem como de diferenças entre a geração programada e executada.

Na operação de reservatórios o método mais usual para a previsão de vazões é considerar que a última vazão afluente calculada ( $Q_{A_i}$ ) se repita no próximo intervalo de tempo futuro  $i$ , ou seja:

$$\hat{Q}_{A_i} = Q_{A_{i-1}} \quad (5)$$

Este método tem sido chamado de “previsor persistente trivial” (p.p.t.), ou ainda “modelo grosseiro” de previsão. Formalmente: considerando a vazão do intervalo anterior obtida por balanço hídrico, substituímos (3) em (5), e após, (5) em (4), obtendo:

$$\hat{Q}_{D_i} = Q_{D_{i-1}} + \frac{2V_{i-1} - V_{i-2} - V_m}{\Delta t} + \frac{2\varepsilon_{i-1} - \varepsilon_{i-2}}{\Delta t} \quad (6)$$

Onde o último termo mostra que o erro total no cálculo da vazão defluente programada para corrigir o nível do reservatório, é função do dobro do erro cometido na avaliação do último volume armazenado, decrescido do erro no início do intervalo  $i-1$  ( $\varepsilon_{i-2}$ ). Ressalte-se que estes erros podem ter sinal positivo ou negativo, podendo resultar em erros totais compostos grandes, que se refletem em um controle ruim do nível do reservatório, necessitando de variações mais radicais nas vazões defluentes dos próximos intervalos. Em outras palavras, vazões defluentes muito acima ou muito abaixo das vazões afluentes naturais, ou seja: cheias artificiais e possíveis contratempos com redução brusca de níveis ou vazões. Na operação real empregam-se taxas máximas de variação das defluências que amenizam estas variações. Outro efeito indesejável dos erros é o aumento na frequência de manobra das comportas.

Um outro método simples de previsão de vazões, também chamado “de tendência”, ou “método intuitivo”, algumas vezes é proposto para a operação hidráulica. Utiliza a tendência ao aumento ou redução das vazões afluentes extrapolando linearmente as afluições calculadas para os dois últimos intervalos de tempo, ou seja:

$$\hat{Q}_{A_i} = 2Q_{A_{i-1}} - Q_{A_{i-2}} \quad (7)$$

Substituindo-se as duas últimas afluições conhecidas por seus valores calculados por balanço hídrico temos:

$$\hat{Q}_{A_i} = 2Q_{D_{i-1}} - Q_{D_{i-2}} + \frac{2V_{i-1} - 3V_{i-2} + V_{i-3}}{\Delta t} + \frac{2\varepsilon_{i-1} - 3\varepsilon_{i-2} + \varepsilon_{i-3}}{\Delta t} \quad (8)$$

Onde o último termo de (8) ressalta a amplificação dramática que os erros de avaliação dos volumes podem causar na vazão prevista por extrapolação linear, notadamente se tiverem uma combinação adversa de sinais.

Substituindo (8), na equação (4) temos:

$$\hat{Q}_{D_i} = 2Q_{D_{i-1}} - Q_{D_{i-2}} + \frac{3V_{i-1} - 3V_{i-2} + V_{i-3} - V_m}{\Delta t} + \frac{3.\varepsilon_{i-1} - 3.\varepsilon_{i-2} + \varepsilon_{i-3}}{\Delta t} \quad (9)$$

Se considerarmos todos os erros  $\varepsilon$  de igual magnitude, com uma combinação adversa de sinais, estaríamos incorrendo num erro de cálculo na vazão defluente para controle de nível do reservatório proporcional a 7 (sete !) vezes o erro típico. Não admira que este método de “tendência” ou “extrapolação linear” para previsões com vazões calculadas por balanço hídrico praticamente não seja utilizado na operação hidráulica em tempo real.

Independentemente da origem dos erros (modelos de previsão de vazões ou erros nas estimativas de volumes armazenados ou na implementação da defluência), eles se traduzem em níveis ao final do intervalo de tempo de controle diferentes do nível meta, que necessitam ser corrigidos no intervalo de tempo seguinte. Quanto maiores os erros, maiores as correções necessárias, o que pode levar a grandes variações na vazão defluente (normalmente limitadas por “taxas máximas de variação das defluências”), causando algumas vezes um comportamento intermitente do vertimento, com vários fechamentos totais de comportas e reaberturas durante o período de vertimento. O feedback proporcionado pela equação (4) mantém as oscilações do nível em torno do nível meta ou de controle se as taxas empregadas não forem muito restritivas. Entretanto, as grandes oscilações de vazões vertidas ocasionadas são indesejáveis em si, pois se refletem em freqüentes manobras em comportas e variações significativas nos níveis do canal a jusante (principalmente onde não haja reservatórios a jusante), associadas a grandes variações na vazão afluente aos reservatórios de jusante, propagando a instabilidade da operação para os outros reservatórios da cascata.

Para uma análise de sensibilidade dos erros de nível dos reservatórios consideremos um erro típico de 3 cm nos níveis dos diversos reservatórios do rio Iguaçu (bastante modesto para os reservatórios da COPEL, em vista das condições de medição anteriores a instalação da nova geração de sensores), com um intervalo de tempo para balanço hídrico (cálculo da vazão afluente), previsão de vazões e correção na posição das comportas (cálculo da vazão defluente a ser implementada) de 4 horas (também típico), com os reservatórios no entorno de seus respectivos níveis máximos normais operativos. Os resultados são apresentados na Tabela 1.

Para o caso do “modelo grosseiro” de previsão, utilizando a Equação 6, com erros iguais a 3 cm e de sinais contrários, teremos os erros na vazão defluente a ser implementada multiplicados por 3, ou seja: 900 m<sup>3</sup>/s para Foz do Areia e mais de 1200 m<sup>3</sup>/s para Salto Santiago, já bastante grandes, superiores a 150 % das vazões médias de longo termo nos locais dos reservatórios. Como já mencionado, o efeito destes erros, em parte, é amortecido pela utilização de taxas de variação de defluências. Entretanto, isto faz com que, freqüentemente, se utilizem as taxas máximas e aumenta-



se o número e a magnitude das movimentações nas comportas. Para o caso do modelo de “tendência” nem é preciso exemplificar, pois os efeitos seriam mais que duplicados!

Tabela 1 – Erros de volume ( $\epsilon$ ) para 3 cm de erro nos níveis no entorno dos níveis máximos normais operativos e seu reflexo na precisão de cálculo das vazões ( $\epsilon/\Delta t$ ) para  $\Delta t = 4$  horas

Reservatório	$\epsilon$ (hm <sup>3</sup> )	$\epsilon/\Delta t$ (m <sup>3</sup> /s)
Foz do Areia	4,170	290
Segredo	2,412	168
Salto Santiago	6,240	433
Salto Osório	1,680	117
Salto Caxias	4,243	295

Obviamente o efeito dos erros deteriora a qualidade da operação, independentemente do método de operação empregado. Muitas vezes os métodos propostos são testados por simulações numéricas, apresentando bons resultados, mas que não são reproduzidos na operação real, devido aos erros citados. Entende-se, assim, as resistências e as críticas ao emprego dos métodos que dependem da medição de níveis em grandes reservatórios. Os linímetros são instalados, na grande maioria dos casos, em apenas um ponto no reservatório (próximo à barragem). Em muitos casos são imprecisos para a aplicação em questão e estão sujeitos ao efeito de ondas de diversas naturezas e de oscilação de massas. Entretanto não há alternativa que independa totalmente do nível do reservatório, pois, mesmo quando a vazão é quantificada e/ou prevista utilizando-se postos pluviométricos e fluviométricos, será necessário utilizar o nível do reservatório para determinar-se a defluência a ser implementada no futuro.

## ÍNDICE DE SENSIBILIDADE

Naturalmente, a importância dos erros na avaliação do volume do reservatório está ligada à magnitude das vazões afluentes ou ao tamanho da bacia hidrográfica. De modo a comparar diversos reservatórios em diferentes bacias, é proposto um índice de sensibilidade  $\tau$  (equação 10):

$$\tau = \frac{\epsilon_{\text{típico}} \cdot A_i}{Q_{MLT}} \quad (10)$$

Onde:

$A_i$ : área inundada do reservatório no nível máximo normal operativo;

$\epsilon_{\text{típico}}$ : erro típico de medição de nível considerado;

$Q_{MLT}$ : Vazão média de longo termo da bacia.

O índice  $\tau$  pode ser interpretado como o intervalo de tempo necessário para que um volume correspondente ao  $\epsilon_{\text{típico}}$  seja preenchido com a vazão afluente, estando o nível do reservatório no entorno do nível máximo normal. Quanto maior o valor de  $\tau$ , maiores são os erros na vazão afluente ocasionados pelos erros na avaliação do nível médio dos reservatórios.

As tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, o índice de sensibilidade calculado para os principais aproveitamentos hidrelétricos do SIN, e para algumas usinas da Copel, considerando um erro típico de medição de nível do reservatório de 5 cm. Para as grandes usinas hidrelétricas do rio Iguaçu, pode-se afirmar que a sensibilidade dos reservatórios de Foz do Areia e Salto Santiago (~ 3 horas) é o dobro de sensibilidade dos reservatórios de Segredo e Salto Caxias, e o quádruplo do menor deles, Salto Osório. Por outro lado, reservatórios com menores volumes em termos absolutos, podem ser muito sensíveis, casos de Vossoroca, Alagados e Mourão (tabela 3).

Tabela 2 – Índice de sensibilidade para um erro de nível de 5 cm para as principais UHE's do SIN e PCH's da Copel

Reservatório	Área inundada (km <sup>2</sup> )	$Q_{MLT}$ (m <sup>3</sup> /s)	$\tau$ (horas)
Serra da Mesa	1784	777	31,9
Sobradinho	4214	2678	21,9
Furnas	1440	925	21,6
Três Marias	1040	690	20,9
Vossoroca	5,1	3,44	20,6
Três Irmãos	785	799	13,6
Alagados	7,2	7,4	13,5
Emborcação	455	488	13,0
Mourão	11,2	14,2	10,9
Capivari	13,5	19,4	9,7
Porto Primavera	2250	7229	4,3
Mauá	83,9	279	4,2
Tucuruí	2850	10984	3,6
Ilha Solteira	1195	5309	3,1
Foz do Areia	139	653	3,0
Salto Santiago	208	994	2,9
Itaipu	1350	10170	1,8
Segredo	80,4	749	1,5
Salto Caxias	141	1336	1,5
Itá	103	1026	1,4
Dona Francisca	19	321	0,8
Salto Osório	56	1041	0,7
Jupiá	330	6427	0,7
Desvio do Jordão	3,4	126	0,4

Fonte: <http://www.ons.org.br>

## ABORDAGEM EXPERIMENTAL PARA A AVALIAÇÃO DO NÍVEL MÉDIO DE RESERVATÓRIOS

A superfície de um reservatório não é horizontal e estática, hipótese implícita ao empregarmos as curvas cota x volume para calcular os volumes armazenados. Um reservatório real é permanentemente perturbado pela propagação de ondas provocadas pelo vento, por precipitação direta, por ondas devido a variações das vazões em afluentes, em vertedores e casas de força do próprio reservatório e daqueles situados a montante.

Além disso, ventos persistentes podem provocar as chamadas “marés de vento”, que são mais pronunciadas em reservatórios rasos, e tiram a horizontalidade do reservatório. Quando estes ventos cessam ou mudam de direção, temos uma oscilação de massa, que é progressivamente amortecida pelo efeito de resistência do fundo. Um exemplo de modelagem hidrodinâmica deste efeito para o reservatório de Itaipu é apresentado por Guetter *et al.* (2005), onde os erros no balanço hídrico diário podem atingir 2000 m<sup>3</sup>/s só por conta deste único efeito.

Podem ainda ocorrer ondas decorrentes de eventos sísmicos, como as registradas no reservatório de Foz do Areia, minutos após o último terremoto no Chile, com registro de ondas de até 2 m de amplitude. Deslizamentos de taludes em reservatórios são outra fonte de perturbações pouco frequentes.

Estas ondas de variadas amplitudes e frequências viajam pelo reservatório nas mais diversas direções, se refratando, devido às mudanças de profundidade, entrando e se refletindo nos braços do reservatório, compondo-se construtiva e destrutivamente, ainda superpondo-se aos efeitos de marés de vento e oscilações de massa. O resultado é um comportamento extremamente complexo, excluindo a possibilidade de tratamento analítico ou modelagem numérica detalhada.

Para enfrentar estas dificuldades foi adotada uma abordagem experimental considerando a medição simultânea do nível em vários pontos do reservatório. A hipótese básica é que a média dos níveis nestes pontos tanto mais se aproximará do nível médio real, quanto maior for o número de pontos monitorados, e mais uniforme for sua distribuição na superfície livre do reservatório. Este critério de média simples poderá ser melhorado no futuro considerando que, ondas longas e de pequena amplitude em relação à profundidade (comprimento de onda > 10 vezes a profundidade), propagando-se em corpos d'água profundos, tem celeridade ( $c$ =velocidade de propagação) próxima a  $c = \sqrt{gh}$  (Equação 10), sendo  $h$  a profundidade (Henderson, 1966). Esta relação pode sugerir um critério de ponderação que leve em conta a forma tridimensional do reservatório.

## ESTUDO DE CASO PARA O RESERVATÓRIO DA UHE SALTO CAXIAS

O reservatório de Salto Caxias foi o primeiro a ser escolhido para a implantação do processo proposto por tratar-se do último reservatório da cascata do rio Iguaçu, onde a vazão defluente tem impacto direto nos níveis d'água no canal do rio a jusante, havendo dificuldades de quantificação da vazão afluyente que era empregada nos sistemas de suporte à decisão da operação hidráulica em tempo real. O que foi discutido nos itens precedentes justifica esta maior atenção à medição dos níveis dos reservatórios de grande porte por instrumentos que possuam boas características de precisão, robustez e estabilidade, acoplados a sistemas de comunicação que garantam a transmissão das informações em tempo real (convencionada na COPEL por um tempo máximo de acesso à informação de operação hidráulica em até 5 minutos após a medição).

Quanto à precisão de linímetros, felizmente, nos últimos anos tem surgido uma nova geração de instrumentos, que reduzem em até uma ordem de grandeza os erros na medição de níveis. Na realidade a precisão especificada dos instrumentos em uso é de 3 mm, atingindo praticamente a precisão dos nivelamentos topográficos convencionais. A queda nos custos de aquisição, manutenção e operação, permitiram que estes sensores fossem instalados em vários pontos do reservatório, possibilitando uma dramática melhoria na avaliação do nível médio real através do emprego de “médias” de leituras simultâneas em vários pontos estrategicamente localizados.

Na escolha dos locais para a instalação dos postos optou-se por locais profundos, próximos ao talvegue principal do reservatório, em pontos que representassem a maior parte de sua superfície livre, evitando afluentes e proximidade da extremidade de montante, onde, dependendo da área da seção, poderemos ter sensível efeito de remanso. Ainda tiveram influência fatores como existência de estradas de acesso, facilidades de comunicação e outros recursos disponíveis no local.

Às margens do reservatório, que se estende por 195 km (comprimento do talvege), predominantemente no sentido leste-oeste, foram instalados três linímetros nos seguintes pontos (ver Figura 2).

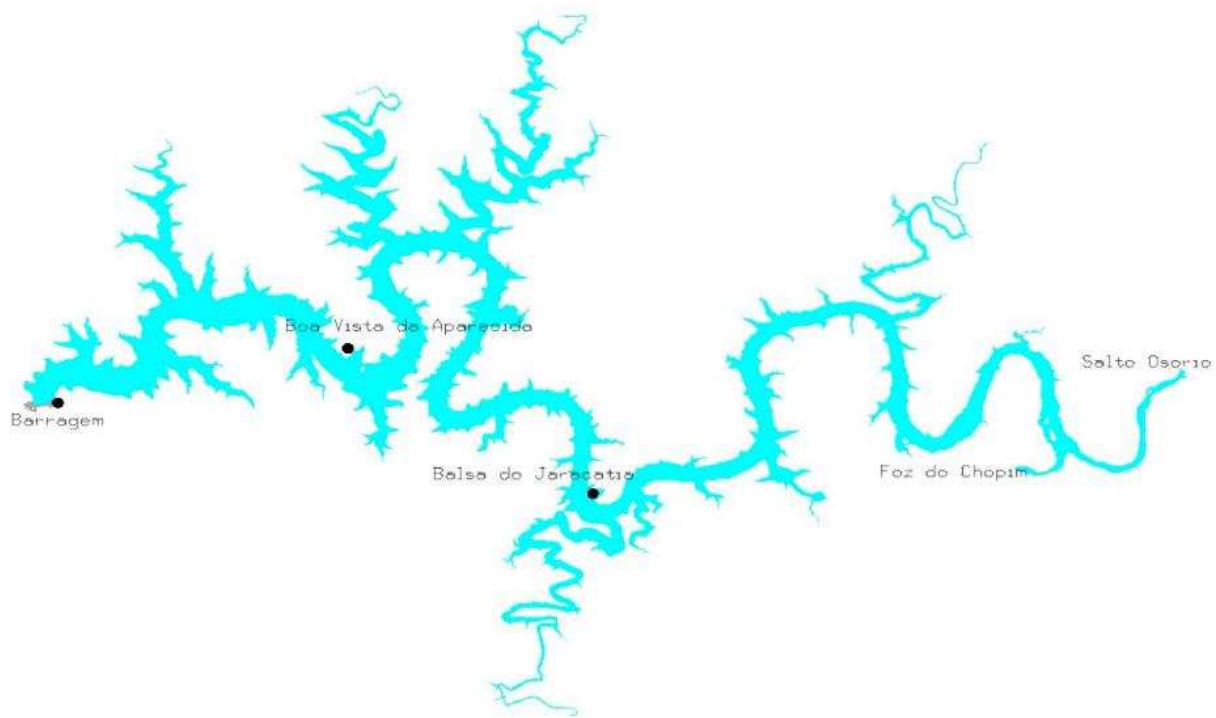


Figura 2 - Reservatório de Salto Caixas: Localização dos Postos Linimétricos

a) Posto Barragem de Salto Caxias (BAR):

Instalado no paramento vertical de montante da barragem, junto à ombreira esquerda, distante do vertedor e do canal de adução. Um linímetro OTT (Thalimedes) foi instalado no topo de um tubulão de PEAD (polietileno de alta densidade) com diâmetro interno de 315 mm, espessura de parede de 9,8 mm, com função de poço tranquilizador, efetivo para as pequenas ondulações de alta frequência, que são perceptíveis visualmente.

b) Posto Boa Vista da Aparecida (BVA):

Instalado à margem do reservatório. Utiliza o mesmo linímetro OTT Thalimedes instalado sobre um tubulão vertical (idêntico ao do posto BAR), com a função de poço tranquilizador, o qual se comunica com o reservatório através de um tubo plástico (100 mm), instalado aproximadamente na horizontal.

c) Posto Balsa do Jaracatiá (BJC):

Instalado à margem do reservatório com as mesmas características de BVA.

O custo de cada estação telemétrica acima tem a seguinte composição aproximada:

a) Instalação inicial: R\$ 55.000,00 (com instrumentos incluídos: linímetro e pluviômetro);

b) Telemetria e manutenção: R\$ 15.000,00 /ano.

Nestas estações inclui-se um pluviômetro, por representar um pequeno acréscimo de custo (R\$ 3.000,00) e melhorar o monitoramento da precipitação utilizada em modelos de previsão de vazões.

Nos três locais a amostragem dos níveis é feita a cada 20 segundos aproximadamente. A partir destas leituras são feitas médias móveis com as leituras dos últimos 5 (cinco) minutos que são registradas a cada 15 (quinze) minutos. As médias móveis resultam num amortecimento das oscilações das ondas com ciclos inferiores a 5 minutos. Desta forma as leituras registradas não são instantâneas, já que passam por dois amortecimentos: mecânico (proporcionado pelo tubulão) e numérico (processo das “médias móveis”).

A associação das leituras obtidas nos linímetros às leituras visuais nas réguas existentes não é direta, a menos que as condições sejam extremamente favoráveis. Em geral, as leituras visuais feitas diariamente por meio de câmeras no posto linimétrico da barragem servem para uma verificação expedita do funcionamento do linímetro da barragem (BAR). Para a calibragem do linímetro da barragem, são feitas observações visuais cuidadosas, nas quais se utiliza um dispositivo simples para amortecer as oscilações de alta frequência: junto às réguas, é instalada uma mangueira plástica, transparente e longa, cuja ponta é lançada a um lugar profundo. Após a observação visual da mangueira junto às réguas por alguns minutos é possível estabelecer a leitura média a ser utilizada na calibragem.

Utilizando-se a Equação 10 do item anterior e considerando uma profundidade média do reservatório de Salto Caxias de 34 m, temos uma celeridade média de 65 km/h, significando que uma perturbação pode percorrer o reservatório em sua maior extensão em menos de 2 horas. Assim é razoável a hipótese de que num período de tempo muito mais longo que este, o nível médio de cada estação, calculado a partir das suas leituras horárias, deve coincidir com as os níveis médios das outras estações para o mesmo período. Desta forma, considera-se que os linímetros estão ajustados entre si quando as médias das leituras de um período de tempo longo (vários dias) coincidem a menos de uma tolerância pré-especificada. Uma importante consequência deste método de aferição “remota” é que não necessita de leituras visuais de réguas nas estações, a menos daquela geralmente situada próxima à barragem, considerada como ponto de partida e referência para a aferição. Assim não precisa haver instalação de réguas ou trabalhos topográficos nestes outros postos após a sua instalação. A implementação da aferição pode ser feita simplesmente mudando o valor de referência da estação no banco de dados, sem necessidade de intervenção local.

Para fins de operação do reservatório são utilizadas as leituras correspondentes às horas cheias, que devem estar disponíveis para os softwares de monitoramento e operação hidráulica dentro de no máximo 5min 59s após cada hora cheia.

O sistema de Salto Caxias se tornou plenamente operacional no tempo real passando pelas seguintes etapas:

(a) 14/julho/2009: início de utilização das informações do linímetro OTT da barragem (BAR) na operação em tempo real;

(b) 21/julho/2009: início da operação simultânea nos três postos: BAR, BVA e BJC com o registro sistemático das leituras nos bancos de dados de operação;

(c) Seguiu-se um período longo de tempo no qual foram feitos ajustes e melhoramentos nas instalações, sistemas de comunicação posto-Simepar e Simepar-Copel (fibra ótica), softwares de banco de dados e de comunicação entre os bancos de dados do Simepar e da Copel, adaptação nos softwares de processamento de informações hidráulico-operativas e de operação hidráulica para leituras milimétricas;

(d) 13/junho/2010: início da utilização da média das três leituras em todos os softwares de operação em tempo real.

O primeiro impacto positivo do sistema ocorreu desde a primeira etapa, melhorando em muito as afluições calculadas por balanço hídrico, reflexo da melhoria da precisão de medição em uma ordem de grandeza, e da discretização milimétrica das leituras no posto da barragem (BAR). Reduziram-se as oscilações nas afluições médias de 4 horas utilizadas refletindo-se em menores variações de vazão vertida, com menor número de manobras nas comportas do vertedor. As informações diárias de afluições obviamente melhoraram, praticamente eliminando a necessidade de correção de inconsistências.

Após a finalização da implantação do sistema não ocorreu um período de vazões altas que permitisse uma verificação experimental de todos os benefícios esperados. Entretanto, apresenta-se na Figura 3 uma amostra de vazões afluentes horárias calculadas como médias móveis das últimas 4 horas, onde, visualmente, nota-se a maior estabilidade das vazões calculadas a partir do nível médio das três estações em relação aos valores calculados utilizando-se somente o posto da barragem (BAR).

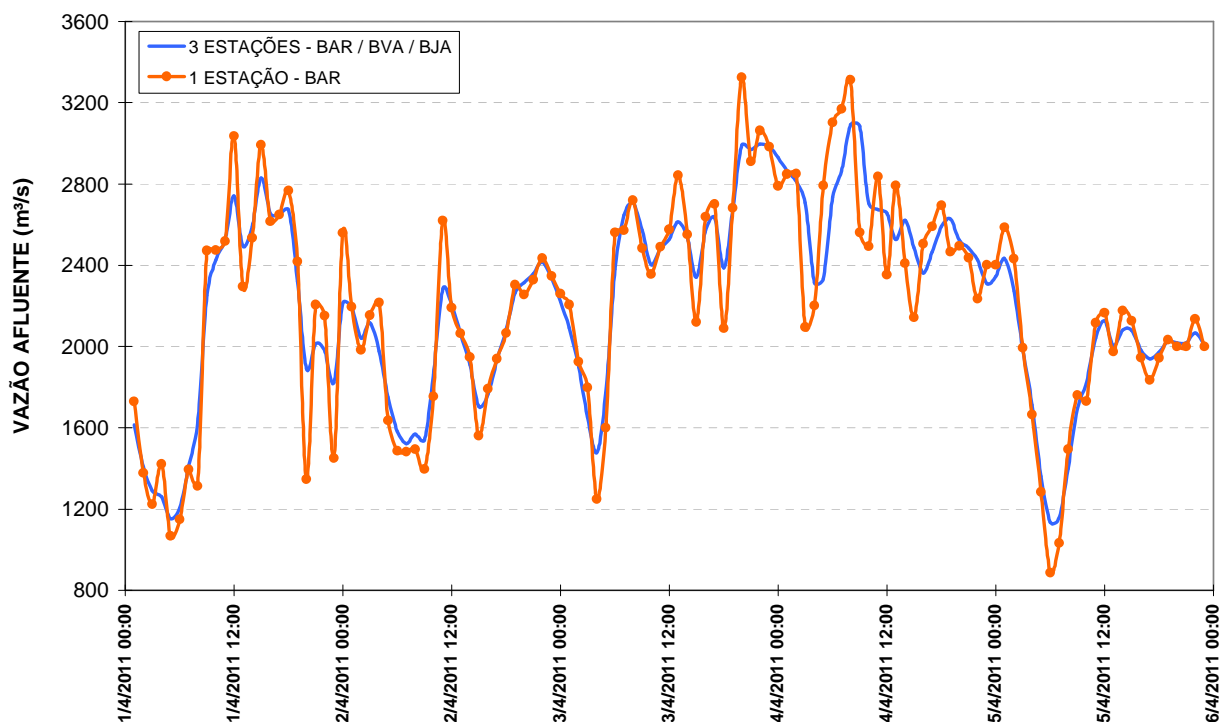


Figura 3 - Afluências Médias Móveis de 4 Horas à Salto Caxias em Abril de 2011

## ANÁLISE DE AMOSTRAS DAS INFORMAÇÕES LINIMÉTRICAS

Para esta análise foi selecionado o mês de Abril de 2011, com dados horários simultâneos nos três locais de medição de nível. Neste período os três linímetros apresentaram as seguintes médias mensais, respectivamente para os postos Barragem Salto Caxias, Boa Vista da Aparecida e Balsa do Jaracatiá: 324,614, 324,614 e 324,611 m.

A média de BVA foi inferior em 3 mm aos outros dois postos, diferença considerada desprezível e compatível com a própria precisão admitida pelo fabricante para os linímetros. A Figura 3 mostra as séries temporais horárias dos três linímetros para o mês. A Figura 4 mostra as séries temporais das diferenças destas mesmas leituras em relação à média das três leituras simultâneas calculada a cada hora. Nesta última é interessante notarmos que as diferenças estão concentradas na faixa de  $-20$  mm a  $+20$  mm, mas há divergências que superam os 40 mm, provenientes de combinações mais raras das ondas que se propagam no reservatório. Isto confirma o modelo hipotético do comportamento da superfície de reservatórios e gera uma importante conclusão: mesmo com a utilização de instrumentos extremamente precisos não é possível estimar com precisão o nível médio de um reservatório num curto intervalo de tempo com a medição em apenas um local, pois a superfície do reservatório não é plana nem horizontal, sofrendo perturbações ininterruptamente.



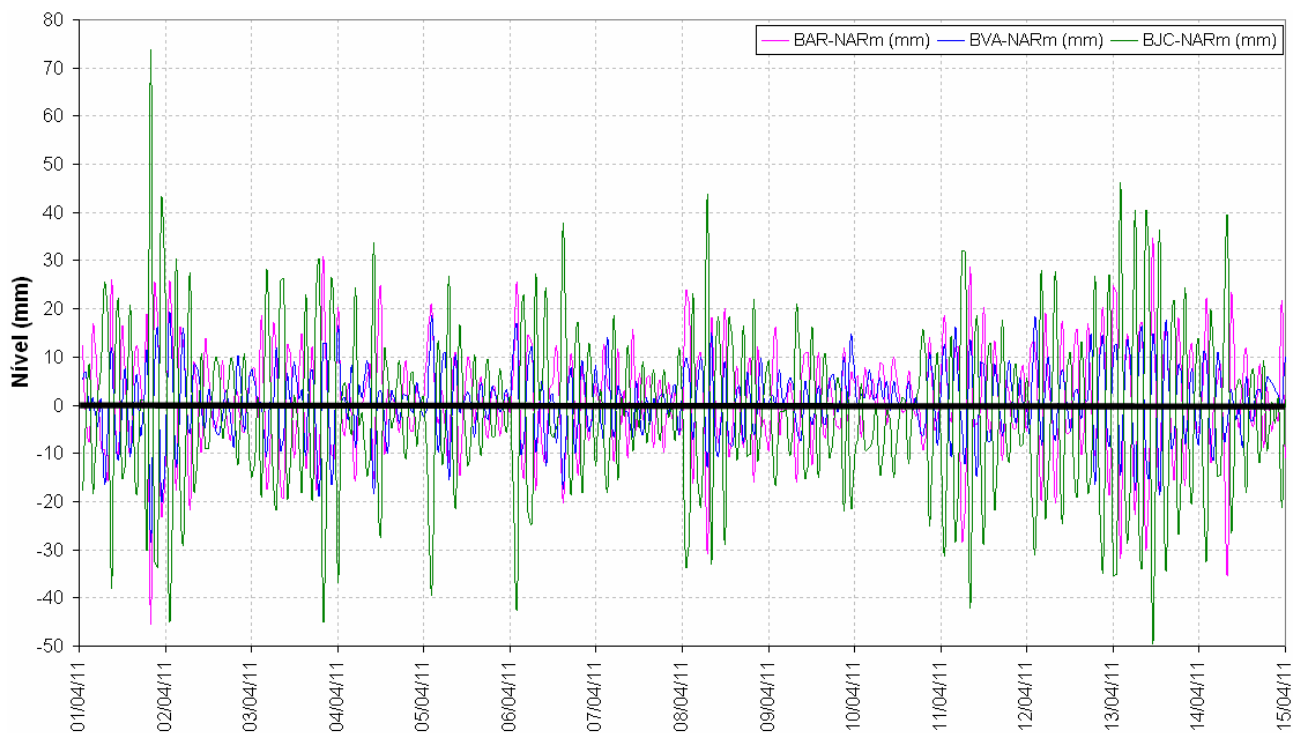


Figura 4 - Linigrama de Diferenças em Relação ao N.A.R. Médio na primeira quinzena de Abril de 2011

Em alguns meses registraram-se divergências pontuais ainda maiores, da ordem de 60 mm e até 70 mm, como no início do linigrama da Figura 4, sugerindo que ondas de diversas frequências e amplitudes se propagam em direções aleatórias, refletindo-se e compondo-se construtivamente ou destrutivamente, podem gerar grandes divergências em relação ao nível médio, num processo análogo ao que ocorre com ondas de cheia, onde composições raras de cheias dos afluentes, aliadas a sincronizações desfavoráveis podem resultar em grandes cheias de elevado tempo de recorrência. Futuramente será possível a análise de séries mais longas de níveis, possibilitando o estudo e o ajuste de distribuições de eventos extremos às séries dos desvios, permitindo estimar o risco associado a grandes desvios.

Analisando a Figura 5 nota-se que BJC em alguns períodos isolados da série apresenta níveis ora mais baixos, ora mais altos, porém em um período mais longo, os níveis situam-se sistematicamente próximos ao médio das 3 estações, não necessitando correção. Caso a tendência dos dados de BJC permanecessem abaixo ou acima da média por um tempo maior, haveria necessidade de corrigir esse desvio, somando-se ou subtraindo-se esta diferença aos dados de BJC, no período onde foi identificada a inconsistência, de modo a obter-se uma série temporal homogênea e consistente para todo o período.

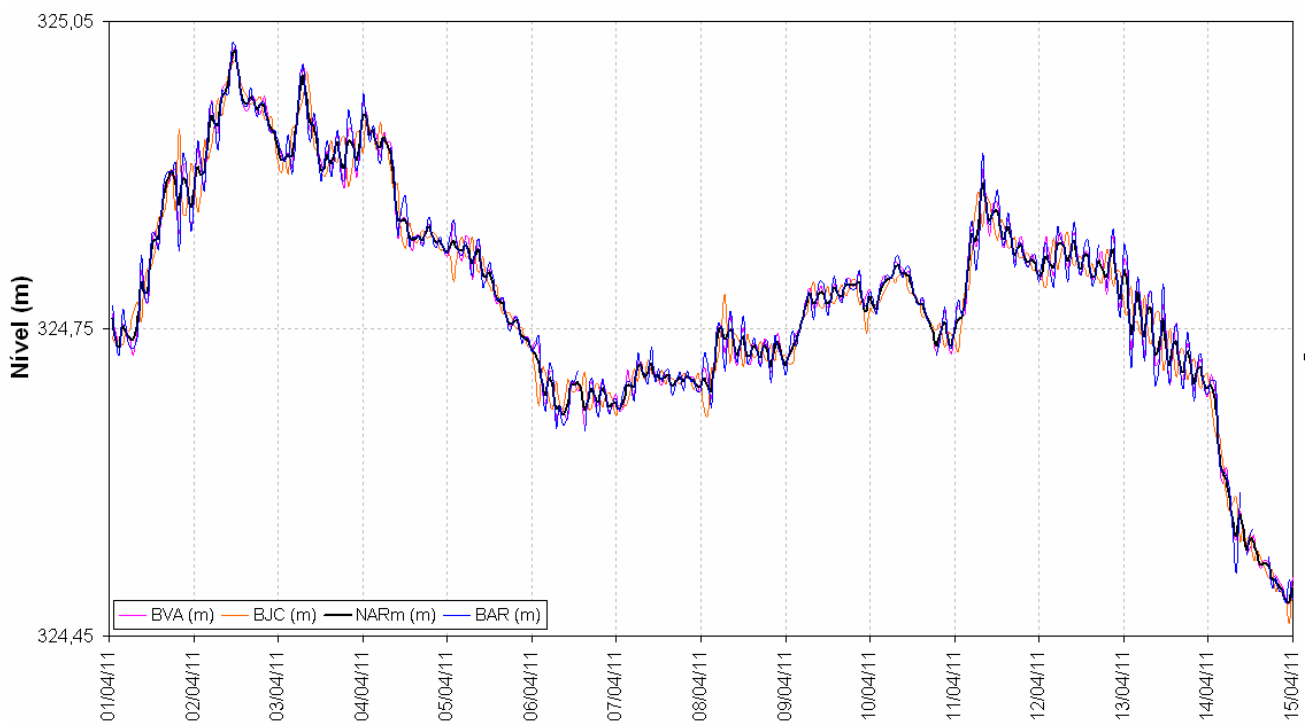


Figura 5 - Linigramas Simultâneos para a primeira quinzena de Abril de 2011

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

a) A qualidade da operação hidráulica de um reservatório está intimamente ligada à qualidade da estimativa do seu nível médio, como foi demonstrado pelas considerações sobre a propagação dos erros de estimativa dos níveis médios (e volumes correspondentes) de um reservatório e sobre os efeitos dos erros de controle de nível sobre a vazão defluente. No entanto, os benefícios esperados não são iguais para todos os reservatórios, dependendo de variáveis como a área inundada, existência de vertedores controláveis, métodos de operação hidráulica implementados, características das cheias na bacia, e restrições operativas, dentre outros, dependendo de uma análise caso a caso. O índice  $\tau$  pode servir como indicação preliminar da sensibilidade de um reservatório específico;

b) O método de medição simultânea do nível em vários pontos do reservatório foi implantado em Salto Caxias com sucesso devido à fatores como: i) linímetro com precisão adequada apresentando adicionalmente características de robustez e estabilidade; ii) equipe de hidrologia de operação atuando em todas as fases do desenvolvimento do projeto: do campo à pós-operação; iii) softwares de processamento de informações de operação hidráulica integrados ao sistema de aquisição de dados por telemetria desenvolvidos na própria empresa, facilitando alterações e manutenção;

c) Os resultados apresentados para o reservatório de Salto Caxias demonstram um alto grau de precisão e estabilidade das medições, com os métodos propostos de aferição funcionando como previsto;

d) Questões que demandam pesquisa e desenvolvimento adicionais: i)- critérios de fixação do número e localização dos pontos de medição de nível em função de um grau de qualidade requerido; ii) melhoria do critério de obtenção da estimativa de nível médio a partir das informações nos pontos de medição; iii) desenvolvimento de algoritmos para automatizar o processo de aferição dos linímetros e de consistência das informações; iv) verificação experimental do efeito do processo de médias móveis a partir dos registros de leituras instantâneas dos níveis; v) aplicação de técnicas estatísticas aos itens acima e para modelar o comportamento das perturbações da superfície do lago.

## BIBLIOGRAFIA

BUBA, H. (1989). “*Avaliação de Modelos de Previsão de Vazões para a Operação Hidráulica de Reservatórios a Curto Prazo*”. Curitiba, UFPR, Dissertação de Mestrado.

BUBA, H. (1993). “*Simulação de Regras Fixas de Operação Hidráulica em Reservatório Isolado*”, in Anais do X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos da ABRH, Gramado-RS, Brasil, Nov.1993.

DAILY, JAMES W.; HARLEMAN, D. R. F. (1966). *Fluid Dynamics*. Addison-Wesley Publishing Company, USA, 454 p.

GUETTER, A. K.; ANDRADE, F. O.; GONÇALVES, R.C. (2005). “*Efeito do Vento sobre o Reservatório de Itaipu: Cenários de Vento e Impacto no Balanço Hídrico*”, in: Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa-PB, Brasil, Nov.2005.

HENDERSON, F. M. (1966). *Open Channel Flow*. The Mcmillan Company, USA, 522 p.