

## Previsão em Tempo Real do Volume Afluente ao Reservatório de Ernestina

**Gerti W. Brun**

*Departamento de Engenharia Química  
PUC – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul*

**Carlos E. M. Tucci**

*Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS - Caixa Postal 15029  
91501-970 Porto Alegre, RS - [tucci@if.ufrgs.br](mailto:tucci@if.ufrgs.br)*

Recebido: 18/07/00 - revisão: 06/11/00 - aceito: 07/02/01

---

### RESUMO

*A operação de um reservatório de geração de energia elétrica é definida em função das vazões afluentes da bacia hidrográfica. Como esta variável é aleatória, existem riscos na sua estimativa, que se refletem na operação da usina.*

*Para reduzir estes riscos é necessário prever as vazões afluentes. A previsão com antecedência pode ser realizada a partir da precipitação observada, utilizando um modelo hidrológico que transforma precipitação em vazão. A previsão em tempo real dos volumes permite antecipar a ocorrência de eventos extremos, atualizando os níveis do reservatório ao longo do tempo.*

*Neste estudo, o modelo IPH II foi adaptado para previsão em tempo real e utilizado para a previsão das vazões afluentes do reservatório de Ernestina com base na precipitação.*

*O estudo introduziu critérios de atualização de estado no modelo IPH II, mostrando melhoria na previsão para antecedência de curto prazo. Além disso, foi observado que para antecedência maior é necessário a previsão de precipitação de curto prazo.*

**Palavras-chave: previsão em tempo real; previsão hidrológica.**

---

### MODELOS DE PREVISÃO

A previsão de curto prazo (tempo real) da vazão ou volume é realizada com antecedência de poucas horas ou dias. Esta previsão pode ser realizada com base na precipitação ocorrida na bacia ou nos níveis ou vazões observados a montante do local de interesse.

A previsão das vazões a partir da precipitação observada utiliza um modelo precipitação-vazão. Estes modelos podem ser dos seguintes tipos: conceitual, empírico ou combinado.

Os modelos empíricos utilizam formulações matemáticas sem nenhuma relação com o processo físico desta parte do ciclo hidrológico. A principal vantagem deste tipo de modelo reside na facilidade de atualização dos seus parâmetros em tempo real. Contudo, a sua principal limitação decorre do empirismo da sua formulação, produzindo fortes incertezas quando é utilizado fora do intervalo dos dados em que foi ajustado.

Os modelos conceituais, ao contrário dos anteriores, apresentam como vantagem a capacidade de reproduzir os processos hidrológicos de forma mais próxima dos processos físicos, permitindo melhor extrapolação de cenários diferentes do ajuste. A grande limitação dos modelos conceituais tem sido a dificuldade de atualização em tempo real de parâmetros e de variáveis estado.

Tucci e Clarke (1980) utilizaram o modelo IPH II com otimização automática para atualização em tempo real dos parâmetros, procurando evitar a limitação do modelo conceitual, mas os resultados não apresentaram ganhos significativos, devido principalmente a qualidade das informações utilizadas. Cruz (1987) utiliza o modelo conceitual com parâmetros fixos e realiza a atualização no resíduo do modelo através do uso de um modelo empírico, portanto um solução híbrida. Os resultados foram promissores, mas podem introduzir distorções na simulação na medida que persiste o empirismo da atualização dos parâmetros. Bertoni et al. (1992) mostraram que uma análise cuidadosa dos parâmetros do modelo permite reduzir as limitações dos modelos conceituais na previsão em tempo

real. Os autores definiram faixas de valores para os parâmetros e também testaram a previsão estatística da precipitação futura.

Neste estudo foi introduzida a atualização de estado do modelo conceitual na previsão em tempo real e mantidos constantes os parâmetros. O modelo foi utilizado ao longo de todo o período chuvoso para a previsão de afluência ao reservatório da Usina de Ernestina no rio Jacuí.

## MODELO HIDROLÓGICO

O modelo IPH II foi utilizado e atualizado em vários artigos nos últimos anos (Tucci e Campana, 1993, Germano et al., 1998, entre outros). Neste artigo somente será apresentado um resumo do modelo e abordados os algoritmos onde são realizadas atualizações para a previsão em tempo real.

### Algoritmos

Os algoritmos do modelo são:

- perdas*: retirada por evaporação e interceptação vegetal;
- separação de escoamento*: balanço do escoamento na camada superior do solo, onde entram infiltração, armazenamento no solo não saturado e percolação;
- propagação do escoamento superficial*: que envolve a combinação do uso do histograma tempo-área e do modelo do reservatório linear simples;
- propagação do escoamento subterrâneo*: utiliza o modelo de reservatório linear simples.

Os parâmetros do modelo são:

$R_{max}$ : capacidade do reservatório de perdas de interceptação da bacia hidrográfica;

$I_o$ ,  $I_b$ ,  $h$ : parâmetros da equação de infiltração de Horton, onde  $I_o$  é a capacidade de infiltração para o solo na capacidade de campo;  $I_b$  é a capacidade de infiltração quando o solo está saturado;  $h = e^k$ , onde  $k$  é um parâmetro que caracteriza o decaimento da curva de infiltração;

$t_c$ : tempo de concentração do escoamento superficial para definição do histograma tempo-área;

$k_s$ : parâmetro do reservatório linear simples do modelo escoamento superficial;

$k_s$ : parâmetro do reservatório linear simples para o escoamento subterrâneo.

### Modificações do modelo

As modificações do modelo para previsão em tempo real com atualização consideram os seguintes critérios:

**1. Atualização do armazenamento da camada superior do solo e vazão subterrânea** - A atualização das variáveis é realizada apenas quando no intervalo de tempo não existe escoamento superficial ou precipitação, portanto um período de estiagem. O critério para definir quando o escoamento superficial é desprezível é uma vazão  $Q_{lim}$  escolhida.

Neste período a vazão observada pelo monitoramento no rio  $Q_{ob}$  é igual a vazão de escoamento subterrâneo  $Q_{sub}$  ( $m^3/s$ ), ou seja:

$$Q_{sub}(t) = Q_{ob}(t) \quad (1)$$

Admitindo-se que o aquífero está em regime permanente é possível considerar que a percolação  $T(t)$  é igual a vazão subterrânea, ou seja:

$$T(t) = Q_{sub}(t).fator \quad (2)$$

onde fator converte a vazão de  $m^3/s$  para  $mm/\Delta t$ .

Esta é uma aproximação, no qual o erro é pequeno nesta fase.

Conhecida a percolação é possível obter o armazenamento do solo ( $mm$ ) pela expressão:

$$S(t) = b_t T(t) \quad (3)$$

$$\text{onde } b_t = -\frac{I_o}{\ln h \cdot I_b}$$

As Equações (1) até (3) atualizam o estado das variáveis  $Q_{sub}(t)$ ,  $T(t)$  e  $S(t)$  com base na leitura do valor de  $Q_{sub}$  obtido do monitoramento em tempo real. Desta forma, o modelo ao prever o tempo  $t + \tau$  (onde  $\tau$  é o tempo no futuro que prevê as vazões e volumes) terá estas variáveis atualizadas.

**2. Atualização do estado do escoamento superficial** - Num intervalo de tempo  $t$  a vazão total é:

$$Q(t) = Q_{sup}(t) + Q_{sub}(t) \quad (4)$$

onde  $Q_{sup}(t)$  é o escoamento superficial ( $m^3/s$ ).

Durante a previsão, após a ocorrência do tempo  $t$ ,  $Q(t)$  é conhecido pelo monitoramento [ $Q_{ob}(t)$ ]. Considerando que durante o período chuvoso a variável com maior incerteza é o escoamento superficial, a sua vazão pode ser atualizada pela equação seguinte:

$$Q_{sup}(t) = Q_{ob}(t) - Q_{sub}(t) \quad (5)$$

Neste caso, admite-se que  $Q_{sub}(t)$ , obtido pelo modelo, é verdadeiro. A vazão assim determinada é utilizada no modelo de propagação superficial com a condição do tempo  $t$  para a previsão em  $t+\tau$ .

## RESERVATÓRIO DE ERNESTINA NO RIO JACUÍ

### Descrição

A bacia hidrográfica do reservatório Ernestina tem uma bacia de 1.046 km<sup>2</sup>. A topografia é ondulada com predominância de plantações de soja e milho. Das matas que originalmente cobriam a região e que foram substituídas pelas plantações a partir da década de 20, sobram alguns capões e estreitas matas ciliares.

O reservatório foi construído na década de 50 e entrou em operação em 1957. A barragem é do tipo de concreto protendido e consiste de um muro de concreto com desenvolvimento levemente arqueado (300 m de raio de curvatura), com seção engastada na rocha do leito do rio. A barragem possui comprimento de 400 m, dos quais 120 m são de vertedor. O vertedor tem oito comportas de 15x1,5 m que permitem a vazão máxima de projeto de 630 m<sup>3</sup>/s no nível máximo operacional. O descarregador de fundo é constituído por dois condutos de 1,5 m de diâmetros e permitem uma vazão de 28,7 m<sup>3</sup>/s. A capacidade de acumulação é de 258,6 hm<sup>3</sup> no nível operacional, sendo 237,5 hm<sup>3</sup> de volume útil. A área de inundação é de 40 km<sup>2</sup> no nível máximo.

### Dados hidrológicos

**Precipitação** - Na bacia existem quatro postos pluviométricos, dos quais apenas um tem registrador.

A simulação foi realizada com intervalo de seis horas, estimado com base no tempo de concentração. A precipitação média diária foi calculada com base nos quatro postos de acordo com os ponderadores do método de Thiessen e distribuídos em cada intervalo de tempo de acordo com o pluviograma disponível.

**Evapotranspiração** - Os dados de evapotranspiração utilizados foram estimados com base nos dados disponíveis em Passo Fundo, no limite superior da bacia.

**Vazões/níveis** - Não existe série histórica de vazão a montante da barragem depois da sua construção, apenas as cotas de níveis observadas na barragem. Desta forma, foi necessário realizar um balanço do reservatório e determinar a vazão afluente:

$$\bar{I} = \frac{S_{t+1} - S_t}{\Delta t} + \frac{(E - P) \cdot A}{31536} + \bar{Q} \quad (6)$$

onde  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em s;  $\bar{I} = \frac{I_{t+1} + I_t}{2}$ , vazão média de entrada ao reservatório, m<sup>3</sup>/s;  $E$  é a evaporação total do período, mm;  $P$  é a precipitação total no período, mm;  $A$  é a área de inundação do reservatório em km<sup>2</sup>;  $\bar{Q} = \frac{Q_{t+1} + Q_t}{2}$  é a vazão média de saída, (m<sup>3</sup>/s) obtida com base nos registros de níveis e da operação do vertedor e turbinas;  $S_t$  e  $S_{t+1}$  são os estados de armazenamento do reservatório (m<sup>3</sup>) nos intervalos  $t$  e  $t+1$ , obtidos com base no nível e na curva cota x volume.

Foram selecionados para este estudo períodos contínuos para os quais houvesse o mínimo de falhas nos dados pluviométricos e fluviométricos. Os anos selecionados foram 1983 a 1985 e 1987 a 1993.

As vazões obtidas no balanço do reservatório apresentaram oscilações. Utilizou-se uma média móvel com janela variável de acordo com o período chuvoso para filtrar o hidrograma resultante.

Para verificar a consistência das vazões médias geradas e evitar tendenciosidade sistemática foram comparados os valores médios anuais em mm com duas bacias a jusante da bacia do reservatório (Espumoso, 2990 km<sup>2</sup> e Passo Real, 4.470 km<sup>2</sup>). Na Figura 1 são apresentados os valores comparativos. O posto de Espumoso não é totalmente confiável e tende a superestimar as vazões (Colischonn, 1997). Os resultados obtidos mostram

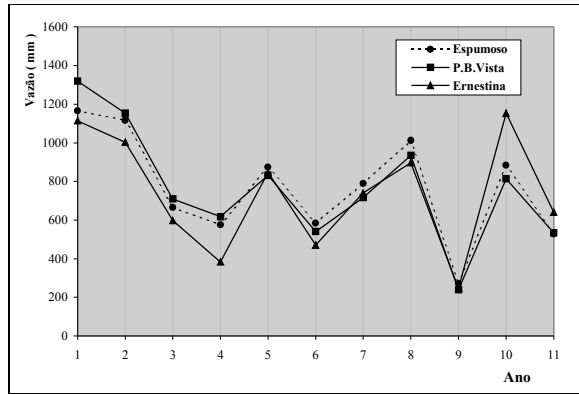


Figura 1. Vazão média anual em Ernestina e em dois outros postos na região.

coerência com os valores de Bela Vista (posto próximo a bacia).

Da regionalização (Tucci et al., 1991) obteve-se uma vazão média para a bacia de 25 m<sup>3</sup>/s. A vazão média dos períodos analisados é de 26,2 m<sup>3</sup>/s, portanto 4,8% maior. A vazão média dos períodos de análise foi obtida com base nos valores semestrais do período chuvoso. Era de se esperar que a média das vazões do estudo fosse maior que a média de longo período obtida da regionalização. Estes números mostram, portanto que a série gerada apresenta coerência regional.

### SIMULAÇÃO

A simulação constou de duas etapas:

- ajuste dos parâmetros do modelo IPH II para os períodos com dados sem simulação em tempo real;
- previsão em tempo real, quando os parâmetros anteriormente ajustados são fixados e a previsão é realizada com atualização das variáveis de estado.

### Ajuste dos parâmetros do modelo hidrológico

Como o período é longo (sete meses), optou-se por calibrar eventos isolados para obter um primeiro conjunto de parâmetros. Para cada ano foram escolhidos os eventos de maior magnitude e ajustados separadamente. Os parâmetros foram obtidos por tentativa e erro, analisados visualmente e verificadas as estatísticas do ajuste.

A seguir, verificou-se qual o conjunto de parâmetros que poderia apresentar resultados mais representativos. Na Tabela 1 é apresentado o melhor conjunto de parâmetros. Foi adotado o que ajustou o ano de 1983. Nas Figuras 2 e 3 são apre-

sentadas as relações entre os valores observados e calculados de pico e volume, respectivamente, para todos os períodos.

### Previsão de vazões e volume em tempo real

A previsão tempo real é entendida como a previsão com uma antecedência estipulada de curto prazo de ocorrência de vazão. A previsão de afllu-

Tabela 1. Parâmetros ajustados.

Parâmetros	Valor
Tempo de concentração (6h)	6
I <sub>o</sub> (mm/6h)	15
I <sub>b</sub>	3,9
H	0,9
K <sub>sup</sub> (6h)	3,2
K <sub>sub</sub> (6h)	100
R <sub>max</sub> (mm)	4

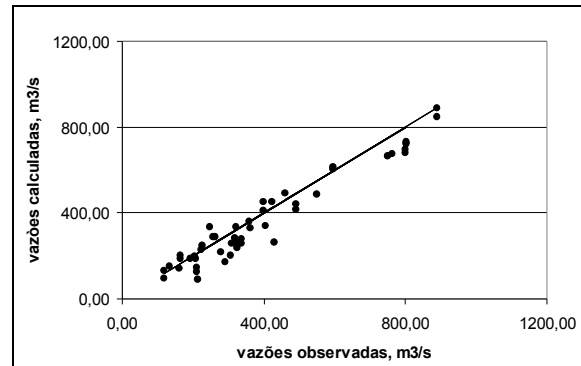


Figura 2. Vazões máximas observadas e calculadas do ajuste.

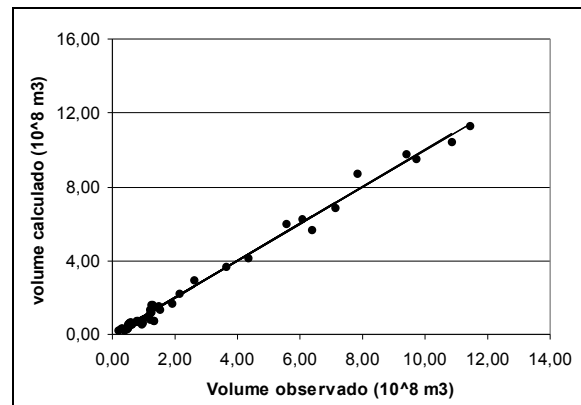


Figura 3. Volumes semestrais observados e calculados.

ências ao reservatório de Ernestina foi realizada para vários anos e dentro de cada ano, sete para antecedência de 6, 12, 18, 24 e 30 h (1 a 5 intervalos de tempo).

Na previsão foram estudadas inicialmente as metodologias propostas de atualização para os períodos selecionados.

Para analisar, inicialmente, os dois critérios de atualização foram utilizados os anos 1983 e 1992. Os resultados com o método de atualização durante a estiagem não apresentaram maior contribuição, já que o ajuste do modelo para a estiagem estava bem estabelecido, enquanto que o segundo critério apresentou ganho significativo,  $R^2$  aumentou de 0,75 para 0,95 em 1983 e de 0,85 para 0,94 em 1992.

Com base nesta seleção do critério de atualização foram realizados estudos de três cenários, para verificar o benefício da atualização do modelo e sobre a necessidade de conhecimento da precipitação futura. Os cenários são os seguintes:

1. modelo sem atualização e precipitação nula para o período de antecedência previsto (entre  $t$  e  $t + \tau$ );
2. com atualização e precipitação futura nula;
3. com atualização e precipitação conhecida (verdadeira), representando a situação de limite superior para a precipitação.

## Estatísticas

Para analisar os resultados foram utilizadas as seguintes estatísticas:

$$V_r = \frac{V_o}{V_c}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (Q_{oi} - Q_{ci})^2}{\sum_i (Q_{oi} - \bar{Q})^2}$$

$$D_a (\%) = \frac{(V_j - V_b)100}{V_o}$$

$$D_{ap} (\%) = \frac{(V_m - V_j)100}{V_o}$$

$$D_{af} (\%) = \frac{(V_m - V_b)100}{V_o}$$

onde  $V_o$  é o volume observado;  $V_c$  é o volume calculado;  $V_m$  é o volume resultante da simulação com atualização e chuva conhecida (cenário 3);  $V_j$  é o volume resultante da simulação com atualização e chuva nula (cenário 2);  $V_b$  é a volume da simulação sem atualização (cenário 1);  $Q_{oi}$  vazão observada;  $Q_{ci}$  vazão calculada e  $\bar{Q}$  é a vazão média.

O coeficiente  $D_a$  compara o cenário 1 com o cenário 2, indicando que quanto maior for este valor, maior será o ganho do cenário 2 com relação ao 1, neste caso, representando o ganho da atualização para precipitação nula.

O coeficiente  $D_{ap}$ , identifica quanto a previsão de precipitação poderá contribuir para a previsão, já que compara os cenários 3 e 2.

O coeficiente  $D_{af}$  compara os cenários 3 e 1, mostrando o ganho da atualização e do conhecimento da precipitação com relação ao cenário de simulação sem nenhuma destas melhorias.

## Análise dos resultados

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os resultados representativos de duas antecedências 6 e 12 h para um evento de 1983 (não foram apresentados os períodos contínuos porque as escalas gráficas não permitem analisar as diferenças). Os resultados dos outros anos são semelhantes. Pode-se observar que existe uma melhoria importante na previsão com atualização de vazão.

Na Figura 6 são apresentados os resultados de  $R^2$  e da relação entre volume observado e calculado.

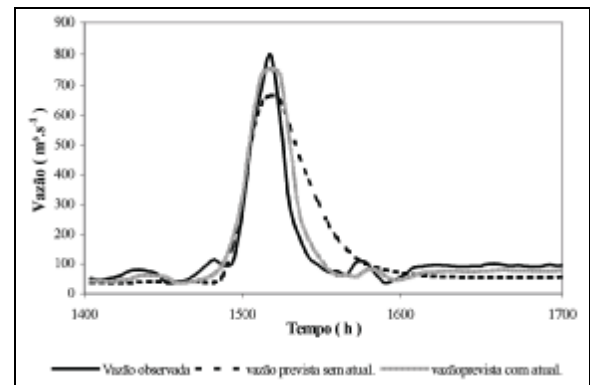


Figura 4. Previsão com chuva nula e antecedência de 6 h de evento em 1983.

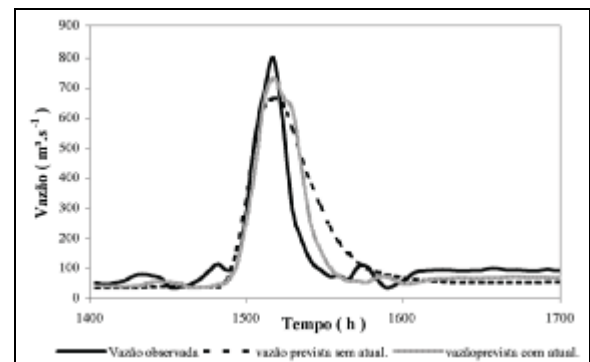


Figura 5. Previsão com chuva nula e antecedência de 12 h de evento em 1983.

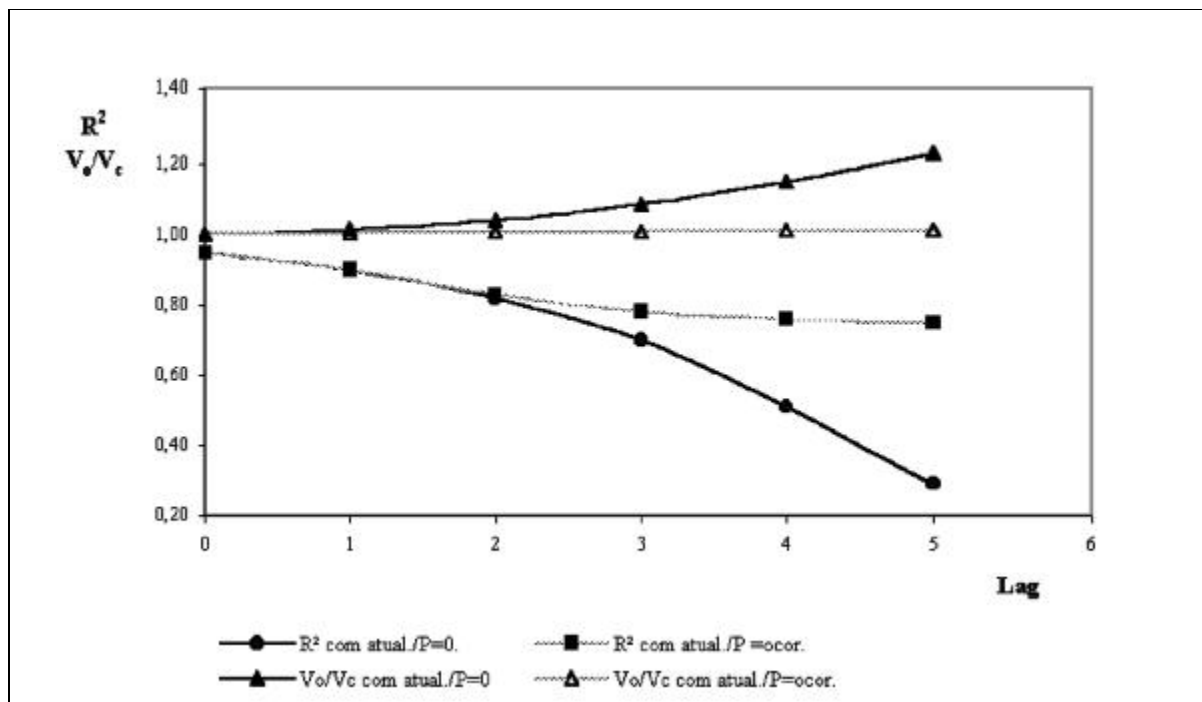


Figura 6. Resultados de 1983, da previsão da vazão e volumes com atualização para: a) sem a precipitação conhecida e; b) com a precipitação conhecida.

lado para os cenários de precipitação conhecida e com precipitação nula, para antecedências de até 30 horas. Pode-se observar que enquanto a precipitação futura não é conhecida o erro aumenta, mas se a precipitação é conhecida o erro diminui mantendo-se constante com antecedência de previsão.

Estas tendências também podem ser observadas nos gráficos dos outros indicadores Figuras 7, 8 e 9. Nas referidas figuras são apresentadas as tendências de todos os anos de dados. O ano que apresenta melhor resultado é 1990. Todos os outros resultados apresentam tendências semelhantes.

Na Figura 7 pode-se observar a variação de  $D_{ap}$  que mostra que para pequena antecedência existe menor diferença entre os cenários 3 (conhecida a precipitação) e 1 (precipitação nula), aumentando o ganho para a antecedência maior (até 28%), como era de se esperar, já que a precipitação futura influencia nos intervalos futuros devido ao tempo de concentração.

Na Figura 8 ( $D_a$ ) pode-se observar que o ganho com a atualização (cenário 2) ocorre principalmente para as pequenas antecedências (até 11%). Na Figura 9 pode-se observar o ganho de

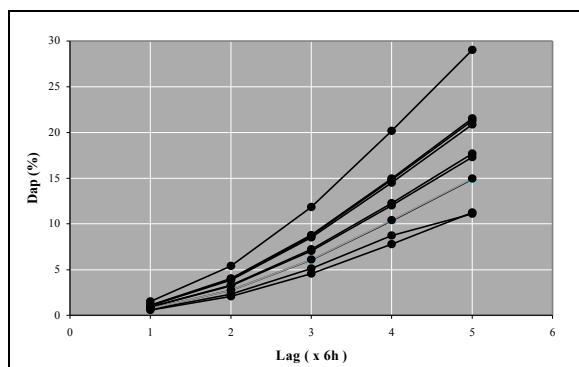


Figura 7. Valores da  $D_{ap}$  para antecedência de 6 a 36 horas e para os anos analisados.

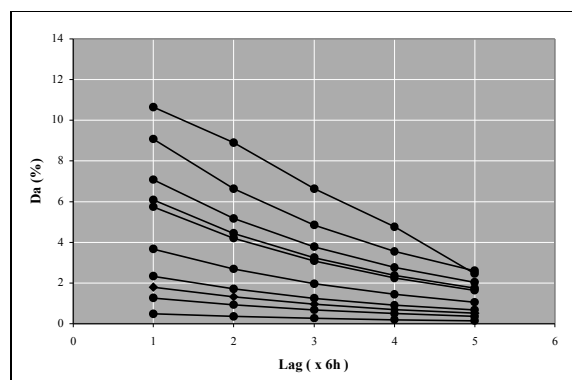
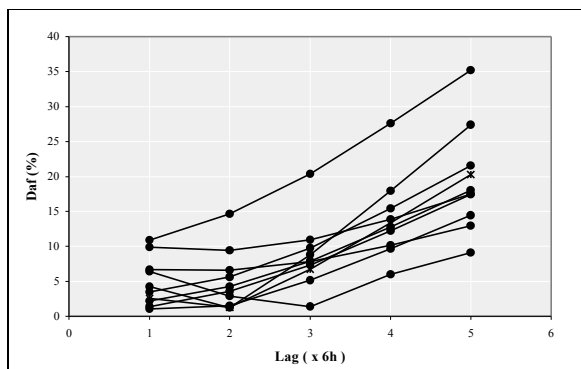


Figura 8. Valores de  $D_a$  para antecedência de 6 a 36 horas e para os anos analisados.



**Figura 9. Valores de  $D_{ar}$  para antecedência de 6 a 36 horas e para os anos analisados.**

introduzir a atualização e o conhecimento da precipitação, que pode chegar a 35%.

## CONCLUSÕES

A previsão contínua de volumes com base em modelo precipitação-vazão é importante no gerenciamento de reservatórios. Neste estudo foi analisada a contribuição de introduzir a atualização de estado do modelo IPH II e da previsão de precipitação. Neste último caso, não foi realizada a previsão de precipitação, mas a simulação utilizou os dois extremos: a) precipitação sempre nula no futuro; b) precipitação verdadeira (observada). A previsão meteorológica ainda é precária, mas esta análise que permite conhecer a contribuição do seu valor verdadeiro na previsão da vazão.

Os resultados da previsão mostraram que existem melhorias na qualidade da previsão tanto num caso como no outro. No procedimento de atualização (segundo critério) a melhoria chegou até a 11% na previsão de volumes para antecedência de seis horas. Para as demais antecedências houve sempre melhoria, mas com valores menores que os citados.

No caso da precipitação, a melhoria da previsão pode chegar até a 28% para antecedência de 30 horas, reduzindo esta percentagem para antecedências menores. Da mesma forma, a melhoria na previsão dos volumes sempre foi positiva quando era conhecida a futura precipitação, que apesar de esperado, permite avaliar a vantagem em aprimorar o conhecimento da precipitação para estimativa da vazão num sistema deste tipo.

O efeito combinado da atualização e da precipitação permite eficiência máxima entre 10 e 35% para antecedências de 6 a 30 horas.

## REFERÊNCIAS

- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1992). Rainfall-based real-time flood forecasting. *Journal of Hydrology*, 131 (1992) 313-339.
- COLLISHCHONN, W. (1997). *Análise do Rompimento hipotético da barragem de Ernestina-RS*. Dissertação de mestrado Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- CRUZ, J. (1987). *Estudo de previsão de cheias em tempo real com modelos empíricos e semi-conceituais*. Dissertação de mestrado COPPE UFRJ.
- GERMANO, A.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. (1998). Estimativa dos Parâmetros do Modelo IPH II para algumas bacias urbanas brasileiras. *RBRH V.3 N°4*, p. 89-101.
- TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T. (1980). Adaptive forecasting with conceptual Rainfall Runoff model. *Hydrologic Forecasting Proc. Oxford IAHS N°129*, p. 425-454.
- TUCCI, C. E. M.; CAMPANA, N. (1993). Simulação distribuída com IPH II nova versão *Anais X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Conesul, ABRH, Gramado n°3*, p. 485-494.
- TUCCI, C. E. M. (Coord.) (1991). *Regionalização de vazões do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre. CEEE Companhia Estadual de Energia Elétrica. Instituto de Pesquisas Hidráulicas/UFRGS 5 vols.

## *Real Time Forecasting of Flows into the Ernestina Reservoir*

### ABSTRACT

*The operation of an electric power generation reservoir is defined as a function of the river basin streamflows. Since this is a random variable there are risks inherent to its estimation, and this is reflected in the Power Plant operation.*

*In order to reduce these risks, it is necessary to forecast inflows. Early forecasting can be performed based on observed precipitation, using a hydrological model that transforms precipitation into streamflow. The real time forecasting of volumes allows a forecast of extreme events, updating the reservoir levels over time.*

*In this study the IPH model was adapted to real time forecasting and used to predict the inflows to Ernestina reservoir, based on precipitation.*

*The study introduced state update criteria in the IPH II model, showing an improvement of short-term forecasting. Furthermore, it was observed that for longer-term forecasts short term forecasts of precipitation are required.*

*Key-words: real time forecasting; hydrologic forecasting.*