XV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

GOP / 06

17 a 22 de Outubro de 1999
Foz do Iguaçu – Paraná - Brasil

GRUPO IX
GRUPO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)

SISTEMA DE PREVISÃO HIDROLÓGICA PARA SUPORTE À OPERAÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DA BACIA DO RIO IGUAÇU

Alexandre Kolodynskie Guetter

SIMEPAR – Sistema Meteorológico do Paraná

RESUMO

A análise de vários sistemas hidrelétricos tem demostrado o potencial de ganhos econômicos significativos e aumento de eficiência no controle de enchentes associados com a otimização da operação hidroenergética. O processo de minimização de vertimento é dependente da robustez e precisão da previsão de curto prazo das afluências. Previsões de afluências de médio e longo prazo contribuem para otimização hidroenergética quando tanto os sistemas hidrelétricos quanto a estrutura de mercado forem complexas. Descrevemos um sistema de previsão hidrológica, integrado a sensores múltiplos (rede telemétrica e radar meteorológico) que assimila previsões numéricas de tempo para dar suporte à operação dos reservatórios da COPEL no rio Iguaçu.

PALAVRAS-CHAVE

Modelo hidrológico, Radar Meteorológico, Telemetria, Previsão de precipitação, Previsão de vazão.

1.0 - INTRODUÇÃO

As empresas geradoras de energia tem aumentado o seu interesse na operação de usinas e vertedouros devido ao recente aumento de competitividade no mercado de energia e das tendências de desregulamentação. Mesmo no ambiente institucional tradicional, estudos de viabilidade da otimização hidroenergética tem demonstrado que há incentivo econômico para aprimorar a previsão de afluências com o uso de tecnologias avançadas de monitoramento e previsão de tempo (Robitaille et al., 1996; e Welt et al., 1998).

O problema de otimização está subdividido em escalas, que são normalmente designadas por: (1) curto prazo, (2) médio prazo e (3) longo prazo. Os componentes de otimização de curto e médio prazo devem ser acoplados para produzir seqüências de operação com discretização horária e horizonte de algumas semanas. A previsão numérica de tempo, com horizonte de até 5 dias e com resolução compatível com as escalas das bacias, contribui significativamente para a otimização de curto/médio prazo. A operação de reservatórios em bacias com resposta hidrológica rápida (p. ex. o Rio Iguaçu) depende fundamentalmente da previsão quantitativa de chuva sobre a bacia para estender o horizonte de previsão das afluências aos reservatórios. Um sistema robusto de previsão de afluências dá suporte á operação horária dos reservatórios e subsidia a otimização da geração semanal para o sistema em cascata. A otimização de longo prazo visa subsidiar a programação de geração para horizontes de alguns meses (no mímino 2 ou 3), e estimar as defluências semanais correspondentes para os reservatórios da cascata. Fatores exógenos a disponibilidade hídrica da cascata, como demanda e preço da energia, são importantes para a otimização de longo prazo. A previsão climática de precipitação, com horizontes de 2-3 meses, contribui para a previsão de afluências aos reservatórios, subsidiando a otimização de longo prazo da cascata.

Embora o recente desenvolvimento de funções matemáticas para otimização da operação hidroenergética (Flatabo e Sandrin, 1996; Georgakakos e Mark, 1987; Georgakakos, 1991; Georgakakos e Yao, 1993; Yao e Georgakakos, 1993), a otimização operacional de curto prazo na escala de bacias/cascatas ainda está nos primeiros estágios de implementação como meio efetivo de dar suporte à operação em tempo

SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ - SIMEPAR
Caixa Postal 318 – CEP 80.001-970 – Curitiba - PR
Tel.: (041) 366-2020 – Fax (041) 366-2122
e-mail : guetter@simepar.br

real. Esta situação decorre em grande parte do fato que os benefícios da implementação operacional dos sistemas de otimização hidroenergética na escala de bacias ainda não foi completamente demonstrado. Adicionalmente, o problema matemático apresenta seus próprios desafios relacionados com o grande número de detalhes operacionais e condições de contorno necessárias para tornar a solução viável, tanto em termos da modelagem dos vários elementos do sistema hidrológico-hidráulico, e na modelagem dos limites das condições operacionais.

Esse artigo apresenta um sistema de previsão hidrológica que atende os requisitos para otimização hidroenergética de curto, médio e longo prazos, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 1. Embora, o processo matemático de otimização não seja descrito neste artigo, o sistema de previsão hidrológica está sendo desenvolvido para atender aos requisitos espaço-temporais da integração entre previsão de afluências e otimização hidroenergética.

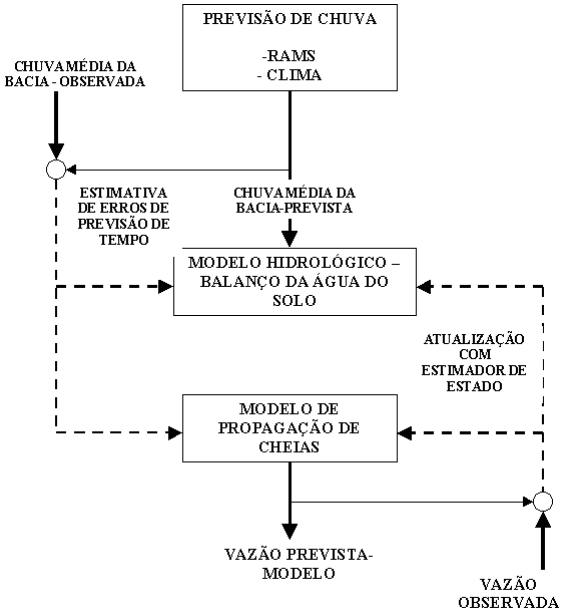

FIGURA 1 - Esquema do sistema de previsão hidrológica

O sistema de previsão hidrológica está fundamentado na modelagem semi-distribuída chuva-vazão-propagação, com o uso de telemetria, monitoramento de chuva estimada por radar meteorológico em tempo real, e previsão de chuva com modelos de previsão numérica de tempo, para produzir as previsões das afluências naturais aos reservatórios com horizontes variando de horas a meses. Tão importante quanto a previsão hidrológica determinística, o sistema também fornece uma estimativa da incerteza associada à previsão. A incerteza aumenta com o horizonte da previsão, e tanto a previsão determinística quanto a incerteza associada devem ser usados no procedimento de otimização hidroenergética. O equilíbrio entre a eficiência da geração e os riscos associados principalmente ao controle de cheias é dependente da estimativa das incertezas do procedimento de previsão.

O sistema operacional de previsão hidrológica agrupa diversos componentes (precipitação, escoamento superficial e propagação de cheias) e requer a descrição da topologia da rede natural de drenagem, tipos de solo, tipos de cobertura vegetal, e características dos canais. A bacia do Rio Iguaçu, com 63.330 km^2, foi subdividida em diversas sub-bacias devido à variabilidade espacial da chuva. A Figura 2 ilustra a topologia das sub-bacias para a primeira fase de implementação do sistema, correspondente ao trecho do alto-médio Iguaçu com 25.000 km^2, a escala das sub-bacias variam de 500 a 3000 km^2.

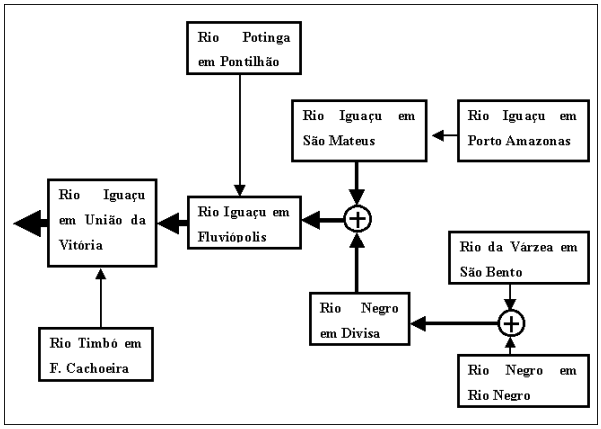

FIGURA 2 – Topologia das sub-bacias do alto-médio Iguaçu.

Os princípios fundamentais para o desenvolvimento desse sistema de previsão hidrológica são: (1) *Divisão em sub-bacias*: A bacia do Rio Iguaçu foi subdividida em sub-bacias menores e razoavelmente homogêneas em acordo com o relevo, disponibilidade de estações hidrométricas, e localização dos aproveitamentos hidrelétricos. (2) *Criação da base de dados*: Após a conclusão da divisão em sub-bacias, todos os dados disponíveis para modelagem foram coletados, passaram por uma primeira análise de consistência e foram arquivados em uma base de dados para calibração. (3) *Organização da estrutura do modelo*: A modelagem chuva-vazão-propagação foi aplicada para cada sub-bacia e para os segmentos que conectam as sub-bacias. (4) *Períodos para teste*: Os operadores do sistema definiram a resolução temporal e os períodos para teste do sistema. (5) *Estimativa dos parâmetros*: Alguns parâmetros do modelo chuva-vazão-propagação tem grande variabilidade para uma

grande bacia. Requerem-se testes iniciais para se estimar os parâmetros do modelo, antecedendo a operação do modelo de previsão em tempo real. Tanto métodos manuais quanto automáticos subsidiam a calibração dos parâmetros do modelo. (6) *Verificação do modelo*: Verificaram-se como os resultados de simulação de uso do modelo se comparam com as observações para diferentes opções, resolução do modelo, e períodos de teste (p. ex. período úmido e período seco).

2.0 - FORMULAÇÃO

O modelo hidrológico está fundamentado na versão diferencial do Modelo de Sacramento (Peck, 1976), que denominaremos de "Sacramento Modificado" (Bae and Georgakakos, 1994). As modificações relativas ao Modelo de Sacramento original são (Guetter e Cunha, 1998): (1) formulação diferencial no espaço de estados, (2) componente de propagação de cheias fundamentado na formulação cinemática com estimador de estado. Os estados do modelo Sacramento Modificado são: (1) armazenamento nas camadas do solo e (2) armazenamento na rede natural de drenagem. O sistema de modelagem da bacia do rio Iguaçu é representado de forma semi-distribuída, usando uma representação concentrada da transformação chuva-vazão na escala da sub-bacia, e um modelo hidrodinâmico para a propagação de vazões afluentes e originadas da sub-bacia. O sistema de modelagem prevê o escoamento superficial para cada sub-bacia de cabeceira em função da previsão de chuvas, então o componente hidrodinâmico transforma o escoamento superficial em vazão efluente. As vazões previstas das sub-bacias de cabeceira alimentam as sub-bacias internas e somam-se ao escoamento superficial local para posterior propagação das vazões e determinação das vazões efluentes das sub-bacias internas, seguindo a topologia da rede de drenagem natural.

O modelo apresenta duas camadas de armazenamento no solo, conforme ilustra a Figura 3. A camada superior apresenta resposta rápida (ordem de dias) aos forçantes de precipitação e evaporação, enquanto que a camada inferior é caracterizada pela memória longa, com escala de semanas, decorrente dos processos lentos de percolação, vazão de base e contribuição para os aqüíferos. A versão operacional do modelo Sacramento Modificado usada pelo Serviço Meteorológico Americano (NWS) também apresenta duas camadas, mas subdividem-se os processos sub-superficiais em cinco sub-processos: dois sub-processos para a camada superior e três sub-processos para a camada inferior. O modelo hidrológico inicialmente proposto para a bacia do Rio Iguaçu não leva em conta o detalhamento de sub-processos (água de tensão e água livre) por camada. Propõe-se uma redução da complexidade do modelo, visando-se robustez e rapidez na aplicação operacional. O agrupamento dos processos sub-superficiais em apenas duas camadas reduz a flexibilidade do modelo hidrológico para aplicações com resolução temporal fina (inferior a algumas horas) e para pequenas bacias que apresentam resposta muito rápida.

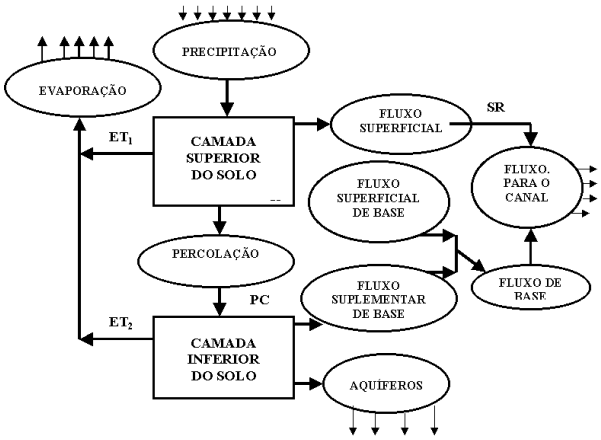

FIGURA 3 – Representação esquemática dos processos e componentes do modelo hidrológico.

Cascatas de reservatórios conceituais são usadas para simular a propagação de cheias na rede natural de drenagem. Este modelo é de implementação simples e é parcimonioso na quantidade e qualidade dos dados. A relação armazenamento/vazão corresponde univocamente à relação nível/vazão que é característica dos modelos cinemáticos de propagação de cheias, adequado para declividades acentuadas. O número de reservatórios na cascata de cada sub-bacia foi estimado pelo tempo de resposta da rede natural de drenagem.

O modelo hidrológico conceitual é utilizado para previsão de vazões, tendo-se as condições iniciais e as previsões de chuva e evapotranspiração potencial. A evapotranspiração potencial é caracterizada por reduzida variabilidade interanual e a sua previsão pode ser aproximada pelas médias climatológicas. As equações diferenciais do modelo dinâmico são integradas numericamente com a aplicação do Método de Runge-Kutta, das condições iniciais $\boldsymbol{x}_0$ no tempo t_0 para a solução final $\boldsymbol{x}_k$ no tempo $t=t_k$, dadas as previsões de precipitação e evapotranspiração potencial para o intervalo de t_0 a t_k. Normalmente, a integração numérica subdivide o intervalo $[t_0, t_k]$ em intervalos menores para que o processo de integração seja preciso. O modelo hidrológico tem fluxos efluentes que são sensíveis ao armazenamento (estado) em alguns compartimentos, e é muito importante para a preservação da precisão numérica que se tenha um grande número de subintervalos quando os fluxos

afluentes/efluentes forem significativos. O modelo hidrológico adota um intervalo de integração dependente da magnitude do fluxo de entrada. Portanto, as equações diferenciais do modelo hidrológico podem ser integradas com dados de chuva e evapotranspiração potencial com resolução variável de horário a mensal.

O componente de atualização foi projetado em função do modelo hidrológico conceitual (dinâmico). Os objetivos do componente de atualização são: (1) correção da estimativa dos estados do modelo dinâmico com a assimilação das vazões observadas, e (2) estimativa dos erros da previsão de vazão.

Esperam-se erros nas previsões de vazão devido aos seguintes fatores: (1) erros na formulação dos componentes do modelo, (2) incerteza na estimativa dos parâmetros devido a calibração com séries curtas, (3) erros nas observações de nível de água, precipitação e estimativa de evapotranspiração potencial, (4) erros na estimativa da precipitação média sobre a sub-bacia, e (5) erros nas previsões de chuva e evapotranspiração potencial. Os erros nas previsões quantitativas de chuva aumentam com o horizonte de previsão, e em conseqüência também aumentam os erros na previsão de vazão a medida que se afasta das condições iniciais observadas. Embora, não haja forma de se "controlar" a magnitude dos erros de entrada para o modelo hidrológico, é possível minimizar os erros na previsão de vazões associados à incerteza nos dados de entrada passados e à imprecisão na estimativa dos parâmetros.

O tratamento dado aos diversos erros para que se possa atualizar os estados do modelo com base nas observações de vazão é o fundamento do componente de atualização. O modelo hidrológico conceitual é expresso por equações diferenciais, de forma que ele tem aplicação geral e a representação conceitual dos processos hidrológicos não dependem de um intervalo de tempo específico (e.g., 4 horas, diário, mensal, etc.). O modelo hidrológico conceitual se caracteriza pela conservação de massa nos vários compartimentos (p. ex., camadas superior e inferior do solo, armazenamento no canal, etc.). A equação diferencial típica para um compartimento individual é:

$$\frac{dx_i(t)}{dt} = I_1(t) + I_2(t) + \ldots + O_1(t) + O_2(t) + \ldots \quad (1)$$

Onde $x_i(t)$ é o volume de água no compartimento i no tempo t; $I_1(t)$, $I_2(t)$, ... representam volumes afluentes ao compartimento; e $O_1(t)$, $O_2(t)$, ...representam volumes efluentes do compartimento. Para o exemplo da camada inferior do solo, há somente um único componente I representando o fluxo de percolação originário da camada superior do solo, e há três componentes de saída (i.e., O_1, O_2 e O_3) do compartimento inferior: transpiração, escoamento de base, e contribuição para o aqüífero.

A minimização dos erros de previsão de vazão é efetuada com a atualização dos estados do modelo, assimilando-se observações de vazão em tempo real. O algoritmo que efetua o processo de minimização atua como um "estimador de estado", e a estimativa dos erros de previsão também está integrada na formulação do estimador de estado.

A atualização do vetor $\boldsymbol{x}$ de previsão de estado no tempo t_k,, quando a observação $Q_0(t_k)$ se encontra disponível, é expressa pela Equação (2):

$$\vec{x}_a(t_k) = \vec{x}_p(t_k) + \vec{g}(t_k)\left(Q_o(t_k) - Q_p(t_k)\right) \quad (2)$$

onde os subscritos "a" e "p" indicam os valores atualizados e previstos no tempo t_k, respectivamente. O vetor $\boldsymbol{g}(t_k)$ pondera a importância do erro de previsão com a importância da previsão do vetor de estados para produzir uma nova estimativa do vetor de estado atualizado.

A atualização com a equação acima é estruturada com a dependência linear do estado $\mathbf{x_a}(t_k)$ e da observação $Q_o(t_k)$. O vetor de ponderação $\boldsymbol{g}(t_k)$ depende da formulação dos componentes do modelo hidrológico, dos erros esperados para as previsões e nos erros esperados para as observações. A atualização segue a previsão dos estados do modelo $\boldsymbol{x_p}(t_k)$ e da vazão $Q_o(t_k)$ no tempo t_k, e irá produzir uma estimativa atualizada do estado, $\boldsymbol{x_a}(t_k)$ no tempo t_k para ser usada como condição inicial para o próximo ciclo da seqüência de previsão/atualização.

Os valores dos elementos de $\mathbf{g}$ dependem do conhecimento dos erros esperados para as observações e para a previsão. Portanto, o processo de atualização foi formulado com um procedimento que expressa o avanço tecnológico de monitoramento e previsão de forma explícita. Por exemplo, as estimativas "a priori" do grau de confiança nos erros esperados para os dados de chuva provenientes da rede telemétrica são obtidas através da análise das séries observadas. Dessa análise, inferem-se os parâmetros do processo de atualização associados com as incertezas decorrentes da densidade da rede telemétrica. Se houver um adensamento da rede telemétrica, ou se usar a estimativa de chuva do radar meteorológico, então espera-se uma redução dos erros na estimativa de chuva. Com o aumento no grau de confiança das observações basta recalibrar os parâmetros da atualização associados com a incerteza da estimativa

de chuva para se continuar usando o sistema de previsão com os novos sensores

A forma do estimador de estado implementado no componente estocástico é significativamente diferente das implementações típicas de estimadores lineares ou linearizados (p.ex.., filtro de Kalman, filtro de Kalman estendido). A formulação estocástica produz um estimador de estado que é função de dois parâmetros lineares associados com as incertezas dos dados de entrada e dos parâmetros do modelo chuva-vazão-propagação. Os parâmetros lineares propiciam um meio objetivo de se considerar os melhoramentos introduzidos tanto na estimativa dos dados de entrada, quanto na estimativa dos parâmetros do modelo.

3.0 RESULTADOS

A Figura 4 ilustra os hidrogramas observados e modelados do Rio Iguaçu em União da Vitória para a grande enchente de 1983. Nota-se que o procedimento de atualização de estado com assimilação das observações de vazão em tempo real melhora sensivelmente o sistema de previsão de vazões. O processo de atualização aumentou a correlação entre vazões observadas diárias e vazões modeladas de 0,94 para 0,99.

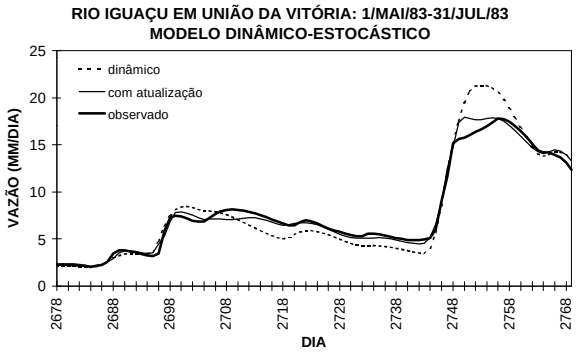

FIGURA 4 – Comparação dos hidrogramas observados e modelados com e sem atualização.

A Tabela 1 indica a correlação entre as vazões diárias observadas e previstas em União da Vitória, assumindo-se que os erros na previsão de chuva sejam de mesma ordem dos erros das observações com uma rede telemétrica esparsa. A redução da correlação para previsões com horizontes de 120 horas indica a gradual degradação do estimador de estado pelo distanciamento do ciclo de atualização.

TABELA 1 – Correlação entre as vazões diárias observadas e previstas em União da Vitória para diferentes horizontes de previsão.

Previsão em horas	Correlação
24	0,987
48	0,977
72	0,966
96	0,966
120	0,945

A operação eficiente do sistema em tempo real depende de dois fatores: (1) fluxo contínuo das informações telemétricas de monitoramento de chuva e vazões e (2) previsão quantitativa de chuva para horizontes compatíveis com o horizonte de previsão de vazões. A transmissão dos dados telemétricos com poucas falhas confere estabilidade ao procedimento de atualização com assimilação das vazões observadas. No caso de falhas nas informações telemétricas recorre-se a um procedimento de contingência para preenchimento das falhas. A previsão quantitativa de chuva está em processo de desenvolvimento com o uso de um modelo numérico de previsão de tempo (RAMS), implantado pelo SIMEPAR com resolução espacial de 20 km. O modelo de previsão de tempo estima as áreas e intensidades de chuva média para cada sub-bacia.

A Figura 5 ilustra a previsão de chuva do modelo RAMS para uma situação associada com a passagem de uma frente fria sobre o Estado do Paraná. O padrão organizado de precipitação com orientação zonal é precedido por uma situação de instabilidade atmosférica associado com grande variabilidade espacial da chuva. O retângulo com linha pontilhada na Figura 5 ilustra a área da primeira fase de implantação do sistema de previsão.

Além da previsão precipitação e vazão de curto prazo, o sistema hidrológico pode assimilar previsões climáticas de precipitação, para horizontes que excedem a escala mensal. Evidentemente as incertezas da previsão climática são maiores do que as incertezas de previsão de tempo. Contudo, tanto a previsão de tempo quanto a climática fornecem elementos (inclusive estimativa de incertezas) que subsidiam um sistema de suporte de decisão para operação de reservatórios, como descrito na Introdução.

A Tabela 2 indica o ganho de geração de energia para Foz do Areia durante o ano de 1992 (evento El Niño) associado ao horizonte de previsão de chuva e vazão. Esses ganhos tendem a crescer quando a análise se estende para toda a cascata. Os dados da Tabela 2 corroboram a necessidade do sistema de previsão hidrológica apresentar uma metodologia consistente para atender às necessidades de previsão de curto, médio e longo prazos.

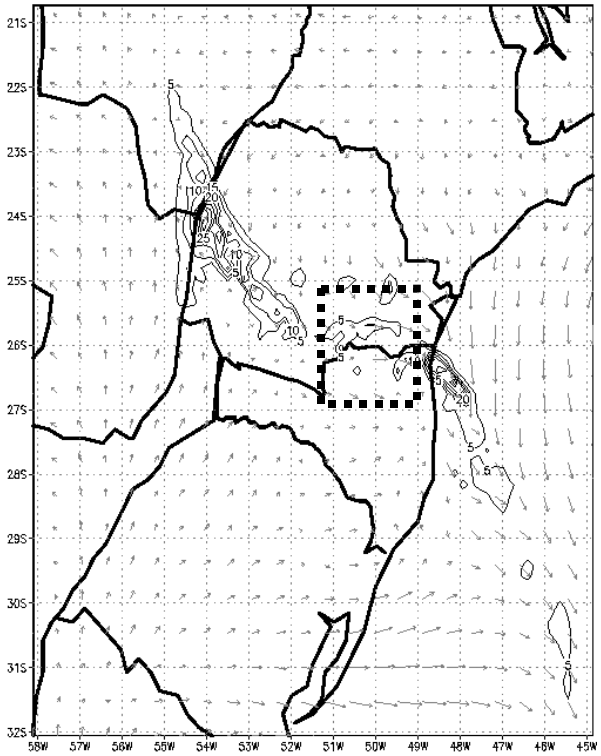

FIGURA 5 – Campo de previsão de precipitação produzido pelo modelo RAMS no SIMEPAR. As isoietas estão em mm/hora.

TABELA 2 – Variação da geração média em Foz do Areia para o ano de 1992 com o horizonte de previsão.

Horizonte de Previsão	Geração (MW/dia)
0	750
7 dias	804
14 dias	837
30 dias	855

4.0 CONCLUSÕES

O sistema de previsão hidrológica em desenvolvimento para a COPEL atende aos critérios operacionais para suporte ao gerenciamento de reservatórios. A formulação do modelo dinâmico associado a um componente de atualização com um sistema de equações diferenciais produzem previsões com resolução de horas a meses. Os erros nas previsões quantitativas de chuva aumentam com o horizonte de previsão, e em conseqüência, também aumentam os erros na previsão de vazão a medida que se afasta das condições iniciais observadas. O componente de atualização minimiza os erros na previsão de vazões associados à incerteza nos dados de entrada e à imprecisão na estimativa dos parâmetros.

5.0 BIBLIOGRAFIA

(1) BAE, D.H., GEORGAKAKOS, K.P., 1994: Climatic variability of soil water in the American Midwest, 1, Hydrologic modeling, *J. Hydrol*., 162, 355-377.

(2) FLATABO, N., SANDRIN, P., 1996: Optimization Methods for Planning, Operation and Control Power Systems. Proceedings of the CIGRE96 Conference, Report 38-203, Working Group 38, Power Systems Analysis and Techniques, September 1996, Paris, France.

(3) GEORGAKAKOS, A.P., MARK, D.H, 1987: A Stochastic Control Method for the Real-Time Operation of Reservoir Systems, *Water Resources Research*, 23(7), 1376-1390.

(4) GEORGAKAKOS, A.P., 1991: Computer-Aided Management of the Southeastern U.S. Reservoir System, in *Decision Support Systems*, D.P. Loucks (editor), NATO ASI Series, Vol G-26, 407-428.

(5) GEORGAKAKOS, A.P., YAO, H., 1993: New Control Concepts for Uncertain Water Resources Systems: 1, Theory, *Water Resources Research*, 29(6), 1505-1516, 1993.

(6) GUETTER, A., CUNHA, L.M., 1998: River Forecasting and Simulation System for Reservoir Operation Support (in Portuguese). Proceedings of the X Brazilian Conference of Meteorology, October 26-30, Brasília, D.F., Brazil (CD midia), 5 pp.

(7) PECK, E.L.,1976: Catchment modeling and initial parameter estimation for the National Weather System river forecast system, *NWS Hydro-31*, National Weather Service, NOAA, Silver Spring, MD.

(8) ROBITAILLE, A., ROBERT, S., WELT, F., 1996: Making Money by Improving Plant Efficiency. Hydro Review, 15(5), 92-96.

(9) WELT,F., RIOUX, P.-J., HOULE, B. HACHEM, S., 1998: Assessing the Economic Benefits of Implementing Hydro Optimization. Proceedings of the Hydrovision 98 Conference, July 28-31, Reno, Nevada, USA.

(10) YAO, H., GEORGAKAKOS, A.P., 1993: New Control Concepts for Uncertain Water Resources Systems: 2, Reservoir Management, *Water Resources Research*, 29(6), 1517-1526, 1993.