

Modelos de Previsão Hidrológica Aplicados ao Planejamento da Operação do Sistema Elétrico Brasileiro

Fernanda da Serra Costa, Maria Elvira Piñeiro Maceira, Jorge Machado Damázio

Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

fernanda@cepel.br, elvira@cepel.br, damazio@cepel.br

Recebido: 18/07/06 - revisado: 07/11/06 - aceito: 05/06/07

RESUMO

A geração de energia elétrica no Brasil depende basicamente das vazões que naturalmente afluem aos aproveitamentos hidroelétricos brasileiros distribuídos por doze bacias hidrográficas do país. Esses aproveitamentos totalizam mais de 85% da capacidade instalada de geração do país. A existência de reservatórios com capacidade de regularização significativa torna o problema do planejamento da operação um problema não-separável no tempo, uma vez que qualquer decisão de desplecionamento destes reservatórios influencia a capacidade de geração do sistema no futuro. A capacidade de geração futura do sistema também é influenciada pelas afluições hidrológicas futuras, cujas previsões e incertezas devem ser consideradas no planejamento da operação do sistema. Este trabalho descreve as diferentes representações das afluições hidrológicas aos aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional – SIN nos modelos utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS no Planejamento da Operação. Apresenta ainda o detalhamento das formulações dos modelos de previsão PREVIVAZ, PREVIVAZM e PREVIVAZH, desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL e alguns de seus desenvolvimentos mais recentes.

Palavras-chave: Previsão de Vazões, Sistema Interligado Nacional, Planejamento da Operação

INTRODUÇÃO

Ao contrário da maioria dos países, a geração de energia elétrica no Brasil depende basicamente das vazões que naturalmente afluem aos aproveitamentos hidroelétricos distribuídos por doze bacias hidrográficas do país. Esses aproveitamentos totalizam mais de 85% da capacidade instalada de geração do país, sendo responsáveis por mais de 90% da energia total gerada no país. Para efeito de comparação a Tabela 1 apresenta as participações das diversas fontes primárias de energia na geração de eletricidade no mundo em 2003. As vazões fluviais têm como característica a inconstância, sendo suas variações usualmente de difícil previsão, principalmente no Brasil, onde se originam das precipitações, sendo usualmente modeladas como sujeitas a componentes aleatórios.

Devido à irregularidade das vazões fluviais e à necessidade de manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, o sistema de geração de energia elétrica brasileiro, além de contar com usi-

nas termoelétricas de complementação (o que implica em custos de combustíveis), conta também com um conjunto de reservatórios de acumulação, cuja função é essencialmente a regularização dos regimes fluviais, através do armazenamento de água nos períodos de maiores afluições naturais de vazões fluviais, para ser utilizada durante os períodos mais secos, quando são escassas as vazões fluviais. A capacidade de armazenamento hoje disponível permite não só a regularização intra-anual do sistema, como também fornece proteção contra ocorrência de seqüências de anos secos, configurando-se a chamada regularização plurianual do sistema.

A coordenação da operação do sistema de reservatórios do setor elétrico, em conjunto com a operação do sistema de usinas termoelétricas de complementação, permite o melhor aproveitamento das vazões naturais, evitando o desperdício de água e gastos excessivos com combustíveis. Esta coordenação é feita no âmbito do chamado Planejamento da Operação do Sistema Interligado, executado atualmente no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS. Vale também ressaltar que, além da função de regularização para efeito de geração de

energia elétrica, parte da capacidade dos reservatórios do setor elétrico é utilizada para controle de cheias. Neste caso, reserva-se uma parcela superior do reservatório para ser ocupada somente durante a ocorrência de grandes cheias.

Tabela 1- Participação das fontes primárias de energia na geração de eletricidade. Fonte: Electricity in World in 2003 - International Energy Agency Statistics -
<http://www.iea.org/Textbase/stats/>

Fonte	Participação (%)
Óleo	6,9
Carvão	39,9
Gás Natural	19,3
Hidroelétrica	16,3
Nuclear	15,7
Outras fontes	1,9

O planejamento da operação de um sistema hidrotérmico de energia elétrica deve definir para cada instante a geração de cada unidade de tal forma que a demanda seja atendida a um custo mínimo. A existência de reservatórios com capacidade de regularização significativa torna o problema do planejamento da operação um problema não-separável no tempo, uma vez que qualquer decisão de deplecionamento destes reservatórios influencia a capacidade de geração do sistema no futuro. A capacidade de geração futura do sistema também é influenciada pelas afluições hidrológicas futuras, cujas previsões e incertezas devem ser consideradas no planejamento da operação do sistema. Em geral, a qualidade das previsões hidrológicas afeta o desempenho da operação do sistema aumentando benefícios e confiabilidade e, reduzindo custos. Potencialmente, o sistema brasileiro de geração de energia elétrica pode beneficiar-se largamente do contínuo aprimoramento dos modelos de previsão hidrológica. O planejamento da operação do sistema hidrotérmico interligado brasileiro, SIN, devido a sua complexidade, é atualmente feito em etapas com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL (Maceira et al., 2002). Em cada etapa os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização do tempo, e graus de detalhamento em suas representações, em particular das afluições hidrológicas futuras. A tabela 2 apresenta

as características dos modelos energéticos e hidrológicos desta cadeia.

Tabela 2 - Características dos modelos

Etapa	Médio Prazo	Curto Prazo	Programação da Operação
Modelo Hidrológico	GEVAZP	PREVIVAZ / GEVAZP	PREVIVAZH
Modelo de Otimização	NEWAVE	DECOMP	DESSEM
Horizonte de planejamento	Até 10 anos	Até 1 ano	Até 14 dias
Discretização temporal	Mensal	Semanal / Mensal	Horária / patamares
Afluições hidrológicas	Estocástico	Determinístico / Estocástico	Determinístico

No topo desta hierarquia, o planejamento da operação de médio prazo constrói uma política para ser usada ao início de cada mês que decide quanto da demanda total de energia do próximo mês será atendida pelo parque térmico e quanto será atendida por cada sub-conjunto de hidroelétricas agrupadas por regiões (modelo NEWAVE). Nesta etapa do planejamento a incerteza hidrológica é considerada através de cenários sintéticos de seqüências de energias naturais afluentes (ENAs) às sub regiões para os próximos 5 anos. Estas seqüências são geradas pela modelagem autorregressiva linear adotada pelo modelo GEVAZP (Maceira e Mercio, 1997, Jardim et al., 2001) tomando-se como condição inicial as afluições verificadas até os últimos 11 meses. O número de afluições verificadas utilizadas como condição inicial varia conforme o mês e a sub-região.

No planejamento de curto prazo, os blocos de geração hidráulico e térmico definidos pela política de longo prazo para o primeiro mês são desagregados em metas semanais de geração para cada usina do sistema (modelo DECOMP). A hidrologia é considerada parte determinística e parte estocástica. Para cada semana do primeiro mês as afluições são consideradas conhecidas utilizando-se previsões obtidas pelos modelos PREVIVAZ (Maceira et al., 1994) e CPINS (Acioli et al., 2004). Para os demais meses do horizonte do estudo considera-se cenários de afluições mensais gerados pelo modelo GEVAZP. Hoje é considerado um horizonte de apenas 2 meses.

Na programação diária (modelo DESSEM) a hidrologia é considerada de forma determinística, através da previsão de aflúências diárias para um horizonte de 7 a 13 dias. O modelo PREVIVAZH (Costa et al., 2000, Livino et al., 2001) foi desenvolvido para este fim. A Figura 1 apresenta a interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN.

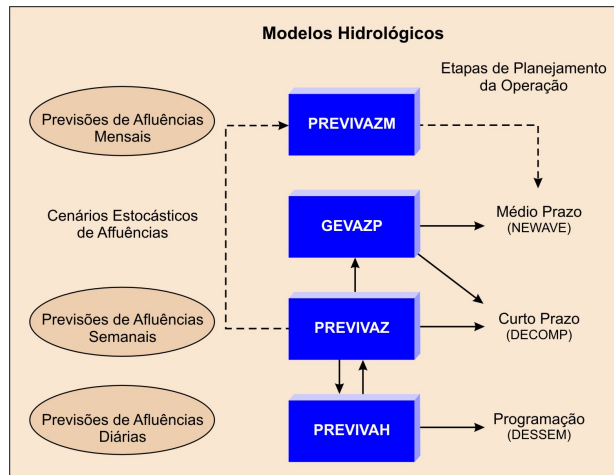


Figura 1 - Interação entre os modelos hidrológicos e a cadeia de planejamento da operação do SIN

Nos próximos itens são descritos os modelos de previsão hidrológica desenvolvidos pelo CEPEL utilizados neste planejamento e suas linhas atuais de aprimoramento.

MODELOS PREVIVAZ E PREVIVAZM

O modelo PREVIVAZM (Costa et al., 2003), tem como objetivo fornecer previsões mensais de aflúências a aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Hidroelétrico Brasileiro para um horizonte de até 12 meses, sendo uma ferramenta para estudos especiais de verificação de condições de atendimento da demanda energética no horizonte anual.

Já o modelo PREVIVAZ foi desenvolvido visando a obtenção das previsões de aflúências semanais, até seis semanas à frente, para serem utilizadas no primeiro mês do planejamento de curto prazo (Programa Mensal de Operação – PMO e suas revisões semanais). Este modelo é, portanto, executado ao final de cada mês para a elaboração do PMO do mês seguinte e, durante o mês em curso, é executado

do todas as semanas para a realização das revisões do PMO.

Nos modelos PREVIVAZ e PREVIVAZM adota-se uma abordagem bastante utilizada para obtenção de previsões de vazões fluviais que consiste no uso do valor esperado de modelos de séries temporais. Neste caso, a previsão toma partido não só do comportamento sazonal das precipitações, como também considera o importante fenômeno denominado tendência hidrológica. A tendência hidrológica é o termo utilizado para se referir à tendência observada nas séries históricas de vazões fluviais naturais, de valores superiores/inferiores ao valor normal do período serem seguidos e precedidos por valores também superiores/inferiores ao valor normal. Ou seja, se em uma certa semana (ou mês), a vazão do rio foi superior ao valor médio para aquela semana (ou mês), é provável que na semana (ou mês) seguinte a vazão do rio deverá continuar acima da média. Da mesma forma, se na semana (ou mês) a vazão foi inferior à média da semana (ou mês), na semana (ou mês) seguinte a vazão do rio deverá continuar abaixo da média. A ocorrência de tendência hidrológica tem sido atribuída ao fenômeno da infiltração de parcela do volume precipitado sobre a bacia hidrográfica. A parcela do volume precipitado que infiltra depende de diversos fatores, dentre eles, o estado de umidade da superfície do terreno. Assim, se na semana (ou mês) passada foi uma semana (ou mês) com bastante precipitação, e digamos, com vazões fluviais altas, esta semana (ou mês) tende a ser de vazões altas, pois a superfície do terreno deve estar úmida e a infiltração será pequena, aumentando o escoamento direto. Além disto, a parcela que infiltrou na semana (ou mês) passada, pode estar chegando ao rio esta semana (ou mês).

Na terminologia de séries temporais, a tendência hidrológica é conhecida como estrutura de dependência temporal, sendo quantificada pela função de autocorrelação estimada do registro de vazões. Essencialmente, qualquer estrutura de dependência temporal sazonal pode ser reproduzida por modelos de séries temporais lineares do tipo PARMA(p,q), sendo este tipo de modelo uma abordagem bastante flexível, e bastante popular para a modelagem estocástica de vazões fluviais (Hipel e McLeod, 1994). O PREVIVAZ e o PREVIVAZM utilizam modelos lineares do tipo PARMA(p,q) (Box e Jenkins, 1970), acoplado a diferentes pré-transformações das séries históricas, tipo Box-Cox ou logarítmicas (Box e Cox, 1964) e a diferentes formas de estimação de parâmetros dos modelos, para obtenção de previsões de vazões semanais e mensais respectivamente.

Tabela 3 - Alternativas de modelagem implementadas no PREVIVAZ

Modelo de Previsão	Característica	Método de Estimação
CONSTANTE	previsão pela média anual	momentos
SAZONAL	previsão pela média da semana	momentos
AR(p) ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação estacionária	momentos
ARMA(p,1) ($1 \leq p \leq 3$)	estrutura de correlação estacionária	momentos
PAR(p)-G1 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semestral	momentos
PAR(p)-G2 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal trimestral	momentos
PAR(p)-G3 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal mensal	momentos
PAR(p)-G4 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semanal	momentos
PAR(p)-RO ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal	regressão-origem
PARMA(p,1)-G1 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semestral	momentos
PARMA(p,1)-G2 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal trimestral	momentos
PARMA(p,1)-G3 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal mensal	momentos
PARMA(p,1)-G4 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semanal	momentos
PARMA(p,1)-RO ($1 \leq p \leq 3$)	estrutura de correlação sazonal	regressão-origem
PARMA(p,1)-R ($1 \leq p \leq 3$)	estrutura de correlação sazonal	regressão

Modelo PREVIVAZ

Em geral, processos naturais em escala semanal apresentam um comportamento periódico descrito pelos ciclos sazonais. Cada período apresenta um conjunto de características estatísticas próprias descritas pela média, desvio-padrão e estruturas de correlação sazonais (ou periódicos). Dependendo da bacia esta sazonalidade pode ser importante ou não. As formulações lineares de previsão de séries temporais selecionadas para análise foram classificadas em modelos estacionários e modelos periódicos. Na classe de modelos estacionários estão a média anual, a média de cada semana e os modelos auto-regressivos média-móvel ARMA(p,q). Nos modelos ARMA(p,q), a equação de regressão e a estrutura de correlação de uma dada semana com as semanas anteriores foram consideradas constantes ao longo do ano, tendo sido considerados na modelagem as médias e desvios-padrão sazonais (isto é, de cada semana). A estimação dos parâmetros desses modelos foi feita pelo método dos momentos.

Na classe dos modelos periódicos utilizou-se os modelos PARMA(p,q) que se caracterizam por apresentar uma equação de regressão para cada período. Nos modelos PAR(p) utilizou-se para estimação dos parâmetros o método dos momentos e também regressão linear em relação a origem das previsões (regressão usando-se apenas as vazões semanais anteriores a origem da previsão). Nos modelos PARMA(p,q), considerou-se o método dos momentos, regressão simples e regressão em relação a origem das previsões. Uma alternativa também considerada é a estrutura de correlação com sazonalidade mensal, trimestral e semestral. Esta facilidade tem a vantagem de aumentar a quantidade de informação para a estimação da função de correlação.

As diversas alternativas de classe de modelo, ordem dos modelos, agrupamento da estrutura de autocorrelação e métodos de estimação dos parâmetros resultaram em diferentes algoritmos de previsão, implementados no PREVIVAZ (Tabela 3). Qualquer dos algoritmos pode ser utilizado com aplicação da transformação Box-Cox, Logarítmica ou sem transformação da série histórica de afluência.

Escolha do melhor algoritmo de previsão

Na abordagem clássica de uso de modelos estocásticos para previsão (Box e Jenkins, 1970), as previsões são obtidas por equações matemáticas cujas estruturas e número de termos foram estatisticamente identificados e cujos coeficientes eficien-

temente estimados utilizando toda a informação disponível. Do ponto de vista prático, procura-se adotar tanto na identificação do modelo, quanto na estimação dos parâmetros, métodos “robustos”, ou seja, métodos resistentes às deficiências de modelagem.

Com efeito, expressões matemáticas utilizadas para descrever fenômenos da natureza são sempre aproximações da realidade, e devem sempre ser julgadas tendo em vista a sua utilização. Dooge (1972), lembra que um modelo é algo para ser usado e não algo em que se deve acreditar. Colocado diante de dois possíveis modelos de previsão, ou ainda de duas diferentes estimativas de um dos parâmetros do modelo, o previsor deve procurar desenvolver uma medida de precisão com a qual tomará a decisão sobre qual modelo utilizar para fazer a previsão.

Tabela 4 – Média dos erros percentuais absolutos das previsões semanais (período 1992-2001)

Aproveitamento	Semanas					
	1	2	3	4	5	6
Foz do Arica	35,9	48,9	56,2	60,8	63,0	63,3
Salto Osório	33,9	45,9	52,0	56,9	59,3	60,6
Itaipu	26,2	32,9	33,2	34,4	34,5	35,1

No modelo PREVIVAZ, os algoritmos de previsão, definidos por um modelo, método de estimação específico e transformação da série de vazões, são testados por um esquema robusto de validação cruzada, onde cada série é dividida em duas partes. Inicialmente, apenas a primeira parte da série é utilizada para a estimação dos parâmetros (estimação) e a segunda parte apenas para o cálculo de erros de previsão (verificação). Em seguida, a estimação dos parâmetros passa a ser feita com a segunda parte da série, ficando a primeira parte apenas para cálculo de erros de previsão. Para cada parte da série é computado o erro padrão de previsão (raiz quadrada da média dos quadrados dos erros de previsão - EQM) um passo à frente obtendo-se, a seguir, a média dos dois valores. O modelo PREVIVAZ utiliza a cada semana o algoritmo de previsão de menor erro médio quadrático de previsão um passo a frente, dentre os enumerados na Tabela 3.

Tabela 5 – Modelos implementados no PREVIVAZM

Modelo de Previsão	Característica	Método de Estimação
CONSTANTE	previsão pela média anual	momentos
SAZONAL	previsão pela média média do mês	momentos
AR(p) ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação estacionária	momentos
ARMA(p,1) ($1 \leq p \leq 3$)	estrutura de correlação estacionária	momentos
PAR(p)-G1 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semestral	momentos
PAR(p)-G2 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal trimestral	momentos
PAR(p)-G3 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal mensal	momentos
PARMA(p,1)-G1 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal semestral	momentos
PARMA(p,1)-G2 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal trimestral	momentos
PARMA(p,1)-G3 ($1 \leq p \leq 4$)	estrutura de correlação sazonal mensal	momentos
PARMA(p,1)-R ($1 \leq p \leq 3$)	estrutura de correlação sazonal	Regressão simples

Exemplo de Aplicação do Modelo PREVIVAZ

Como exemplo, utilizou-se o modelo PREVIVAZ para prever as afluências semanais incrementais aos aproveitamentos hidrelétricos de Foz do Arica, Salto Osório e Itaipu para o período de 1992 a 2001. Na Tabela 4 pode-se observar, para cada aproveitamento o esperado crescimento da média dos erros percentuais absolutos de previsão de afluências incrementais ao longo do horizonte de seis semanais (6 passos a frente). Observa-se a maior previsibilidade das afluências a Itaipu.

Modelo PREVIVAZM

O modelo PREVIVAZM foi desenvolvido a partir do modelo PREVIVAZ e segue a mesma abordagem, adaptando-a ao intervalo mensal e ao horizonte de 12 meses, mantendo-se o procedimento de estimação e escolha do melhor algoritmo de previsão. A Tabela 5 apresenta os algoritmos de previsão implementados no modelo PREVIVAZM. Estes algoritmos podem também ser aplicados às séries históricas de vazões mensais com transformação Box-Cox ou Logarítmica e nas séries sem transformação.

Exemplo de Aplicação do Modelo PREVIVAZM

Como exemplo, utilizou-se o modelo PREVIVAZM para prever as afluições mensais incrementais ao aproveitamento hidrelétrico de Itaipu para os meses entre janeiro de 2000 e dezembro de 2002. Na Tabela 6 pode-se notar a flutuação dos erros percentuais absolutos de previsão de afluições incrementais para até 12 (doze) passos à frente. Comparando-se com os resultados da Tabela 5 para Itaipu, pode-se inferir a maior previsibilidade relativa nas vazões mensais. Costa et al, 2003, apresentam resultados deste modelo, para estes mesmos anos para outros 21 aproveitamentos distribuídos por quatro bacias brasileiras.

Tabela 6 – Erro percentual absoluto

Itaipu	Erro (%)		
Antecedência	2000	2001	2002
1	18	8	21
2	21	12	19
3	21	13	15
4	21	15	16
5	19	13	22
6	17	14	18
7	20	12	14
8	22	10	18
9	26	10	18
10	19	9	16
11	21	8	15
12	22	8	15

MODELO PREVIVAZH

O PREVIVAZH é um modelo de natureza estocástica, baseado na desagregação em intervalos diários das previsões semanais utilizadas na elabora-

ção do Programa Mensal da Operação Energética, PMO (em geral, obtidas pelo modelo PREVIVAZ). O modelo utiliza as previsões das afluições semanais e seqüências sintéticas de vazões diárias (geradas pelo modelo DIANA, Kelman et al., 1983) para os sete dias da semana, condicionada às últimas afluições diárias observadas.

Geração de seqüências sintéticas de afluições diárias condicionadas

A geração de seqüências sintéticas de afluições diárias se baseia no modelo DIANA alterado para condicionar a geração de seqüências às informações hidrológicas recentes, ou seja, às duas últimas afluições diárias observadas. A seguir descreve-se de forma sucinta o modelo DIANA considerando as alterações referentes à geração condicionada.

O DIANA considera que as vazões diárias podem ser decompostas em duas parcelas: uma parcela dependente de fatores externos (por exemplo, precipitação) e outra que representa o contínuo esvaziamento da bacia. A vazão no dia t da hidrógrafa de um dado posto fluviométrico é dada pela soma de dois componentes:

$$Q(t) = U(t) + O(t), t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Idealmente, $U(t)$ dependeria principalmente de fatores externos (ex.: precipitações), cuja natureza intermitente ocasionariam na hidrógrafa pulsos irregularmente espaçados no tempo, e $O(t)$ representaria o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia. Considera-se a ocorrência de $u(t)$ positivo sempre que $q(t) > \lambda q(t-1)$, onde $0 \leq \lambda \leq 1$ é uma taxa de recessão característica do posto fluviométrico. Assim para qualquer λ teríamos:

$$\begin{aligned} u(t) &= 0 & \text{se } q(t) \leq \lambda q(t-1) \\ u(t) &= q(t) - \lambda q(t-1) & \text{se } q(t) > \lambda q(t-1) \end{aligned} \quad (2)$$

$$q(t) = \lambda q(t-1) + u(t), \quad u(t) > 0 \quad (3)$$

Nos dias em que não atuam fatores externos ($u(t) = 0$), a vazão total é dada simplesmente por $O(t)$, o qual pode ser considerado como a soma das defluências de dois reservatórios lineares, cada parcela dependendo de $q(t-1)$ através de uma equação probabilística. Esta abordagem pode ser simplificada considerando-se apenas um reservatório linear de comportamento estocástico. Assim, quando $u(t) = 0$, $O(t)$, e, portanto, $q(t)$, é uma fração $k(t) \leq \lambda$ da vazão anterior:

$$q(t) = O(t) = k(t) q(t-1), \quad k(t) \leq \lambda; \quad u(t) = 0 \quad (4)$$

Juntando-se as equações (1), (3) e (4) o modelo pode ser escrito por:

$$\begin{aligned} q(t) &= u(t) + k(t) q(t-1) \\ u(t) = 0 &\Rightarrow k(t) \leq \lambda \quad u(t) > 0 \Rightarrow k(t) = \lambda \end{aligned} \quad (5)$$

Existem dois aspectos a serem considerados na modelagem do processo $U(t)$: a definição de sua distribuição de probabilidade marginal levando-se em conta que existe uma probabilidade finita p de que $U(t)$ seja exatamente igual a zero, e a preservação da eventual dependência entre valores sucessivos de $U(t)$.

Quanto à questão da dependência entre $U(t-1)$ e $U(t)$, o modelo assume a existência de um processo autoregressivo normal de ordem 1 com censura, cujo coeficiente de autocorrelação ρ deve ser preservado. Este processo é mapeado em $U(t)$ através de uma transformação não-paramétrica que deve preservar as distribuições empíricas $F_U(\cdot)$. Seja, então, o processo markoviano $Z(t)$ definido por (6), onde $\varepsilon(t)$ é um ruído normal padrão e ρ a correlação lag-1 do processo.

$$z(t) = \rho z(t-1) + \varepsilon(t) \sqrt{1-\rho^2} \quad (6)$$

Seja o processo $Y(t)$ resultado de uma censura imposta ao processo $Z(t)$ definida por (7), onde β define o intervalo de censura $(-\infty, \beta)$, $\phi(\cdot)$ é a distribuição acumulada normal, e $p = P[u(t)=0]$. A relação entre $U(t)$ e $Y(t)$ é obtida resolvendo-se $F_U(u) = \phi(y(t))$.

$$\begin{aligned} y(t) &= z(t) & \text{se} & \quad z(t) > \beta \\ y(t) &= \beta & \text{se} & \quad z(t) \leq \beta \end{aligned} \quad (7)$$

$$\beta = \phi^{-1}(p)$$

Para a modelagem da série de $k(t)$'s assume-se que seja suficiente simplesmente usar para a geração de valores sintéticos a distribuição empírica de $k(t)$ menor que λ , $FK(\cdot)$, sempre que $u(t) = 0$, e $k(t) = q(t) / q(t-1)$.

Algoritmo de desagregação da previsão semanal

De forma bastante resumida, o processo de desagregação da previsão da afluência semanal QS_1 ,

em previsões para os 7 dias da semana, pode ser descrito da seguinte forma:

Consideram-se disponíveis a vazão semanal prevista para a semana que se inicia no dia $i = 1$, QS_1 , e as duas últimas vazões diárias observadas, referentes aos dias $i = -1$ e $i = 0$, respectivamente QD_{-1} e QD_0 .

- **Passo 1:** Gera-se conforme descrito no item 3.1, um conjunto de M seqüências sintéticas de 7 vazões diárias, $QD_i^m, i=1, \dots, 7; m=1, \dots, M$
- **Passo 2:** Do conjunto de M seqüências, seleciona-se aquela cuja vazão média semanal seja a mais próxima à QS_1 para formar a previsão das vazões dos dias $i=1, 2, \dots, 7$.

Vale observar que a previsão semanal, QS_1 , é obtida a partir de valores médios de afluências para semanas anteriores. É possível que as últimas afluências diárias observadas, QD_{-1} e QD_0 , estejam sinalizando que a previsão QS_1 esteja bastante descolada da realidade. Eventuais discrepâncias devem ser consideradas no processo de escolha da seqüência sintética a ser utilizada como previsão das afluências diárias para os dias da semana em curso.

No modelo PREVIVAZH o grau de discrepância entre QS_1 e as afluências diárias observadas é avaliado localizando o valor de QS_1 na distribuição de frequência das M médias semanais, $\{\overline{QD}^m, m=1, \dots, M\}$, correspondentes às seqüências sintéticas geradas no passo 1. Sempre que o valor de QS_1 estiver contido num intervalo de aceitação de QS_1 formado, por exemplo pelos quantis 5% ($\overline{QD}_{5\%}$) e 95% ($\overline{QD}_{95\%}$), nível de confiança de 90%, considera-se que não há discrepância entre QS_1 e as afluências diárias já ocorridas e, o passo 2 é então executado normalmente. Se o valor de QS_1 estiver fora deste intervalo, considera-se que há grande discrepância entre QS_1 e o conjunto formado pelas afluências diárias já ocorridas. Neste caso, o valor médio usado para seleção da seqüência sintética é a média das M médias semanais ($media \overline{QD}^m$). Caso $QS_1 \leq \overline{QD}_{5\%}$, no passo 2, o valor de média usado para seleção da seqüência sintética é obtido interpolando-se na reta definida pelos pontos ($\min_m \overline{QD}^m, media \overline{QD}^m$) e ($\overline{QD}_{5\%}, \overline{QD}_{5\%}$). Finalmente, no caso $QS_1 \geq \overline{QD}_{95\%}$, interpola-se na reta definida pelos pontos ($\max_m \overline{QD}^m, media \overline{QD}^m$) e ($\overline{QD}_{95\%}, \overline{QD}_{95\%}$). O nível

de confiança do intervalo de aceitação de QS_1 deve ser ajustado de acordo com as características de previsibilidade da vazão semanal na bacia em estudo (maiores detalhes ver Costa et al., 2004, Livino de Carvalho, 2001).

Cabe ressaltar que a média das previsões de aflúências diárias, obtidas pelo modelo PREVIVAZH para os sete dias da semana, pode ser utilizada como a previsão da aflúência semanal.

Exemplo de Aplicação do Modelo PREVIVAZH

Como exemplo, utilizou-se o PREVIVAZH para prever as aflúências diárias incrementais aos aproveitamentos hidrelétricos de Itaipu, Foz do Areia e Salto Osório para os sete dias das semanas dos anos de 1992 a 2001. Para cada aproveitamento a Tabela 7 apresenta o crescimento da média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências diárias ao longo do horizonte. Em termos de vazão diária a previsibilidade de Itaipu não é significativamente maior que dos demais aproveitamentos.

Para efeito de comparação Oliveira, 2003, obteve usando o modelo chuva-vazão SSARR previsões para as aflúências diárias ao aproveitamento de Manso, no rio Cuiabá, com erro médio absoluto percentual de 9 a 20% no primeiro dia e entre 20 e 35% no terceiro dia.

Tabela 7 – Média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências diárias

DIA						
1	2	3	4	5	6	7
Itaipu						
7,5	13,6	18,7	23,9	27,6	29,9	33,5
Foz do Areia						
5,6	10,9	16,2	21,6	26,7	31,6	37,2
Salto Osório						
6,4	13,2	19,6	25,4	29,7	33,9	38,5

APRIMORAMENTOS DOS MODELOS

Consideração da Informação de Precipitação

É de se esperar que a consideração da informação de precipitação nos modelos de previsão de vazão possa aumentar sua acurácia. Este potencial é maior na previsão de vazão em intervalo diário e semanal.

Tendo em vista que o modelo PREVIVAZH decompõe a previsão de aflúência semanal, é natural adotar como estratégia a inclusão das informações de precipitação no modelo PREVIVAZH, procurando assim concomitantemente melhorar o desempenho das previsões de vazões diárias e semanal correspondente.

A inclusão da informação de precipitação no modelo PREVIVAZH é feita através do condicionamento da distribuição de $U(t)$ (Costa et al, 2006).

O condicionamento da distribuição de $U(t)$ pressupõe a definição das classes de precipitação média diária na bacia. A informação de precipitação que será utilizada para condicionar a distribuição do processo $U(.)$ no dia t , pode ser na sua forma mais simples, a precipitação ocorrida para o dia $t-1$ ou a previsão da precipitação para o dia t . Outras alternativas incluem o uso de médias ponderadas de precipitações ocorridas recentemente de forma a modelar uma variação do tempo de viagem no interior da área de drenagem (maiores detalhes ver Costa et al., 2004). À medida que se deseja fazer previsões para mais de um dia de antecedência, as precipitações ocorridas em $t-1$, $t-2$, ... não estariam ainda disponíveis, considerando-se então que existem previsões disponíveis que seriam utilizadas.

Seja qual for a definição da informação quantitativa de precipitação considera-se possível calcular para cada dia do histórico o valor correspondente $prec(t)$. Se definirmos um valor crítico próximo de zero, e se dividirmos a amostra disponível de $u(t)$ em duas sub-amostras, a primeira incluindo apenas os dias em que $prec(t)$ não excede o valor crítico selecionado e a segunda incluindo os dias em que $prec(t)$ o excede, é de se esperar que a probabilidade de que $U(t)$ seja exatamente igual a zero varie em cada sub-amostra, apresentando valores maiores na primeira. Da mesma forma, espera-se que as distribuições empíricas de $U(t) > 0$ das duas sub-amostras difiram significativamente entre si. O valor crítico para esta repartição da amostra poderia ser objeto de uma calibração com o histórico, procurando obter o valor que fornece previsões de aflúências com menor erro médio absoluto. Este esquema de uso da informação de $prec(t)$ pode ser desdobrado dividindo-se a amostra em mais de duas sub-amostras. Os valores críticos das repartições poderiam ser calibrados de forma similar à calibração do valor crítico usado na primeira repartição da amostra.

A Tabela 8 apresenta a média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências incrementais diárias para até 7 passos à frente (uma semana à frente), para o período de 1992 a 2001, para

os aproveitamentos hidrelétricos de Itaipu, Foz do Areia e Salto Osório, considerando a precipitação média diária observada na bacia. Comparando-se com os resultados da Tabela 7 pode-se observar a influência da precipitação média diária a partir do terceiro dia.

Tabela 8 – Média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências diárias

DIA						
1	2	3	4	5	6	7
Itaipu						
7,8	13,2	17,5	21,1	22,9	25,9	29,3
Foz do Areia						
5,9	10,4	14,8	17,9	21,8	25,3	28,8
Salto Osório						
6,5	10,9	14,7	18,4	20,9	23,6	28,1

A Tabela 9 apresenta o efeito da consideração da precipitação média diária observada na bacia e das últimas vazões diárias observadas na média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências incrementais semanais 1 passo a frente, para o período de 1992 a 2001, para os aproveitamentos hidrelétricos de Itaipu, Foz do Areia e Salto Osório.

Tabela 9 - Média dos erros percentuais absolutos de previsão de aflúências semanais

Aproveitamento	PREVIVAZ	PREVIVAZH c/ chuva	Redução
Itaipu	26,20	16,80	36
Foz do Areia	35,86	16,72	53
Salto Osório	33,87	15,08	55

CONCLUSÃO

O planejamento da operação do sistema hidrotérmico interligado brasileiro devido à sua complexidade, é atualmente feito em etapas com o auxílio da cadeia de modelos desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Em cada etapa os modelos utilizados possuem diferentes horizontes de planejamento, discretização do tempo, e graus de detalhamento em suas representações, em particular das aflúências hidrológicas futuras.

Este trabalho descreveu as diferentes representações das aflúências hidrológicas aos aproveitamentos hidrelétricos nos modelos utilizados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS. Foram apresentados o detalhamento das formulações dos modelos de previsão PREVIVAZ, PREVIVAZM e PREVIVAZH, desenvolvidos no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Estes modelos adotam a formulação de séries temporais adaptadas para modelagem de séries de vazões para os intervalos de tempo mensal, semanal e diário. A estratégia geral de construção dos modelos visa minimizar os erros médios quadráticos ou percentuais ao longo dos históricos de vazões observadas. Em particular nos modelos PREVIVAZ e PREVIVAZM a escolha do melhor algoritmo de previsão é feita utilizando o esquema robusto de validação cruzada. Os desenvolvimentos mais recentes visam incorporar as previsões de precipitação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos diversos técnicos que contribuíram para o desenvolvimento dos modelos de previsão objeto deste trabalho: Angela de Carvalho Livino, Angela de Oliveira Ghirardi, Jerson Kelman, Joari Paulo da Costa, Marcos Denício de Souza da Silva e Paulo Roberto de Holanda Sales. Os autores agradecem também as contribuições sugeridas por: Ailton de Mesquita Vieira, Helena Maria K. Dantas, Luiz Guilherme F. Guilhon, Paulo Diniz, Simone Borin e Vinícius Forain Rocha.

Os autores agradecem ainda aos Revisores do Comitê Editorial da RBRH.

REFERÊNCIAS

- ACIOLI, G.C.L., GOMES, L.F.C. e MAGALHÃES, J.K.M. (2004): *Previsão de vazões diárias ao reservatório de Sobradinho*, VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz, Brasil.
- BOX, G. E. P. e COX, D.R. (1964): *An Analysis of Transformations*, Journal of the Royal Statistical Society, A127, 211-252.
- BOX, G. E. P. e JENKINS, G. M. (1970): *Time Series Analysis- Forecasting and Control*, Holden-Day.
- COSTA, F. S., DAMÁZIO J. M., LIVINO DE CARVALHO, A. R. e DANTAS, H. M. (2000): *PREVIVAZH – Modelo Es-*

- tocástico de Previsão de Vazões Diárias, Seminário Internacional sobre Hidrologia Operativa, CIER.
- COSTA, F. da S., DAMÁZIO, J.M., MACEIRA, M. E. P., SOUZA, M.D.S., GUILHON, L. G. e SILVA, S. B. (2003): *Modelagem Estocástica de Previsão de Vazões Mensais: PREVIVAZM*, XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba, PR, Brasil.
- COSTA F.S., DAMÁZIO J.M. e SOUZA M.D.S. (2004): *Uso de Informação Quantitativa de Precipitação na Previsão de Vazões Diárias Através de uma Abordagem Estocástica*, Proceedings of the XXI Congresso Latino americano de Hidráulica São Pedro, São Paulo, Brasil.
- COSTA, F. DA S., DAMÁZIO, J.M., SOUZA, M.D.S. e MACEIRA, M.E.P. (2006): *Previsão de Afluência Semanais para a Elaboração do Planejamento da Operação de Curto Prazo considerando a informação de Precipitação e as últimas afluências diárias observada*, X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Florianópolis, Brasil.
- COSTA, F. DA S., DAMÁZIO, J.M. e SOUZA, M.D.S. (2005): *Previsão de vazões diárias na programação eletroenergética do Sistema Interligado Brasileiro*, Proceedings of the XVIII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Curitiba, Brasil.
- DOOGE, J.C.I. (1972): *Mathematical Models of Hydrologic Series*, In: Biswas, A.K. (Ed.) *Modelling of Water Resource Systems*, Ed. A. Biswas Montreal, Harvest House, Vol 1.
- HIPEL, K.W. A. e McLEOD, I. (1994): *Time Series Modelling of Water Resources and Environmental Systems*, Elsevier.
- JARDIM, D.L.D.D., MACEIRA, M.E.P. e FALCÃO, D.M. (2001): *Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems Using Clustering Techniques*, In Anais do IEEE Porto Power Tech Conference, vol.3, Porto, Portugal.
- KELMAN J., DAMÁZIO J.M. e COSTA J.P. (1983): *Geração de Séries Sintéticas de Vazões Diárias – Modelo Diana*, Revista Brasileira de Engenharia – Caderno Recursos Hídricos, vol 1, no 2, Brasil.
- LIVINO DE CARVALHO A.R. (2001): *Previsão de Afluências Diárias Considerando Horizonte de 1 a 7 Dias Através de Uma Abordagem Estocástica – Modelo Previvazh*. Tese de Mestrado em Engenharia Civil, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.
- LIVINO DE CARVALHO, A. R., COSTA, F. S., DAMÁZIO, J. M. e GUILHON, L. G. F. (2001): *Previsão de Vazões Diárias através de uma Abordagem Estocástica – Modelo PREVIVAZH*, In XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Aracaju, SE, Brasil.
- MACEIRA, M.E.P., TERRY, L.A., COSTA, F.S., DAMÁZIO, J.M. e MELO, A.C.G. (2002): *Chain of Optimization Models for Setting the Energy Dispatch and Spot Price in the Brazilian System*, in Anais do XIV Power Systems Computation Conference, session 43, paper 1, Sevilla, Spain.
- MACEIRA, M.E.P. e MERCIO, C.M.V.B. (1997): *Stochastic Streamflow Model for Hydroelectric Systems*, in Anais do V International Conference PMAPS - Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Vancouver, Canada.
- MACEIRA M.E.P., DAMÁZIO J.M., GHIRARDI A.O. e DANTAS H. (1999): *Periodic ARMA Models Applied to Weekly Streamflow Forecasts*. Proceedings of the 1999 IEEE Powertech, Budapest.
- OLIVEIRA, L.C.K (2003): *Papel do Monitoramento e da Previsão de Vazões no Gerenciamento de Bacias Hidrográficas*, Tese de Mestrado, Programa de Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

Hydrological Forecasting Models Applied to Planning Brazilian Electricity Systems Operations

ABSTRACT

Electricity generation in Brazil depends basically on natural inflows to Brazilian hydropower developments distributed through twelve hydrographic basins in Brazil. These developments make up more than 85% of the installed generation capacity in this country. Reservoirs with a significant regulation capacity transform the operational planning into a problem that is not separable in time, since any decision to deplete these reservoirs influences the future system generation capacity. The future generation capacity of the system is also influenced by future hydrological inflows, whose forecasts and uncertainties must be taken into account in planning systems operation. This study describes the different representations of hydrological inflows to hydropower developments of the National Integrated System (SIN) in the models used by the National Operator of the Electric System – ONS in Planning the Operation. It also shows details concerning the formulations of the PREVIVAZ, PREVIVAZM and PREVIVAZH forecasting models developed by the CEPEL – Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, and some of its most recent developments.

Key-words: Flow forecasting, National Integrated System, Operational Planning.