

## Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos

Luiz Guilherme Ferreira Guilhon, Vinicius Forain Rocha

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico

guilhon@ons.org.br, vforain@ons.org.br

Jonatas Costa Moreira

Hicon Engenharia Ltda.

jonatas@hicon.com.br

Recebido: 01/11/06 - revisado: 23/01/07 - aceito: 26/07/07

---

### RESUMO

*O presente trabalho trata do desenvolvimento de concorrência entre diferentes alternativas de modelos de previsão de vazões médias diárias, com horizonte de até 12 dias à frente, utilizando informações de precipitação, para aplicação em aproveitamentos hidroelétricos do Sistema Interligado Nacional – SIN. Os aproveitamentos hidroelétricos considerados neste trabalho estão localizados nas bacias dos rios Iguaçu, Paraná e Paranaíba.*

*Foram empregados, no desenvolvimento dos modelos concorrentes, diversos métodos de previsão, abrangendo modelagem física, com modelos dos tipos conceitual concentrado e distribuído, metodologias híbridas combinando tanto técnicas de inteligência artificial e modelos estocásticos diversos, como técnicas de inteligência artificial e mineração de dados.*

**Palavras-chave:** *previsão de vazões, previsão de precipitação, inteligência artificial, rio Iguaçu, rio Paraná, rio Paranaíba, UHE Itaipu, UHE São Simão, UHE Salto Osório, UHE Foz do Areia, ONS.*

---

### INTRODUÇÃO

A significativa predominância da hidroeletricidade no parque gerador de energia elétrica do Brasil faz com que a informação de vazão natural afluente aos aproveitamentos hidroelétricos apresente-se como insumo fundamental para o planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional - SIN.

Conceitua-se a vazão natural afluente como a vazão que ocorre em uma seção de um rio no qual não existem ações antrópicas que alterem o seu regime, ou seja, aquela vazão que ocorreria em uma seção do rio caso não houvesse a operação de reservatórios a montante, nem a vazão evaporada pelos lagos artificiais, nem mesmo retiradas de água consumidas com abastecimento e irrigação a montante. Em síntese, a vazão provida pela própria natureza.

No planejamento e programação da operação dos recursos de geração e transmissão, integrantes do SIN, atividades realizadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, são adotados métodos de otimização a partir de programação dinâmica dual estocástica, as quais tratam as aflúências

aos aproveitamentos hidroelétricos através de cenários hidrológicos determinísticos para o 1º mês do horizonte de estudo e probabilísticos para os meses subsequentes até o final do horizonte de estudo, em geral, 5 anos a frente.

Para a obtenção dos cenários de aflúência determinísticos para o primeiro mês do estudo, são adotados modelos de previsão de vazão, enquanto que para a obtenção dos cenários de aflúência probabilísticos para o período de 2 meses a 5 anos a frente, são utilizados modelos de geração de séries sintéticas de aflúências.

Desta forma, os aperfeiçoamentos metodológicos para a obtenção dos cenários hidrológicos de previsão ou geração de aflúências contribuem para a melhoria do processo de planejamento e programação da operação do SIN. Neste contexto, este trabalho aborda o projeto de desenvolvimento de novos modelos de previsão de vazões, realizado entre os anos de 2004 e 2006, no âmbito do ONS, no qual foram comparadas diferentes alternativas tecnológicas para a previsão de vazões, com o objetivo de aprimorar a qualidade deste insumo para a operação do SIN.

## PREVISÃO HIDROLÓGICA NO ÂMBITO DO SIN

As previsões de vazões naturais, para todos os locais de aproveitamentos hidroelétricos do SIN, são obtidas, com a participação dos agentes de geração responsáveis por essas instalações, para dois horizontes temporais: de curtíssimo prazo, até 12 dias, com discretização em valores médios diários, para fins de programação diária; e de curto prazo, até seis semanas, através de valores médios semanais, para o planejamento de curto prazo da operação eletroenergética.

Os modelos de previsão de vazões, atualmente utilizados para todos os locais de aproveitamento, à exceção do aproveitamento de Sobradinho, na bacia do rio São Francisco, são os modelos estocásticos Previvaz [Maceira et al, 1999] e Previvazh [de Carvalho et al, 2001], respectivamente, modelos de previsão de vazões médias semanais e diárias. Estes modelos consideram, como insumo, apenas as informações históricas de vazões naturais observadas nos locais de aproveitamentos hidroelétricos.

A análise de desempenho disponível destes modelos ao longo dos últimos anos mostra que as vazões previstas apresentam desvios absolutos, em relação às vazões naturais observadas, de 12% a 68%, no caso da previsão de vazões médias semanais, para o período de 1997 a 2004, considerando uma semana a frente, e de 10% a 52%, no caso da previsão de vazões médias diárias, para os anos 2000 e 2001, considerando um dia à frente. A Tabela 1 apresenta os desvios médios absolutos percentuais dos modelos de previsão de vazões naturais médias semanais (Previvaz) e diárias (Previvazh) em alguns locais de aproveitamento. Entende-se por desvio absoluto o índice “MAPE” definido por:

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{|Q_{P,t} - Q_{O,t}|}{Q_{O,t}} \times 100$$

onde,

$MAPE$  = desvio absoluto

$Q_{P,t}$  = vazão (semanal ou diária) prevista no instante t.

$Q_{O,t}$  = vazão (semanal ou diária) observada no instante t.

N = número total de passos de tempo (semanas ou dias) usados na avaliação.

**Tabela 1 – Desvios médios absolutos dos modelos de previsão de vazões Previvaz (de 1997 a 2004) e Previvazh (de 2000 a 2001)**

Usina	Desvio Previvaz (%)	Desvio Previvazh (%)
Tucuruí	12,3	10,2
Itaipu	15,5	30,4
S. Simão	18,4	17,7
Marimbondo	20,9	16,2
S. Grande	21,6	12,9
Furnas	27,9	24,2
Paraibuna	28,6	37,2
Três Marias	35,3	31,8
S. Mesa	35,4	51,7
Foz do Arelia	38,0	12,2
Passo Real	42,0	27,9
Itá	67,6	NA

NA – Não avaliado.

## PREVISÃO METEOROLÓGICA NO ÂMBITO DO SIN

Nas últimas décadas, as diferentes tecnologias de modelagem, para reproduzir os fenômenos naturais, têm evoluído continuamente, propiciando ao homem a oportunidade de ampliar seus conhecimentos sobre a natureza e compreender seus processos físicos e biológicos.

Em relação a estes fatos destacam-se os avanços no tema de variabilidade climática e de previsão de tempo e clima. A cada ano a habilidade de previsões em escala global evolui e novos desenvolvimentos são esperados, com benefícios nas áreas técnicas, econômicas e sociais. Uma das linhas de pesquisa que tem contribuído para esse desenvolvimento é a técnica de regionalização da previsão climática.

Para a hidrologia existe um pleno potencial de utilização dessas estimativas climáticas de chuvas, na área de previsão de vazões, e no aprimoramento do conhecimento sobre os diferentes fenômenos naturais que constituem o ciclo hidrológico.

Há alguns anos, o ONS tem utilizado as previsões de precipitação geradas e disponibilizadas pelo CPTEC/INPE para a elaboração de previsão meteorológica para as bacias hidrográficas com aproveitamentos integrantes do SIN. Dentre estas previsões, destaca-se a obtida pelo modelo regional ETA, com resolução 40 km X 40 km, que apresenta resultados com qualidade razoavelmente satisfatória para os horizontes considerados.

O modelo regional ETA, apresentado em Chou (1996), trata-se de um modelo atmosférico desenvolvido pela Universidade de Belgrado em conjunto com o Instituto de Hidrometeorologia da

Iugoslávia, que é utilizado para simular a previsão do estado atmosférico. Foi instalado em 1996, no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), onde é executado operacionalmente, desde então, com o objetivo de fornecer a previsão numérica de tempo em sua área de cobertura, que engloba a maior parte da América do Sul e oceanos adjacentes. O modelo ETA é utilizado para prever fenômenos em mesoescala, como aqueles associados à orografia, brisas marítimas e tempestades severas. Devido à maior não-linearidade dos sistemas nesta escala, a previsibilidade é pequena e as previsões são de curto prazo. Maiores detalhes sobre o modelo ETA podem ser encontrados em Chou (1996). Dentre as variáveis meteorológicas previstas pelo modelo está a precipitação acumulada em 24 horas a cada dia. As previsões de precipitação são fornecidas em uma grade regular com resolução espacial de 40 km, iniciando-se às 12 TMG – Tempo Médio de Greenwich (correspondente às 09 horas do horário de Brasília quando não está em vigor o horário de verão) e estendendo-se por um horizonte de 10 dias.

Na figura 1, a seguir, apresenta-se, para o primeiro semestre de 2002, uma comparação entre a chuva acumulada para 7 (sete) dias obtida a partir do modelo ETA, ou seja, chuva prevista, e a média de chuva observada nos pluviômetros para a bacia do rio Paraná no trecho incremental entre a UHE Rosana, a UHE Porto Primavera e a UHE Itaipu, onde observa-se que, ao final do mês de janeiro, houve uma subestimativa da precipitação, e em seguida ao final de fevereiro houve uma superestimativa de precipitação, enquanto que em meados de maio houve uma chuva registrada nos pluviômetros que não foi prevista pelo ETA.

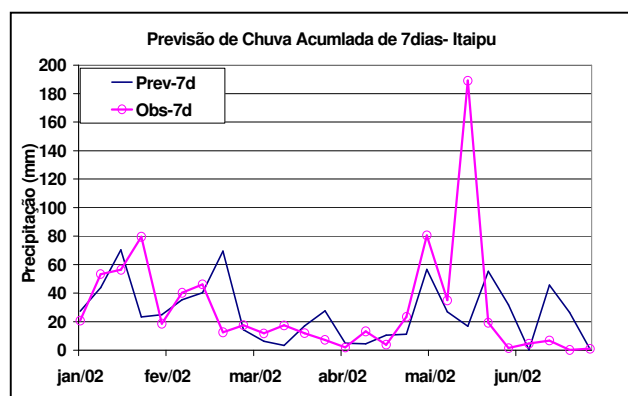


Figura 1 – Previsão de Precipitação em Itaipu

## CONCEPÇÃO DO PROJETO DE NOVOS MODELOS DE PREVISÃO DE VAZÕES EM CONCORRÊNCIA

Considerando a ordem de grandeza dos desvios existentes nas previsões de vazões naturais aos aproveitamentos do SIN, apresentadas na Tabela 1, é razoável supor um significativo potencial de melhoria nos processos de planejamento e programação da operação do SIN, caso houvesse alguma redução nestes desvios.

O acompanhamento dos avanços ocorridos nas áreas de previsão de tempo e clima, com a crescente redução dos desvios nas previsões de precipitação na escala de tempo, associado à demanda latente pela redução dos desvios nas previsões de vazões, levaram à concepção de um projeto de aperfeiçoamento das previsões de vazões em locais de aproveitamentos hidrelétricos do SIN, considerando informações de precipitação.

Entretanto, antes de se estabelecer o escopo do desenvolvimento a ser feito neste projeto, foi realizada uma etapa preliminar de conhecimento da oferta tecnológica disponível para a previsão hidrológica, com uso de informações de precipitação.

Para isso, foram desenvolvidas entrevistas com especialistas de diferentes áreas do conhecimento, abrangendo os temas previsão meteorológica, hidrologia física, hidrologia estocástica e sistemas inteligentes. Nestas entrevistas a abordagem baseou-se na troca de informações entre os técnicos do ONS e os especialistas, sendo que os técnicos do ONS apresentaram a situação atual da previsão hidrológica no âmbito do SIN e os especialistas expuseram as suas experiências consideradas válidas para os problemas enunciados pelo ONS.

Após esta fase de prospecção tecnológica e a partir da diversidade de alternativas metodológicas exploradas nessas entrevistas, algumas com experiências já exitosas em previsão hidrológica e outras acompanhadas de aplicações de sucesso em outras áreas, identificou-se um amplo conjunto de alternativas promissoras para o aperfeiçoamento da previsão hidrológica. Por outro lado, não se teve clareza acerca de qual seria a melhor alternativa.

Dessa forma, foi estruturado um projeto que previu o desenvolvimento de novos modelos de previsão de vazões, utilizando como principais insumos as séries históricas de vazões naturais e de precipitação, bem como as previsões de precipitação oriundas do modelo numérico ETA, tendo sido dividido

em diferentes fases, conforme as etapas apresentadas a seguir.

**Etapas 1 - Desenvolvimento de metodologias de modelos de previsão de vazão, consolidadas em protótipos preliminares.**

**Etapas 2 - Análise do desempenho dos protótipos preliminares dos modelos de previsão de vazão e seleção dos modelos para implementação.**

**Etapas 3 - Desenvolvimento e aquisição dos protótipos finais dos modelos selecionados.**

A estruturação do projeto em três etapas visou a segmentação entre a fase de desenvolvimento metodológico e a fase de transferência tecnológica, a fim de possibilitar, inicialmente, uma maior experimentação de diferentes metodologias, sem o custo da aquisição da tecnologia.

Para viabilizar a transição entre a fase de experimentação, representada pelo desenvolvimento dos protótipos preliminares (Etapas 1) e a fase de transferência tecnológica, representada pelo desenvolvimento e aquisição dos protótipos finais (Etapas 3), foi concebida a etapa de análise de desempenho dos protótipos preliminares (Etapas 2), que teve como finalidade a realização da seleção das melhores metodologias a partir de aplicações práticas e comparáveis entre si.

Um aspecto fundamental para razoabilidade da etapa de análise de desempenho era o de disponibilizar condições equânimes para as aplicações práticas. Neste sentido, optou-se pela formação de uma base de dados única, disponibilizada para o desenvolvimento de todas as alternativas metodológicas, à exceção daquelas que exigissem a utilização de informações peculiares e específicas. A base de dados do projeto foi, então, formada por séries históricas de dados hidrológicos nos locais de aproveitamentos e em postos fluviométricos e por séries históricas de precipitação observada em postos pluviométricos e séries históricas de 6 anos (de 1996 a 2001) de precipitação prevista para o horizonte de 10 dias, obtidas do modelo regional ETA. O objetivo de incluir estas últimas informações foi o de aproximar ao máximo o ambiente de desenvolvimento às condições reais de dados que estarão disponíveis no ambiente de operação, no qual os modelos estarão inseridos.

Em complementação à concepção do projeto, foram definidas três bacias hidrográficas como bacias piloto para a realização dos desenvolvimentos e aplicações previstos no âmbito do projeto. São elas as bacias dos rios Iguaçu, em todo o seu trecho a montante do aproveitamento hidroelétrico de Salto

Osório, Paraná, no trecho incremental entre os aproveitamentos de Itaipu, Rosana e Porto Primavera, e Paranaíba, no trecho incremental entre os aproveitamentos hidroelétricos de São Simão e Itumbiara. Na seleção destes trechos de bacias foi levada em consideração a diversidade de regimes hidrológicos, bem como a relevância da acurácia da previsão hidrológica nestes trechos para o planejamento e programação eletroenergética do SIN.

## DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

**Etapas 1 - Desenvolvimento de metodologias de modelos de previsão de vazão, consolidadas em protótipos preliminares.**

Esta etapa, conforme já mencionado, teve por objetivo o desenvolvimento de metodologias alternativas para a previsão de vazões naturais afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos do SIN, tendo como resultado os seguintes produtos esperados:

- Previsão de vazão natural média semanal (para 1 semana à frente);
- Previsões de vazões naturais médias diárias do 1º ao 12º dia.

A partir de um processo de seleção dentre 41 propostas recebidas, combinando metodologias e suas aplicações aos trechos de bacias definidos no escopo do projeto, foram escolhidas oito delas, as quais envolviam seis diferentes alternativas tecnológicas, conforme descrito a seguir.

**Modelo Multi-Layer Perceptron (MLP)** – Modelo que utiliza técnica de Inteligência Artificial baseada em Redes Neurais Artificiais, desenvolvido pela PUC-Rio, somente para a bacia do rio Iguaçu.

**Modelo de Regressão Dinâmica** – Modelo que utiliza técnicas Estocásticas de Regressão Dinâmica, desenvolvidos pela PUC-Rio, para as bacias dos rios Paranaíba e Paraná.

**Modelo Fuzzy Recorrente** – Modelo híbrido utilizando Técnicas de Mineração de Dados, com emprego de Cubo OLAP, e Modelos de Inteligência Artificial, baseados em algoritmos Fuzzy Recorrentes, desenvolvido pela UFF em conjunto com a UFRJ.

**Modelo SMAP** – Modelo Físico Concentrado SMAP (Lopes, 1999; Lopes et al, 1982), aplicado pelo LACTEC/PR.

**Modelo SMAP-MEL** – Solução com modelo híbrido, utilizando uma combinação do Modelo Físico Concentrado SMAP e do Modelo Estocástico Multivariado MEL, desenvolvidos pela Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica da USP.

**Modelo MGB-IPH** – Modelo Físico Distribuído complementado com Modelo Estocástico de Correção da Previsão, desenvolvido pela Rhama Consultoria Ambiental Ltda.

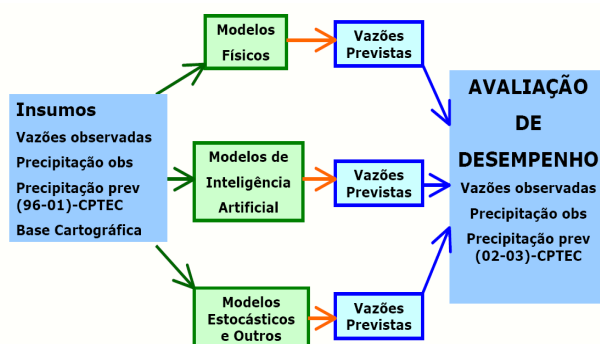
Essas cinco alternativas foram desenvolvidas e aplicadas nos trechos de bacias apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 - Aplicações das propostas metodológicas por trechos de bacias**

Bacia - Trecho	Modelo
Bacia do rio Iguaçu	Fuzzy Recorrente
	Multi-Layer Perceptron - MLP
	Físico Concentrado - SMAP
Paranaíba-Trecho incremental a São Simão	Regressão Dinâmica
	Físico Distribuído – MGB-IPH
Paraná – Trecho incremental a I-taipu	Regressão Dinâmica
	Físico Distribuído – MGB-IPH
	Físico/Estocástico – SMAP-MEL

**Etapa 2** - Análise do desempenho dos protótipos preliminares dos modelos de previsão de vazão e seleção dos modelos para implementação.

O esquema desta segunda etapa apresenta-se na figura 2.



**Figura 2 - Esquema da etapa 2 do PROJPREV**

Com o objetivo de poder comparar o desempenho dos diferentes modelos nas diferentes bacias hidrográficas, foram aplicados testes de avali-

ação do desempenho das previsões de vazões naturais. Estes testes procuraram simular, com o maior realismo possível, um ambiente de utilização do protótipo em tempo real, onde os dados observados na última semana são recebidos e armazenados numa base apropriada, as previsões de precipitação (modelo ETA-CPTEC) para os próximos 10 dias são recebidas e armazenadas e os modelos de previsão são acionados, fornecendo a previsão de vazões diárias para 12 dias à frente, além das previsões de vazões médias semanais para as uma semanas à frente, conforme descrito anteriormente.

Para aplicação dos testes foi escolhido o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2003, por ser o período subsequente ao empregado para treinamento dos modelos, evitando assim problemas de falta de continuidade dos dados, que poderiam afetar determinadas metodologias.

Foram empregados nas análises diversos índices estatísticos para comparar o desempenho das diversas metodologias, sendo que apenas os quatro índices mais importantes vão ser considerados no presente documento. A terminologia empregada é a seguinte:

- $QP_i$  – vazão média prevista na semana  $i$ ;
- $QO_i$  – vazão média observada na semana  $i$ ;
- $N$  – número de semanas consideradas na estatística;

Além do MAPE foram considerados também na avaliações outros três índices importantes:

- **MAD** – Média dos valores absolutos dos desvios

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |QP_i - QO_i|$$

- **NASH** - Coeficiente de Eficiência de Nash.

$$NASH = R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1..N} (QP_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1..N} (QO_i - \overline{QO})^2}$$

- **NASH-LOG** - Coeficiente de Eficiência de Nash aplicado aos logaritmos.

$$NASHLOG = 1 - \frac{\sum_{i=1..N} (\log(QP_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1..N} (\log(QO_i) - \overline{\log(QO)})^2}$$

O significado destes índices pode ser descrito da seguinte maneira:

**MAPE** – Traduz o quanto as previsões se desviam em valor percentual relativo aos valores observados. Este valor deverá ser muito elevado para locais com vazões pequenas, pois qualquer desvio poderá significar muito e deverá ser menor para locais com vazões maiores, pois, mesmo com grandes variações, estas significarão pouco em relação ao total a ser previsto.

**MAD** – Traduz o quanto as previsões de vazões se desviam (em m<sup>3</sup>/s) em relação aos valores observados, ou seja, em relação ao seu objetivo que é acertar a previsão. A tendência é que esse valor seja mais elevado para locais com maiores vazões e seja menor para locais com valores menores de vazões. Quanto menor seja o seu valor melhores são as previsões.

**NASH** – Conhecido como coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe, traduz a eficiência de realizar previsões mais acertadas nas cheias, ou seja, quando o aproveitamento encontra-se com vazões bastante elevadas. Quanto maior a eficiência, ou seja, maior o valor do índice, melhores serão as previsões. Este índice é limitado em 1.

**NASHLOG** – É o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe aplicado aos logaritmos, o qual valoriza mais as vazões baixas que o coeficiente NASH tornando-se menos sensível a cheias. Quanto maior a eficiência, ou seja, maior o valor do índice, melhores serão as previsões. Este índice é limitado em 1.

Estas estatísticas também foram aplicadas a sub-períodos do período de teste, tais como:

- Apenas as previsões realizadas para o ano 2002;
- Apenas as previsões realizadas para o ano 2003;
- Período Úmido (menos para o Iguaçu) – Jan/2002-Abr/2002; Nov/2002-Abr/2003; Nov/2003-Dez/2003;
- Úmido Iguaçu (semanas 3 a 7, 16 a 26, 31 a 52 do ano 2002 e semanas 5 a 13, 22 a 31 e 43 a 52 do ano 2003);
- Período Seco – (menos para o Iguaçu) – Mai/2002-Out/2002; Mai/2003-Out/2003;
- Seco Iguaçu (semanas 1 e 2, 8 a 17, 27 a 30 de 2002 e semanas 1 a 4, 14 a 21, 32 a 42 de 2003);
- Itaipu (semanas 1 a 6, 19 a 23, 47 a 50 de 2002 e 3 a 13 e 45 a 51 de 2003);
- São Simão (semanas 1 a 14 de 2002 e semanas 1 a 18 e 49 a 51 de 2003).

## BACIA DO RIO PARANAÍBA

Nesta bacia, para o trecho incremental entre a UHE Itumbiara e a UHE São Simão, concorreram o modelo conceitual distribuído, MGB-IPH e um modelo estocástico baseado em regressão dinâmica.

Na Tabela 3, apresenta-se uma comparação dos resultados dos modelos de previsão de vazões concorrentes e os resultados do modelo em uso atualmente pelo Setor Elétrico, Previvaz. Observa-se nessa Tabela 3, que, os resultados do modelo MGB-IPH foram superiores aos demais modelos em todos os índices.

**Tabela 3 – Resultados na Bacia do rio Paranaíba**

ESTATÍSTICA	PREVIVAZ	MGB/IPH	REGRESSÃO
<b>MAD</b>	169,84	112,97	131,74
<b>MAPE</b>	16,15	10,82	11,94
<b>NASH</b>	0,759	0,889	0,859
<b>NASHLOG</b>	0,842	0,928	0,902

## BACIA DO RIO PARANÁ

Nesta bacia, para o trecho incremental entre as UHE Rosana, UHE Porto Primavera e a UHE Itaipu, concorreram o modelo conceitual distribuído, MGB-IPH, o modelo físico conceitual/estocástico SMAP-MEL, e um modelo estocástico baseado em regressão dinâmica.

Na Tabela 4, apresenta-se uma comparação dos resultados dos modelos de previsão de vazões concorrentes e os resultados do modelo em uso atualmente no Setor Elétrico, Previvaz. Observa-se nessa Tabela 4, que, os resultados do modelo MGB-IPH foram superiores aos demais modelos em todos os índices.

**Tabela 4 - Resultados na Bacia do rio Paraná**

ESTATÍSTICA	PREVIVAZ	SMAP-MEL	MGB-IPH	REGRESSÃO
<b>MAD</b>	587,48	524,79	458,92	579,30
<b>MAPE</b>	28,37	20,90	19,28	23,43
<b>NASH</b>	0,031	0,382	0,570	0,306
<b>NASHLOG</b>	0,242	0,563	0,666	0,498

## BACIA DO RIO IGUAÇU

Nesta bacia, para as UHE Jordão, UHE Foz do Areia e o trecho incremental entre a UHE Foz do Areia a UHE Jordão e a UHE Salto Osório, concorreram o modelo conceitual concentrado, SMAP, o modelo de Redes Neurais Multi-Layer Perceptrons com Back Propagation e o modelo Fuzzy Recorrente baseado no emprego do cubo OLAP para exploração de técnicas de mineração de dados.

Nas Tabelas 5, 6 e 7 apresentam-se comparações dos resultados dos modelos de previsão de vazões concorrentes e os resultados do modelo em uso atualmente no Setor Elétrico, Previvaz, para os três trechos de bacia avaliados. Observam-se nessas tabelas que os resultados do modelo da Fuzzy Recorrente foram superiores aos demais modelos em quase todos os índices.

**Tabela 5 - Resultados na UHE Foz do Areia**

ESTATÍSTICA	PREVIVAZ	SMAP	MLP	FUZZY
<b>MAD</b>	199,49	216,23	166,15	159,73
<b>MAPE</b>	40,68	38,50	35,64	31,93
<b>NASH</b>	0,260	0,131	0,565	0,582
<b>NASHLOG</b>	0,487	0,576	0,651	0,720

**Tabela 6 - Resultados na UHE Jordão**

ESTATÍSTICA	PREVIVAZ	SMAP	MLP	FUZZY
<b>MAD</b>	51,16	59,44	41,99	38,01
<b>MAPE</b>	43,81	47,47	32,88	36,99
<b>NASH</b>	-0,034	-0,269	0,145	0,488
<b>NASHLOG</b>	0,286	0,288	0,358	0,573

**Tabela 7 – Resultados na incremental à UHE S.Osório**

ESTATÍSTICA	PREVIVAZ	SMAP	MLP	FUZZY
<b>MAD</b>	151,83	107,52	120,28	97,60
<b>MAPE</b>	46,88	31,15	31,91	31,23
<b>NASH</b>	-0,023	0,450	0,210	0,584
<b>NASHLOG</b>	0,299	0,546	0,456	0,654

**Etapa 3 – Desenvolvimento e aquisição dos protótipos finais dos modelos selecionados.**

A partir dos resultados apresentados anteriormente foi selecionada a seguinte alternativa de desenvolvimento e aquisição de protótipos finais:

- Para a bacia do rio Paranaíba: considerando-se a diferença significativa dos resultados favoravelmente ao modelo MGB-IPH resolveu-se optar por esse modelo conceitual distribuído.
- Para a bacia do rio Iguaçu: apesar dos resultados não apontarem de forma unânime para um único modelo, a grande maioria dos resultados foi favorável ao modelo Fuzzy Recorrente, razão pela qual se optou por esse modelo.
- Para a bacia do rio Paraná: embora os resultados também indicassem um resultado favorável ao modelo MGB-IPH, considerando a necessidade de se conhecer e aplicar diferentes metodologias nas bacias de interesse do SIN optou-se por o modelo físico concentrado/estocástico, SMAP-MEL, por considerar seus resultados também bastante satisfatórios.

Essa decisão de opção pelos modelos escolhidos permitiu a implementação de uma diversificação de metodologias, no sentido de iniciar seu uso e avaliar os resultados no planejamento e programação da operação dos aproveitamentos do SIN.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A partir do desenvolvimento do projeto de previsão de vazões com inclusão de informações de precipitação, chegou-se às seguintes conclusões:

- Os novos modelos selecionados tiveram um desempenho superior ao Previvaz nos índices avaliados.
- A informação de previsão de precipitação incorpora um ganho de qualidade aos modelos de previsão de vazões.
- Recomenda-se investir em melhorar ainda mais a qualidade da previsão de precipitação obtida com o modelo regional ETA, seja por modificação em sua parametrização, seja por alteração em sua escala.
- Recomenda-se estudar formas de obter previsões de precipitação que não fossem simplesmente resultados diretos da saída do

modelo ETA, mas uma composição destes resultados com outras informações obtidas a partir de outros modelos numéricos em diferentes escalas, bem como dados de imagens de satélite e radar meteorológico.

- Deverão ser acompanhados os resultados obtidos com esses modelos a partir de sua implantação na atividade de planejamento e programação da operação do SIN.
- Deve-se investir cada vez mais na melhoria das previsões de precipitação, pois poderão trazer ainda mais benefícios aos resultados dos modelos chuva-vazão desenvolvidos.

*ous techniques, including concentrated and distributed rainfall-runoff models, a stochastic approach and different artificial intelligent technologies using fuzzy and data mining.*

*Key-words: streamflow forecasts, rainfall forecasts, artificial intelligence, Iguaçu river, Paraná river, Paranaíba river, Itaipu Hydropower Plant, São Simão Hydropower Plant, Salto Osório Hydropower Plant, Foz do Areia Hydropower Plant, SIN (National Integrated System)*

## REFERÊNCIAS

- CHOU, S. C. Regional ETA Model. In *Climanálise - Boletim de Monitoramento e Análise Climática*. Edição Comemorativa de 10 anos. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE/CPTEC, Cachoeira Paulista, SP, 1996.
- MACEIRA M.E.P., DAMÁZIO J.M., GHIRARDI A.O. & DANTAS H. (1999): Periodic ARMA Models Applied to Weekly Streamflow Forecasts. *Proceedings of the 1999 IEEE Powertech*, Budapest.
- DE CARVALHO, A. R. L., 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.
- LOPES, J. E. G. Manual do modelo SMAP. 1999.
- LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. SMAP - A Simplified Hydrological Model, *Applied Modelling in Catchment Hydrology*, Ed. V.P.Singh, Water Resources Publications, 1982.

## *Comparison of Forecasting Methods for Natural Inflows in Hydropower Developments*

### ABSTRACT

*This study compares the results of different daily streamflow forecast models using information on observed and forecast rainfall, applied to hydropower plants of the Brazilian National Integrated System - SIN.*

*These streamflow forecasting models are defined to obtain future values up to 12 days ahead for the Iguaçu river basin, the river basin upstream from Itaipu and the Paranaíba river basin between Itumbiara and São Simão hydropower plants. These models are developed using vari-*