



**XXIII SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GOP/33
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO -IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS- GOP

**O USO DE INFORMAÇÃO METEOROLÓGICA NO PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO DO SISTEMA
INTERLIGADO NACIONAL**

Grupo de Estudo de Operação de Sistemas Elétricos
Tema Preferencial: **Planejamento e programação da operação**

Autores: **ROCHA, V.F. (1); BRAGA, R.G.S. (1); FRANÇA, E.H.F. (1); CATALDI, M. (2);**
Instituições: ⁽¹⁾ ONS (1); ⁽²⁾ UFF (2)

RESUMO

Este trabalho aborda o uso de informações meteorológicas para o planejamento da operação, contemplando os desenvolvimentos realizados nos últimos 10 anos para a incorporação deste tipo de informação, os resultados alcançados até então e as perspectivas de inovações tecnológicas para o aprimoramento do uso destas informações no planejamento da operação do SIN.

A incorporação de informações meteorológicas se dá através de modelos hidrológicos que utilizam informações de chuva observada e prevista para a obtenção de previsões de vazão, denominados de modelos chuva vazão.

PALAVRAS-CHAVE:

Previsão de Vazão, Previsão de Chuva, Modelo Chuva-Vazão, Previsão Climática

INTRODUÇÃO

A previsão de vazões afluentes aos aproveitamentos hidroelétricos vem se constituído em uma das mais importantes informações para o planejamento e programação da operação do Sistema Interligado Nacional – SIN. Devido à predominância da geração hidroelétrica no parque gerador de energia elétrica do Brasil, a qual foi responsável no ano de 2013 por 79% de toda a energia produzida, e ao declínio que vem sendo observado na capacidade de regularização de vazões pelo sistema de hidroelétricas, em razão das restrições ambientais para a implantação de reservatórios de grande porte, tem sido crescente a relevância da previsão de vazões neste contexto. A qualidade destas informações tem efeito cada vez mais significativo nas decisões de intercâmbio de blocos de geração entre os diferentes subsistemas existentes no SIN e nos despachos de geração térmica, visando a otimização do uso dos recursos disponíveis.

No planejamento da operação dos recursos de geração e transmissão integrantes do SIN, atividade sob a responsabilidade do Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, são adotadas ferramentas de programação dinâmica estocástica dual para a tomada de decisão sobre o uso ótimo dos recursos de geração disponíveis, tendo em vista o atendimento eletroenergético. O uso destas ferramentas tem como um de seus insumos fundamentais, em especial num sistema como o brasileiro, as afluições futuras aos aproveitamentos hidroelétricos, que devido ao grau de incerteza envolvido em cada etapa de planejamento da operação, podem ser representadas através de cenários determinísticos ou probabilísticos.

Neste contexto, o uso de informações meteorológicas tem contribuído para os aperfeiçoamentos metodológicos para a obtenção dos cenários hidrológicos futuros em busca da melhoria do processo de planejamento da operação do SIN.

(*) Rua Júlio do Carmo, 251, Cidade Nova, RJ – Brasil - Tel.: (+55 21) 3444-9400

(**) Rua Passo da Pátria, 156 – Bl. D, Sala 133, São Domingos, Niterói – RJ – Brasil - Tel.: (+55 21) 2629-5354

1. REPRESENTAÇÃO DAS AFLUÊNCIAS AOS APROVEITAMENTOS HIDROELÉTRICOS

Para a realização dos estudos de planejamento da operação de curto prazo de um sistema de geração fortemente baseado na hidroeletricidade, um dos componentes de maior importância é a representação das afluições futuras aos aproveitamentos hidroelétricos. No sistema brasileiro, a representação das afluições foi dividida em três etapas: a primeira referente ao primeiro mês do horizonte de planejamento, com discretização semanal e afluições tratadas individualmente por usina, a segunda referente a um período de um ou mais meses à frente (atualmente adota-se apenas o período de um mês), com discretização mensal e afluições tratadas individualmente por usina, e a terceira etapa, referente ao período restante até o horizonte de cinco anos à frente, com discretização mensal e afluições tratadas de forma agregada em energia para cada um dos subsistemas interligados eletricamente, abrangendo todos os aproveitamentos hidroelétricos dos subsistemas na forma de reservatórios equivalentes.

Para a primeira etapa dos estudos de planejamento, ou seja, no horizonte do primeiro mês, são adotados cenários hidrológicos determinísticos, obtidos através de modelos de previsão de vazão. Para a segunda e terceira etapas, ou seja, para os meses subsequentes até o final do horizonte de estudo, são adotados cenários hidrológicos probabilísticos providos por modelos de geração de séries sintéticas de afluições. A Figura 1 ilustra a representação das afluições adotada nos estudos de planejamento da operação através de cenários hidrológicos determinísticos e probabilísticos.

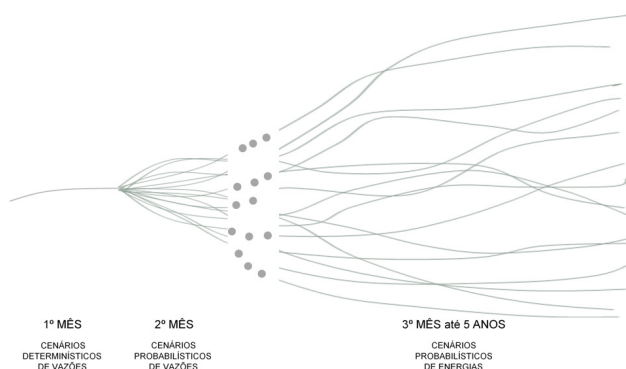


FIGURA 1- Representação Atual das Afluições nos Estudos de Planejamento da Operação do SIN

Os modelos de previsão de vazões, adotados para a obtenção dos cenários determinísticos para o horizonte de um mês, se dividem em dois grupos: no primeiro deles estão os modelos que se baseiam exclusivamente nas informações de vazões observadas históricas, denominados de modelos estocásticos vazão-vazão, e no segundo estão os modelos que utilizam informações de precipitação observada e prevista, além das informações de vazões observadas, denominados de modelos chuva-vazão. O uso desta segunda abordagem de modelagem hidrológica para a previsão de vazões tem sido alavancado pelos avanços tecnológicos e computacionais alcançados na modelagem numérica de previsão do tempo, a qual tem apresentado um crescimento de sua destreza ao longo das últimas décadas [KALNAY, 2003]. Além disso, pela disponibilidade de boas alternativas de modelagem hidrológica para a representação do processo de transformação de chuva em deflúvio.

Os modelos estocásticos de previsão de vazão adotados para o horizonte de um mês são o Previvazh [COSTA et al., 2000, LIVINO DE CARVALHO, 2001] e o Previvaz [MACEIRA et al., 1999], respectivamente, modelos de previsão de vazões médias diárias e semanais. Estes modelos consideram como insumo apenas as informações históricas de vazões naturais observadas nos locais de aproveitamentos hidroelétricos.

Os modelos chuva-vazão de previsão de vazão são responsáveis atualmente por cerca 64% das afluições previstas no planejamento da operação do SIN. Estes modelos se subdividem em modelos do tipo conceitual ou físico, modelos de inteligência artificial, baseados em técnicas de redes neurais e técnicas similares, e modelos mistos, nos quais são ponderados os resultados de duas diferentes modelagens, envolvendo inclusive a modelagem estocástica. Dentre estes, destaca-se em termos de abrangência espacial de utilização no SIN, o modelo Smap [LOPES et. al., 1982], o qual abrange atualmente, em termos médios, a previsão de cerca de 32% da energia natural afluyente ao sistema brasileiro. Em geral, a discretização dos resultados desse tipo de modelo é diária, sendo o seu resultado agregado para a obtenção da previsão de vazão média semanal utilizada no processo de planejamento da operação. Em razão da queda de desempenho da previsão de precipitação para períodos superiores a dez dias, os modelos chuva-vazão têm sido adotados até então apenas no horizonte de uma semana à frente.

Os cenários probabilísticos de afluições para o horizonte de um mês até cinco anos à frente, adotados na 2ª e 3ª etapas dos estudos de planejamento, que complementam a representação das afluições aos aproveitamentos hidroelétricos, são obtidos através do modelo Gevazp [MACEIRA e MERCIO, 1997, JARDIM et al., 2001], o qual se trata de modelo estocástico de geração de séries sintéticas de afluições do tipo autorregressivo periódico.

Em razão do planejamento e do despacho dos recursos de geração do SIN ser realizado de forma centralizada pelo ONS, com o objetivo de assegurar a otimização destes recursos, cabe exclusivamente ao ONS a obtenção dos cenários de afluições utilizados em todas as três etapas dos estudos de planejamento da operação do SIN.

Tendo em vista que a informação meteorológica só está incorporada de forma objetiva na primeira etapa de planejamento da operação, ou seja, na etapa em que as afluições futuras são obtidas através de modelos de previsão de vazões do tipo chuva-vazão, e que, até então, a incorporação dessas informações se atém ao horizonte de uma semana à frente, este trabalho tem como foco os modelos de previsão hidrológica e meteorológica adotados neste horizonte. Para o entendimento e análise desses modelos, são apresentadas de uma forma simplificada as concepções

gerais dos modelos hidrológicos de previsão chuva-vazão e do modelo meteorológico de previsão de chuva, bem como a avaliação de seus desempenhos.

2. PREVISÃO HIDROLÓGICA

Tendo como referência o ano de 2014, a previsão de vazões médias semanais é realizada para os 155 aproveitamentos hidroelétricos considerados no planejamento da operação do SIN. Estas usinas, em geral, tem potência igual ou superior a 30 MW, pois aquelas de menor porte não são consideradas de forma individualizada nos estudos de planejamento. Destas 155 usinas, 107 (69%) têm as suas previsões obtidas diretamente de modelos de previsão de vazão e as 48 (31%) usinas restantes têm as previsões semanais determinadas através de equações de regressão, a partir dos resultados das previsões obtidas dos modelos. Das 107 usinas para as quais são obtidas previsão de vazão através de modelos, 49%, ou seja, 52 usinas têm suas previsões semanais para a primeira semana do horizonte de planejamento obtidas através de modelos chuva-vazão, sendo que uma destas usinas tem também suas previsões semanais para a segunda semana do horizonte de planejamento obtidas através de modelo chuva-vazão. As usinas cujas previsões são obtidas pelos modelos chuva-vazão abrangem as seguintes bacias hidrográficas brasileiras e áreas de drenagem:

- i) Bacia do rio São Francisco – 611.000 km²
- ii) Bacia do rio Paranaíba – 171.000 km²
- iii) Bacia do rio Grande – 139.000 km²
- iv) Bacia do rio Paranapanema – 101.000 km²
- v) Bacia do rio Paraná – 151.000 km²
- vi) Bacia do rio Iguaçu – 57.000 km²
- vii) Bacia do rio Uruguai – 44.000 km²

A Figura 2 apresenta a localização geográfica das bacias hidrográficas do SIN que dispõe de previsão de vazão para o horizonte de até uma semana à frente através de modelos chuva-vazão.

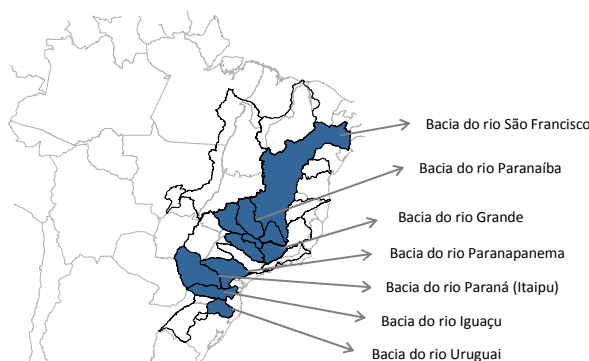


FIGURA 2 – Localização das bacias hidrográficas brasileiras que dispõem de modelos de previsão hidrológica do tipo chuva-vazão

Para a bacia do rio São Francisco é adotado o modelo Cpins [ACIOLI et. al., 2004], que associa uma rotina de propagação de vazões a um modelo de redes neurais para a transformação chuva-vazão. Por se tratar de uma bacia em que há uma extensa área localizada na região do semiárido brasileiro, localizada na região nordeste do Brasil, a propagação de vazões observadas e previstas em postos localizados a montante desta região seca traz bons resultados para a previsão de vazões nas usinas hidroelétricas situadas a jusante. Para a previsão das vazões nos trechos a montante da região do semiárido é utilizado o modelo Neuro3m, baseado em técnica de redes neurais, que tem como insumo informações de vazões observadas e chuva observada e prevista até 10 dias à frente.

Para a bacia do rio Paranaíba são adotados dois modelos para diferentes trechos, Smap e MGB [COLLISCHONN et. al., 2007], ambos classificados como físicos, que buscam representar através de equações matemáticas o escoamento da água na superfície terrestre e nas camadas do solo, com base nas informações de precipitação e de vazões observadas. O que diferencia estes dois modelos é que o Smap trata o processo de transformação chuva-vazão de uma forma concentrada, ou seja, a bacia hidrográfica ou o trecho de bacia incremental entre dois locais com informação de vazão são considerados como uma única unidade de área para a representação da transformação chuva-vazão, enquanto que o MGB trata a bacia ou trecho de bacia de forma distribuída, subdividindo-a em várias unidades de área, nas quais são representados os fluxos de água em cada uma delas.

Para as bacias dos rios Grande, Paranapanema e Paraná, sendo que para esta última apenas o trecho incremental a usina de Itaipu, é adotado o modelo Smap.

Para a bacia do rio Iguaçu é adotado o modelo Fuzzy [EVSUKOFF et. al., 2012], que é um modelo chuva-vazão de transferência não linear, baseado em técnicas de redes neurais e mineração de dados, recorrente e com “fuzzificação” da chuva, que utiliza como insumo as vazões passadas, a precipitação observada nos últimos dois dias anteriores ao dia da previsão e a previsão de precipitação para 10 dias, discretizada diariamente.

Para a bacia do rio Uruguai é adotado o modelo MPCV/Previvaz [CATALDI et. al., 2007], que se trata de um modelo misto que combina os resultados do modelo estocástico Previvaz com a classe de vazão determinada por um modelo de técnica de mineração de dados, o qual utiliza como insumo as informações de vazão observada e de precipitação observada e prevista.

Para este conjunto de usinas, cuja previsão de vazões para a primeira de semana dos estudos de planejamento é obtida através de modelos chuva-vazão, as previsões complementares para as semanas subsequentes até o final do 1º mês do horizonte de

planejamento são obtidas a partir do modelo estocástico Previvaz. Para as demais usinas nas quais são utilizados modelos de previsão de vazões, as previsões semanais, da primeira à última semana do primeiro mês do horizonte de planejamento da operação, são obtidas também a partir do modelo estocástico Previvaz. Para estas usinas também é utilizado o modelo Previvazh de previsão de vazões diárias para a estimativa da vazão média da semana anterior à primeira do horizonte de planejamento.

Cabe destacar que o uso de modelagem chuva-vazão no âmbito do SIN foi iniciado em 2006, após um projeto de desenvolvimento de novos modelos de previsão de vazão, o qual contemplou o estudo de seis diferentes alternativas de modelagem em aplicações em diferentes trechos de bacias. Neste estudo foram identificados ganhos de qualidade na previsão de vazões com o uso das informações de previsão de precipitação [GUILHON, 2007]. Tanto para o desenvolvimento deste projeto como para a execução de forma operacional dos modelos chuva-vazão adotados no processo de planejamento da operação, a previsão de precipitação utilizada provém do modelo ETA [CATALDI et. al., 2007] de previsão numérica do tempo. No tópico a seguir é apresentada uma descrição sucinta da previsão meteorológica utilizada como base para os modelos chuva-vazão.

3. PREVISÃO METEOROLÓGICA

O Modelo Eta é proveniente do National Centers for Environmental Prediction (NCEP) [MESINGER et. al., 1988; BLACK, 1994]. O modelo tem sido utilizado operacionalmente para produzir previsões de tempo sobre a América do Sul desde 1996 no Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE). É um modelo em ponto de grade, sendo que na horizontal as variáveis são distribuídas na grade E de Arakawa [ARAKAWA e LAMB, 1977], com uma resolução espacial de 40 km, e a coordenada vertical é a coordenada η [MESINGER, 1984], que permite que a topografia seja resolvida na forma de degraus discretos, diferentemente do que ocorre na maioria dos demais modelos atmosféricos.

O domínio do modelo utilizado no CPTEC/INPE abrange a maior parte da América do Sul e inclui parte dos oceanos adjacentes. A Figura 3 mostra o domínio na projeção do modelo.

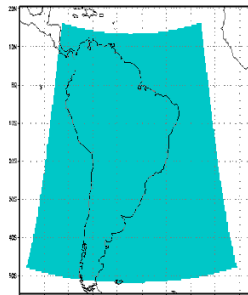


FIGURA 3 – Domínio do modelo Eta atualmente utilizado no ONS, proveniente do CPTEC/INPE.

4. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DOS MODELOS DE PREVISÃO HIDROLÓGICA

Para assegurar que a incorporação de previsão meteorológica traz ganhos aos modelos de previsão de vazões para o horizonte de uma semana à frente, foram feitos previamente estudos de validação e testes para todos os novos modelos, comparando os resultados com aqueles que seriam obtidos com utilização da metodologia anteriormente adotada.

Durante este processo surgiu a necessidade de definir uma métrica para comparar os resultados obtidos. Foi adotado o indicador denominado Distância Multicritério, o qual combina dois indicadores comumente utilizados na comparação de hidrogramas e cuja metodologia está descrita a seguir.

4.1. Indicador Distância Multicritério

Há grande dificuldade em encontrar um indicador, entre os usuais, que seja robusto o suficiente para uma boa comparação de hidrogramas observados e previstos. Identificamos dois tipos de indicadores: os que consideram a média das diferenças entre valores observados e previstos e outros que avaliam a qualidade da previsão comparada a um valor preestabelecido.

Para formar um indicador único que levasse em consideração as duas possibilidades foi criado um indicador composto pelo indicador Erro Médio Percentual Absoluto – MAPE e pelo indicador Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS.

O MAPE é a média da diferença absoluta entre os valores previstos e observados, expressa em porcentagem dos valores observados. Este indicador apresenta a vantagem de não ser influenciado pelo valor absoluto das vazões, podendo assumir valores no intervalo $[0, \infty)$. MAPE=0 corresponde a previsões perfeitas no período.

Erro Médio Percentual Absoluto – MAPE:

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{(O_t - P_t)}{O_t} \right|$$

Onde:

n - número de intervalos de tempo

O_t - vazão observada no intervalo de tempo t

P_t - vazão prevista no intervalo de tempo t ;

O NS é utilizado para avaliar o poder de predição dos modelos hidrológicos. Este indicador pode assumir valores no intervalo $(-\infty, 1]$. NS= 1 corresponde à previsão perfeita das vazões no período em foco. NS<0 mostra que utilizar as previsões do modelo é pior do que utilizar o valor médio das observações.

Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe – NS

$$NS = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (P_t - O_t)^2}{\sum_{t=1}^n (P_t - \bar{O})^2}$$

Onde:

n - número de intervalos de tempo

O_t - vazão observada no intervalo de tempo t

\bar{O} - média das vazões observadas nos intervalos de tempo de 1 a n

P_t - vazão prevista no intervalo de tempo t ;

O índice Distância Multicritério – DM utiliza os indicadores como um par ordenado (1-NS, MAPE), e calcula a distância euclidiana ao ponto ótimo, no caso (0,0). A fórmula para a DM é:

$$DM = \sqrt{(1 - NS)^2 + MAPE^2}$$

4.2. Avaliação de desempenho

Desde janeiro de 2006, o ONS iniciou o uso de modelos que incorporam informações de precipitação observada e prevista ao processo de previsão de vazões com horizonte de uma semana à frente. Os períodos de testes de cada modelo não são necessariamente iguais, embora alguns coincidam.

A Tabela 1 mostra o desempenho dos modelos chuva-vazão, apresentando os resultados dos índices utilizados para comparação com o desempenho da metodologia anteriormente adotada. A análise desta mostra, por meio do índice DM, que a substituição da metodologia anteriormente utilizada trouxe ganhos em todas as bacias.

TABELA 1 – Resultados obtidos nos testes dos modelos Utilizados Atualmente comparando com a metodologia anterior

SUB-BACIA	ÁREA (km ²)	Período	Modelo Chuva - Vazão				Metodologia Anterior		
			MODELO	MAPE	NASH	DM	MAPE	NASH	DM
Camargos	6.279	ago/96 - jul/98 ago/01 - jul/03	SMAP	16,0	0,763	0,286	18,6	0,753	0,309
Inc. Funil	9.491			15,6	0,619	0,412	25,8	0,470	0,589
Inc. Furnas	36.368			14,8	0,880	0,191	22,6	0,746	0,340
Inc. P.Col/Furnas	25.289			14,8	0,853	0,209	41,9	0,497	0,654
Euclides da Cunha	4.392	jan/02 - dez/03 fev/06 - dez/07	SMAP	16,2	0,759	0,291	20,0	0,710	0,352
Inc. Marimbondo	36.696			11,6	0,886	0,163	17,0	0,800	0,262
Inc. Água Vermelha	20.922			15,0	0,685	0,349	18,0	0,770	0,292
Jurumirim	17.891	ago/97 - jul/99 ago/00 - jul/01 ago/02 - jul/03	SMAP	20,1	0,640	0,412	21,8	0,549	0,501
Inc. Chav/Jurum	9.878			26,3	0,431	0,627	39,9	-0,058	1,131
Inc. Canoas/Chav	13.507			16,8	0,653	0,386	27,0	0,306	0,744
Inc. Capiv/Canoas	43.439			19,4	0,651	0,399	36,3	0,188	0,890
Inc. Rosana/Capiv	16.084			14,0	0,182	0,830	42,5	-3,222	4,243
Corumbá IV	6.938			15,0	0,770	0,275	21,0	0,620	0,434
Inc. Corumbá	20.666	jan/02 - dez/03 fev/06 - dez/07	SMAP	13,0	0,870	0,184	18,0	0,800	0,269
Serra do Fação	10.639			11,0	0,890	0,156	16,0	0,790	0,264
Inc. Emborcação	18.411			14,0	0,870	0,191	21,0	0,760	0,319
Nova Ponte	15.480			16,0	0,810	0,248	24,0	0,660	0,416
Inc. Itumbiara	22.594			15,0	0,700	0,335	23,0	0,600	0,461
Inc S.Sim/Itumb	76.746			10,8	0,889	0,155	16,2	0,759	0,290
Inc. Itaipu	150.901	jan/02 - dez/03	SMAP-MEL	20,9	0,382	0,652	28,4	0,031	1,010
Foz do Areia	30.127	jan/02 - dez/03	FUZZY	31,9	0,582	0,526	40,7	0,260	0,844
Jordão	4.682			37,0	0,488	0,632	43,8	-0,034	1,123
Inc. S.Osor/FA - Jor	10.960			31,2	0,584	0,520	46,9	-0,023	1,126
Campos Novos	14.514	jan/01 - dez/02	MPCV	29,0	0,305	0,753	35,3	0,242	0,836
Barra Grande	12.028			46,7	0,164	0,958	72,0	-0,030	1,257
Itá total	44.258			42,5	0,217	0,891	60,9	-0,074	1,235
Três Marias	50.732	jan/03 - dez/03 jan/06 - dez/07	NEURO3M	21,0	-	-	28,0	-	-

5. PERSPECTIVAS DE EVOLUÇÃO NO USO DE INFORMAÇÕES METEOROLÓGICAS

A incorporação das informações meteorológicas no estabelecimento de cenários futuros de aflúências aos aproveitamentos hidroelétricos do SIN tem um potencial de aplicação que transcende o horizonte da previsão do tempo. Até então foi explorado o horizonte de uma semana à frente em razão da qualidade da previsão de precipitação ser adequada apenas neste período para o seu uso na obtenção de cenários determinísticos de vazões, através dos modelos de previsão hidrológica. No entanto, considerando-se que nos estudos de planejamento da operação já são adotados cenários probabilísticos a partir do horizonte de dois meses à frente, há uma perspectiva bastante promissora de incorporação das previsões climáticas sazonais na forma de cenários probabilísticos de precipitação. Estas previsões têm sido acompanhadas de forma qualitativa pelo ONS para a identificação antecipada de situações anômalas nas condições hidrometeorológicas das regiões de interesse para o parque gerador do SIN. Com base neste tipo de informação pode ser identificada uma situação de atenção sobre a projeção de eventuais reduções na oferta de energia hidráulica nos próximos meses, assim como a indicação de uma situação oposta. De qualquer

forma, como ainda não se dispõe de uma modelagem que incorpore de forma objetiva estas previsões climáticas de precipitação na obtenção dos cenários probabilísticos de vazões, o uso destas previsões ainda é incipiente e com possibilidade de melhorias.

Para se ter uma ideia da qualidade desta informação, são apresentados a seguir alguns resultados de modelos de previsão climática, tendo como foco a previsão de precipitação. Estes resultados têm como referência para a avaliação de sua qualidade, os valores médios de precipitação observada nas bacias de interesse para a operação do SIN. Os modelos avaliados foram o CFS do NCEP, CCM3 do NCAR, Global do COLA e o ECHAM do IRI [CATALDI et. al., 2012].

Para a utilização da previsão de modelos climáticos, com horizontes de um a três meses, se faz necessário a utilização de técnicas de Ensemble [WEISHEIMER et. al., 2009], que se caracterizam pela combinação de resultados de diferentes condições iniciais, condições de contorno ou esquemas paramétricos de um mesmo modelo e até mesmo de diferentes modelos (Ensemble Multi-Model). Um exemplo deste tipo de aplicação pode ser observado na Figura 4, onde são apresentados os resultados das previsões por Ensemble do modelo ECHAM 4.5, para a bacia do rio Paranapanema.

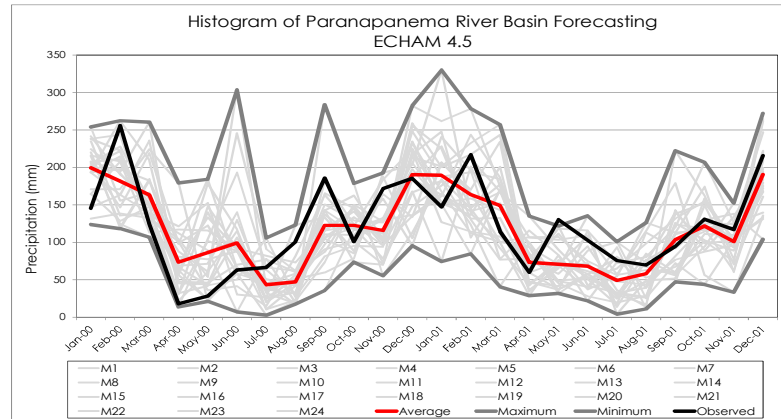


FIGURA 4 – Exemplo da aplicação de técnicas de previsão de precipitação do modelo ECHAM 4.5 para o horizonte de um mês, utilizando as técnicas de Ensemble para os anos de 2000 e 2001 na bacia do rio Paranapanema. Fonte: [CATALDI et. al., 2012].

Outro aspecto importante na previsão de precipitação para horizontes mensais é a necessidade da remoção dos erros sistemáticos (viés) destas previsões. Para este tipo de correção pode-se utilizar um ajuste linear, ou então uma correção estatística a partir do ajuste das Probability Density Function dos valores observados e previstos (Figura 5).

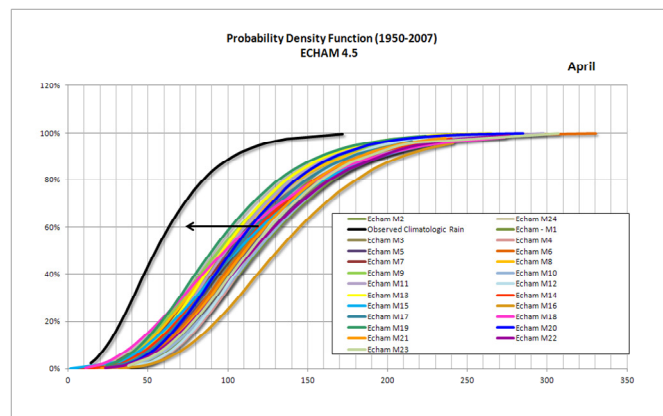


FIGURA 5 – Exemplo da remoção do viés das previsões de precipitação utilizando o ajuste das curvas de Probability Density Function. Fonte: [CATALDI et. al., 2012].

Na tabela 2 é apresentado um dos resultados do estudo de Cataldi et. al. (2012) para a bacia do rio Grande, no período de 1984 a 2002. Nesta tabela estão os erros absolutos da média das previsões dos modelos ECHAM 4.5, CFS 2, CCM3 e COLA para esta bacia, em um horizonte de um mês, sem e com a aplicação da técnica de remoção de viés. Observa-se nesses resultados que os erros dos modelos, após a remoção de viés, foram bastante reduzidos, sendo os modelos ECHAM 4.5 e CFS os que apresentaram os menores índices de erro.

TABELA 2 – Erros absolutos médios das previsões dos modelos ECHAM, CFS, CCM3 e COLA, no horizonte de um mês para a bacia do rio Grande, no período de 1984 a 2002. Fonte: [CATALDI et. al., 2012].

Absolute erros (mm) without scale adjustment Grande River Basin					Absolute erros (mm) with linear scale adjustment Grande River Basin				
	ECHAM	CFS	CCM3	COLA		ECHAM	CFS	CCM3	COLA
January	74,8	76,2	73,5	458,2	January	74,9	74,9	73,8	74,1
February	55,3	53,9	66,7	454,2	February	55,0	52,6	66,1	57,8
March	46,2	43,9	88,3	241,3	March	36,6	39,6	46,3	50,3
April	56,8	19,7	39,0	92,9	April	22,0	29,5	28,2	33,6
May	24,3	24,8	41,1	31,3	May	22,4	23,8	22,4	27,2
June	28,4	14,1	15,8	35,2	June	18,4	13,9	22,3	20,0
July	26,0	14,0	13,6	45,9	July	16,3	12,1	16,0	16,5
August	32,5	16,9	18,1	86,3	August	17,4	17,4	18,0	16,7
September	48,3	32,1	31,0	83,5	September	30,4	33,3	30,7	28,4
October	109,9	55,8	54,1	162,1	October	37,7	33,3	41,5	35,7
November	93,7	45,0	35,8	254,3	November	43,1	38,4	35,8	54,2
December	60,9	73,7	64,2	333,4	December	56,9	62,7	59,3	59,8
Average	54,8	39,2	45,1	189,9	Average	35,9	35,9	38,4	39,5

Além da ampliação do uso da informação de previsão meteorológica para horizontes superiores a uma semana, tem-se como outra alternativa de inovação tecnológica nesta área o uso combinado de mais de um modelo de previsão numérica do tempo, com a adoção de técnicas de “ensemble”. Nesta direção, o ONS realizou um estudo para avaliar novas configurações e resoluções espaciais do modelo ETA e outros modelos de previsão de precipitação.

Neste estudo foram avaliadas previsões para horizontes de 10 dias, elaboradas pelos seguintes modelos do CPTEC/INPE: ETA 40 (resolução espacial de 40x40 km), ETA 15 (resolução espacial de 15 km x 15 km com mudanças em seus esquemas paramétricos) e BRAMS (resolução espacial de 15 x 15 km). O período de análise foi de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, totalizando 6 anos de previsões. Os resultados mostraram que para a grande maioria das bacias do SIN não houve diferenças significativas na qualidade da previsão de precipitação com o aumento da resolução espacial, e nem com as modificações do modelo ETA. Estatisticamente o desempenho dos modelos ETA 40 e ETA 15 foi similar. Já as previsões do modelo BRAMS, quando comparadas com as previsões do modelo ETA, apresentaram diferenças marcantes. O modelo ETA teve desempenho superior para as bacias do Sul do Brasil. Para todas as demais bacias do SIN o melhor desempenho das previsões foi obtido com a combinação linear das previsões dos modelos ETA 15 e BRAMS (ensemble), exceto na bacia do rio Paraíba do Sul onde as previsões do modelo BRAMS tiveram desempenho superior.

Estudos recentes realizados com o uso de diversas previsões do modelo GFS do NCEP, com alterações em suas condições iniciais (Ensemble de condições iniciais), mostraram que seu desempenho, a partir do segundo dia do horizonte da previsão, é, em geral, superior aos dos quatro modelos anteriormente citados em todas as principais bacias do SIN.

Estes resultados, mesmo que limitados a poucos modelos atmosféricos, mostram que é possível obter-se ganhos na qualidade das previsões de precipitação com a combinação da previsão com uso de diferentes condições iniciais (Ensemble de condições iniciais) e de diferentes modelos (Ensemble Multi-Model) de previsão do tempo.

6. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com o uso de informações meteorológicas em modelos hidrológicos de previsão de vazões afluentes, aplicados em bacias hidrográficas onde estão localizados aproveitamentos hidroelétricos do SIN, apresentam um ganho na qualidade das previsões de vazões adotadas no planejamento da operação do SIN. O uso da previsão de precipitação agrega uma informação relevante sobre o futuro, que não é utilizada pelos modelos estocásticos até então adotados, que tem se limitado a utilizar apenas as informações de vazões observadas passadas.

No entanto, há um grande potencial para desenvolver melhorias na forma de utilização dos modelos de previsão meteorológica e climática no planejamento da operação dos aproveitamentos hidroelétricos. Tanto pode-se ampliar o horizonte temporal de incorporação deste tipo de informação, com a adoção de previsões climáticas de precipitação nas previsões determinísticas de vazões afluentes e na geração de cenários probabilísticos das afluições para meses à frente, como pode-se estudar o usos de outras alternativas de modelagem de previsão do tempo, além da atualmente adotada, incluindo o uso de “ensemble” de resultados de diferentes modelos.

Desta forma, pode-se concluir que o desenvolvimento de aplicação de modelagem hidrológica com o uso de informações meteorológicas para a previsão de afluições no planejamento da operação dos aproveitamentos hidroelétricos é um caminho adequado para o aprimoramento do planejamento da operação do SIN, que pode e deve ser explorado com maior profundidade para buscar-se ampliar os ganhos já conquistados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ACIOLI, G. C. L.; GOMES, L. F. C.; MAGALHÃES, J. K. M.; (2004). "Previsão de Vazões Diárias ao Reservatório de Sobradinho". VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luis/MA - Brasil.
- (2) ARAKAWA, A. and LAMB, V.R. Computational design of the basic dynamical process of the UCLA general circulation model. *Methods Comput. Phys.* 17: 173-265, 1977.
- (3) BLACK, T. L. The new NMC mesoscale Eta model: Description and forecast examples. *Wea. Forecasting*, 9, 265-278, 1994.
- (4) CATALDI, M.; FREITAS, Bruno G.; DA SILVA, Simone B.; GUILHON, Luiz G. F.; ACHÃO, Carla da C. L.. Aplicação de Técnica de Mineração de dados como complemento às previsões estocásticas univariadas de vazão natural: Estudo de Caso para a bacia do rio Iguaçu. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 83-92, 2007.
- (5) CATALDI, M.; MACHADO, Christiane Osório; GUILHON, Luiz G. F.; CHOU, Sin Chan; GOMES, Jorge L.; BUSTAMANTE, Josiane F. Análise de Previsões de Precipitação obtidas com a utilização do modelo ETA como insumo para modelos de previsão semanal de vazão natural. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 5-12, 2007.
- (6) CATALDI, M., BRAGA, R. S., LOPES DIAS, T., de SÁ, R. V., ROCHA, V. F. e SOUZA FILHO, F. A. Assessment Of Precipitation Climate Forecasting Of Models Echam 4.5, Cfs, Cola/Iri And Ccm3 For Hydrographic Basins In Southwest Brazil, CLIVAR VAMOS Workshop on Modeling and Predicting Climate in the Americas, 2012.
- (7) COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; and TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large scale rainfall runoff modeling. *Hydrological Sciences Journal*, 52(5), 878-895, doi: 10.1623/hysj.52.5.878, 2007.
- (8) COSTA, F. S., DAMÁZIO J. M., LIVINO DE CARVALHO, A. R. e DANTAS, H. M. (2000): PREVIVAZH – Modelo Estocástico de Previsão de Vazões Diárias, Seminário Internacional sobre Hidrologia Operativa, CIER.
- (9) EVSUKOFF, Alexandre G.; CATALDI, Marcio; DE LIMA, Beatriz S.L.P.. A multi-model approach for long-term runoff modeling using rainfall forecasts. *Expert Systems with Applications*, v. 39, p. 4938-4946, 2012.
- (10) GUILHON, L. G. F.; ROCHA, V. F.; MOREIRA, J. C. (2007). "Comparação de Métodos de Previsão de Vazões Naturais Afluentes a Aproveitamentos Hidroelétricos". *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Volume 12, nº 3, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Brasil.
- (11) 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.
- (12) KALNAY, E. (2003). "Atmospheric modeling, data assimilation and predictability". Cambridge University Press, p. 341.
- (13) 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.
- (14) 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.
- (15) 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.
- (16) 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
- (17) MESINGER, F. A blocking technique for representation of mountains in atmospheric models. *Riv. Meteor. Aeronaut.*, 44, 195-202, 1984.
- (18) MESINGER, F.; JANJIC, Z. I.; NIXKOVIC, S.; GAVRILOV, D.; DEAVEN, D. G.: The step-mountain coordinate: Model description description and performance for cases of Alpine lee cyclogenesis and for a case of Appalachian redevelopment. *Mon. Wea. Rev.*, 116, 1493-1518, 1988.
- (19) WEISHEIMER, A., F. J. DOBLAS-REYES, T. N. PALMER, A. ALESSANDRI, A. ARRIBAS, M. DÉQUÉ, N. KEENLYSIDE, M. MACVEAN, A. NAVARRA, and P. ROGEL (2009), ENSEMBLES: A new multi-model ensemble for seasonal-to-annual predictions—Skill and progress beyond DEMETER in forecasting tropical Pacific SSTs, *Geophys. Res. Lett.*, 36, L21711, doi:10.1029/2009GL040896.

8. DADOS BIOGRÁFICOS

Vinicius Forain Rocha, natural do Rio de Janeiro, RJ, nascido em 22/04/1963.

Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRJ, 1986, Mestrado em Engenharia Civil, Área de Recursos Hídricos, UFRJ/COPPE, 1993.

Engenheiro Civil, especializado em Recursos Hídricos, com atuação no setor elétrico na área de hidrologia operacional, desde 2002, como Gerente de Recursos Hídricos e Meteorologia no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS.

Rogério Saturnino Braga, natural do Rio de Janeiro, RJ, nascido em 28/04/1956.

Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRJ, 1978, Pós Graduação em Recursos Hídricos, UFRJ/COPPE, 1983.

Engenheiro Civil, especializado em Recursos Hídricos, com atuação em diversas empresas nas áreas de hidrologia e de obras hidráulicas, em especial na área de hidrologia operacional.

Eduardo Henrique Ferreira França, natural do Rio de Janeiro, RJ, nascido em 11/11/1956.

Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia da UFRJ, 1982, Pós Graduação em Engenharia Elétrica, UNICAMP 1997.

Engenheiro Civil, especializado em Recursos Hídricos e Planejamento Energético, com atuação em diversas empresas nas áreas de hidrologia operacional, planejamento da operação, de curto e longo prazos, distribuição de energia elétrica, e de comercialização de energia elétrica.

Marcio Cataldi, natural de Curitiba, PR, nascido em 26/11/1974.

Graduação em Meteorologia pela UFRJ, 1999, Mestrado em Engenharia Mecânica pela UFRJ, 2002 e Doutorado pela UFRJ, 2008. Atualmente é Professor Adjunto do Curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal Fluminense, possuindo também experiência em temas do setor elétrico brasileiro. Tem atuado principalmente nos seguintes temas: camada limite, modelagem atmosférica, turbulência, modelagem hidrológica e previsão do tempo e clima.