

AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE LIMITES APLICADOS AS PREVISÕES DE AFLUÊNCIAS SEMANAIS CALCULADAS PELO MODELO PREVIVAZ

Saulo Aires de Souza¹; Fernanda da Serra Costa^{1,2}; Maria Elvira P. Maceira^{1,2} & Jorge M. Damazio^{1,2}

RESUMO --- A geração de energia elétrica no Brasil depende basicamente das vazões que naturalmente afluem aos aproveitamentos hidroelétricos brasileiros. O uso de previsões hidrológicas pode melhorar o desempenho da operação do sistema aumentando benefícios e confiabilidade e, reduzindo custos. O modelo PREVIVAZ, modelo de previsão de vazões semanais, é utilizado no planejamento hidrotérmico de curto prazo, sendo seu desempenho essencial para a qualidade do planejamento mensal da operação (PMO). Por trabalhar com séries temporais o modelo PREVIVAZ apresenta alguns inconvenientes para determinadas séries de vazões, que apresentam fraca estrutura de auto-correlação. Sendo assim, foi desenvolvida no CEPEL uma metodologia que aplica limites na previsão cujo objetivo principal é melhorar a capacidade preditiva do PREVIVAZ. Foram feitas inúmeras simulações para séries de diferentes bacias e concluiu-se que a utilização dessa nova metodologia de aplicação de limites na previsão é viável melhorando o desempenho do modelo de um modo geral.

ABSTRACT --- The generation of electricity in Brazil is basically the flow that naturally flock to the Brazilian hydroelectric exploitations. The use of hydrological forecasts can improve the performance of the operation of the system benefits and increasing reliability and reducing costs. The model PREVIVAZ, model of weekly estimates of flows, is used in the planning of hydrothermal short term, their performance is essential to the quality of the planning of monthly operation (PMO). By working with time series PREVIVAZ the model presents some drawbacks for a series of flows, which have low self-correlation structure. So, was developed in CEPEL a methodology that applies limits to predict whose main aim is to improve the predictive capacity of PREVIVAZ. We made many simulations for different sets of basins and concluded that the use of this new methodology for the application of limits on prediction is feasible improving the performance of the model in general.

Palavras-chave: Previsão de vazão semanal, Modelo PREVIVAZ e Limites na Previsão.

¹ CEPEL – Centro de Pesquisas em Energia Elétrica. Av. Horácio Macedo, nº 354, Cidade Universitária – Ilha do Fundão, CEP 21941-911, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. Fone: (21) 2598-6411, (21) 2598-6317. e-mail: saulo@cepel.br.

² UERJ – Universidade do Estado do Rio de Janeiro

1 – INTRODUÇÃO

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 90% da capacidade instalada de geração de energia elétrica do país. O processo natural de vazões fluviais tem como característica principal a sua inconstância, dependente que é da ocorrência de precipitações, fenômeno sabidamente intermitente e de comportamento sazonal ditado pelo clima. Por exemplo, no sudeste brasileiro, chuvas copiosas tendem a ocorrer com maior frequência no Verão, enquanto que no Inverno, as precipitações, além de pouco frequentes, tendem a serem pouco copiosas (CEPEL, 2002).

Devido à irregularidade das vazões fluviais e a necessidade de manter a continuidade do fornecimento de energia elétrica, o sistema de geração de energia elétrica brasileiro conta 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 afluências 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.

Em geral, o uso de previsões hidrológicas pode melhorar o desempenho da operação do sistema aumentando benefícios e confiabilidade e, reduzindo custos. Potencialmente, o sistema brasileiro de geração de energia elétrica, que contém uma grande capacidade de regularização, pode beneficiar-se largamente do desenvolvimento de melhores modelos de previsão hidrológica.

O Modelo PREVIVAZ é um modelo de previsão de vazões semanais. Esse modelo analisa e testa diferentes alternativas metodológicas para a modelagem estocástica das afluências semanais e seleciona a melhor alternativa para o cálculo da previsão para a próxima semana, podendo realizar previsões para até seis semanas à frente. O PREVIVAZ utiliza modelos lineares de séries temporais univariadas, sendo as previsões de afluências a um aproveitamento obtidas usando observações passadas das afluências ao aproveitamento em questão, não sendo, portanto utilizadas as informações sobre o comportamento das afluências aos aproveitamentos próximos ou de postos pluviométricos na área de drenagem do aproveitamento. O modelo PREVIVAZ é utilizado no planejamento da operação hidrotérmica de curto prazo do Sistema Interligado Nacional (SIN). Esse planejamento é feito considerando no primeiro mês uma discretização temporal semanal e para cada semana as afluências previstas, para vários aproveitamentos do SIN, são obtidas pelo PREVIVAZ (CEPEL, 1997), já para o segundo mês do horizonte do estudo consideram-se cenários de afluências mensais gerados pelo modelo GEVAZP (Maceira e Jardim, 2000). Este planejamento é realizado no

final de cada mês para o próximo mês e durante o mês corrente toda semana é feita sua revisão, sendo assim, a periodicidade de execução do modelo PREVIVAZ é semanal.

Este artigo apresenta a implementação no modelo PREVIVAZ de limites nos seus valores previstos função da última vazão observada com o objetivo de fornecer previsões mais realistas aumentando assim sua capacidade preditiva. São apresentados os resultados da aplicação desta metodologia na realização das previsões de aflúências semanais para o período de 1995 a 2004 para a usina hidroelétrica (UHE) Foz do Areia. Apresentam-se também, de forma resumida, os resultados obtidos para outras 21 UHE localizadas em bacias hidrográficas com características hidrológicas distintas.

A próxima sessão apresenta uma descrição sucinta do modelo PREVIVAZ e descreve em detalhes a metodologia proposta.

2 - METODOLOGIA

2.1 – Modelo PREVIVAZ

A classe de fenômenos cujo processo observacional e conseqüente quantificação numérica gera uma seqüência de dados distribuídos no tempo é comumente denominada na literatura de séries temporais. A natureza de uma série temporal e a estrutura de seu mecanismo gerador estão relacionadas com o intervalo de ocorrência das observações no tempo. De modo geral, dizemos que uma série temporal é uma realização de um processo estocástico.

As séries de vazões podem ser estudadas sob a ótica da análise de séries temporais e por sua vez podem ser feitas inferências sobre as propriedades ou características básicas do mecanismo gerador do processo estocástico das observações da série de vazão. Assim, através da abstração de regularidades contidas nos fenômenos observáveis da vazão existe a possibilidade de se construir um modelo matemático como uma representação simplificada da realidade. Após a formulação do modelo matemático, obtido pela seleção entre as alternativas de classes de modelos identificadas como apropriadas para essa representação e subsequente estimação de seus parâmetros, é possível utilizá-lo para testar alguma hipótese ou teoria a respeito do mecanismo gerador do processo estocástico e realizar a previsão de valores futuros para série de vazões. O modelo PREVIVAZ se sustenta nessa idéia, ou seja, procura modelar o sistema (bacia hidrográfica) com aplicação de modelos matemáticos consolidados e que consigam capturar “toda” a estrutura de dependência existente na série de vazão.

A metodologia do modelo PREVIVAZ consiste em testar uma variada gama de alternativa de modelagem do tipo PARMA (periódicos auto-regressivos médias móveis) e escolher aquela que na

etapa de validação obtiver o menor erro médio quadrático. Podemos simplificar o modelo PREVIVAZ com o seguinte algoritmo:

- PASSO 1 - Calcular as estatísticas amostrais da série total de afluições semanais e de cada metade da série (parte 1 e parte 2);
- PASSO 2 - Calcular os parâmetros para cada alternativa de modelagem das 3 séries (serie total, parte 1 e parte 2) utilizando as estatísticas calculadas no passo anterior. No PREVIVAZ estão disponíveis até 140 alternativas do tipo PARMA. Estas alternativas consistem na combinação de diferentes modelos lineares, formas de estimação dos parâmetros, e tipos de transformações aplicadas a série histórica de afluições;
- PASSO 3 - Fazer a previsão (um passo a frente) utilizando todas as alternativas definidas com a parte 1 da série (primeira metade);
- PASSO 4 - Fazer a previsão (um passo a frente) utilizando todas as alternativas definidas com a parte 2 da série (segunda metade);
- PASSO 5 - Fazer a verificação utilizando a 1ª e a 2ª parte da série considerando como métrica a raiz do erro médio quadrático (REQM). Para cada semana calcular a média das REQM de cada metade da série para cada alternativa;
- PASSO 6 – Para cada semana ordenar as N alternativas em ordem crescente da média das REQM's;
- PASSO 7 - Fazer a previsão com a alternativa que teve a menor média das REQMs para a semana a ser prevista, alternativa de ordem $k=1$;
- PASSO 8 - Para obter a previsão para as demais semanas do horizonte (até 6 semanas), utilizar a previsão da semana anterior como a tendência para a previsão da próxima semana e adotar a alternativa que para essa semana teve a menor média das REQMs.

2.2 – Aplicação dos limites nas previsões do modelo PREVIVAZ

A principal característica do modelo PREVIVAZ na obtenção de previsões de vazões fluviais, é o uso da parte determinística de modelos de séries temporais ajustados às séries de vazões fluviais como previsão. Neste caso, a previsão toma partido não só do comportamento sazonal das vazões fluviais referido anteriormente, como também considera o importante fenômeno denominado tendência hidrológica. 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 (CEPEL, 2002).

No entanto, em bacias que apresentam fraca estrutura de dependência temporal e grande variabilidade das vazões, modelos de séries temporais como o PREVIVAZ tendem a fornecer previsões de valores futuros próximos da média, independente das condições passadas. Pode-se assim obter valores previstos muito superiores ou inferiores aos últimos valores observados, que apresentem razões entre as vazões das semanas $t+1$ e t pouco frequentes no histórico de afluições.

Outro problema verificado ocorre quando se adota transformação das séries histórica de afluições. Tem-se verificado que na previsão de séries transformadas pode ocorrer uma atenuação ou um aumento acentuado nos valores de previsão quando ocorre uma combinação entre o valor do parâmetro da transformação adotada e um período de alta variabilidade de vazões. Esta combinação pode levar a que a previsão da série transformada se localize na região assintota da função de transformação, fazendo com que o valor obtido na inversão da função de transformação seja muito grande e hidrológicamente improvável para a bacia na semana a ser prevista.

Diante do exposto, a metodologia propõe que durante o processo de escolha da melhor alternativa e no cálculo das previsões, as previsões calculadas sejam revistas considerando limites conforme descrito nos itens 2.2.1 e 2.2.2.

2.2.1 – Aplicação dos limites na escolha da melhor alternativa no PREVIVAZ

De acordo com o algoritmo apresentado no item 2.1 percebe-se que as alternativas são testadas por um esquema 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 - REQM) um passo à frente obtendo-se, a seguir, a média dos dois valores.

Na nova proposta de escolha da melhor alternativa têm-se inicialmente todas as previsões para todas as alternativas utilizando a primeira parte da série para estimação dos parâmetros, como feito atualmente, entretanto, as previsões obtidas serão avaliadas para verificar se seu valor extrapola limites previamente definidos para a bacia em estudo. Estes limites são calculados considerando a parte da série usada para estimar os parâmetros das alternativas (primeira metade). O mesmo procedimento é aplicado quando se utiliza a segunda metade da série para estimar os parâmetros.

Para a definição dos limites calculam-se as razões entre as vazões da semana $t+1$ (semana a ser prevista) com a da semana t (semana anterior à semana a ser prevista) da parte da série utilizada para a estimação dos parâmetros. Constrói-se, então, a distribuição de frequência acumulada de não excedência das razões entre as vazões das semanas $t+1$ e t . A partir dessa distribuição de frequência se estabelecem os limites superior e inferior para as previsões associados às probabilidades de não excedência definidas pelo hidrólogo. Assim, por exemplo, se a probabilidade utilizada para definir o limite inferior foi de 20% e o limite superior foi de 70%, significa que o limite inferior para a previsão da semana $t+1$ é o valor da vazão observada na semana t multiplicada pela razão associada à probabilidade de não-excedência de 20% e o limite superior é o valor da vazão observada na semana t multiplicada pela razão associada à probabilidade de não-excedência de 70%.

De posse destes limites os valores de previsão calculados que localizarem-se fora deste intervalo serão substituídos pelos limites mais próximos. Desta forma, as alternativas que tiveram seus erros médios quadráticos influenciados por valores extremos e que, portanto deixaram de ser competitivas, após a consideração dos limites para previsão podem inclusive apresentar erros médios quadráticos inferiores a outras, que no critério original estavam em posição de vantagem.

As figuras 1 e 2 mostram um exemplo das distribuições de frequência acumuladas de não excedência das razões entre as afluições das semanas $t+1$ e t para as duas metades de uma série histórica de afluições, as setas indicam os valores das razões que multiplicadas pela vazão observada da semana t fornecerá os limites para os valores previstos para a semana $t+1$. A figura 3 ilustra as previsões para uma semana qualquer $t+1$ e os valores fora e dentro dos limites das previsões.

O conjunto dos valores que serão utilizados para a construção da distribuição de frequência acumulada de não excedência poderá ser constituído apenas dos valores observados para a semana de interesse ou pode-se agregar a estes valores os demais valores do mês, do trimestre ou do semestre que contém a semana a ser prevista. A distribuição de frequência poderá ainda estar associada a diferentes magnitudes de vazão. Neste caso a magnitude será dada pelos centis segundo o número de subdivisões escolhidas. Assim, se o interesse for adotar distribuições de frequências associadas a 2 faixas de magnitudes da vazão, então o centil considerado será de 50% (mediana), se for associada a 3 faixas os centis serão 33% e 66%, e se for a 4 faixas os centis serão 25%, 50% e 75%.

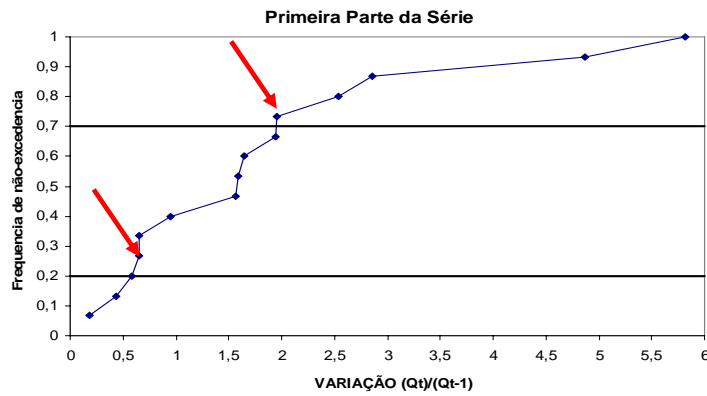


Figura 1 – Distribuição de frequência acumulada não excedência da razão entre as semanas t+1 e t da primeira parte de uma série.

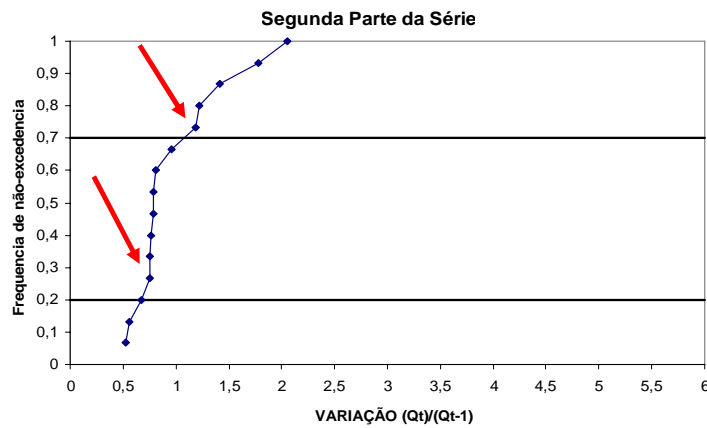


Figura 2 – Distribuição de frequência acumulada não excedência da razão entre as semanas t+1 e t da segunda parte de uma série.

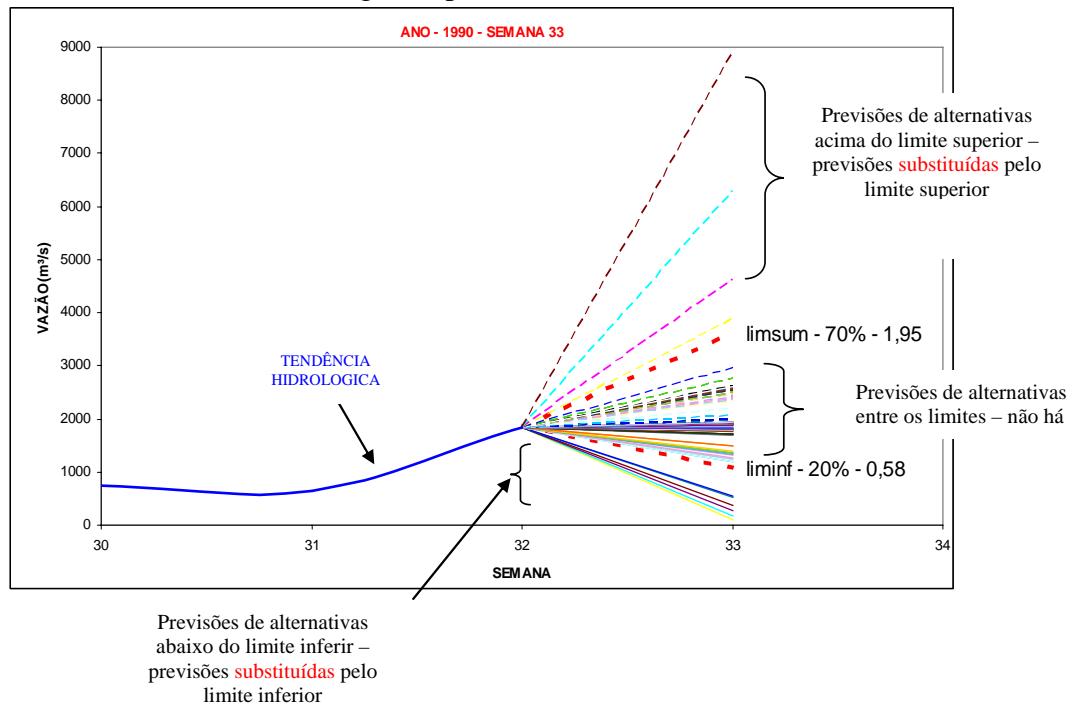


Figura 3 – Conjunto de previsões para a semana 33 obtidas com todas as alternativas e limites inferior (associada a probabilidade de não excedência de 20%) e superior (70%)

2.2.2 – Aplicação dos limites na previsão do modelo PREVIVAZ

Na etapa de previsão é utilizado o mesmo critério para definição dos limites adotados na alteração da escolha da melhor alternativa descrito no item 2.2.1, entretanto, nesta etapa utiliza-se toda a série histórica de aflúências. É também respeitada a hierarquia das alternativas definidas pelo menor erro médio quadrático. Deste modo, não há substituição do valor previsto, mas sim a alteração da melhor alternativa caso o valor da previsão obtida por esta não se encontre dentro dos limites para os valores previstos. As etapas para alteração da alternativa de previsão são:

1. Para a semana da previsão (t+1) calcular a previsão utilizando a melhor alternativa (aquele que resultou no menor erro médio quadrático, considerando o procedimento descrito no item 2.2.1), ou seja, a alternativa de ordem $k=1$;
2. Estabelecer a distribuição de frequência acumulada de não-excedência para a semana t+1 das razões $(Q_i(t+1)/Q_i(t))$, $i=1,\dots,N$, levando-se em conta a série histórica completa, onde N corresponde ao número de anos da série histórica se o conjunto de valores considerados para construção da distribuição de frequência forem apenas os da semana t+1;
3. Definir os limites a partir da distribuição de frequência acumulada de não excedência e das probabilidades de não-excedência pré-estabelecidas pelo hidrólogo;
4. Verificar se a razão entre a previsão da semana t+1 com o valor observado (ou previsto) da semana t é menor que o limite inferior ou maior que o limite superior;
5. Se a situação da etapa 4 for falsa a previsão da semana t+1 continua a mesma; se for verdadeira a previsão é substituída pela previsão da alternativa de ordem (k+1) e a verificação descrita na etapa 4 é refeita. A previsão é substituída até que o valor previsto por uma alternativa se encontre entre os limites inferior e superior;
6. Repetir as etapas 1 a 5 para as 6 semanas do horizonte de previsão.

Pode ocorrer na verificação dos valores das previsões obtidas pelas k alternativas que todas estejam fora dos limites pré-estabelecidos. Neste caso existem três possibilidades: (i) caso todas as previsões estejam abaixo do limite inferior, a previsão escolhida será a da alternativa que apresentou o maior valor (mais próximo do limite inferior); (ii) caso todas as previsões estejam acima do limite superior, será utilizada a previsão obtida pela alternativa que teve a menor previsão (mais próximo do limite superior); e (iii) finalmente, na situação de todos os valores das previsões encontrarem-se fora dos limites, porém alguns acima do limite superior e os outros abaixo do limite

inferior, determina-se, então, os números de previsões acima do limite superior e abaixo do limite inferior e escolhe-se aquele que estiver mais próxima do limite além do qual encontra-se o maior número de previsões.

A figura 4 mostra o conjunto de previsões para uma semana qualquer $t+1$ com um indicativo das alternativas que apresentaram os 4 menores erros médios quadráticos na etapa de escolha da melhor alternativa. Observa-se nesta figura que utilizando a opção de alteração da alternativa de previsão, o valor da previsão será o da alternativa de 4ª ordem (4º menor erro médio quadrático na etapa de escolha da melhor alternativa) visto que verificando as previsões das alternativas de 1ª, 2ª e 3ª ordem todas estão fora dos limites pré-estabelecidos.

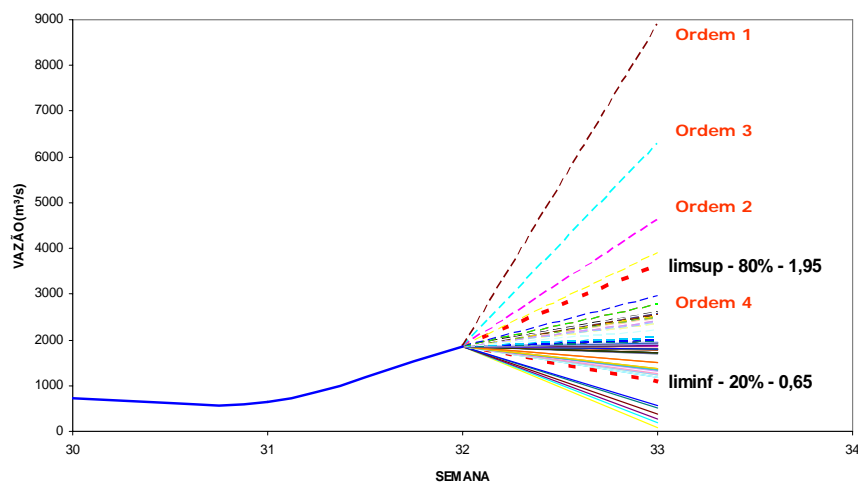


Figura 4 – Conjunto de previsões para uma semana $t+1$ com alternativas que extrapolam ou não os limites pré-definidos.

3 - APLICAÇÃO

Na avaliação da metodologia apresentada neste artigo, procurou-se analisar o resultado de sua aplicação em séries com características hidrológicas diferentes, ou seja, séries cujas vazões semanais apresentam fraca estrutura de correlação e regime hidrológico pouco definido e séries com regime hidrológico bem definido e com forte estrutura de correlação. Sendo assim, a metodologia foi aplicada a séries de aflúências semanais de 21 localidades (usinas hidroelétricas, UHE) localizadas em 4 bacias hidrográficas diferentes, as bacias analisadas foram: bacia do rio Uruguai, bacia do rio Iguaçu, bacia do rio Jacuí e bacia do rio Tocantins.

Inicialmente, para cada bacia selecionou-se uma UHE de modo a obter a melhor combinação das diferentes formas de se aplicar a metodologia proposta (probabilidades de não excedências associadas aos limites, conjunto de valores utilizados para a construção da distribuição de

frequência, agregação por período e magnitude de vazão), para depois utilizar essa combinação na previsão das demais UHE da bacia. Para cada UHE selecionada foram simulados 48 opções de modelagem no período de 1995 à 2004 (10 anos), cada opção correspondente a uma diferente combinação da metodologia, e mais uma opção, para comparação, utilizando o PREVIVAZ sem a adoção da metodologia proposta. A tabela 1 contém as UHE's selecionadas, os períodos de estimação dos parâmetros e de previsão utilizados para cada série.

Tabela 1 - UHE, bacia e período utilizado para análise dos casos

Bacia	UHE	Período mínimo de estimação	Período de Previsão
Iguaçu	Foz do Areia	1969-1994	1995-2004
Uruguai	Itá	1973-1994	1995-2004
Jacuí	Passo Real	1940-1994	1995-2004
Tocantins	Tucuruí	1970-1994	1995-2004

A tabela 2 apresenta as combinações utilizadas nas simulações efetuadas com as séries das UHE's da tabela 1.

Tabela 2 – Combinações utilizadas nas simulações do modelo PREVIVAZ

Prob. de não-excedência dos limites	Classe de magnitude de vazão	Agrupamento para diferentes períodos
Modelo 1 (mod1) – modelo sem utilização de limites, versão atual do PREVIVAZ ;	Sem divisão (sdiv) - modelo sem utilizar o agrupamento das variações por magnitude de vazão;	Semanal (sem) – para formar a distribuição empírica dos valores da variação essa opção utiliza apenas os valores da semana em análise
Modelo 2 (mod2) – modelo com limite inferior, determinado a partir da probabilidade de não-excedência das variações, de 10% e com limite superior de 90% ;	2 faixas (2fxs) – modelo utilizando 2 faixas subdivididas a partir do centil 50% (mediana) dos valores de vazões;	Mensal (men) – para formar a distribuição empírica dos valores da variação essa opção utiliza os valores de todas as semanas pertencentes ao mês da semana em análise ;
Modelo 3 (mod3) – modelo com limite inferior, determinado a partir da probabilidade de não-excedência das variações, de 20% e com limite superior de 70% ;	3 faixas (3fxs) – modelo utilizando 3 faixas subdivididas a partir do centil 33% e 66% dos valores de vazões;	Trimestral (tri) – para formar a distribuição empírica dos valores da variação essa opção utiliza os valores de todas as semanas pertencentes ao trimestre da semana em análise;
Modelo 4 (mod4) – modelo com limite inferior, determinado a partir da probabilidade de não-excedência das variações, de 30% e com limite superior de 60% .	4 faixas (4fxs) – modelo utilizando 4 faixas subdivididas a partir do centil 25%, 50% e 75% dos valores de vazões;	Semestral (sms) - para formar a distribuição empírica dos valores da variação essa opção utiliza os valores de todas as semanas pertencentes ao semestre da semana em análise;

Assim, foi definida uma nomenclatura para cada opção de modelagem. Por exemplo, o modelo designado por **mod4_4fxs_men** representa a modelagem que tem limite inferior, determinado a partir da probabilidade de não-excedência das variações, de 30% e limite superior de 60%, utiliza 4 faixas de magnitude de vazão subdivididas a partir dos centis 25%, 50% e 75% e a distribuição empírica das razões entre as vazões das semanas t+1 e t considera agrupamento mensal.

A tabela 3 apresenta os valores do erro médio percentual absoluto (MAPE) da previsão um passo a frente para a série de afluições semanais da UHE Foz do Areia utilizando as 49 opções descritas na tabela 2. A tabela 3 contém, ainda, a média dos MAPE's, o desvio padrão (DESVPAD), os centis de 25% (Q25%), 50% (Q50%), 75% (Q75%) e 95% (Q95%). A primeira linha (mod1) apresenta os valores correspondentes à aplicação do modelo PREVIVAZ sem a metodologia proposta no artigo. Os valores sombreados de verde indicam que o desempenho do modelo foi melhor que mod1. Os valores sombreados de laranja indicam que o modelo teve desempenho pior que o mod1.

Tabela 3 – MAPE (%) das simulações feitas utilizando o PREVIVAZ com e sem a metodologia.

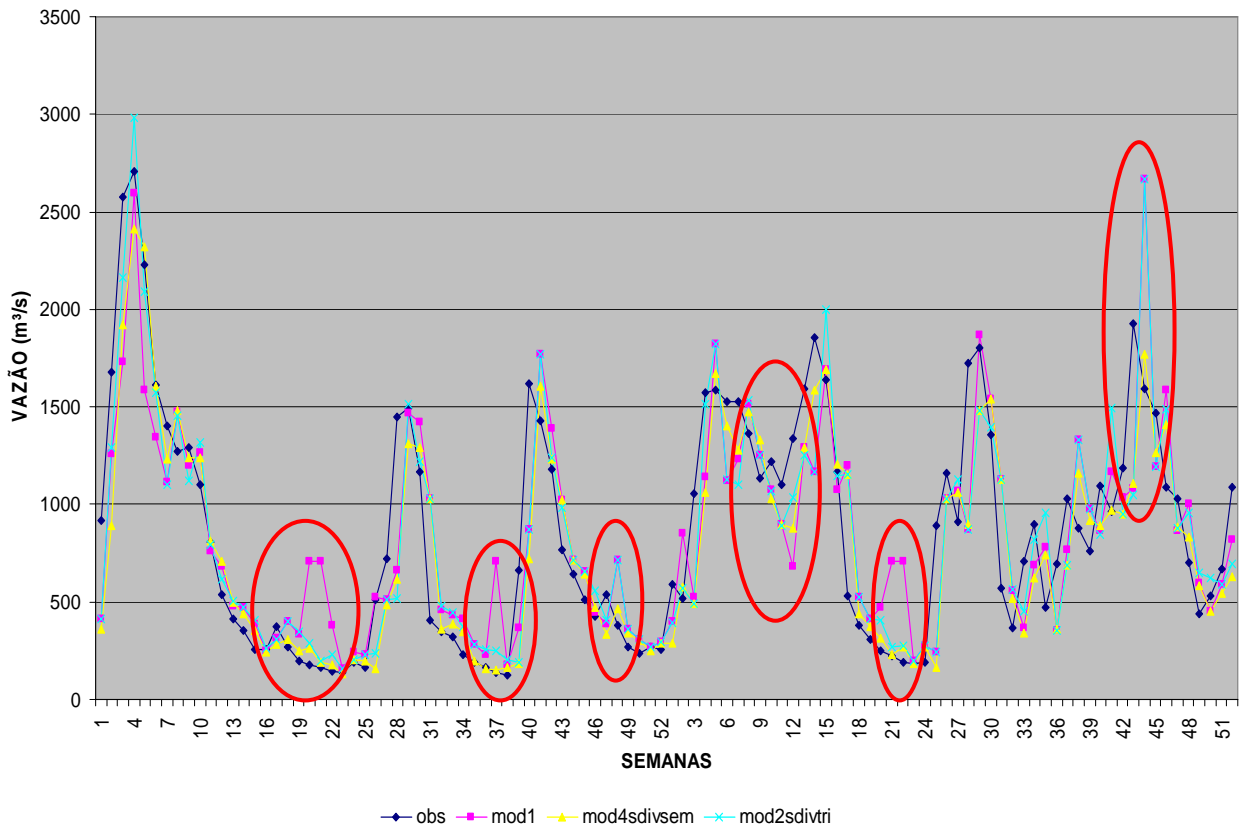
	FOZ DO AREIA - HORIZONTE 1 - MAPE (%)					
	MEDIA	DESV.PAD	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%
mod1	37,16	42,07	12,43	26,79	47,32	98,26
mod2_sdiv_sem	34,89	31,89	11,53	28,54	47,97	88,57
mod3_sdiv_sem	29,99	24,22	10,98	24,72	42,76	72,50
mod4_sdiv_sem	27,22	21,94	9,98	22,47	40,26	66,83
mod2_sdiv_men	35,75	30,75	12,43	28,94	49,07	93,99
mod3_sdiv_men	29,31	22,87	10,90	24,84	42,76	71,47
mod4_sdiv_men	27,44	21,49	10,62	23,63	38,67	66,83
mod2_sdiv_tri	32,93	26,92	11,77	27,35	47,40	81,94
mod3_sdiv_tri	30,09	22,92	11,45	25,77	43,31	70,44
mod4_sdiv_tri	28,50	22,47	10,65	23,63	40,28	70,19
mod2_sdiv_sms	33,43	27,17	12,45	27,78	47,40	81,78
mod3_sdiv_sms	29,77	22,80	10,79	25,38	43,04	71,47
mod4_sdiv_sms	27,52	21,67	10,30	23,51	39,74	66,83
mod2_2fxs_sem	34,49	30,82	12,43	26,86	46,53	94,21
mod3_2fxs_sem	29,95	24,58	10,72	24,81	44,45	71,56
mod4_2fxs_sem	27,71	22,17	10,01	23,47	39,25	68,77
mod2_2fxs_men	34,93	30,97	12,45	28,01	47,93	91,37
mod3_2fxs_men	30,50	23,52	12,59	25,60	43,93	71,47
mod4_2fxs_men	27,39	21,40	10,15	24,10	39,65	67,23
mod2_2fxs_tri	35,37	30,56	12,19	28,94	48,47	95,17
mod3_2fxs_tri	30,25	22,82	11,79	26,02	43,49	70,21
mod4_2fxs_tri	27,35	20,94	10,71	24,12	39,69	64,95
mod2_2fxs_sms	34,86	30,50	12,43	28,42	48,13	92,55
mod3_2fxs_sms	30,24	22,62	12,08	26,11	44,18	69,24
mod4_2fxs_sms	27,79	21,18	10,90	24,73	40,01	66,20
mod2_3fxs_sem	34,09	29,85	11,87	27,21	47,37	90,80
mod3_3fxs_sem	30,42	25,35	11,77	24,35	42,71	75,33
mod4_3fxs_sem	28,77	23,39	10,37	24,29	40,96	70,49
mod2_3fxs_men	34,69	30,07	12,39	27,78	47,15	93,00
mod3_3fxs_men	29,91	23,54	11,30	25,66	42,78	71,47
mod4_3fxs_men	27,96	22,08	10,41	24,41	40,27	68,87
mod2_3fxs_tri	33,90	28,14	12,07	27,79	47,54	86,88
mod3_3fxs_tri	30,52	22,69	11,80	26,97	43,55	73,58
mod4_3fxs_tri	28,80	22,09	10,89	25,15	41,72	67,54
mod2_3fxs_sms	34,44	29,13	12,67	29,03	47,32	90,08
mod3_3fxs_sms	30,25	22,52	11,77	26,70	43,55	70,52
mod4_3fxs_sms	27,90	21,58	10,81	24,12	40,28	66,54
mod2_4fxs_sem	35,11	32,93	11,81	26,68	49,02	92,74
mod3_4fxs_sem	31,97	27,13	11,92	26,73	46,00	76,60
mod4_4fxs_sem	29,34	24,52	10,03	24,81	42,00	70,84
mod2_4fxs_men	34,28	31,04	11,81	27,35	47,01	93,00
mod3_4fxs_men	29,58	23,80	11,45	24,16	43,03	71,05
mod4_4fxs_men	27,47	21,70	11,14	23,42	39,07	68,86
mod2_4fxs_tri	34,66	29,68	13,13	28,26	47,54	93,99
mod3_4fxs_tri	30,42	23,44	11,26	26,93	42,71	71,76
mod4_4fxs_tri	27,86	21,41	10,41	24,64	40,03	66,54
mod2_4fxs_sms	34,70	28,78	12,98	28,48	48,21	92,58
mod3_4fxs_sms	30,38	23,20	11,26	26,54	44,28	73,58
mod4_4fxs_sms	28,17	21,91	10,20	24,54	41,37	66,55

Observa-se na tabela 3 que para todas as opções de modelagem utilizando os limites testados os valores médios, desvio padrão e o Q95% (5% dos piores erros) foram melhores que os do PREVIVAZ atual, e que mais de 75% dos resultados nos centis Q25%, Q50% e Q75% foram também melhores. O MAPE médio do PREVIVAZ atual que foi de 37,16% foi reduzido a até 27,22% que representa uma redução de 27% no MAPE médio. No centil 95% que correspondem a faixas dos altos erros houve também uma redução expressiva chegando o erro reduzir em 33%. Verificou-se que os menores MAPE's foram para os casos com limites mais estreitos (mod4), ou seja, as previsões teriam que estar mais próximas do último valor observado. Observou-se que a metodologia é mais eficiente na recessão do hidrograma do que na ascensão, visto que, a recessão apresenta uma variação menor que a variação observada durante os eventos chuvosos.

Na figura 5 são apresentados os hidrogramas da vazão observada (obs – linha azul escuro), prevista com o **PREVIVAZ atual - mod1** (linha rosa), prevista com o **PREVIVAZ-mod4_sdiv_sem** (limites mais estreitos - linha amarela) e prevista com o **PREVIVAZ-mod2_sdiv_tri** (limites mais largos - linha azul claro) para o período de 1995-1998 da série de aflúências da UHE Foz do Areia. Observa-se que os maiores ganhos foram justamente nas recessões dos hidrograma quando o **PREVIVAZ-mod4_sdiv_sem** não superestimou o valor da previsão. Verifica-se que em alguns casos o modelo **PREVIVAZ-mod4_sdiv_sem** evitou que a previsão fosse subestimada, ou seja, houve uma atenuação do erro no período de ascensão, demonstrando que a metodologia é eficiente nas duas fases do hidrograma – ascensão e recessão. Observa-se, também, que o modelo com limites mais largo (**PREVIVAZ-mod2_sdiv_tri**) ora acompanha o PREVIVAZ atual, ora acompanha o **PREVIVAZ-mod4_sdiv_sem**, resultando num desempenho pior do que as modelagens do PREVIVAZ com limites mais estreito.

Uma vez feita as 49 simulações para as séries de aflúências das UHE's informadas na tabela 1, foram selecionados, para cada bacia, uma opção de modelagem. Assim, definido a melhor opção para cada bacia, selecionou-se um grupo de UHE's para essas bacias de modo que suas séries tivessem características semelhantes a séries das UHE's (tabela 1). A tabela 4 apresenta para as quatro bacias, as UHE's selecionadas para aplicação da metodologia proposta e a opção escolhida para fazer as simulações e comparar com o PREVIVAZ atual (mod1).

FOZ DO AREIA - 1995-1996



FOZ DO AREIA - 1997-1998

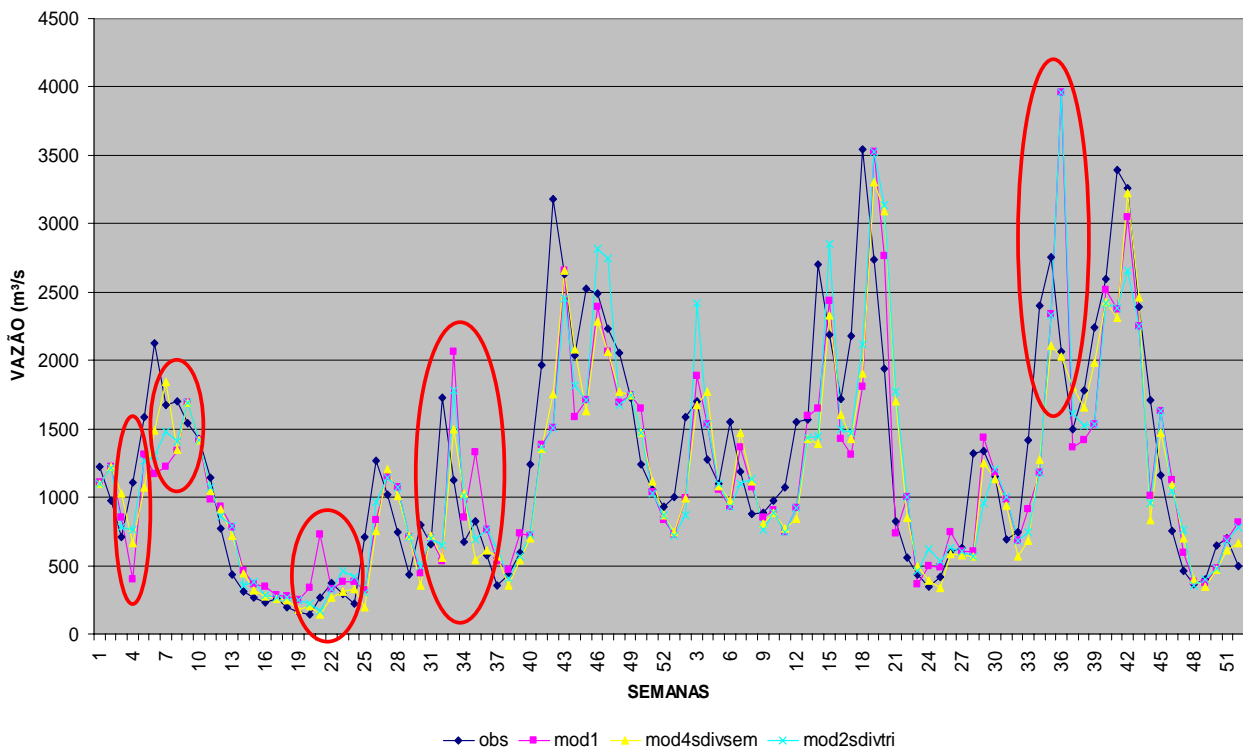


Figura 5 – Hidrograma da série de afluições semanais observadas e previstas da UHE de Foz do Areia no período de 1995 a 1998.

Tabela 4 – Bacias, usinas hidroelétricas, período de estimação e previsão e o modelo escolhido para as simulações.

BACIA	UHE	PERÍODO MÍNIMO DE ESTIMAÇÃO	PERÍODO DE PREVISÃO	MODELO
URUGUAI	MACHADINHO	1973-1994	1995-2004	MOD4_2FX_MEN
	PASSO FUNDO	1973-1994	1995-2004	
	QUEBRA QUEIXO	1968-1994	1995-2004	
	ITÁ	1973-1994	1995-2004	
IGUAÇU	FUNDÃO	1950-1994	1995-2004	MOD4_2FX_TRI
	JORDÃO	1950-1994	1995-2004	
	SALTO CAXIAS	1957-1994	1995-2004	
	SANTA CLARA	1950-1994	1995-2004	
	SEGREDO	1968-1994	1995-2004	
	SALTO OSÓRIO	1941-1994	1995-2004	
	SALTO SANTIAGO	1941-1995	1995-2004	
	FOZ DO AREIA	1969-1994	1995-2004	
JACUÍ	DONA FRANCISCA	1940-1994	1995-2004	MOD4_3FX_SMS
	ITAUBA	1940-1994	1995-2004	
	JACUÍ	1940-1994	1995-2004	
	PASSO REAL	1940-1994	1995-2004	
TOCANTINS	CANA BRAVA	1962-1994	1995-2004	MOD4_2FX_MEN
	LAJEADO	1962-1994	1995-2004	
	PEIXE ANGICAL	1962-1994	1995-2004	
	SERRA DA MESA	1962-1994	1995-2004	
	TUCURUI	1970-1994	1995-2004	

A tabela 5 apresenta os MAPE's das previsões de aflúências semanais um passo a frente de todas as UHE's testadas. Ela contém além dos valores do MAPE (sombreado de amarelo) o valor da diferença percentual entre os MAPE's (sombreado de rosa). Observa-se que para todas as usinas o uso da metodologia de limites na previsão do PREVIVAZ resultou numa melhora, obtendo resultados bastante expressivos para usinas com série de aflúência com fraca estrutura de correlação, como é o caso das séries das bacias dos rios Iguaçu, Jacuí e Uruguai. A redução percentual foi de até 39% no MAPE médio e de 49% no MAPE Q95% (altos erros), ou seja, além de melhorar em média as previsões, reduz-se a frequência de erros altos.

A tabela 6 apresenta a redução percentual média dos MAPE's das usinas de cada bacia analisada para previsões até 6 passos a frente. Verifica-se que em todos os índices de MAPE's e para todos os horizontes há uma redução no erro, sendo essa redução mais expressiva para as bacias dos rios Uruguai, Jacuí e Iguaçu. As maiores reduções se deram na média, no desvio padrão, e no Q95% (altos erros).

Tabela 5 – MAPE(%) do PREVIVAZ sem e com a metodologia do limites para previsões um passo a frente.

MAPE (%) DO PREVIVAZ SEM E COM A METODOLOGIA E A DIF. (%) ENTRE OS MODELOS - HORIZONTE 1								
BACIA	UHE	MODELO	MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%
URUGUAI	MACHAD.	MOD1 (MAPE(%))	60	65	20	44	75	160
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	37	27	17	31	52	81
		DIF(%)	39	59	17	28	31	49
URUGUAI	P. FUNDO	MOD1 (MAPE(%))	59	186	18	37	68	147
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	44	166	15	29	51	98
		DIF(%)	25	11	18	21	26	34
URUGUAI	Q. QUEIXO	MOD1 (MAPE(%))	56	66	19	43	69	144
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	35	25	15	30	50	79
		DIF(%)	38	62	23	30	28	45
URUGUAI	ITÁ	MOD1 (MAPE(%))	60	67	20	43	75	172
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	39	30	17	34	55	85
		DIF(%)	35	55	14	20	27	51
IGUAÇU	FUNDÃO	MOD1 (MAPE(%))	41	44	15	33	53	106
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	29	23	10	23	45	72
		DIF(%)	29	47	33	29	16	32
IGUAÇU	JORDÃO	MOD1 (MAPE(%))	40	39	15	31	54	104
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	29	23	9	23	42	74
		DIF(%)	28	41	38	27	22	29
IGUAÇU	S. CAXIAS	MOD1 (MAPE(%))	35	28	14	30	48	87
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	27	19	11	23	39	63
		DIF(%)	23	31	24	22	19	28
IGUAÇU	S. CLARA	MOD1 (MAPE(%))	41	44	16	33	54	102
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	29	23	10	24	46	72
		DIF(%)	29	47	36	28	15	29
IGUAÇU	SEGREDO	MOD1 (MAPE(%))	35	33	13	28	47	91
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	27	20	10	23	40	63
		DIF(%)	25	40	19	17	15	30
IGUAÇU	S. OSÓRIO	MOD1 (MAPE(%))	32	27	12	27	47	78
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	26	19	10	22	39	61
		DIF(%)	20	29	16	18	17	21
IGUAÇU	S. SANTI.	MOD1 (MAPE(%))	34	30	12	27	48	81
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	26	19	9	22	39	62
		DIF(%)	23	36	23	17	18	23
IGUAÇU	F. AREIA	MOD1 (MAPE(%))	37	42	12	27	47	98
		MOD4_2FX_TRI (MAPE(%))	27	21	11	24	40	65
		DIF(%)	26	50	14	10	16	34
JACUÍ	D. FRANCO	MOD1 (MAPE(%))	46	42	19	36	61	113
		MOD4_3FX_SMS (MAPE(%))	34	29	10	28	52	83
		DIF(%)	26	30	45	22	14	27
JACUÍ	ITAUBA	MOD1 (MAPE(%))	44	41	18	34	60	116
		MOD4_3FX_SMS (MAPE(%))	33	28	10	28	50	79
		DIF(%)	26	32	42	18	17	32
JACUÍ	JACUÍ	MOD1 (MAPE(%))	43	40	17	34	58	112
		MOD4_3FX_SMS (MAPE(%))	32	26	12	26	47	71
		DIF(%)	27	35	32	23	18	36
JACUÍ	P. REAL	MOD1 (MAPE(%))	34	36	13	26	45	94
		MOD4_3FX_SMS (MAPE(%))	24	21	9	19	34	64
		DIF(%)	29	43	32	24	25	32
TOCANTINS	C. BRAVA	MOD1 (MAPE(%))	24	33	6	14	30	73
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	19	21	5	13	28	56
		DIF(%)	19	36	22	13	7	23
TOCANTINS	LAJEADO	MOD1 (MAPE(%))	20	26	4	12	28	59
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	16	18	3	10	24	50
		DIF(%)	19	31	15	20	16	16
TOCANTINS	P. ANGIC.	MOD1 (MAPE(%))	22	32	4	11	28	75
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	16	18	4	10	23	52
		DIF(%)	24	43	12	9	16	31
TOCANTINS	S. MESA	MOD1 (MAPE(%))	23	33	4	11	30	75
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	18	21	4	11	26	55
		DIF(%)	21	38	-1	-1	14	26
TOCANTINS	TUCURUÍ	MOD1 (MAPE(%))	9	9	3	6	13	27
		MOD4_2FX_MEN (MAPE(%))	8	9	3	6	12	23
		DIF(%)	7	6	-5	8	10	16

Tabela 6 – Redução percentual média das estatísticas do MAPE para diferentes bacias e horizontes de previsão

REDUÇÃO PERCENTUAL MÉDIA DO MAPE													
BACIAS	HORIZONTE 1						BACIAS	HORIZONTE 2					
	MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%		MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%
URUGUAI	34	47	18	25	28	45	URUGUAI	31	39	12	15	23	42
IGUAÇU	26	40	25	21	17	28	IGUAÇU	23	44	13	15	14	32
JACUÍ	27	35	38	22	19	32	JACUÍ	28	43	30	24	18	36
TOCANTINS	18	31	8	10	13	22	TOCANTINS	18	33	6	9	11	21
BACIAS	HORIZONTE 3						BACIAS	HORIZONTE 4					
	MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%		MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%
URUGUAI	28	38	7	10	23	39	URUGUAI	27	41	0	8	25	34
IGUAÇU	23	51	6	9	11	35	IGUAÇU	21	43	5	8	10	35
JACUÍ	24	40	25	12	16	38	JACUÍ	62	84	4	7	15	40
TOCANTINS	16	23	7	5	8	25	TOCANTINS	14	19	4	5	12	20
BACIAS	HORIZONTE 5						BACIAS	HORIZONTE 6					
	MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%		MEDIA	DESV. PAD.	Q25%	Q50%	Q75%	Q95%
URUGUAI	26	41	-1	11	25	35	URUGUAI	25	43	6	7	24	34
IGUAÇU	19	37	1	5	8	33	IGUAÇU	20	36	8	6	7	34
JACUÍ	40	81	4	6	12	40	JACUÍ	25	59	6	6	12	37
TOCANTINS	14	22	6	6	11	18	TOCANTINS	14	21	7	7	10	19

5 – CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostram que a performance das previsões obtidas pelo PREVIVAZ utilizando a metodologia dos limites é no geral superior ao modelo PREVIVAZ atual, destaca-se o desempenho em séries de aflúências com fraca estrutura de correlação, como é o caso das UHE's das bacias dos rios Uruguai, Iguaçu e Jacuí. Observa-se que quando aplicados a séries com forte estrutura de correlação e com regime hidrológico bem definido, como é o caso das UHE's do rio Tocantins, em que o PREVIVAZ atual tem um excelente desempenho, o PREVIVAZ com o uso dos limites não piorou a qualidade das previsões, melhorando em algumas situações.

Verificou-se que o PREVIVAZ com limites mais estreitos apresentou um desempenho melhor que os com limites mais largos, constatando o ótimo desempenho nos períodos de recessão do hidrograma. Apesar de ter uma melhor performance na recessão observou-se em diversas situações atenuações nos erros oriundos dos períodos de ascensão do hidrograma, sendo que as opções com limites mais largos tiveram para esses casos um melhor desempenho.

Analisando a redução percentual do MAPE para diversos horizontes de previsão notou-se que a redução se deu de forma homogênea, independente do horizonte, tendo nos maiores erros uma significativa redução da freqüência de ocorrência.

Assim, conclui-se que a adoção da metodologia proposta neste artigo no modelo PREVIVAZ é viável melhorando o desempenho do modelo de um modo geral, seja pela identificação mais freqüente das recessões ou pela atenuação da queda brusca da vazão nos períodos iniciais de ascensão do hidrograma.

Propõe-se para futuros trabalhos a adoção de valores dos limites variáveis, ou seja, utilizar limites mais estreitos em períodos de estiagens e utilizar limites mais largos nos períodos úmidos. Sugere-se, também, investir esforços para automatizar os valores dos limites de modo a não utilizá-los ou alargá-los nos períodos de ascensão e estreitá-los nos períodos de recessão. Uma forma de identificar os períodos de ascensão e recessão do hidrograma é o uso da informação de precipitação, assim, recomenda-se aplicar essa informação de chuva associada aos limites de previsão de modo a diminuir ou até mesmo evitar a defasagem do hidrograma previsto nos períodos de ascensão e recessão.

BIBLIOGRAFIA

CEPEL (2002), Modelo de Previsão de Vazões Semanais Aplicado ao Sistema Hidroelétrico brasileiro – Modelo PREVIVAZ – Manual de Metodologia, CEPEL, 2002, Rio de Janeiro, Brasil.

CEPEL (1997), Modelo de Previsão de Vazões Semanais Aplicado ao Sistema Hidroelétrico Brasileiro – Modelo PREVIVAZ, Relatório Técnico 125/97 CEPEL, Rio de Janeiro, Brasil, 1997.

MACEIRA, M.E.P., JARDIM, D.L.D.D.(2000), Modelo de Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões - GEVAZP - Manual de Referência, Relatório Técnico DPP/PEN 83/2000, CEPEL, Rio de Janeiro, 2000.