

PREVISÃO DE CHEIA EM TEMPO ATUAL, COM UM MODELO ARMAX, PARA A CIDADE DE RIO DO SUL - SC

Ademar Cordero¹; Marcos Rodrigo Momo²; Dirceu Luis Severo³

RESUMO --- Neste trabalho apresenta-se os resultados obtidos de um modelo hidrológico de previsão de cheia em tempo atual para a cidade de Rio do Sul. A estrutura do modelo foi baseada nos modelos matemáticos estocásticos do tipo ARMAX. Devido à configuração geométrica da bacia hidrográfica, o modelo foi estruturado para utilizar como entrada os dados de três postos fluviométricos. O primeiro posto está localizado no rio Itajaí do Sul no município de Ituporanga, o segundo no rio Itajaí do Oeste no município de Taió e o terceiro no rio Itajaí-Açu na cidade de Rio do Sul. Como saída foi obtida a previsão em tempo atual dos níveis do rio Itajaí-Açu na cidade de Rio do Sul. O modelo proposto apresentou resultados satisfatórios até 8 horas de antecedência.

ABSTRACT --- This paper presents the results of a real time flood forecasting hydrologic model designed to the Rio do Sul town. The model structure was based on the ARMAX family of the stochastic mathematical models. Due to the geometric configuration of the hydrographic basin, this model was designed to use as input data three fluviometrics stations. The first in the Itajaí do Sul river on the Ituporanga town, the second in the Itajaí do Oeste river on the Taió town and the third in the Itajaí-Açu river on the Rio do Sul town. The output of the model is the forecast in real time for the level of Itajaí-Açu river on the Rio do Sul town. The model showed satisfactory results for until 8 hours in advance.

Palavras-chave: Modelo ARMAX, bacia do rio Itajaí, previsão em tempo real.

¹ Professor da FURB, CCT/DEC – CEOPS, Rua Antônio da Veiga, 140, 89012-900 Blumenau/SC. E-mail:cordero@furb.br

² Bolsista da SDM – CEOPS, Rua Antônio da Veiga, 140, 89012-900 Blumenau/SC. E-mail:momo@furb.br

³ Professor da FURB, CCEN – CEOPS, Rua Antônio da Veiga, 140, 89012-900 Blumenau/SC. E-mail:severo@furb.br

1 INTRODUÇÃO

Enchentes são fenômenos naturais que têm sido registradas em várias partes do mundo, uma das mais antigas é o Dilúvio descrito na Bíblia, sendo que muitas delas tem tido efeitos catastróficos trazendo grandes prejuízos tanto ao homem quanto à natureza. Na cidade de Rio do Sul, localizada na bacia do rio Itajaí-Açu, a primeira grande enchente que se tem registro ocorreu em 1911, atingindo um pico de 12,20m, referenciada na régua da atual estação fluviométrica localizada naquela cidade. Para se ter uma idéia da amplitude desta enchente, atualmente as primeiras edificações começam a ser inundadas quando o rio Itajaí-Açu, atinge a cota 6,60m. Após aquela data muitas outras enchentes foram registradas.

Foram realizados esforços no sentido de minimizar os efeitos das enchentes no Alto Vale do Itajaí. Na década de 70 foram construídas duas importantes barragens a montante da cidade de Rio do Sul, uma localizada na bacia do rio Itajaí do Sul e a outra na bacia do rio Itajaí do Oeste (Cordero *et al.* 2000). Na década de 1980, a cidade de Rio do Sul foi atingida por duas enchentes catastróficas. A primeira, em julho de 1983 é a maior já registrada até hoje e atingiu a marca de 13,58m e a segunda, em agosto de 1984, alcançou a cota 12,80m. A última inundação registrada na cidade de Rio do Sul ocorreu em abril de 2010 com 8,80m.

Conforme Tucci (2001) um sistema de monitoramento e alerta de enchentes exerce um papel fundamental para a minimização dos impactos causados pelas enchentes. Com o intuito de monitorar o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do rio Itajaí, em 1984 o antigo Departamento Nacional de Água e Energia Elétrica – DNAEE instalou uma rede telemétrica composta por 5 estações, que monitorava a chuva e o nível dos rios. Em 1986, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, que substituiu o DNAEE, modernizou e ampliou para 12 o número de estações telemétricas. Estas estações telemétricas sempre ficaram sob a responsabilidade do Governo Federal (atualmente representado pela Agência Nacional da Águas – ANA) no que diz respeito aos equipamentos e a sua manutenção. A Universidade Regional de Blumenau-FURB por sua vez, sempre ficou com a incumbência de realizar a operação dessa rede telemétrica através do Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Itajaí-CEOPS.

Em 2010 houve uma mudança estratégica, quando a FURB iniciou a implantação de uma nova rede telemétrica composta por 16 estações, independentes das 12 estações da ANA. Esta nova rede telemétrica foi possível com recursos oriundos do Governo do Estado de Santa Catarina através da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável - SDS. A FURB, através da equipe do CEOPS, continua com a incumbência de realizar o monitoramento da rede telemétrica da bacia do rio Itajaí. Além do monitoramento, a equipe do CEOPS produz informações e a previsão

dos níveis, principalmente para a cidade de Blumenau, as quais são repassadas para a Defesa Civil de Blumenau (Ceops, 2010).

Tucci (2001), diz que a modelagem hidrológica de previsão de cheia em tempo atual é ferramenta importante para prever situações de risco de inundações. Para a bacia do rio Itajaí foram desenvolvidos e testados diversos modelos matemáticos, dentre os quais um modelo de previsão em tempo atual para a cidade de Blumenau (Cordero *et al.* 1998), um modelo de previsão de níveis para a cidade de Gaspar (Cordero *et al.* 1989) e um modelo hidrológico conceitual de previsão de enchentes em tempo atual para a cidade de Rio do Sul (Pinheiro, 1990). Este último não apresentou bons resultados e por isso não foi colocado em operação.

O objetivo deste trabalho é apresentar um modelo estocástico para previsão de cheias em tempo atual para a cidade de Rio do Sul.

2 MODELOS ESTOCÁSTICOS

Modelos estocásticos são sistemas dinâmicos cuja variável de saída e algumas das variáveis de entrada são processos estocásticos (Box e Jenkins, 1976), (Bittanti, 1981) e (Ljung, 1999). Usualmente, modelos deste tipo são utilizados como instrumento de previsão de cheias em tempo atual. Cordero *et al.* (1998) utilizaram um modelo do tipo ARMAX para prever a evolução dos níveis do rio Itajaí-Açu em Blumenau, durante enchentes empregando o software AST-3. Os resultados encontrados foram robustos para a previsão do nível com até 8 horas de antecedência.

Os modelos estocásticos são constituídos por variáveis de entrada, de saída e uma componente (constante) denominada ruído. De uma forma geral o modelo pode ser descrito pela seguinte equação:

$$\begin{aligned} \hat{y}(t) = & a_1 y(t-1) + \dots + a_p y(t-p) \\ & + b_{11} u_1(t-\tau_1-1) + \dots + b_{1n_1} u_1(t-\tau_1-n_1) \\ & + b_{21} u_2(t-\tau_2-1) + \dots + b_{2n_2} u_2(t-\tau_2-n_2) \\ & \vdots \\ & \vdots \\ & \vdots \\ & + b_{M1} u_M(t-\tau_M-1) + \dots + b_{Mn_M} u_M(t-\tau_M-n_M) \\ & + \varepsilon(t) + c_1 \varepsilon(t-1) + \dots + c_q \varepsilon(t-q) + d \end{aligned} \quad (1)$$

onde:

$\hat{y}(t)$ é a variável escalar, saída do modelo (valor previsto) no tempo t ;

τ_i é um número inteiro mostrando o intervalo de tempo de viagem da cheia entre a entrada e a saída e a i^{th} entrada;

$u_i(t)$ a parte exógena, com $i = 1, 2, \dots, M$, sendo M as entradas;

e $\varepsilon(t)$ o ruído, assumido para ser um processo estocástico estacionário.

O modelo (1) é conhecido na literatura como ARMAX. Sendo a soma da parte auto-regressiva (AR), mais a parte exógena (X) e a média móvel (MA). Se o ruído encontrado for zero (nulo ou branco) o modelo pode ser considerado perfeito, dentro do escopo determinístico.

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no Alto Vale do rio Itajaí-Açu. O município de Rio do Sul se encontra entre a Serra do Mar e a Serra Geral e sua população é de cerca de 60.000 habitantes. A área de drenagem é de aproximadamente 5.100,00 km² até a estação fluviométrica de Rio do Sul. A estação fluviométrica está localizada na latitude -27°12'43"S, longitude 49°37'54"W e na altitude de 340,0 metros acima do nível médio do mar e foi instalada em 1927 pelo antigo DNAEE e atualmente é operada pela ANA. A temperatura média anual é de 18°C e a precipitação média anual fica em torno de 1600 mm (Severo, 2007).

A figura 1 mostra a bacia hidrográfica do rio Itajaí, com as principais cidades, a atual rede telemétrica e as barragens de contenção de cheias.



Figura 1 - Bacia hidrográfica do rio Itajaí. (CEOPS, 2010)

As chuvas na bacia hidrográfica do rio Itajaí-Açu são bem distribuídas ao longo do ano, sendo que nas estações mais quentes elas são de maior intensidade, mas geralmente de duração curta, sendo este tipo de chuva as mais propícias a causar enxurradas. Nas estações mais frias elas são menos intensas, porém mais duradouras, sendo estas as chuvas mais favoráveis a eventos geradores de enchentes.

Com o objetivo de controle de enchentes foram construídas pelo antigo DNOS duas barragens à montante da cidade de Rio do Sul, exclusivamente para armazenar parte do volume das precipitações. A primeira (Barragem Sul) foi concluída em 1973 e tem capacidade para armazenar 93,5 milhões de metros cúbicos. A segunda a ser construída foi a Barragem Oeste que ficou pronta em 1976 e tem capacidade para armazenar 83,0 milhões de metros cúbicos (Cordero *et al.* 2000).

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta e organização dos dados

Os dados utilizados para a realização deste trabalho estavam armazenados em planilhas eletrônicas distribuídas e não estruturadas. O conjunto de planilhas eletrônicas descrevia todos os eventos ocorridos desde 1978 até 2009 e estavam organizadas em séries temporais. Cada série temporal continha os seguintes dados: dia, mês e ano do evento ocorrido e o nível (em metros) do rio registrado a cada 2 horas durante todo o período de ocorrência do evento. As séries temporais de cada evento estavam disponíveis para as estações de Rio do Sul, Ituporanga e Taió. As planilhas foram organizadas e estruturadas no formato de vetores, viabilizando a carga de dados e simulação a partir do software *Matlab* e posteriormente o software *MSExcels*.

4.2 Definições da estrutura do modelo

Neste estudo, para a fase de inicial de calibração do modelo matemático foram consideradas como variáveis de entradas, os níveis dos rios em Ituporanga, Taió e Rio do Sul e como variável de saída o nível do rio Itajaí do Sul na cidade de Rio do Sul. Para toda a fase de tratamento dos dados foi utilizado o software *MatLab*. O *toolbox Ident* (Toolbox, 2010), proporcionou as operações de importação e processamento dos dados para a realização da estimação do modelo. Esta tarefa foi realizada através de interfaces disponibilizadas pelo *toolbox Ident* que por sua vez viabilizou um ambiente adequado para a configuração da simulação do modelo. Matematicamente, o sistema de identificação proposto pode ser representado da seguinte forma:

$$f(Y) = U_1 + U_2, \text{ onde: } Y \text{ é Rio do Sul, } U_1 \text{ é Ituporanga e } U_2 \text{ é Taió.}$$

4.3 Calibração do modelo

Para esta fase foram utilizados 5 eventos de cheias ocorridos em Rio do Sul: 12/1978, 03/1983, 11/1986, 05/1988 e 05/1989. Na tabela 1 descrevem-se os níveis máximos para cada evento na cidade de Rio Sul. A partir da etapa anterior (identificação do sistema) onde foram encontrados valores das constantes de entrada e saída do modelo, utilizou-se o software *MSExcels* para visualizar o comportamento do modelo proposto.

Tabela 1 - Nível máximo do rio Itajaí na cidade de Rio do Sul.

Nº	EVENTO	NÍVEL MÁXIMO RIO DO SUL (metros)	AÇÃO
1	12/1978	6,74	Calibragem
2	03/1983	6,72	Calibragem
3	11/1986	7,42	Calibragem
4	05/1988	5,36	Calibragem
5	05/1989	6,76	Calibragem

Nesta fase de calibração do modelo buscam-se as constantes do modelo que mais vão se aproximando dos resultados ótimos. A partir das informações obtidas nesta fase, avança-se para o desenvolvimento do modelo na sua fase final. As figuras 2, 3 e 4 ilustram a fase de calibragem para três eventos de inundação.

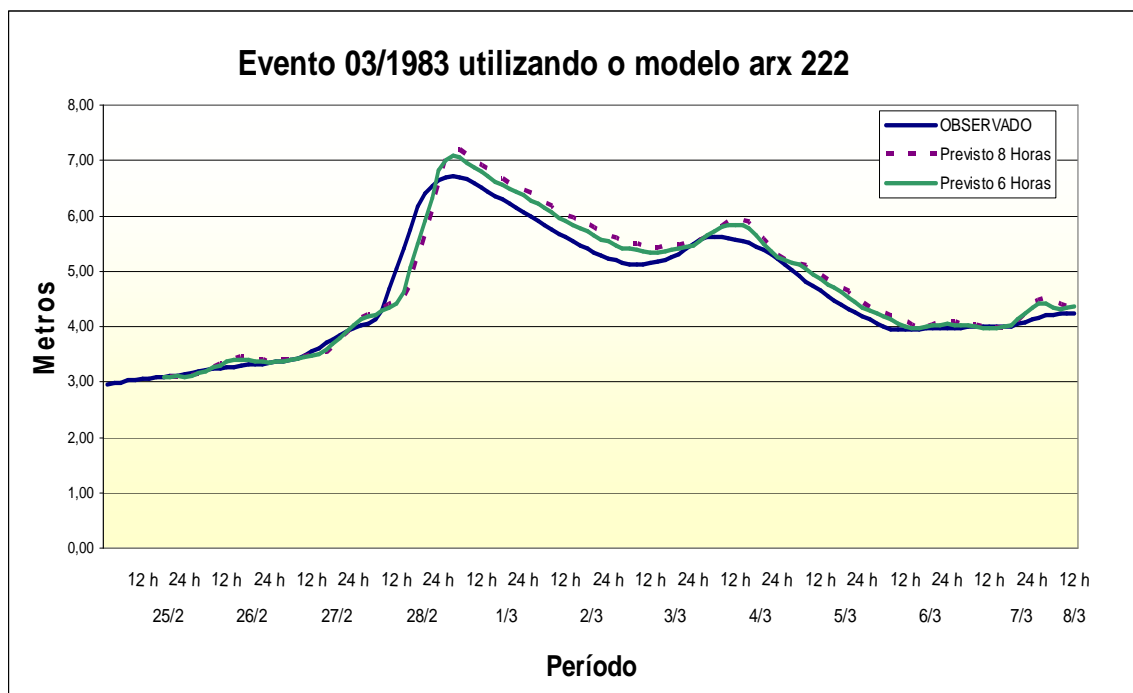


Figura 2 - Calibração do modelo de previsão para 6 e 8 horas

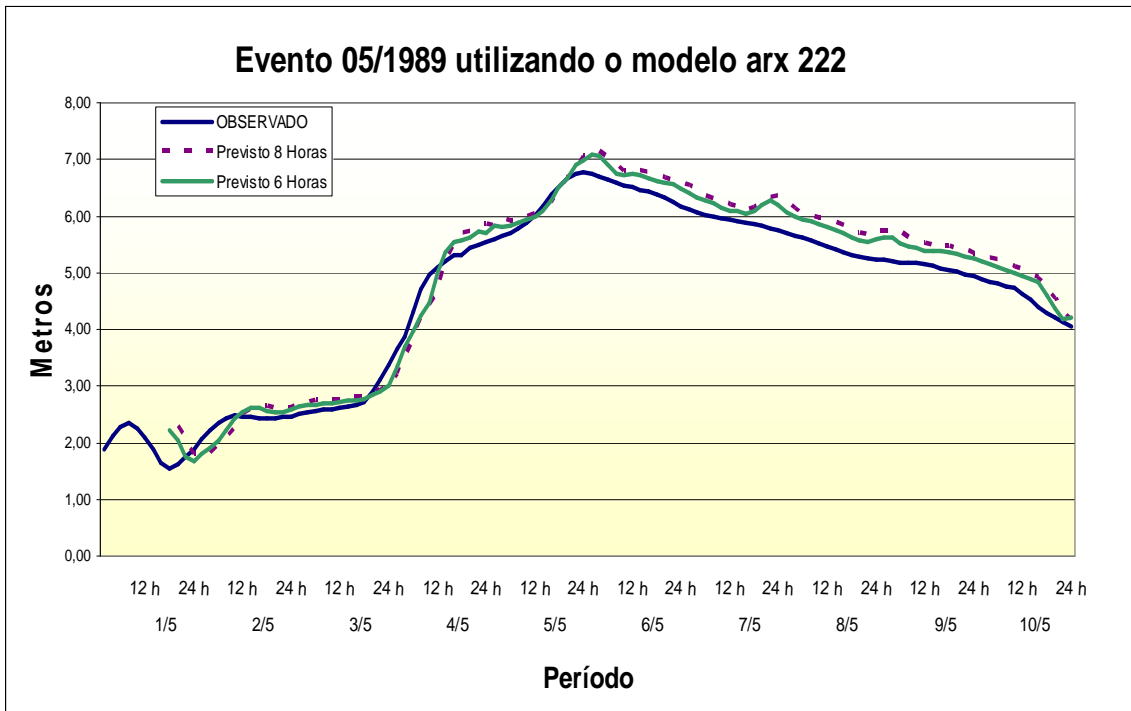


Figura 3 - Calibração do modelo de previsão para 6 e 8 horas

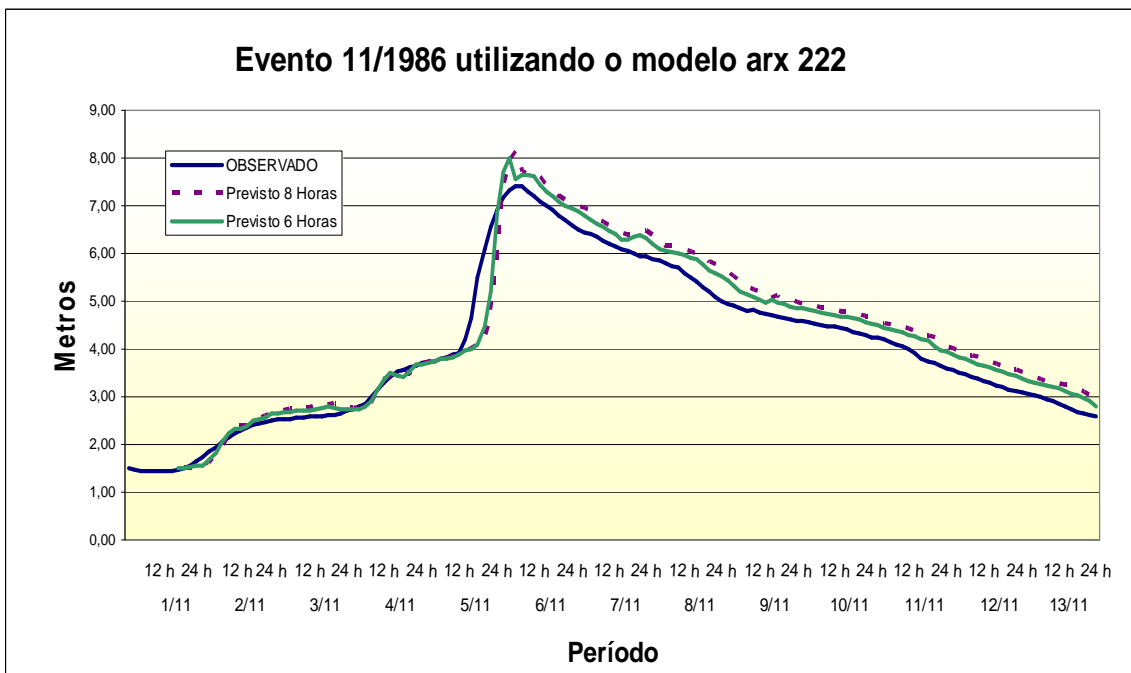


Figura 4 - Calibração do modelo de previsão para 6 e 8 horas

4.4 Testes do modelo

Na etapa de teste do modelo foram utilizados os seguintes eventos de cheias: 05/1983, 08/1984, 09/1989, 07/1992, 02/1997. Na tabela 2 é apresentado o valor do pico da cheia de cada um dos eventos.

Tabela 2 - Nível máximo do rio Itajaí na cidade de Rio do Sul.

Nº	EVENTO	NÍVEL MÁXIMO RIO DO SUL (metros)	AÇÃO
1	05/1983	7,55	Teste
2	08/1984	12,85	Teste
3	09/1989	6,80	Teste
4	07/1992	8,20	Teste
5	02/1997	8,75	Teste

5 RESULTADOS

Neste trabalho foi apresentado um modelo matemático calibrado para a previsão em tempo atual do nível do rio Itajaí do Sul na cidade de Rio do Sul. O modelo calibrado e testado foi um modelo estacionário estocástico da família ARMAX, mais especificamente, ARX (p, n1, n2), onde: “p” é a variável autoregressiva (nível do rio em Rio do Sul); “n1” é a primeira variável da parte exógena (nível do rio em Ituporanga) e “n2” é a segunda variável da parte exógena (nível do rio em Taió). O tempo de percurso da onda de cheia entre Ituporanga e Rio do Sul é de aproximadamente 6 horas, e de Taió à Rio do Sul é de 8 horas, o intervalo de tempo utilizado nas simulações foram de 2 horas e, com base nestes parâmetros, o melhor ajuste encontrado nas simulações foi a configuração ARX(2,2,2). O modelo calibrado é descrito pela equação a seguir:

$$\hat{y}(t) = 1,24500 * y(t - 1) + 0,25130 * y(t - 2) + 0,41410 * u_1(t - 4) + 0,36370 * u_1(t - 5) + 0,06747 * u_2(t - 5) + 0,06861 * u_2(t - 6) + 0,04 \quad (2)$$

onde:

$\hat{y}(t)$ = nível previsto para Rio do Sul;
 y = nível observado em Rio do Sul;
 u_1 = nível observado em Ituporanga;
 u_2 = nível observado em Taió;
 t = tempo (1, 2, 3,...).

Obs. O intervalo de tempo é de 2 horas.

Os resultados do modelo de previsão proposto são apresentados nas figuras 5, 6 e 7. Nestas figuras observa-se a evolução do nível do rio em cada evento juntamente com as previsões para 6 e 8 horas de antecedência.

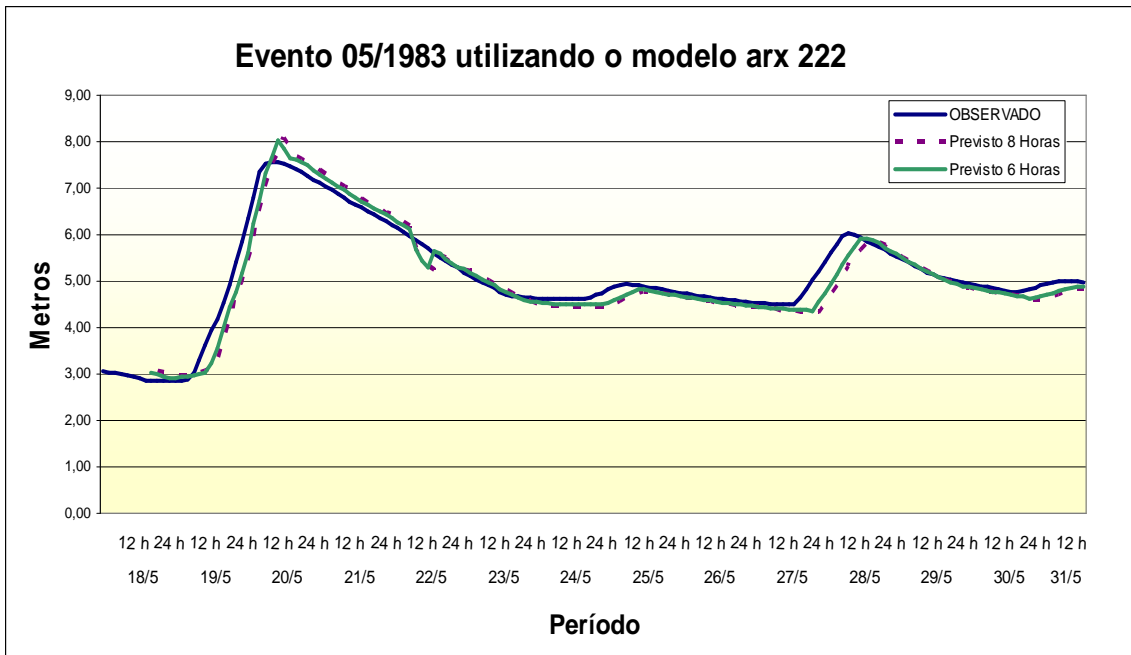


Figura 5 - Teste do modelo de previsão para 6 e 8 horas

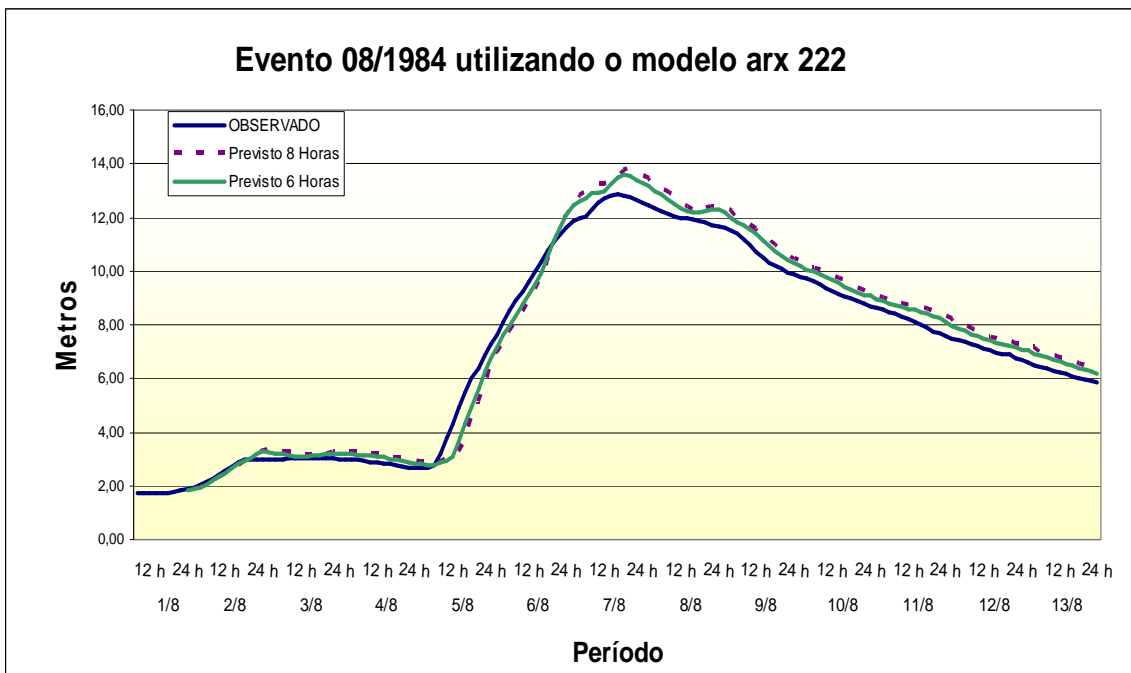


Figura 6 - Teste do modelo de previsão para 6 e 8 horas

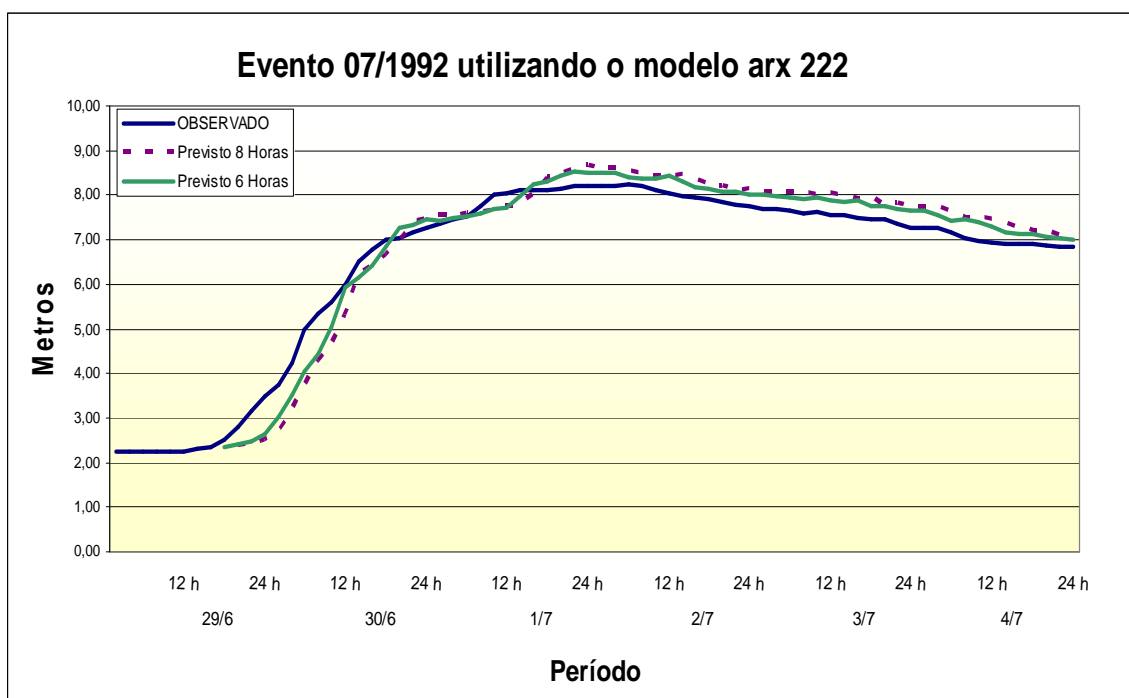


Figura 7 - Teste do modelo de previsão para 6 e 8 horas

Para avaliar o ajuste entre os valores observados e previstos, utilizou-se o coeficiente de determinação R^2 . Na tabela 3 são mostrados estes resultados.

Tabela 3 - Níveis e determinação do coeficiente (R^2).

Nº	EVENTO	NÍVEL MÁXIMO OBSERVADO EM RIO DO SUL (metros)	R^2 (6 horas)	R^2 (8 horas)
1	12/1978	6,74	0,9834	0,8934
2	03/1983	6,72	0,9529	0,9239
3	11/1986	7,42	0,9483	0,9141
4	05/1988	5,36	0,9555	0,9217
5	05/1989	6,76	0,9683	0,9430
6	05/1983	7,55	0,9386	0,8931
7	08/1984	12,85	0,9829	0,9690
8	09/1989	6,80	0,9561	0,9239
9	07/1992	8,20	0,9139	0,8493
10	02/1997	8,75	0,9634	0,9381

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Um modelo matemático do tipo ARMAX foi calibrado para prever a elevação do nível do rio Itajaí do Sul na cidade de Rio do Sul. O uso de modelos numéricos para previsão em tempo atual é muito importante para a tomada de decisão, principalmente em eventos relacionados a alertas e evacuação da população das áreas de risco. A previsão antecipada de uma enchente pode diminuir consideravelmente os danos sejam eles de ordem econômica, social ou na forma de perda de vidas.

Os resultados alcançados neste estudo permitem afirmar que o modelo é adequado para estimar a elevação do nível do rio na cidade de Rio do Sul com até 8 horas de antecedência. Assim, este modelo poderá ser integrado ao sistema de monitoramento operado pelo CEOPS/FURB (Momo, 2010).

Apesar dos bons resultados alcançados neste trabalho, tanto na fase de calibração como na de testes do modelo ARMAX, recomenda-se a investigação de modelos que permitam a introdução da chuva como variável de entrada. Neste sentido já está em desenvolvimento uma versão que utiliza métodos de Inteligência Artificial. Com estes aperfeiçoamentos, o CEOPS poderá se beneficiar de uma ferramenta adicional para a previsão do nível do rio Itajaí-Açu. Intui-se que ferramentas com estas características podem minimizar a margem de erro de previsões em tempo atual com mais de 6 horas de antecedência do nível do rio. Para tanto, se pretende utilizar o método de redes neurais artificiais (RNA) por entender que se adapta de forma satisfatória nas características da área de estudo. Este método vem sendo largamente utilizado por outros grupos de pesquisadores e tem apresentando bastante sucesso para modelos de previsão de cheias em tempo atual. Para este novo estudo que iremos iniciar, se propõe aplicar o modelo de rede *feed forward* utilizando o algoritmo *back propagation* para treinamento com multicamadas e aprendizagem supervisionada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Secretaria de Estado do Desenvolvimento Econômico Sustentável (SDS) através do Projeto de Modernização e Ampliação da Rede de Monitoramento Hidrometeorológico da Bacia do Rio Itajaí. Os autores também agradecem aos demais membros do Centro de Operações do Sistema de Alerta – CEOPS/FURB, pelas importantes contribuições na realização deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- BITTANTI, S. (1981). **Identificazione parametrica**. Clup, Milano, Italy. 313 p.
- BOX, G.E.P.; JENKINS, G.M. (1976). **Time series analysis, forecasting and control**. 2^oed. Holden-Day, San Francisco, USA, 575 p.
- CEOPS (2010). **Centro de Operação do Sistema de Alerta da Bacia do Rio Itajaí**. Página Web: <http://ceops.furb.br>. Ultimo acesso: 08/2010.
- CORDERO, A.; TERAN, A. L.; MEDEIROS, P. A. (1998). **Real-time flood forecasting with a stochastic model**. in Anais do International Workshop on non-structural flood control in urban areas. IRTCUD-RCTC, São Paulo, Abr.1998, p. 135-145.
- CORDERO, A.; ALTOFF, R.; MEDEIROS, P. A. (1989). **Modelo de previsão de cheia em tempo atual para a cidade de Gaspar**. In Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Foz do Iguaçu, PR, Nov.1989. pp. 1-16.
- CORDERO, A.; SILVA, H. S.; SEVERO, D. L. (2000). **Análise da capacidade de armazenamento das ondas de cheia pela barragem Norte e suas implicações nas comunidades do Vale do Itajaí (SC)**. in Anais do XI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Rio de Janeiro, RJ, pp.1542-1551
- LJUNG, L. (1999). **System identification: theory for the user**. 2^oed. Prentice-Hall Englewood Cliffs, NJ, 609 p.
- MOMO, M. R. *et al.* (2010). **Serviços grid/web para sistemas de emergência**. *Dynamis* 16,2, pp. 36-109.
- PINHEIRO, A. (1990). **Avaliação da aplicação e previsão de cheias com modelo distribuído na bacia do rio Itajaí-Açu**. IPH/UFRGS, Porto Alegre, RS, 119 p.
- SEVERO, D. L. (2007). **Padrões de circulação anômalas associados a episódios úmidos e secos no sul do Brasil**. INPE, São José dos Campos, SP, 225 p.
- TOOLBOX, S. I. (2010). **The MathWorks - MatLab and Simulation**. T. MathWorks. Disponível: <http://www.mathworks.com>. Ultimo acesso: 01/2010.
- TUCCI, C. E. M. (2001). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2.ed.; Universidade/UFRGS/ABRH, Porto Alegre, RS, 943 p.