



GOP/023

21 a 26 de Outubro de 2001
Campinas - São Paulo - Brasil

GRUPO IX ESTUDOS DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

SISCV – SISTEMA DE PREVISÃO DETERMINÍSTICO PARA SUPORTE A OPERAÇÃO DE RESERVATÓRIOS DE APROVEITAMENTOS HIDRELÉTRICOS

Luciene Pimentel da Silva* e Guilherme Siqueira Vanni
COPPE/UF RJ
Fernanda Serra Costa e Jorge Machado Damázio
CEPEL
Luiza Cristina Krau de Oliveira
FURNAS
Luiz Guilherme Ferreira Guilhon e Helena Maria Dantas
ONS

RESUMO

Neste trabalho é apresentado o sistema SISCV para previsão de vazões diárias. O sistema é de uso amigável, foi desenvolvido principalmente na linguagem DELPHI e poderá ser integrado ao SIPPOEE, que está sendo desenvolvido pela *HydroSoft* com apoio do CEPEL e do ONS. Além da previsão de vazões, o SISCV permite a calibração de parâmetros, manual e automática; e, a simulação de vazões. Inicialmente, foram implementados no sistema os modelos SMAP II – suavizado e IPH II. É apresentada uma aplicação do SISCV, utilizando o modelo SMAP II – suavizado ao APM Manso no rio Manso. As performances do SISCV e do sistema convencional (modelo SSARR) na previsão de vazões são analisadas.

PALAVRAS-CHAVE: Previsão de afluências, Programação diária, Modelos chuva-vazão

1.0 – INTRODUÇÃO

Atualmente, o Sistema Brasileiro de geração de energia elétrica compreende 85 aproveitamentos hidrelétricos distribuídos ao longo das principais bacias hidrográficas do país, interligados eletricamente com os principais centros de consumo, e com cerca de 15 usinas termoeletricas. No caso da geração hidrelétrica, com a reestruturação do setor elétrico Brasileiro, a programação diária ou previsão de curto prazo (defluência do próximo dia) será feita de forma centralizada pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico). Adicionalmente, as previsões de curto prazo deverão ser aplicadas na determinação do preço da energia de curto prazo a ser comercializada no Mercado Atacadista de Energia (MAE) no Brasil.

Na previsão de afluências a reservatórios de usinas hidrelétricas são freqüentemente aplicados

modelos matemáticos. Esses modelos podem ser de séries temporais ou de características determinísticas, onde são levadas em consideração as características físicas da região representada; sendo este o caso dos modelos chuva-vazão. Os modelos chuva-vazão encontram aplicação direta na determinação das afluências aos reservatórios das usinas que constituem o início (de montante para jusante) da cascata de reservatórios, ou, indiretamente, na determinação das vazões incrementais entre usinas.

O objetivo principal desse trabalho é a apresentação do Sistema SISCV para previsão de vazões diárias. A versão apresentada no artigo constitui a primeira versão do Sistema e teve como objetivo principal a rápida introdução da capacitação do ONS no acompanhamento/execução de previsões de vazões de curto prazo com a aplicação de ferramentas de modelagem chuva-vazão. No artigo é apresentada ainda, uma aplicação do SISCV, utilizando o modelo SMAP II – suavizado em Manso no rio Manso, e são analisadas as performances do SISCV e do sistema convencional (modelo SSARR) na previsão de vazões do APM Manso.

2.0 – O SISCV

O Sistema SISCV⁽⁸⁾ (**S**istema de Previsão **C**huvia-**V**azão) tem como função principal a previsão de vazões usando modelagem determinística do tipo chuva-vazão. No entanto, para a atividade de prever vazões percebe-se outras funções/atividades de aplicação dos modelos chuva-vazão associadas, que foram acopladas ao sistema. Assim, o SISCV permite também a calibração dos parâmetros dos modelos e a simulação de vazões a partir de parâmetros conhecidos. O sistema permite algumas análises gráficas e estão disponíveis ferramentas de análise que auxiliarão na avaliação dos resultados produzidos

* Caixa Postal 68 506 – Rio de Janeiro – RJ – 21945-970, Tel: 21 562.7830, Fax: 21 280.9545

pelos modelos. A Figura 1 apresenta um fluxograma global das funções do SISCV. A primeira versão do sistema foi desenvolvida nas linguagens DELPHI e FORTRAN e, na mesma, está disponibilizada a aplicação dos modelos SMAP II ⁽⁷⁾ e IPHII ⁽¹⁰⁾, ambos amplamente disponíveis no Brasil.

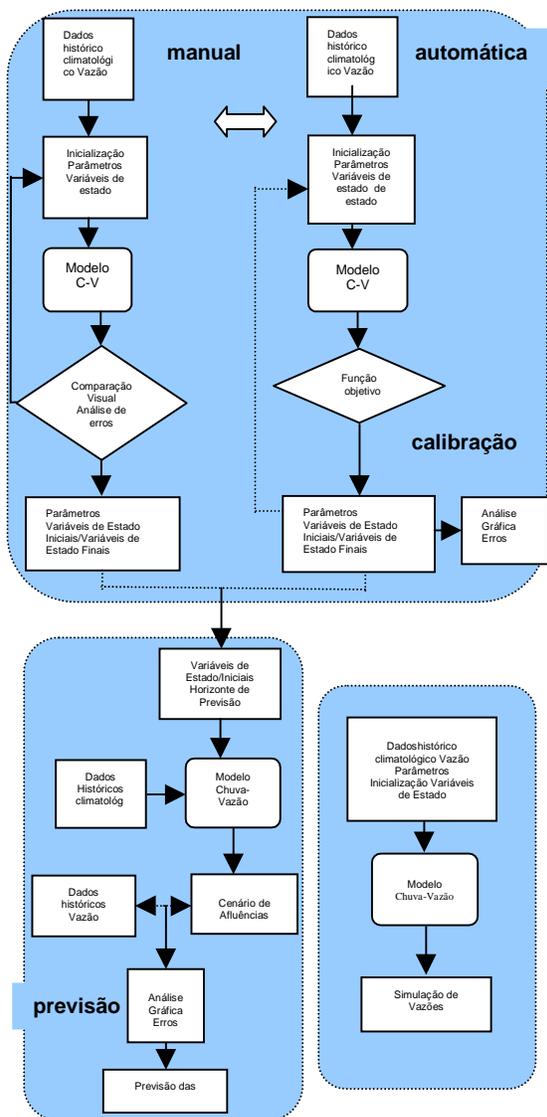


FIGURA 1 – FUNÇÕES DO SISCV

3.0 – MODELO SMAP II – SUAVIZADO

O modelo SMAP II – suavizado ⁽⁷⁾ foi desenvolvido a partir do modelo SMAP II ⁽²⁾. Na versão II do modelo SMAP ⁽⁶⁾ foi incorporado o modelo Clark para representação da propagação. Assim como em outros modelos conceituais, o modelo SMAP possui uma estrutura relativamente simples constituída por três reservatórios que representam respectivamente as zonas superficial, sub-superficial e profunda (aquífero)

dos solos. A separação do escoamento superficial é representada pela equação do *Soil Conservation Service*. A vazão simulada pelo modelo resulta das parcelas do reservatório da superfície e do que representa a parte profunda do solo. As equações matemáticas que regulam os reservatórios do modelo consistem, em geral, de uma variável de estado que corresponde ao nível do reservatório a cada intervalo de tempo e, um conjunto de parâmetros associados às características físicas das diferentes bacias hidrográficas. A relação explícita entre as características físicas das bacias hidrográficas e os parâmetros é normalmente desconhecida e a determinação dos parâmetros envolve calibração. A calibração ou ajuste dos parâmetros pode ser feita manualmente, por tentativa e erro, ou de forma automática, envolvendo métodos matemáticos de otimização. No entanto, devido à peculiaridades da formulação matemática dos modelos chuva-vazão, o problema de calibração dos parâmetros quase nunca é trivial ^{(4), (5)}.

Usualmente, identifica-se nos modelos conceituais chuva-vazão a existência de estruturas tipo patamar limitante, representadas no código computacional por "IF's". Estas estruturas além de provocar que os métodos de busca se percam, limitam a escolha do método a algoritmos menos robustos (em geral busca direta) que não usam derivadas ^{(3), (9)}. A aplicação da técnica de suavização ao modelo SMAP II implicou na re-estruturação do modelo, identificação e substituição dessas estruturas e substituição das mesmas pela função (forma hiperbólica):

$$\phi = \frac{\tan\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)}{\tan^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)-1} \left(x_t - M + \sqrt{(x_t - M)^2 + d^2 \frac{\left(\tan^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)-1\right)^2}{\tan^2\left(\frac{\pi-\alpha}{2}\right)}} \right) \quad \text{Equação 1}^{(11)}$$

A função ϕ (equação 1) é contínua e possui derivada contínua em x_t , incluindo o ponto $x_t = M$ para $d > 0$, permitindo o uso de algoritmos de otimização que usam derivadas. Além disso, a função ϕ possui características que a tornam ainda mais interessante para aplicação a este problema:

$$\lim_{d \rightarrow 0} \phi(x_t, M, d) = \begin{cases} 0, & \text{se } x_t \leq M \\ (x_t - M), & \text{se } x_t > M \end{cases} \quad \text{Equação 2}$$

que implica que o desvio entre ϕ e a função do modelo é tão pequeno quanto desejável quando o parâmetro 'd' da função hiperbólica tende a zero, o que permite a conservação da integridade da representação original do modelo. Adicionalmente, a função ϕ é tangente assintoticamente às funções lineares $R_1(x_t, M) = 0$ e

$R_2(x_i, M) = (x_i - M)$, para $d > 0$; que a faz especialmente apropriada para a suavização das funções tipo patamar limitante dos modelos conceituais.

A técnica de suavização aplicada ao modelo SMAP além de tornar possível a aplicação de métodos de otimização mais robustos e corrigir aspectos negativos relacionados a forma da superfície-resposta do modelo, permite que a expressão analítica da função objetivo seja dada como função explícita dos parâmetros do modelo. Adicionalmente, esta técnica permite a avaliação sistemática de todas as regiões de possíveis 'pontos ótimos' no domínio de validade dos parâmetros do modelo pela análise dos valores nulos das derivadas, minimizando o problema de convergência para pontos ótimos locais.

3.0 – MODELO SSARR

O modelo SSARR (Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation) foi desenvolvido inicialmente pelo U S Corps of Engineers por volta de 1960. Analogamente ao modelo SMAP, o SSARR é um modelo conceitual chuva-vazão contínuo no tempo (contrastando com modelos de eventos) com parâmetros de ajuste. O modelo SSARR tem uma concepção espacialmente distribuída no sentido que permite ao usuário a subdivisão da bacia hidrográfica, de forma a representar a variação espacial das características fisiográficas e dos processos. O modelo inclui a simulação da *acumulação e derretimento de neve, da acumulação de água no solo e evapotranspiração, do escoamento básico, e, dos escoamentos superficial e sub-superficial*. A vazão simulada é resultante do somatório das parcelas do escoamento básico, superficial e sub-superficial após propagação aplicada a cada uma das parcelas individualmente. Os escoamentos superficial e sub-superficial são estimados a partir do escoamento básico, ou seja, todo volume excedente do escoamento básico é considerado como escoamentos superficial e subsuperficial. A separação dos escoamentos básico e superficial/subsuperficial é feita com base no índice de infiltração do escoamento básico (baseflow infiltration index, BII). Por sua vez, a separação das parcelas dos escoamentos superficial e subsuperficial é feita com base numa relação empírica, a curva de separação dos escoamentos superficial/subsuperficial. O escoamento total (básico, superficial e subsuperficial) é determinado com base no índice de umidade no solo acumulada (accumulated soil-moisture index, SMI) ajustado para consideração dos efeitos do processo de evapotranspiração. As taxas de evapotranspiração são estimadas com base nos dados de evaporação média mensal ou de evaporação diária.

4.0 – O APM MANSO

Localizado no rio Manso, no município de Chapada dos Guimarães, Estado de Mato Grosso, o Aproveitamento Múltiplo de Manso (APM Manso) terá uma potência instalada de 210 MW, com quatro unidades geradoras de 52,50 MW. O enchimento do

reservatório foi iniciado em 30/11/1999 e a primeira unidade geradora entrou em operação em 01/12/2000, sendo que as demais unidades estão com previsão de operação para este ano de 2001. O empreendimento foi concebido para atender a distintos propósitos, dentro do conceito de usos múltiplos do reservatório e da água. Assim, além da geração de energia, entre outros benefícios, o APM Manso irá trazer uma redução nas vazões máximas das grandes enchentes nas cidades de Cuiabá e Varzêa Grande. Controlando uma área de drenagem de 9365 km², cerca de 40% da bacia do rio Cuiabá em Cuiabá e 2% da bacia hidrográfica do rio Paraguai na foz do rio Apa, esta barragem foi inicialmente concebida pelo extinto DNOS devido a grande cheia ocorrida em março de 1974, afetando diretamente cerca de 12.000 pessoas em diversas cidades a montante de Cuiabá.

O principal afluente do rio Manso é o rio Casca, cuja área de drenagem representa aproximadamente 55% da área de drenagem total no local da barragem. O regime hidrológico do rio Manso é caracterizado, em geral, por um período de cheias, águas altas, que se estende de Dezembro a Abril, e por um período de estiagem, águas baixas, entre Junho e Outubro. Os meses de Maio e Novembro representam a transição entre os dois períodos. Observa-se que as vazões de estiagem do rio Casca devido a condições geológicas de sua bacia, são relativamente altas comparadas com as de outros rios da região. Ao contrário do que observamos na bacia do rio Manso, que a montante da confluência com o rio Casca, também devido às suas condições geológicas participa com pequenas vazões no período de estiagem.

5.0 – PREVISÃO DE AFLUÊNCIAS NO APM MANSO

O Sistema SISCV foi aplicado na previsão de aflúências a partir de previsões de precipitação ao APM Manso e foi feita uma análise da performance dos sistemas SISCV (modelo SMAPII suavizado) e convencional (modelo SSARR).

Não estavam disponíveis previsões (de fato) de precipitações. As previsões foram então geradas sinteticamente através de um modelo probabilístico para a distribuição condicionada das previsões de precipitações, dadas as precipitações reais correspondentes e com implementação de um esquema de geração de realizações desta distribuição. O modelo aplicado na geração das precipitações é descrito sucintamente no Apêndice A.

Para as previsões de aflúências foram selecionados os eventos de cheias iniciando em: 22/fev/98, 16/abr/98 e 28/dez/97. Para esses dias, considerados "dias atuais" foram realizadas previsões de vazões para os sete "dias futuros", sendo que só foram quantificadas chuva para os três primeiros dias.

Os parâmetros dos modelos chuva-vazão aplicados na previsão foram obtidos nos dois casos; modelo SMAPII suavizado e SSARR através da calibração dos modelos. No caso do modelo SSARR foram adotados os parâmetros obtidos num estudo de enchentes máximas prováveis para o APM Manso ⁽¹⁾.

O modelo SMAPII suavizado foi calibrado no sistema SISCV para o período de 01/09/1994 a 31/03/1997. Os dados de chuva usados na calibração são equivalentes aos do estudo realizado usando o modelo SSARR por FURNAS. No ajuste dos parâmetros, foi adotada inicialmente calibração automática e posteriormente, procurou-se o refinamento da calibração através de ajuste manual. O valor do coeficiente de determinação para o ajuste escolhido foi de 0,759 (Figura 3 – relatório de análise de erros do SISCV).

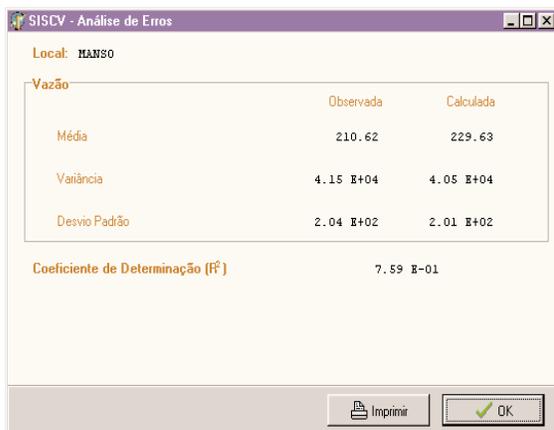


FIGURA 3 – RESULTADOS CALIBRAÇÃO SMAP II SUAVIZADO: ANÁLISE DE ERROS

A calibração dos parâmetros foi validada para o período de 01/09/1997 a 31/08/1998. As Figuras 4 e 5 apresentam exemplos das saídas gráficas do sistema SISCV, nesse caso para o período de validação. Nesse caso, o coeficiente de determinação r^2 foi igual a 0,496.

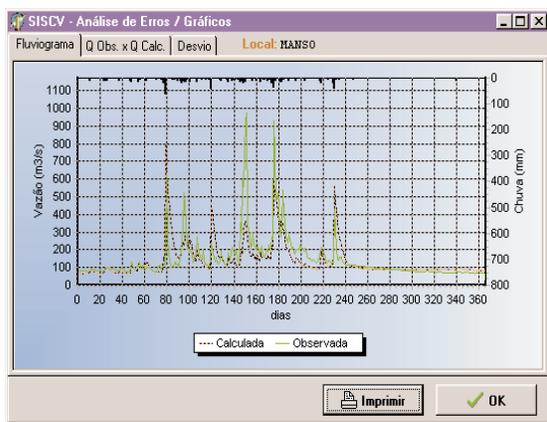


FIGURA 4 – RESULTADOS VALIDAÇÃO SMAPII SUAVIZADO: HIDROGRAMAS

Observa-se nas Figuras 4 e 5 que eventualmente aparecem alguns picos de cheia observados sem, no entanto, ter ocorrido um evento de chuva significativo. Uma das suspeitas recai sobre os dados de precipitação média aplicados, merecendo maiores investigações no futuro. Este tipo de problema foi

também identificado no período usado para calibração e também no caso do modelo SSARR.

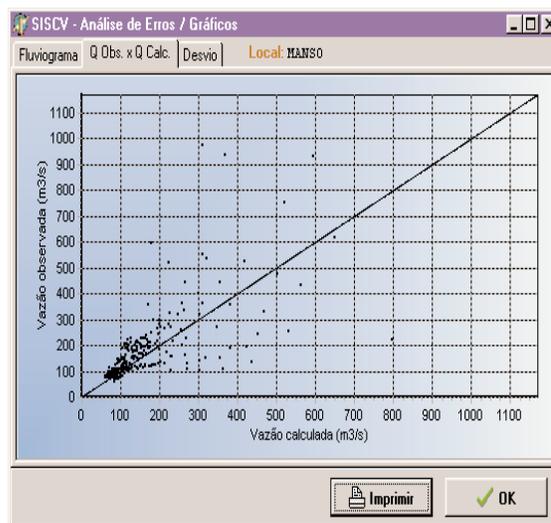
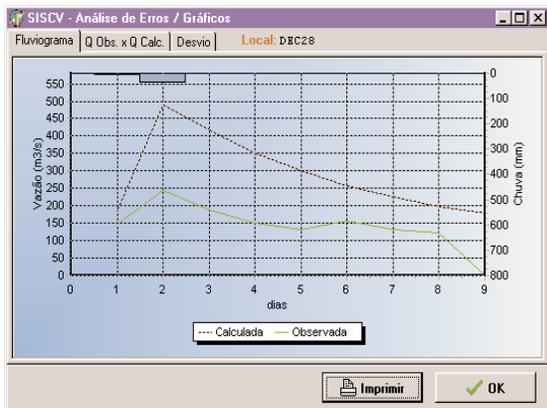
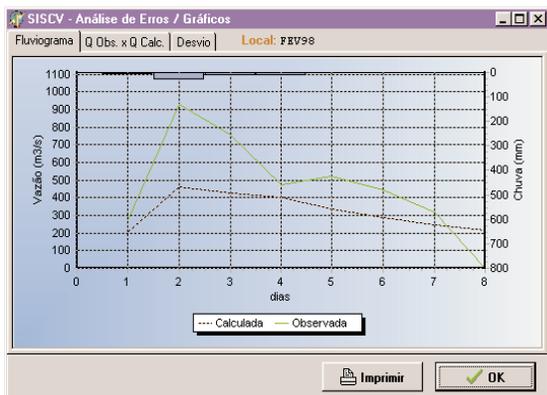


FIGURA 5 – RESULTADOS CALIBRAÇÃO SMAP II SUAVIZADO: VAZÕES OBSERVADAS X VAZÕES CALCULADAS

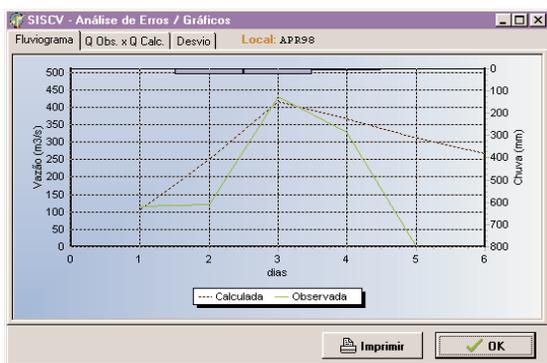
Os parâmetros dos modelos determinados na calibração foram então aplicados nas previsões. As Figuras 6 e 7 apresentam graficamente os resultados das previsões pelo SISCV (modelo SMAPII suavizado) e sistema convencional (modelo SSARR). De uma forma geral, a forma dos hidrogramas simulados pelo modelo SSARR são mais convincentes do que as do modelo SMAP II suavizado. Para esses eventos, no entanto, o modelo SMAP II suavizado parece representar melhor o momento da ascensão e magnitude dos picos. A melhor previsão para ambos os casos foi para o evento de abril. Porém, a quantidade de dados disponíveis no momento desse estudo limitou a análise de performance dos dois sistemas. Seria necessário um número bem maior de eventos para a análise completa, além de mais informações hidrológicas e meteorológicas para a região de Manso, e, atualização da calibração do modelo SSARR. Como seria esperado, quando são adotados os valores reais da chuva observada ao invés das previstas (previsão perfeita), para ambos os casos, a precisão da previsão é melhorada. Em ambos os casos, como é esperado no problema de previsões, foi árdua a determinação dos valores iniciais. Os autores acreditam que os valores usados no estudo podem ainda ser melhorados, o que levaria certamente à melhoria na precisão das previsões. Embora a simplicidade desse estudo, dado a simplicidade de aplicação do SISCV, recursos disponíveis para calibração (automática e manual) dos modelos, número de parâmetros do modelo SMAP II suavizado (aproximadamente 6 parâmetros + parâmetros de propagação) e dados disponíveis no momento da aplicação, considerou-se os primeiros resultados de aplicação do SISCV bastante satisfatórios e promissores.



(a) Dezembro de 1997



(b) Fevereiro de 1998

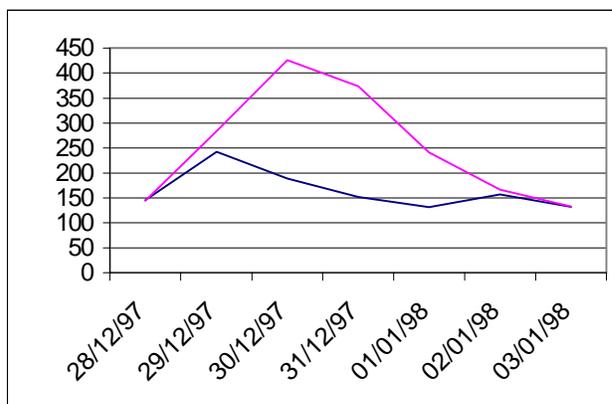


(c) Abril de 1998

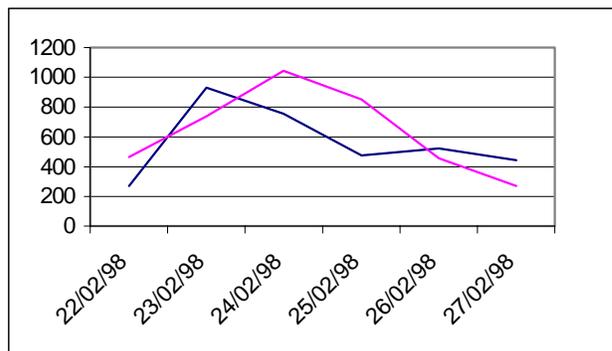
FIGURA 6 – PREVISÕES SISCV

6.0 – CONCLUSÕES

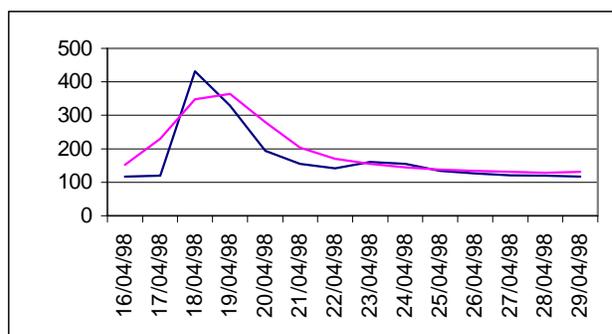
Apesar da grande carência de dados no momento desse estudo, os dois sistemas (SISCV e convencional) mostraram resultados comparáveis e aceitáveis para as previsões de aflúncias ao APM Manso. Esses são os primeiros resultados de aplicação do SISCV e os resultados mostraram-se muito promissores. Acredita-se que o estudo para estabelecimento das chuvas médias usadas na calibração e validação dos dois sistemas pode ser



(a) Dezembro de 1997



(b) Fevereiro de 1998



(c) Abril de 1998

FIGURA 7 – PREVISÕES SSARR (eixo vertical vazão em m^3/s ; linha rosa são os valores previstos)

aprimorado. Nesse estudo não foram levadas em consideração as diferenças do comportamento hidrológico da sub-bacia do rio Casca. Já estão sendo feitos estudos no sentido de analisar o comportamento dos modelos com a sub-divisão da região de estudo. Além disso, já está sendo considerado a revisão dos estudos de calibração do modelo SSARR.

Os estudos realizados nesse trabalho reforçam a importância das previsões da chuva nas previsões de vazões. Os autores sugerem que sejam

feitos estudos no sentido do estabelecimento de metodologias para simulação das condições iniciais na previsão com menor parcimônia.

7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) APM MANSO, ESTUDOS PROGRAMA AMBIENTAL, 5. MONITORAMENTO HIDROLÓGICO, Relatório Interno, FURNAS Centrais Eétricas SA
- (2) DIB, K. R., 1986, Manual de apresentação do Modelo SMAP II, publicação interna da ENGE-Rio Eng. SA
- (3) HENDRICKSON, J. D., SOROOSHIAN, S. e BRAZIL, L. E., 1988, Comparison of Newton-type and direct search algorithms for calibration of conceptual rainfall-runoff models, *Water Resour. Res.*, 24(5), 691-700.
- (4) IBBIT, R. P. e O'DONNELL, T., 1971, Fitting methods for conceptual catchment models, *J. Hydraul. Eng.*, 97(HY9), 1331-1342.
- (5) JOHNSTON, P. R. e PILGRIM, D., 1976, Parameter optimisation for watershed models, *Water Resour. Res.*, 12(3), 477-486.
- (6) LOPES, J. E. G., BRAGA, B. P. F. e CONEJO, J. G. L., 1981, SMAP, a simplified hydrologic model, *International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling*, Mississippi State University, Mississippi.
- (7) PIMENTEL DA SILVA, L., 1990, Calibração automática de modelos tipo chuva-vazão utilizando técnicas de suavização: uma aplicação ao modelo SMAP II, Tese de mestrado, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- (8) SISTEMA SISCV, Relatório Interno, COPPETEC, COPPE/UFRJ.
- (9) SOROOSHIAN, S. e GUPTA, V. K., 1985, The analysis of structural identifiability: theory and application to conceptual rainfall-runoff models, *Water Resour. Res.*, 21(4), 487-495.
- (10) TUCCI, C. E. M., ZAMANILLO, E. A. e PASINATO, H. D., 1989, Sistema de simulação precipitação-vazão IPHS1, IPH/UFRGS.
- (11) XAVIER, A. E., 1982, Hyperbolic penalization: a new method for resolution of optimisation problems, M.Sc. thesis, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil (in Portuguese).

APÊNDICE A - PREVISÃO DE PRECIPITAÇÕES

As previsões foram então geradas sinteticamente através de um modelo probabilístico para a distribuição condicionada das previsões de precipitações, dadas as precipitações reais correspondentes e com implementação de um esquema de geração de realizações desta distribuição.

Y é a transformação da precipitação (transformações das precipitações para o campo gaussiano) ocorrida num dia qualquer e X, a sua pseudo-previsão, foram consideradas a distribuição bivariada normal, onde as duas variáveis, X e Y, tem média zero. A variável associada à precipitação realmente ocorrida num certo dia, Y, terá desvio padrão unitário e a associada à sua pseudo-previsão, X, desvio padrão igual ao coeficiente de correlação entre as duas, r_0 , que é o único parametro do modelo. Dado y, podemos gerar valores de x através de:

$$x = r_0^2 y + r_0(1 - r_0^2)^{\frac{1}{2}} \varepsilon$$

onde ε é um ruído normal padrão. Obtido X, conforme descrito anteriormente usamos este valor na inversa da transformação de precipitação em Y para obter a pseudo-previsão.

Para cada mês do ano, à excessão dos meses de inverno; junho, julho e agosto, que foram agrupados e tratados em conjunto, foram desenvolvidos três modelos para geração de pseudo-previsões de média espacial de precipitação na bacia do Rio Manso, conhecida a precipitação média ocorrida (excelente (parâmetro $r_0=0.9$), muito bom (parâmetro $r_0=0.7$) e bom (parâmetro $r_0=0.5$)). Foi feita análise empírica desses modelos para os meses de Janeiro e Fevereiro de 1998. Para cada "mês" foram geradas 100 possíveis séries de pseudo-previsões para cada um dos três modelos e calculados os seguintes parâmetros: Historico; media - media das precipitacoes dp - desvio padrao das precipitacoes, percseco - percentagem de dias sem chuvas; Simulacoes; media - media das 100 simulacoes das previsões, dp - desvio padrao das previsões médio ao longo das 100 simulacoes, percseco - média ao longo das 100 simulacoes da percentagem em cada simulação dos dias previstos sem chuvas, CertoSeco - média ao longo das 100 simulações da frequencia em cada simulação de dias previstas secos que realmente não ocorreu chuva; CertoChuva - média ao longo das 100 simulacoes da frequencia em cada simulação de dias previstos com chuvas que realmente ocorreu chuva; ChuvaSeco - média ao longo das 100 simulações da média em cada simulação da chuva ocorrida para os dias em que não foi previsto chuva, ErroChuva - média ao longo das 100 simulações da média em cada simulação da diferença absoluta entre a chuva ocorrida e a chuva prevista para os dias em que foi previsto chuva, CorHisPrev - média ao longo das 100 simulações da correlação em cada simulação entre chuva ocorrida e prevista

Pode-se notar que as pseudo-previsões geradas tiveram performance muito boa, sendo pouco provável que sistemas reais de previsão de chuva alcancem tal nível de acerto. Se for possível obter dados de previsões feita e chuvas ocorridas podemos ajustar o parametro r_0 do modelo aqui desenvolvido, ou mesmo introduzir outros parametros (ex: X não precisa ter média zero) para simular a performance do sistema em estudo. Nesse estudo r_0 foi adotado como 0,7.