

DOIS MODELOS DE DESAGREGAÇÃO DE VAZÕES MENSIS EM DIÁRIAS

Fabricio Müller

COPEL - Coordenação de Planejamento - Coordenadoria de Planejamento da Geração
Rua Marechal Deodoro, 1028 - CEP 80060-010
moz@mail.copel.br - fbrc@hotmail.com

RESUMO

Geração de séries sintéticas de vazões diárias podem ser utilizadas em hidrologia em, por exemplo, simulação de vazões máximas ou refinamento de decisões obtidas com simulação mensal.

Este estudo visa a criação de modelos de geração de séries diárias de vazões que resolvam os problemas comumente encontrados neste tipo de modelos: a não preservação, ao mesmo tempo, da forma das hidrógrafas encontradas no histórico e das estatísticas mensais.

Os modelos propostos são basicamente dois: MSD (Modelo Simplificado de Desagregação) e MMD (Modelo Modificado de Desagregação) e são baseados no modelo dos fragmentos (Svanidze, 1980). Para comparação com os modelos propostos, geraram-se vazões por diversos modelos existentes.

Os testes realizados mostraram que os modelos não-paramétricos - Diana, de Yakowitz, dos fragmentos e os propostos - saíram-se, na maioria dos casos, melhor que os modelos paramétricos (os restantes), por preservarem com maior eficiência as características da hidrógrafa. E as estatísticas mensais foram bem preservadas pelos modelos propostos, tendo sido portanto alcançado o objetivo do estudo.

INTRODUÇÃO

São inúmeras as possíveis utilizações de gerações de séries hidrológicas sintéticas no planejamento de sistemas de aproveitamento de recursos hídricos. A simulação mediante

modelos matemáticos permite a análise do comportamento ou respostas de diferentes configurações possíveis ante uma variedade de situações hidrológicas ou estímulos, podendo alcançar-se desta forma soluções tendentes ao ótimo dentro do planejamento, desenho e operação de sistemas para o aproveitamento dos recursos hídricos (Valencia et al., 1991). Em boa parte dos casos, necessita-se apenas gerar séries mensais ou anuais, porém às vezes isto não é o suficiente, como por exemplo no cálculo do volume de espera a ser alocado nos reservatórios para o controle das cheias, na modelagem de vazões extremas ou na análise de segurança de barragens. O'Connell e Jones (1978) (*apud* Kelman, 1983) demonstram a necessidade de séries diárias para o cálculo da confiabilidade de um reservatório de abastecimento de água na Inglaterra.

O objetivo deste trabalho é tentar resolver, de maneira satisfatória e ao mesmo tempo, dois aspectos importantes na geração de vazões diárias:

1. a dificuldade em se obter um modelo matemático que reproduza com perfeição o comportamento de séries diárias de vazões, com suas ascensões rápidas e recessões lentas;

2. a dificuldade em se obter um modelo que, ao mesmo tempo, preserve estatísticas mensais, anuais e diárias. Considera-se que um modelo "preserva" estatísticas mensais ou anuais neste trabalho quando o mesmo utiliza estatísticas mensais ou anuais para a geração de séries, tendendo então a preservar estas estatísticas.

Estes aspectos não foram resolvidos ao mesmo tempo porque os modelos que resolveram o primeiro aspecto (como o modelo Diana (Kelman et al., 1983) e o modelo não-paramétrico (Yakowitz, 1979)) não resolvem o segundo, e os que resolvem o segundo aspecto (como os de desagregação) não resolvem plenamente o primeiro.

Para cumprir este objetivo são cumpridas três etapas:

1. gerar vazões por modelos existentes de geração de séries de vazões diárias;

2. proposição propriamente dita de modelos de desagregação de vazões mensais em diárias (MSD - Modelo Simplificado de Desagregação e MMD - Modelo Modificado de Desagregação) e gerar vazões por estes modelos;

3. fazer uma comparação de resultados obtidos pelos modelos existentes e propostos.

No estudo não serão considerados casos de geração multivariada, nem casos de geração indireta, onde geram-se precipitações diárias para então transformá-las em vazões. Um exemplo de modelo de geração de vazões diárias por simulação indireta pode ser encontrado em Kottegoda e Horder (1979). Em alguns modelos, será estimado o efeito da chuva na série de vazões, mas apenas através do próprio registro de vazões.

É interessante ressaltar que os modelos de geração indireta poderiam resolver alguns dos problemas encontrados em alguns modelos analisados neste trabalho (como geração de vazões negativas e a forma dos hidrogramas), mas talvez introduzissem outros (como a correta relação chuva-vazão e a conseqüente dificuldade na preservação de estatísticas mensais).

ESTAÇÃO ESCOLHIDA PARA GERAÇÃO DE SÉRIES

A estação fluviométrica escolhida para o estudo foi a de Rio dos Patos em Rio dos Patos (código do DNAEE: 64620000), na Bacia do Rio Ivaí, Estado do Paraná. Ela está situada a 25°12' latitude sul, 50°56' longitude leste, e tem uma área de drenagem

correspondente de 1090 km². Para o período estudado, 1931-1993, a vazão média foi de 22,8 m³/s, a vazão máxima observada foi de 660,0 m³/s, em 31/5/92, e a mínima observada foi de 0,2 m³/s, em 18/8/33. A figura 1 mostra seis meses de registro histórico no Rio dos Patos.

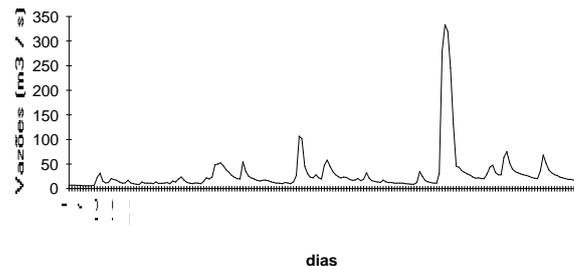


Figura 1 - Seis meses de registro histórico no Rio dos Patos

MODELOS EXISTENTES ESCOLHIDOS PARA SIMULAÇÃO

Escolha dos modelos

A filosofia que norteou a escolha dos modelos de geração de vazões diárias foi a seguinte:

- escolher pelo menos um modelo para cada sub-item da classificação de modelos apresentada por Müller (1997);
- escolher entre os modelos mais representativos ou mais citados em cada sub-item da supracitada classificação.

Abaixo relacionada está apresentada a classificação de Müller com os correspondentes modelos escolhidos em cada sub-item:

1. Modelos baseados unicamente em simuladores de vazões mensais. Modelos escolhidos: QUI1 e QUI2 (Quimpo, 1968) e PAY (Payne, 1969);

2. Modelos de "pulsos", que geram, por um meio ou outro, ascensões rápidas da hidrógrafa causadas por chuvas e estimados unicamente através do registro de vazões. Dividem-se em:

- 2.1. Modelos "shot-noise". Modelos escolhidos: SHC, SHM e DSN (Weiss, 1977);
 - 2.2. Modelos baseados na transição de probabilidades "seco-chuvoso". Modelo escolhido: SAR (Sargent, 1979);
 - 2.3. Modelos de pulsos empíricos. Modelo escolhido: DIAN (modelo Diana, apresentado por Kelman et al., 1983);
 3. Modelo não-paramétrico, ou de Yakowitz (1979). Modelos escolhidos: YAK1, YAK2, YAK3 e YAK-A.
 4. Modelos de desagregação de vazões anuais ou mensais em diárias. Modelo escolhido: FRAG (modelo dos fragmentos apresentado por Svanidze, 1980).
- Apesar dos modelos de Yakowitz (1979) serem os únicos chamados "não-paramétricos", os modelos DIAN e FRAG também não são paramétricos.

Principais características

Neste item estão apresentadas algumas características dos modelos existentes simulados. A descrição completa destes modelos, juntamente com a descrição de sua aplicação em Rio dos Patos está apresentada em Müller (1997).

Os modelos QUI1 e QUI2, estocásticos propostos por Quimpo (1968) são adaptações de modelos auto-regressivos, de ordens 1 e 2, respectivamente, para o caso de modelagem diária. Como os modelos auto-regressivos geram séries com média nula e desvio-padrão unitário, que depois serão multiplicadas pelo desvio-padrão e somadas às médias de longo período, isto tornou inviável a pura e simples aplicação de modelos auto-regressivos para o caso diário, tendo em vista a enorme variabilidade das médias e desvios-padrão para cada dia do ano neste caso. Para sanar este problema, é ajustada uma função suave e verossímil, tanto para a média $\hat{\mu}_t$ quanto para o desvio-padrão $\hat{\sigma}_t$. Estas funções são as médias e desvios-padrões periódicos obtidos por séries de Fourier para séries

diárias (Kelman, 1987a; Quimpo, 1968; Yevjevich, 1984). Este modelo apresenta os seguintes inconvenientes: a ascensão da hidrógrafa não apresenta uma ascensão abrupta comparada com recessão suave, como normalmente ocorre na série histórica; e não consegue reproduzir a alta assimetria e curtose das distribuições empíricas (Tao, 1973, *apud* Kelman, 1987b).

O modelo PAY (Payne et al., 1969) se baseia nas séries históricas *rearranjadas*: as ascensões e recessões da série histórica são retiradas do seu lugar de origem e realocadas nos dias de maior probabilidade de ocorrência. Após este rearranjo das vazões históricas, um modelo log-Pearson tipo III é utilizado para gerar novas séries. O método foi testado originalmente no rio Calapooia, em Oregon, que apresenta uma forte sazonalidade, com a neve derretida apresentando grande influência na primavera, e com finais de verões chuvosos. A aplicação de tal modelo para a Região Sul do Brasil, com sazonalidade muito pouco definida, apresenta, como era de se esperar, grandes dificuldades.

Os modelos *shot-noise* SHC e SHM (Bernier, 1970, *apud* Kelman, 1987a; Weiss, 1977) se compõem de uma série de eventos, obedecendo a uma lei de Poisson, cada um produzindo um pulso de altura aleatória, superposto a uma equação exponencial ajustada às recessões. Isto constitui um processo regressivo de primeira ordem contínuo no tempo, com distribuição gama dos valores instantâneos. O modelo pode ser ajustado aos dados disponíveis de tal modo a preservar a média, o desvio-padrão e as correlações seriais da série histórica. Weiss (1977) ainda criou os modelos de segunda ordem (como o DSN), onde o escoamento é dividido em duas parcelas: escoamentos de base e de superfície. Estes modelos têm a grande vantagem de gerar vazões diárias com a utilização de um número mínimo de parâmetros e foram, inclusive, aplicados com sucesso na região litorânea do estado do Paraná (Mine, 1990).

O modelo SAR (Sargent, 1979) gera inicialmente os dias onde devam ou não ocorrer pulsos, ou seja, dias chuvosos ou não. Para cada dia chuvoso, um pulso é gerado

utilizando uma distribuição exponencial modificada. O pulso é então adaptado a uma função de transferência para obter a seqüência de vazões para os dias onde não ocorrem pulsos. Posteriormente é feito um ajuste, segundo o modelo de Harms e Campbell (1967), das vazões diárias geradas às vazões mensais previamente geradas. Neste estudo foi utilizado o modelo FRAG mensal para gerar vazões mensais (ver descrição do modelo FRAG mais adiante neste capítulo).

No modelo DIAN de geração de séries sintéticas diárias (Kelman et al., 1983) a vazão diária $q(t)$, para um dia t qualquer é considerada como a soma de dois componentes:

$$q(t) = u(t) + o(t) \quad (1)$$

onde $u(t)$ depende de fatores externos, tais como precipitações - podendo ser considerado um "pulso" do modelo Diana, e $o(t)$ representa o contínuo esvaziamento da água armazenada na bacia hidrográfica. Na modelagem do processo $u(t)$, dois aspectos devem ser considerados: definir sua distribuição de probabilidade marginal e preservar a dependência entre valores sucessivos de $u(t)$. Para resolver estes aspectos, o modelo Diana mapeia o processo $u(t)$ através de uma transformação do tipo $u(t)=[v(t)]^\alpha$. O processo $v(t)$ resulta de uma censura ao processo $z(t)$, auto-regressivo de ordem 1 de distribuição normal. Já o processo $o(t)$, o contínuo esvaziamento da bacia hidrográfica, é igual a $q(t-1)$ multiplicado por uma taxa de recessão.

Nos modelos YAK1, YAK2, YAK3 e YAK-A (Yakowitz, 1979) a vazão num dia $j+1$ é obtida das N vazões nos dias anteriores, onde N é a ordem do modelo (ordem igual a 1 para os modelos YAK1 e YAK-A; 2 e 3 para os modelos YAK2 e YAK3 respectivamente). Por exemplo, se a ordem do modelo for igual a dois, adota-se para início da simulação duas vazões, $q(j-1)$ e $q(j)$, aleatoriamente. A partir destas duas vazões o modelo não-paramétrico, inicialmente procura em qual "estado representativo" previamente obtido

melhor se encaixa o vetor contendo as vazões $q(j-1)$ e $q(j)$. A cada "estado representativo" corresponde uma função de distribuição empírica, e, a partir desta, o modelo não-paramétrico gera a vazão no próximo dia, ou seja $q(j+1)$. Obtidas as vazões nos dias j e $j+1$ gera-se a vazão no dia $j+2$, e assim por diante. O modelo YAK-A utiliza algumas modificações, propostas por Müller (1997), para simplificar o processo de otimização na obtenção dos "estados representativos".

No modelo FRAG (Svanidze, 1980), inicialmente são calculados os fragmentos adimensionalizados $q_{adm}(t,k)$, onde t é o ano e k o dia da série histórica. Estes fragmentos são obtidos através da divisão da série diária histórica de vazões $q(t,k)$ pela média anual $x(t)$ do ano em que estas vazões $q(t,k)$ ocorreram. Deste modo, para cada ano t do histórico corresponderá um fragmento $q_{adm}(t,k)$, o qual é um vetor composto por 365 valores adimensionalizados tais que:

$$q_{adm}(t,k) = q(t,k) / x(t) \quad (2)$$

com t variando do ano inicial até o final do histórico, e $k = 1, \dots, 365$ dias (o modelo FRAG mensal considera k variando de 1 a 12 meses). Para se gerar a série $q(j,k)$ de vazões mensais simuladas por este método, necessita-se inicialmente gerar a série $x(j)$ de vazões médias anuais (para o caso de Rio dos Patos foi escolhido um modelo AR(3) - ver Müller, 1997), com j variando do primeiro ao último ano da geração e k variando de 1 a 365. Então, para cada vazão $x(j)$ média anual gerada, sorteia-se um ano t do histórico para que se obtenha o fragmento correspondente, multiplica-se os 365 valores $q_{adm}(t,k)$ deste fragmento pela vazão anual gerada $x(j)$ obtendo-se então os 365 valores correspondentes de $q(j,k)$.

Svanidze (1980) recomenda o uso de séries simuladas de vazões diárias no estudo de volumes de espera para cheias; mostra a semelhança entre as hidrógrafas geradas pelo modelo dos fragmentos e as históricas, seja qual for o intervalo de discretização da hidrógrafa (mensal, diário, ou mesmo horário); e acrescenta que o problema dos saltos que

ocorrem no final de cada ano gerado "não está ainda resolvido": uma solução está mostrada na descrição dos modelos propostos.

MODELOS PROPOSTOS

Problemas encontrados nos modelos de geração de vazões diárias

Alguns problemas encontrados na geração de vazões diárias conduziram à necessidade da proposição de novos modelos de geração de séries neste trabalho, problemas estes relacionados a três fatores principais:

a) à dificuldade em ajustar um processo ARMA(p,q), comumente aplicável em séries temporais, à série histórica;

b) à forma própria das hidrógrafas;

c) à dificuldade em preservar ao mesmo tempo vazões diárias, mensais e anuais.

Quanto ao item a), aplicação de modelos do tipo ARMA(p,q) na modelagem de vazões diárias, a mesma não é recomendada por dois motivos:

- Tao (1973), *apud* Kelman (1987b), tentou ajustar diversas expressões analíticas para o termo aleatório da fórmula da equação básica dos modelos ARMA(p,q), não obtendo sucesso, devido aos altos coeficientes de assimetria e curtose comumente encontrados nas séries diárias de vazões.

- Nas séries diárias de vazões, as ascensões da hidrógrafa são quase sempre mais abruptas que as recessões. Processos cujas características exibam esta propriedade são chamados irreversíveis no tempo. Este fato é possivelmente argumento suficiente para desestimular o emprego de modelos ARMA(p,q) para o estudo de vazões diárias (Kelman, 1987a).

Os modelos QUI1 e QUI2 (Quimpo, 1968) nada mais são do que uma forma especial da aplicação de modelos ARMA(p,q) para séries diárias. A forma das hidrógrafas simuladas por este modelo, como as da figura 2, geradas para Rio dos Patos conforme

descrito em Müller (1997), são completamente diferentes das hidrógrafas do histórico (como as da figura 1): não há diferenças de forma entre ascensões e recessões; o hidrograma é muito irregular; e há geração de valores negativos. Tudo isto colabora para o desestímulo do uso de modelos ARMA(p,q) na simulação de vazões diárias.

Sendo eliminada a possibilidade de gerar séries de vazões semelhantes com as históricas por modelos do tipo ARMA(p,q), soluções matemáticas paramétricas alternativas foram tentadas, como os modelos de PAY (Payne et al., 1969), *shot noise* como o DSN (Weiss, 1977), e SAR (Sargent, 1979). As figuras 3 a 5, seguir, mostram hidrógrafas de seis meses geradas em Rio dos Patos pelos métodos, respectivamente, PAY, DSN e SAR.

Uma análise destas figuras permite as seguintes conclusões:

- O modelo PAY apresenta hidrógrafas mais irregulares que as do histórico (figura 1) e de tamanho sempre igual;

- A hidrógrafa do modelo DSN é bastante distinta da do histórico, por ser muito regular - parecendo uma serra dentada, conforme a definição de Weiss (1977);

- A hidrógrafa do modelo SAR é, comparando com as dos outros dois modelos, a mais próxima da série histórica; mesmo assim, ela é mais linear; a parte superior dos picos é muito retilínea; a recessão "baixa"

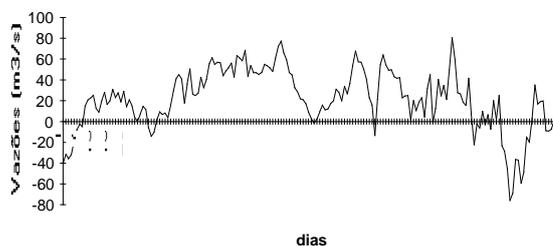


Figura 2 - Seis meses gerados pelo modelo Quimpo de 1a. ordem

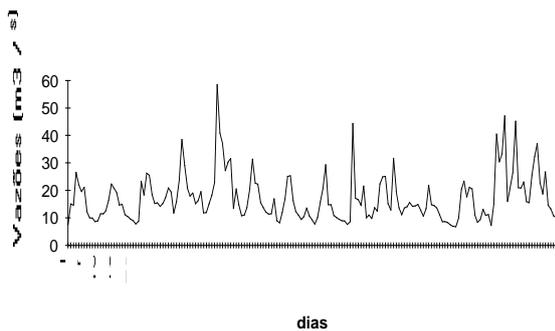


Figura 3 - Seis meses gerados pelo modelo PAY (Rio dos Patos)

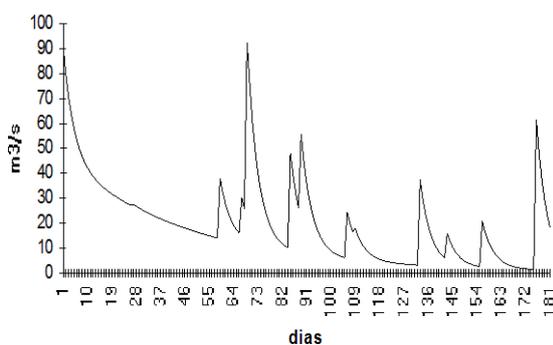


Figura 4 - Seis meses gerados pelo modelo DSN (Rio dos Patos)

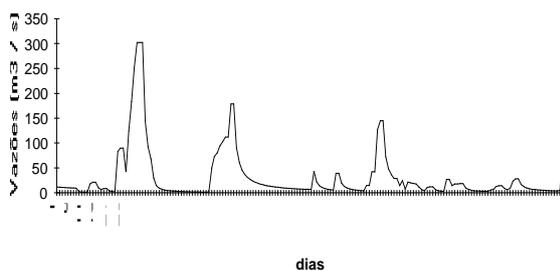


Figura 5 - Seis meses gerados pelo modelo simplificado de SAR (Rio dos Patos)

começa sempre, arbitrariamente, logo abaixo das vazões iguais à média de longo período (ver Müller, 1997); o modelo SAR reproduz melhor ascensões e recessões baixas que

ascensões e recessões altas, o que contraria o objetivo mais freqüente de gerações de séries sintéticas de vazões diárias, ou seja, estudo de máximas.

Estas conclusões são coerentes com as objeções de Yakowitz (1979) quanto à parametrização de simuladores de vazões diárias e estas podem ser resumidas nestes dois pontos, já mencionados:

- as séries simuladas por modelos paramétricos "não se parecem com as séries históricas";
- estas séries têm dificuldade em reproduzir ascensões e recessões da hidrógrafa.

A conclusão de Yakowitz é de suma importância: "ainda não há uma família paramétrica de séries temporais rica o suficiente para modelar de maneira segura e perfeita séries de vazões diárias. Na ausência, até agora, do descobrimento de classes paramétricas mais robustas, devemos então, ou recorrer a séries temporais não paramétricas ou nos contentarmos com alguns tipos de famílias paramétricas que não conterão a lei à qual a série diária obedece".

Foram geradas vazões por outros três modelos já existentes e que podem ser considerados não-paramétricos: o modelo DIAN, os modelos de Yakowitz (1979), e o FRAG. Hidrogramas de seis meses para estes três modelos (o de Yakowitz é o YAK-A) gerados em Rio dos Patos estão representados, respectivamente, nas figuras 6, 7 e 8.

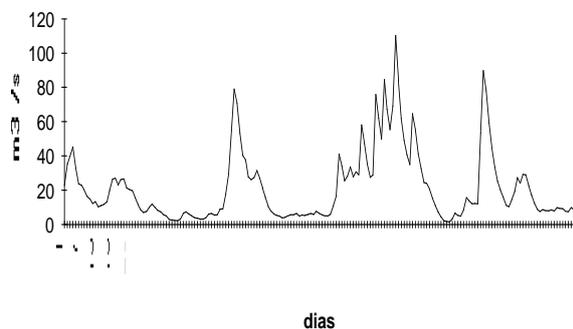


Figura 6 - Seis meses gerados pelo modelo DIAN (Rio dos Patos)

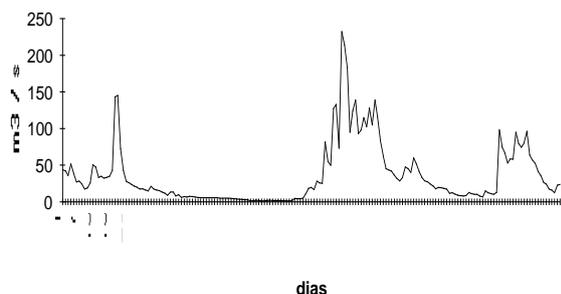


Figura 7 - Seis meses gerados pelo modelo de YAKOWITZ (Rio dos Patos)

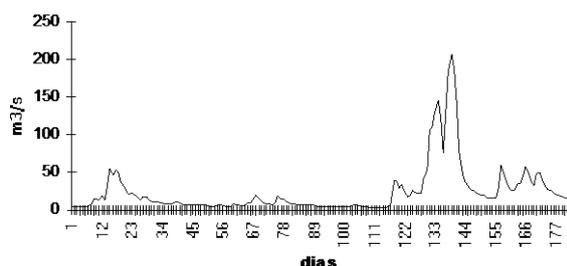


Figura 8 - Seis meses gerados pelo método dos fragmentos diário (Rio dos Patos)

O modelo FRAG diário apresenta excelentes resultados no que diz respeito à preservação das estatísticas anuais e mensais. Os modelos propostos podem ser considerados aperfeiçoamentos do modelo

dos fragmentos original, e sua criação se justifica tendo em vista que:

- visam resolver o problema dos saltos intra-anuais;
- como partem de uma série anual para uma mensal e só então para uma diária, permitem uma maior variabilidade das séries de vazões, isto é, séries bastante distintas da original, mas preservando suas estatísticas;
- permitem um melhor planejamento estratégico, levando em conta as palavras de KELMAN (1987b): "a vantagem desta abordagem (de desagregações sucessivas) é que torna compatível os estudos estratégicos e táticos relativos à operação do sistema hidrelétrico, quando feitos a partir de simulações com séries sintéticas. No planejamento estratégico o horizonte considerado pode ser de alguns anos e o intervalo de discretização do tempo não é usualmente inferior a um mês. No planejamento tático é preciso refinar as decisões da fase estratégica, levando em consideração as restrições à operação com curto prazo de duração, como são as relacionadas ao controle de cheias".

- permitem que a geração sintética por qualquer modelo de geração de séries diárias que não preserve estatísticas mensais venha a fazê-lo, como se verá na descrição do modelos estendidos de desagregação.

Notação utilizada

A notação para os modelos propostos deve ser acompanhada com atenção para evitar mal-entendidos. Isto porque, para os modelos MSD (Modelo Simplificado de Desagregação) e MMD (Modelo Modificado de Desagregação), existem quatro séries de igual importância, todas com seus respectivos anos, meses e dias: a série original; as séries originais com "meses" de n dias; séries diárias adimensionalizadas em "meses" de n dias; série gerada.

A descrição das séries do modelo MSD é a seguinte:

- série original: pode ser a série histórica ou uma série diária gerada por outro modelo. As vazões aqui são representadas

por letras minúsculas e seus contadores por gregas minúsculas. As vazões médias anuais são representadas $x(i)$ para um ano i qualquer, com $i = \text{anoi}, \dots, \text{anof}$ (onde anoi é o primeiro ano da série original e anof o último). As vazões diárias são representadas por $q(i, \xi, \kappa)$, para um ano i , um mês ξ e um dia κ , $\kappa = 1, \dots, \text{numdias}(\xi)$, onde $\text{numdias}(1) = 31$, $\text{numdias}(2) = 28$ (não foram considerados fevereiro com 29 dias, por simplificação) e assim por diante - ou seja, é o número de dias de mês, conforme visto no calendário.

- série original com "meses" de $n (=28, 30, 31)$ dias: são as mesmas vazões diárias da série original rearranjadas de maneira que existam "janeiros" com 28, 30 e 31 dias; "fevereiros" com 28, 30 e 31 dias; e assim por diante. Isto é feito para aumentar o número de fragmentos na série histórica. Estas vazões diárias com "meses" de $n (=28, 30, 31)$ dias são representadas por $q_{28}(i, \xi, \kappa)$, $q_{30}(i, \xi, \kappa)$ e $q_{31}(i, \xi, \kappa)$ para um ano i um mês ξ e um dia κ , $\kappa = 1, \dots, \text{num}(\xi)$ (onde $\text{num}(\xi) = 28$ nas séries $q_{28}(i, \xi, \kappa)$, 30 nas séries $q_{30}(i, \xi, \kappa)$ e 31 nas séries $q_{31}(i, \xi, \kappa)$, para $\xi = 1, \dots, 12$). Na descrição do modelo MSD está apresentada a maneira como são montados estes "meses" de n dias. As correspondentes vazões médias mensais são para estes "meses" são $y_{28}(i, \xi)$, $y_{30}(i, \xi)$ e $y_{31}(i, \xi)$ conforme sejam de "meses" com 28, 30 ou 31 dias, para o ano i e mês $\xi = 1, \dots, 12$.

- séries diárias adimensionalizadas em "meses" de $n (=28, 30, 31)$ dias: são chamadas, respectivamente, de $a_{28}(i, \xi, \kappa)$, $a_{30}(i, \xi, \kappa)$ ou $a_{31}(i, \xi, \kappa)$ conforme tenham 28, 30 ou 31 dias, para $i = \text{anoi}, \dots, \text{anof}$, para $\xi = 1, \dots, 12$ e para $\kappa = 1, \dots, \text{num}(\xi)$.

- série gerada: os meses têm a mesma duração do calendário. As vazões são representadas por letras maiúsculas e os contadores por romanas minúsculas. A vazão média anual para um ano i é representada por $X(i)$, com $i = \text{anoig}, \dots, \text{anofg}$ (onde anoig é o primeiro ano gerado e anofg o último). A vazão média mensal é representada por $Y(i, j)$ para um ano i e um mês j . Finalmente, a vazão diária gerada é notada como $Q(i, j, k)$ para um dia k , com $k = 1, \dots, \text{numdias}(j)$.

Já para o modelo MMD, a série original de vazões diárias é simplesmente chamada $w(t)$, com $t = 1, \dots, h$, onde h é o número de dias da série original completa. Como para o modelo MSD, também existem vazões mensais para "meses" de 28, 30 e 31 dias (como se verá mais adiante), aqui chamados de $v_{28}(t)$, $v_{30}(t)$ e $v_{31}(t)$, com $t = 1, \dots, h-n$, onde $n = 28, 30$ ou 31 conforme o número de dias do "mês" de n dias. Este procedimento aumenta o número de fragmentos no modelo MMD, o que é importante em sua implementação, como se verá adiante.

Modelo MSD

O modelo MSD (Modelo Simplificado de Desagregação) é uma extensão do modelo dos fragmentos na desagregação de vazões mensais em diárias. A diferença entre ambos está em dois itens:

- * na passagem da vazão gerada do final de um mês para o primeiro dia do mês seguinte;
- * na série original: para o modelo MSD, esta série é gerada a partir da série original. A partir daqui, a "série original" será aquela a que este estudo irá se referir, não importando se esta série é a histórica ou a modelada.

A geração de séries por este modelo segue o princípio básico seguinte: dadas as vazões diárias geradas de um mês j , calcula-se por tentativas, qual fragmento adimensionalizado, que, multiplicado pela vazão média mensal do mês $j+1$, resultar na menor distância entre o último dia do mês j e o primeiro dia do mês $j+1$. Esta geração envolve os seguintes passos:

1. Geração da série de vazões mensais $Y(i, j)$ por algum método (Müller (1997) escolheu o modelo FRAG mensal para Rio dos Patos).

2. Preparação dos registros históricos com meses de 28, 30 e 31 dias, ou seja, das séries $q_{28}(i, \xi, \kappa)$, $q_{30}(i, \xi, \kappa)$ e $q_{31}(i, \xi, \kappa)$, dada a série $q(i, \xi, \kappa)$, chamada série original, conforme notação acima. Como dito anteriormente, existem "meses" de janeiro com 28, 30 e 31 dias, assim como fevereiro, março, etc. para aumentar o número de fragmentos na série histórica. Deste modo, ter-se-á três novos registros com dimensões

aproximadamente iguais às do histórico (maiores que o histórico no caso de registro com meses de 31 dias e menores que o histórico nos outros casos). Para a criação destes registros adota-se o seguinte procedimento:

- a vazão no primeiro dia dos "meses" de n (28, 30 e 31) dias é a mesma do primeiro dia do mês original;
- quando o número de dias do mês da série original for maior que o número de dias do "mês" de n dias (por exemplo, meses originais de fevereiro nos arquivos com meses de 31 dias), basta tomar os dias que faltam para completar o novo "mês" no mês original imediatamente subsequente;
- no outro caso (por exemplo, meses de janeiro nos arquivos com meses de 30 dias), basta tomar os dias do mês original necessários para completar a soma do número de dias do novo arquivo com "meses" de n dias. Obviamente, nos casos em que o número de dias do mês original for igual ao número de dias do "mês" de n dias, todas as vazões do mês original serão iguais às do novo "mês".

3. O próximo passo é a adimensionalização dos "meses" de n dias. Isto é feito simplesmente dividindo cada vazão diária dos "meses" de n dias pela vazão média mensal de seu próprio "mês". Sejam por exemplo, "meses" de 30 dias. A vazão média mensal $y_{30}(t, \xi)$ para $t = \text{anoi}, \dots, \text{anof}$ e cada "mês" $\xi, \xi = 1, \dots, 12$ é dada por

$$y_{30}(t, \xi) = \frac{1}{30} \sum_{\kappa=1}^{30} q_{30}(t, \xi, \kappa) \quad (3)$$

A série adimensionalizada para "meses" de 30 dias é então dada por

$$a_{30}(t, \xi, \kappa) = \frac{q_{30}(t, \xi, \kappa)}{y_{30}(t, \xi)} \quad (4)$$

com $t = \text{anoi}, \dots, \text{anof}$, $\xi = 1, \dots, 12$, $\kappa = 1, \dots, 30$. Raciocínio semelhante é empregado para os "meses" de 28 e 31 dias.

Como exemplo da criação destas séries com meses de n dias, para facilitar a

compreensão apresenta-se na tabela 1 a série de vazões em fevereiro (sem dia 29 de fevereiro) e março de 1960 para Rio dos Patos ao lado das correspondentes vazões dos "meses" de n ($=28, 30, 31$) dias, adimensionais ou não, mais as suas correspondentes médias.

4. Quando forem gerados meses de janeiro, buscam-se os "meses" adimensionalizados com 31 dias; quando forem gerados fevereiro, buscam-se "meses" adimensionalizados de 28 dias e assim por diante. O princípio da geração é multiplicar o valor da vazão mensal $Y(i, j)$ obtido no primeiro passo pelas vazões adimensionalizadas obtidas no terceiro passo para a obtenção de vazões diárias.

Para o primeiro mês gerado, basta multiplicar o valor de $Y(i, j)$ obtido para $i = \text{anoi}$ e $j = 1$ pelas vazões de uma série $a_{31}(t, \xi, \kappa)$, $\kappa = 1, \dots, 31$ com t e ξ quaisquer para a obtenção do primeiro mês com vazões diárias geradas $Q(\text{anoi}, 1, \kappa)$, $\kappa = 1, \dots, 31$.

Tabela 1 - Exemplo de criação das séries $q_{28}(t, \xi, \kappa)$, $a_{28}(t, \xi, \kappa)$, $y_{28}(t, \xi)$, $q_{30}(t, \xi, \kappa)$, $a_{30}(t, \xi, \kappa)$, $y_{30}(t, \xi)$, $q_{31}(t, \xi, \kappa)$, $a_{31}(t, \xi, \kappa)$, $y_{31}(t, \xi)$ mais as suas correspondentes médias para os meses (ξ) de fevereiro (sem dia 29 de fevereiro) e março para o ano (t) de 1960 na estação de rio dos Patos ao lado da correspondente série histórica $q(t, \xi, \kappa)$

t	ξ	κ	$q(t, \xi, \kappa)$ (m ³ /s)	κ	$q_{28}(t, \xi, \kappa)$ (m ³ /s)	$a_{28}(t, \xi, \kappa)$ (adimens)	κ	$q_{30}(t, \xi, \kappa)$ (m ³ /s)	$a_{30}(t, \xi, \kappa)$ (adimens)	κ	$q_{31}(t, \xi, \kappa)$ (m ³ /s)	$a_{31}(t, \xi, \kappa)$ (adimens)
1960	2	1	5,6	1	5,6	0,351	1	5,6	0,359	1	5,6	0,363
1960	2	2	4,9	2	4,9	0,307	2	4,9	0,314	2	4,9	0,318
1960	2	3	3,9	3	3,9	0,244	3	3,9	0,250	3	3,9	0,253
1960	2	4	11,7	4	11,7	0,733	4	11,7	0,751	4	11,7	0,759
1960	2	5	11,7	5	11,7	0,733	5	11,7	0,751	5	11,7	0,759
1960	2	6	7,9	6	7,9	0,495	6	7,9	0,507	6	7,9	0,513
1960	2	7	6,1	7	6,1	0,382	7	6,1	0,391	7	6,1	0,396
1960	2	8	4,6	8	4,6	0,288	8	4,6	0,295	8	4,6	0,298
1960	2	9	4,2	9	4,2	0,263	9	4,2	0,270	9	4,2	0,272
1960	2	10	6,1	10	6,1	0,382	10	6,1	0,391	10	6,1	0,396
1960	2	11	7,9	11	7,9	0,495	11	7,9	0,507	11	7,9	0,513
1960	2	12	9,8	12	9,8	0,614	12	9,8	0,629	12	9,8	0,636
1960	2	13	8,4	13	8,4	0,526	13	8,4	0,539	13	8,4	0,545
1960	2	14	11	14	11	0,689	14	11	0,706	14	11	0,714
1960	2	15	14,6	15	14,6	0,915	15	14,6	0,937	15	14,6	0,947
1960	2	16	21,8	16	21,8	1,366	16	21,8	1,399	16	21,8	1,414
1960	2	17	19,2	17	19,2	1,203	17	19,2	1,232	17	19,2	1,246
1960	2	18	16,8	18	16,8	1,053	18	16,8	1,078	18	16,8	1,090
1960	2	19	16,1	19	16,1	1,009	19	16,1	1,033	19	16,1	1,045
1960	2	20	32,4	20	32,4	2,030	20	32,4	2,079	20	32,4	2,102
1960	2	21	59,4	21	59,4	3,722	21	59,4	3,812	21	59,4	3,854
1960	2	22	44	22	44	2,757	22	44	2,824	22	44	2,855
1960	2	23	37,7	23	37,7	2,362	23	37,7	2,419	23	37,7	2,446
1960	2	24	28,8	24	28,8	1,804	24	28,8	1,848	24	28,8	1,869
1960	2	25	20,1	25	20,1	1,259	25	20,1	1,290	25	20,1	1,304
1960	2	26	12,5	26	12,5	0,783	26	12,5	0,802	26	12,5	0,811
1960	2	27	10,3	27	10,3	0,645	27	10,3	0,661	27	10,3	0,668
1960	2	28	9,4	28	9,4	0,589	28	9,4	0,603	28	9,4	0,610
1960	2			29	10,3		29	10,3	0,661	29	10,3	0,668
1960	2			30	10,3		30	10,3	0,661	30	10,3	0,668
1960	2			31	10,3					31	10,3	0,668
				$y_{28}(t, \xi) =$ 15,96 média = 1,000			$y_{30}(t, \xi) =$ 15,58 média = 1,000			$y_{31}(t, \xi) =$ 15,41 média = 1,000		
1960	3	1	10,3	1	10,3	1,431	1	10,3	1,507	1	10,3	1,547
1960	3	2	10,3	2	10,3	1,431	2	10,3	1,507	2	10,3	1,547
1960	3	3	10,3	3	10,3	1,431	3	10,3	1,507	3	10,3	1,547
1960	3	4	9,8	4	9,8	1,361	4	9,8	1,434	4	9,8	1,472
1960	3	5	9,4	5	9,4	1,306	5	9,4	1,376	5	9,4	1,412
1960	3	6	9,4	6	9,4	1,306	6	9,4	1,376	6	9,4	1,412
1960	3	7	8,9	7	8,9	1,236	7	8,9	1,302	7	8,9	1,337
1960	3	8	8,4	8	8,4	1,167	8	8,4	1,229	8	8,4	1,262
1960	3	9	8,4	9	8,4	1,167	9	8,4	1,229	9	8,4	1,262
1960	3	10	7,9	10	7,9	1,097	10	7,9	1,156	10	7,9	1,187
1960	3	11	8,9	11	8,9	1,236	11	8,9	1,302	11	8,9	1,337
1960	3	12	11	12	11	1,528	12	11	1,610	12	11	1,652
1960	3	13	10,3	13	10,3	1,431	13	10,3	1,507	13	10,3	1,547
1960	3	14	9,8	14	9,8	1,361	14	9,8	1,434	14	9,8	1,472
1960	3	15	9,4	15	9,4	1,306	15	9,4	1,376	15	9,4	1,412
1960	3	16	7,5	16	7,5	1,042	16	7,5	1,098	16	7,5	1,126
1960	3	17	6,5	17	6,5	0,903	17	6,5	0,951	17	6,5	0,976
1960	3	18	6,1	18	6,1	0,847	18	6,1	0,893	18	6,1	0,916
1960	3	19	5,6	19	5,6	0,778	19	5,6	0,820	19	5,6	0,841
1960	3	20	5,6	20	5,6	0,778	20	5,6	0,820	20	5,6	0,841
1960	3	21	5,3	21	5,3	0,736	21	5,3	0,776	21	5,3	0,796
1960	3	22	5,3	22	5,3	0,736	22	5,3	0,776	22	5,3	0,796
1960	3	23	4,9	23	4,9	0,681	23	4,9	0,717	23	4,9	0,736
1960	3	24	4,2	24	4,2	0,583	24	4,2	0,615	24	4,2	0,631
1960	3	25	2,5	25	2,5	0,347	25	2,5	0,366	25	2,5	0,375
1960	3	26	2	26	2	0,278	26	2	0,293	26	2	0,300
1960	3	27	1,8	27	1,8	0,250	27	1,8	0,263	27	1,8	0,270
1960	3	28	1,8	28	1,8	0,250	28	1,8	0,263	28	1,8	0,270
1960	3	29	1,8	29	1,8		29	1,8	0,263	29	1,8	0,270
1960	3	30	1,6	30	1,6		30	1,6	0,234	30	1,6	0,240
1960	3	31	1,4							31	1,4	0,210
				$y_{28}(t, \xi) =$ 7,20 média = 1,000			$y_{30}(t, \xi) =$ 6,83 média = 1,000			$y_{31}(t, \xi) =$ 6,66 média = 1,000		

O próximo mês (j+1) gerado (fevereiro neste caso) é obtido encontrando o fragmento $a_{28}(i, \xi, \kappa)$, variando i de ano a ano e ξ de 1 a 12, que respeite a condição

$$\min \left| Y(i, j+1) * a_{28}(i, \xi, 1) - Q(i, j, 31) \right| \quad (5)$$

Esta condição foi imposta de modo que a distância entre o último dia de um mês e o primeiro dia do próximo seja a menor possível. Raciocínio semelhante é empregado na obtenção do mês de março subsequente: como março (o mês j+1) tem 31 dias e fevereiro (o mês j) tem 28 dias a condição da fórmula (5) passa a ser:

$$\min \left| Y(i, j+1) * a_{31}(i, \xi, 1) - Q(i, j, 28) \right| \quad (6)$$

também variando i de ano a ano e ξ de 1 a 12. Aplicando o mesmo raciocínio, são gerados os valores dos meses seguintes (obviamente, na passagem de um ano para outro tem-se $j=12$ e $j+1=1$, variando o valor de i , o ano gerado).

O fato da diferença $\left| Y(i, j+1) * a_{28}(i, \xi, 1) - Q(i, j, 31) \right|$, das

equações (5), (6) ou similares entre a vazão no último dia de um mês e o início do outro ser tomada simplesmente como a mínima para a toda a gama de variação de i e ξ pode ser justificada pelos seguintes motivos:

- as vazões diárias normalmente tem alta correlação lag 1;
- os valores desta diferença não são sempre pequenos, o que assemelha o caso simulado com o gerado;
- o fato de não se estar respeitando com tanta fidelidade a correlação entre a última vazão de um mês e a primeira do próximo é compensada pela facilidade de programação - além disso, o modelo MMD, mais complexo, se propõe a resolver este problema.

As séries adimensionais $a_{28}(i, \xi, \kappa)$, $a_{30}(i, \xi, \kappa)$ ou $a_{31}(i, \xi, \kappa)$ a serem multiplicadas

por $Y(i, j)$ podem ou não serem empregadas obedecendo restrições de ordem sazonal ou diversa. Adiante são mostradas as restrições que foram empregadas na geração de vazões diárias em Rio dos Patos.

Modelo MMD

O modelo MMD é uma extensão do modelo MSD. A diferença entre os dois está na passagem da vazão gerada de um mês para o seu subsequente: no modelo MSD, é escolhida a primeira vazão do próximo mês pela menor diferença entre esta vazão e a anterior; no modelo MMD, impõe-se a vazão do primeiro dia do próximo mês pelo método não-paramétrico de Yakowitz. Como para o modelo MSD, chamar-se-á "série original" a série utilizada como base para modelação, não importando se esta série é a histórica ou não.

O princípio deste modelo é o seguinte: dados os últimos N dias do mês j, obtém-se, por algum dos modelos não-paramétricos de Yakowitz (1979) a vazão do dia seguinte, isto é, a vazão do primeiro dia do mês j+1, onde N é a ordem do modelo não-paramétrico. Por sucessivas tentativas, obtém-se um fragmento que, multiplicado por $Y(i, j+1)$ mais aproxime a vazão do primeiro dia com aquela calculada pelo modelo de Yakowitz.

Os seguintes passos são necessários para a simulação:

1. Dada a série histórica de vazões diárias $w(t)$, $t=1, \dots, h$, criar a série de vazões "mensais" de 28, 30 e 31 dias, respectivamente $v_{28}(t)$, $v_{30}(t)$ e $v_{31}(t)$, $t=1, \dots, h-n$ que nada mais são que a média de 28, 30 ou 31 dias das vazões iniciando no dia t. Para "meses" de 30 dias, ter-se-á

$$v_{30}(t) = \frac{1}{30} \sum_{\tau=t}^{t+29} w(\tau), \quad t=1, \dots, h-30 \quad (7)$$

Fórmulas semelhantes são empregadas para os "meses" de 28 e 31 dias. A tabela 2 apresenta, para facilitar a compreensão, o início do histórico em rio dos Patos (de 1/1/1931 a 2/2/1931), ou seja, a série $w(t)$,

para $t=1, \dots, 33$, com suas correspondentes médias $v_{28}(t)$, $v_{30}(t)$ e $v_{31}(t)$, para $t=1, 2, 3$.

2. Para gerar o primeiro mês de janeiro, basta selecionar uma série cuja média seja $v_{31}(t)$, $t=\text{qualquer}$ e empregar a fórmula:

$$Q(1,1,k) = Y(1,1) * w(t+k-1) / v_{31}(t) \quad (8)$$

para $k=1, \dots, 31$. A fração $w(\cdot)/v_{31}(\cdot)$ constante do segundo termo da fórmula (8) é a adimensionalização das vazões diárias $w(t^*)$, $t^*=t, \dots, t+31-1$, pois as mesmas são divididas por sua média mensal $v_{31}(t)$. No modelos MMD preferiu-se pela não formação de arquivos adimensionalizados tendo em vista as grandes dimensões que os mesmos teriam nestes modelos.

3. Como dito acima, dados os últimos N dias do mês j, obtém-se, por algum modelo não-paramétrico de Yakowitz, a vazão do dia seguinte, isto é, a vazão do primeiro dia do mês j+1, onde N é a ordem do modelo não-paramétrico. Esta vazão obtida por Yakowitz será a partir de agora chamada de $W(i,j+1,1)$, maiúsculo, onde i é o ano, j é o mês, e 1 representa o primeiro dia. Então se calcula, por tentativas, qual fragmento adimensionalizado $w(\cdot)/v_{28}, v_{30}, v_{31}$ cujo primeiro dia multiplicado por $Y(i,j)$, dê a menor distância com relação a $W(i,j+1,1)$.

Deste modo, tendo sido gerado o primeiro mês de janeiro $Q(\text{anoig},1,k)$, $k=1, \dots, 31$, com as últimas N vazões de janeiro obtém-se $W(\text{anoig},2,1)$, ou seja, a primeira estimativa da vazão no primeiro dia de fevereiro gerado. Será então escolhido um fragmento $w(t)$ tal que

$$\min | Y(\text{anoig},2) * w(t)/v_{28}(t) - W(i,2,1) | \quad (9)$$

variando t de 1 até $h-28+1$. É preciso lembrar que $v_{28}(t)$ é a vazão mensal de 28 dias começando em t, e $w(t)$ é o primeiro dia do "mês" de 28 dias começando em t e que anoig é o primeiro ano gerado. Escolhido o valor de t que resulte mínimo para a equação (9), as 28 vazões de fevereiro são então dadas por

$$Q(\text{anoig},2,k) = Y(\text{anoig},2) * w(t+k-1) / v_{28}(t) \quad (10)$$

para $k=1, \dots, 28$. As vazões nos meses seguintes devem ser obtidas utilizando raciocínio semelhante.

Aplicação dos modelos propostos para Rio dos Patos

Dois problemas surgiram da simulação do modelo MMD: o problema do número de tentativas e o da distância, que serão comentados a seguir.

O número de tentativas para a obtenção do valor t que corresponda à condição de mínimo da equação (9) pode ser muito alto, dependendo de h, o tamanho da série original, o que pode aumentar muito o tempo empregado na simulação. Isto pode ser evitado mudando a condição desta equação para $\min | Y(\text{anoig},2) * w(t)/v_{28}(t) - W(i,2,1) | \leq \epsilon$, diminuindo ou não o número de tentativas. Nas simulações feitas neste trabalho, mudou-se o intervalo de $t=1, \dots, h-28+1$ para $t=q, \dots, q+5000$, onde q era um número inteiro randômico tal que $0 < q < h-5000-28$.

O segundo problema a ser analisado aqui é o da diferença entre $W(i,j,1)$ e $Q(i,j,1) = Y(i,j) * w(t)/v_{28,30,31}(t)$, dado um ano i e um mês j gerados quaisquer. Como $W(i,j,1)$ é o próximo valor da vazão, obtida pelo modelo não-paramétrico, se houver muitos meses em que $|Q(i,j,1) - W(i,j,1)|$ tenha um valor grande, o resultado apresentará perturbação, alterando a correlação entre as vazões do último dia simulado de um mês e a primeira do próximo - por isto a criação da série $w(t)$, para aumentar o número de fragmentos e, assim, diminuir a probabilidade de que $|Q(i,j,1) - W(i,j,1)|$ seja grande. Para minimizar ainda mais este efeito, pensou-se num método simplificado de alteração da série $Q(i,j,k)$, $k=1, \dots, n$, onde n pode ser 28, 30 ou 31, de acordo com o número de dias do mês.

Tabela 2 - Início do histórico em Rio dos Patos (de 1/1/1931 a 2/2/1931), isto é, a série $w(\tau)$, para $\tau=1,\dots,33$, com suas

correspondentes médias $v_{28}(t)$, $v_{30}(t)$ e $v_{31}(t)$, para $t=1,2,3$

Data	Vazão Observada observadaA τ (série $w(\tau)$) (m3/s)	t=1			t=2			t=3			
		28 dias	séries com 30 dias	31 dias	28 dias	séries com 30 dias	31 dias	28 dias	séries com 30 dias	31 dias	
01/01/31	1	5,6	5,6	5,6	5,6						
02/01/31	2	7,5	7,5	7,5	7,5						
03/01/31	3	16,1	16,1	16,1	16,1						
04/01/31	4	10,3	10,3	10,3	10,3						
05/01/31	5	7,5	7,5	7,5	7,5						
06/01/31	6	6,5	6,5	6,5	6,5						
07/01/31	7	6,5	6,5	6,5	6,5						
08/01/31	8	5,6	5,6	5,6	5,6						
09/01/31	9	5,6	5,6	5,6	5,6						
10/01/31	10	10,3	10,3	10,3	10,3						
11/01/31	11	11,7	11,7	11,7	11,7						
12/01/31	12	7,5	7,5	7,5	7,5						
13/01/31	13	10,3	10,3	10,3	10,3						
14/01/31	14	59,4	59,4	59,4	59,4						
15/01/31	15	59,4	59,4	59,4	59,4						
16/01/31	16	73,2	73,2	73,2	73,2						
17/01/31	17	50,6	50,6	50,6	50,6						
18/01/31	18	31,5	31,5	31,5	31,5						
19/01/31	19	24,5	24,5	24,5	24,5						
20/01/31	20	38,6	38,6	38,6	38,6						
21/01/31	21	36,8	36,8	36,8	36,8						
22/01/31	22	26,2	26,2	26,2	26,2						
23/01/31	23	22,7	22,7	22,7	22,7						
24/01/31	24	16,1	16,1	16,1	16,1						
25/01/31	25	14,6	14,6	14,6	14,6						
26/01/31	26	13,2	13,2	13,2	13,2						
27/01/31	27	13,2	13,2	13,2	13,2						
28/01/31	28	10,3	10,3	10,3	10,3						
29/01/31	29	9,4		9,4	9,4	9,4					
30/01/31	30	8,4		8,4	8,4		8,4				
31/01/31	31	7,5		7,5	7,5			7,5			
01/02/31	32	6,5								6,5	
02/02/31	33	6,5									6,5
MÉDIAS =		$v_{28}(1)= 21,5$	$v_{30}(1)= 20,6$	$v_{31}(1)= 20,2$	$v_{28}(2)= 21,6$	$v_{30}(2)= 20,7$	$v_{31}(2)= 20,2$	$v_{28}(3)= 21,6$	$v_{30}(3)= 21,2$	$v_{31}(3)= 20,2$	

O princípio deste método é o seguinte: seja $Q'(i,j,k)$, $k=1,\dots,n$ a nova série alterada. O primeiro valor de $Q'(i,j,k)$, isto é, para $k=1$, é simplesmente igual a $W(i,j,1)$. Para que esta diferença entre $Q'(i,j,k)$ e $Q(i,j,k)$, $k=1,\dots,n$ seja compensada de modo que a média do mês formado pelas vazões $Q(\cdot)$ e $Q'(\cdot)$ seja a mesma, basta aplicar a fórmula:

$$Q'(i,j,k) = [Q(i,j,k) + \Delta] - \frac{n-k}{n-1} \cdot 2\Delta \quad (11)$$

para $k=1,\dots,n$ e $\Delta=Q(i,j,1)-Q'(i,j,1)$. Esta fórmula provoca uma inclinação do hidrograma no sentido anti-horário quando Δ é positivo e no sentido horário quando Δ é negativo. Isto pode ser visto na figura 9 abaixo que mostra um mês simulado pelo modelo MMD modificado por um valor de Δ igual a 8.

O valor $\Delta=8 \text{ m}^3/\text{s}$ é muito alto, com probabilidade muito pequena de ocorrência em Rio dos Patos, onde a média de longo período é de $22,8 \text{ m}^3/\text{s}$; mesmo assim, nota-se que a forma do hidrograma não se alterou substancialmente. Isto justifica o uso da equação (11).

A série de vazões diárias será então a série $Q'(i,j,k)$, $i=\text{ano}i,\dots,\text{ano}f$. Para cada mês gerado por uma fórmula do tipo da (11), se o valor de Δ resultar maior que um certo limite ε , deve-se mudar a série $Q(i,j,k)$, $k=1,\dots,n$ para uma série Q' pela fórmula (11). Esta série $Q'(i,j,k)$, $k=1,\dots,n$ então será a série de vazões diárias definitiva para o mês i . Com os últimos N valores de vazão para este mês i será então obtido o valor de $W(i,j+1,1)$, e o processo segue conforme explicado anteriormente.

Para aplicação do modelo MMD neste trabalho, escolheu-se para a passagem de um mês para outro, $N=1$ (modelo YAK-A, por sua facilidade de programação) e $N=2$ (modelo YAK2, o que apresentou melhores resultados entre os modelos de Yakowitz simulados - ver Müller, 1997). Estes modelos são chamados, respectivamente, MMD e MMD2.

Quanto às séries simuladas, tanto o modelo MSD quanto o modelo MMD podem ter como série original tanto a série histórica quanto uma série composta por outro modelo,

para que esta série venha a preservar estatísticas mensais. Foram feitas algumas simulações com cada série original sempre tendo o tamanho da série histórica, ou seja, 63 anos, o que não impede que se venham simular vazões com séries de tamanhos diferentes, maiores ou mesmo menores.

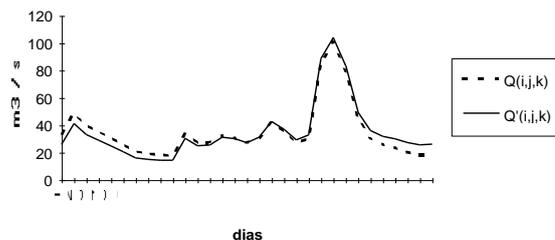


Figura 9 - Séries $Q(i,j,k)$ e $Q'(i,j,k)$ para um mês gerado pelo MMD

A escolha dos modelos para criação de séries originais recaiu sobre os modelos não-paramétricos, pois apresentam as melhores formas dos hidrogramas. Foram escolhidos:

- o modelo Diana;
- o modelo YAK-A;
- o modelo YAK2.

Deste modo, para o modelo MSD, foram gerados os seguintes modelos, conforme a série original: MSD (histórica), MSD-D (Diana), MSD-Y (YAK-A), MSD-Y2 (YAK2). Já para o modelo MMD, o valor de N para a passagem de um mês para outro pode ser tanto 1 (modelo MMD) quanto 2 (modelo MMD2). Deste modo, para o modelo MMD, conforme a série original, teremos: MMD (série histórica), MMD-D (Diana), MMD-Y (YAK-A) e MMD-Y2 (YAK2). Já para o modelo MMD2 foram simulados: MMD2 (histórica), MMD2-D (Diana), MMD2-Y (YAK-A) e MMD2-Y2 (YAK2).

Tanto para os modelos MSD quanto para os modelos MMD, tendo em vista que os meses mais secos são semelhantes entre si, por causa da maior frequência de recessões baixas, do mesmo modo que existe semelhança entre os meses mais chuvosos, adotou-se o seguinte procedimento: quando a

vazão média mensal gerada para certo mês, q_{men} , fosse maior do que a média de longo período, q_{med} ($=22,8 \text{ m}^3/\text{s}$), o fragmento mensal adimensionalizado que seria multiplicado por q_{men} deveria ter origem em uma série que, antes da adimensionalização, tivesse média maior do que q_{med} . Quando q_{med} fosse menor que a média de longo período, então o fragmento seria buscado em uma série que originalmente fosse menor que q_{med} . É possível que em estações com maiores áreas de drenagem e/ou sazonalidade bem pronunciada os modelos propostos, com série original obtida do histórico, não tenham bom desempenho. Isto devido ao fato de que os fragmentos obtidos em um mês não possam ser transferidos para outro, por causa da forma do hidrograma típico existente em cada mês, o que não aconteceu neste estudo. Neste caso uma análise mais aprofundada é necessária, e as seguintes soluções são possíveis:

- * fragmentos obtidos da série histórica em janeiro só poderiam gerar vazões em janeiro, e assim por diante;

- * geram-se vazões diárias por algum outro modelo (como o Diana ou o não-paramétrico de Yakowitz) e posteriormente aplicam-se os modelos propostos. Neste caso podem-se gerar, inclusive novas séries diárias por Diana ou Yakowitz em janeiro tomando como série histórica apenas meses de janeiro, e assim por diante.

A figura 10 apresenta seis meses de simulação diária pelo modelo MSD, e a figura 11 faz o mesmo para o modelo MMD. Por estas figuras percebe-se que estes modelos propostos geram séries bastante parecidas com a do histórico.

ANÁLISE COMPARATIVA

Para cada modelo de geração de vazões diárias foram simuladas 16 séries de 63 anos (o tamanho da série histórica), ou seja, 1008 anos de valores de vazões diárias,

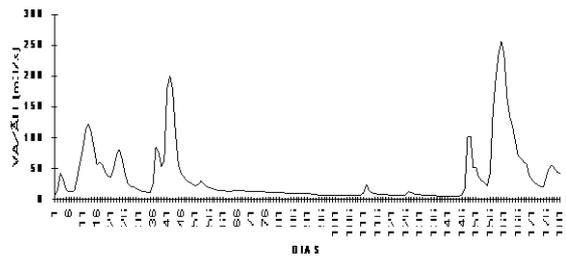


Figura 10 - Seis meses de vazões diárias geradas pelo modelo MSD (Rio dos Patos)

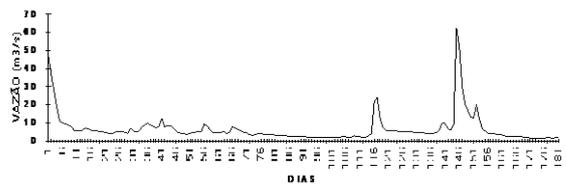


Figura 11 - Seis meses de vazões diárias geradas pelo modelo MMD (Rio dos Patos)

num total de 367920 valores de vazão por modelo. Os últimos valores de uma série são utilizados para gerar os primeiros da próxima, o que permite que esta série de 1008 anos seja tomada tanto como uma única série de 1008 anos como 16 séries de 63 anos.

Momentos

Inicialmente é estudada a sazonalidade diária. A tabela 3 apresenta, para a série histórica e para todos os modelos simulados, os valores da média, desvio-padrão e coeficiente de assimetria diários, mensais e anuais.

Por esta tabela percebe-se:

a) quanto a média: os modelos PAY, SHM, SHC, YAK-A, YAK3 apresentaram as médias mais baixas: o modelo PAY mostrou dificuldade em toda a sua aplicação, como apresentado no item 4.3.2; a média dos três modelos *shot-noise* mostrou a ocorrência de tendenciosidade, o que também ocorreu com o modelo YAK-A, pelo mesmo não sofrer processo de otimização pelo algoritmo de K-Means, sendo uma alternativa aos outros; quanto a média obtida pelo modelo YAK3, ver

seção 4.3.6. Todos os demais modelos apresentaram bons resultados.

b) quanto ao desvio-padrão das vazões diárias: todos os modelos paramétricos (QUI1, QUI2, PAY, SHM, SHC, DSN e SARG) apresentaram desvio-padrão diários menores que o do histórico; destes, o de melhores resultados foi DSN e o pior o modelo SARG. Os modelos não-paramétricos DIAN, FRAG, YAK1, YAK2, YAK3 foram os que melhor se comportaram. Já o modelo YAK-A apresentou desvio-padrão um pouco menor que o histórico. Os modelos propostos, com exceção daqueles baseados numa série original YAK2, apresentaram valores um pouco mais altos que aqueles apresentados pelo histórico.

c) quanto à assimetria das vazões diárias: os modelos paramétricos, exceto o modelo SARG, resultam em valores de coeficiente de assimetria bastante diferentes do histórico (maior para PAY, menor para os outros). Os quatro modelos YAK dão excelentes resultados, e o modelo DIAN resultou em assimetria um pouco menor que a esperada. Os modelos baseados em fragmentos (FRAG mais os modelos propostos) tendem a resultar em valores pouco mais altos que os do histórico.

d) quanto aos momentos obtidos das séries mensais: por partirem de um processo de desagregação, os modelos propostos mais o modelo FRAG revelaram-se superiores aos demais, principalmente quanto à assimetria. Apesar de também partir de um processo desagregativo, o modelo SARG não se apresentou tão bem aqui, possivelmente devido às perturbações na passagem de um mês ao outro (Sargent, 1979). Quanto ao desvio-padrão, apenas os modelos PAY e QUI2 não apresentaram valores razoáveis. Dos quatro modelos de Yakowitz, o de piores resultados foi o YAK3, tendo tido um bom desempenho os modelos YAK-A e YAK1, o que mostra que para valores de N menores (iguais a 1) o modelo YAK tende a reproduzir melhor estatísticas mensais.

e) quanto aos momentos obtidos das séries anuais: para o desvio-padrão, os melhores resultados novamente ficaram com os modelos propostos mais o FRAG. Quanto à

assimetria, os melhores modelos foram os não-paramétricos não-desagregativos: os modelos YAK mais o modelo DIAN; isto porque o modelo AR(3) utilizado na geração de séries anuais, para os modelos utilizando desagregação, não previa a preservação da assimetria. Os demais modelos também não apresentaram bons resultados quanto à assimetria.

Sazonalidade

Seja $M(i)$ o valor que assume uma grandeza mensal (média, desvio, etc.) para o mês i gerada por um modelo de simulação diária e $H(i)$ o valor desta mesma grandeza para o período histórico. O valor da somatória do erro absoluto (SEA) é então dado por:

$$SEA = \sum_{i=1}^{12} |M(i) - H(i)| \quad (12)$$

Foram realizadas três simulações para as grandezas $M(i)$: na primeira $M(i)$ representou a média mensal para o mês i ; na segunda o desvio-padrão mensal para o mês i ; e na última, a correlação entre os meses i e $i+1$. A tabela 4 apresenta os valores da SEA para estas três simulações, para todos os modelos simulados, por ordem crescente de valor.

Pela tabela 4 nota-se uma nítida superioridade dos modelos QUI1, FRAG e o dos modelos propostos sobre todos os demais. Os modelos QUI1 e QUI2, entretanto, não apresentaram bons resultados para a correlação mensal. Dos modelos baseados em desagregação, o modelo SARG, devido às perturbações causadas na passagem de um ano para outro, teve os piores resultados. Por esta tabela, não há nítida preferência entre os

Tabela 3 -Momentos da série de vazões diárias, mensais e anuais histórica (HIST) e sintéticas, em Rio dos Patos

MODELO	MÉDIA (m ³ /s)	DIÁRIOS		MENSIS		ANUAIS	
		DESVIO- PADRÃO (m ³ /s)	COEF. DE ASSIMETRIA	DESVIO- PADRÃO (m ³ /s)	COEF. DE ASSIMETRIA	DESVIO- PADRÃO (m ³ /s)	COEF. DE ASSIMETRIA
HIST	22,79	33,29	4,83	20,41	2,15	9,49	0,85
QUI1	22,52	31,98	0,12	21,35	0,17	7,12	0,01
QUI2	22,44	24,33	0,14	14,26	0,19	4,29	-0,03
PAY	19,49	28,28	12,02	10,75	2,98	3,78	0,51
SHM	20,88	25,47	2,69	18,22	1,68	6,36	0,63
SHC	21,53	31,51	2,89	20,79	1,62	7,01	0,50
DSN	21,59	32,48	3,11	21,88	3,31	10,62	1,97
SARG	22,34	25,79	4,29	19,46	2,45	8,86	0,20
DIAN	22,64	33,20	4,40	17,80	2,32	5,43	0,70
FRAG	22,62	33,74	5,37	20,87	2,20	9,46	0,10
YAK-A	21,05	29,78	4,31	20,25	2,10	7,92	0,47
YAK1	22,72	32,40	4,66	21,83	2,32	8,48	0,69
YAK2	22,35	33,07	4,57	24,13	2,90	9,79	0,87
YAK3	18,36	32,44	5,34	24,66	4,05	10,67	1,53
MSD	22,52	34,67	5,28	20,26	2,14	9,13	0,05
MSD-D	22,84	35,43	5,40	20,61	2,23	9,18	0,18
MSD-Y	22,44	34,49	5,35	20,47	2,22	9,25	0,18
MMD	22,94	34,79	5,06	20,68	2,19	9,22	0,12
MMD-D	22,85	37,65	5,20	20,61	2,23	9,18	0,18
MMD-Y	22,89	31,54	5,11	20,41	2,18	8,74	0,07
MMD2	22,88	34,72	5,24	20,59	2,11	9,40	0,06
MMD2-D	22,89	36,82	5,08	20,41	2,18	8,74	0,07
MMD2-Y	23,05	31,47	4,46	20,70	2,21	9,28	0,08

Tabela 4 -Valores da somatória do erro absoluto (SEA) para a média, o desvio padrão e a correlação mensal sazonal (valores em ordem crescente)

MÉDIA		DESVIO- PADRÃO		CORRELAÇÃO	
VALOR	MODELO	VALOR	MODELO	VALOR	MODELO
10,82	QUI1	29,37	QUI1	0,90	MMD2-Y
11,16	QUI2	34,35	FRAG	1,03	MMD
13,84	MMD	36,14	MMD2-Y	1,03	MMD2-D
14,17	MMD2-Y	38,86	MMD-Y	1,03	MMD-Y
15,07	MSD-Y	38,87	MMD2-D	1,03	FRAG
15,29	MMD2-D	39,73	MSD-Y	1,06	SARG
15,30	MMD-Y	40,29	MMD2	1,12	MMD2
15,39	FRAG	40,89	MMD-D	1,16	MSD-Y
15,88	MMD2	40,90	MSD-D	1,22	MMD-D
19,00	MMD-D	43,23	MMD	1,22	MSD-D
19,01	MSD-D	43,83	MSD	1,28	MSD
21,27	MSD	43,94	SARG	1,62	YAK3
25,26	SARG	49,44	YAK-A	1,67	YAK-A
36,20	YAK2	51,28	SHM	1,77	PAY
36,39	DIAN	52,57	SHC	1,81	YAK1
36,43	DSN	52,61	DIAN	1,85	YAK2
36,43	YAK-A	54,71	DSN	1,97	SHM
36,89	YAK1	62,67	YAK1	2,26	DSN
37,35	SHM	70,68	YAK2	2,43	QUI1
38,74	SHC	73,57	QUI2	2,67	SHC
49,73	PAY	77,15	YAK3	3,31	QUI2
57,39	YAK3	136,29	PAY	3,86	DIAN

resultados do modelo FRAG contra os modelos propostos.

Análise das correlações seriais

Para a análise das correlações seriais foi utilizada a estatística SEA (somatório dos erros absolutos), como anteriormente, desta vez sob a forma:

$$SEA = \sum_{i=1}^k |M(i) - H(i)| \quad (13)$$

onde M(i) é a correlação lag i obtida com o modelo as séries sintéticas e H(i) é a correlação lag i correspondente do registro histórico. Foram feitas seis simulações variando o significado de M(i) e o valor de k da fórmula (13). Estas simulações são:

- a) M(i) = correlação diária e k=30;
- b) M(i) = correlação diária e k=10;
- c) M(i) = correlação mensal e k=10;
- d) M(i) = correlação mensal e k=3;
- e) M(i) = correlação diária e k=10;
- f) M(i) = correlação diária e k=3.

Os resultados destas simulações estão na tabela 5.

Pelos resultados da tabela 5, conclui-se que os melhores modelos foram:

- a) para as correlações diárias: FRAG e modelos propostos;

Tabela 5 - SEA (somatório dos erros absolutos) para as correlações diária, mensal e anual variando o valor de k da equação (13) (valores em ordem crescente)

CORRELAÇÃO DIÁRIA				CORRELAÇÃO MENSAL				CORRELAÇÃO ANUAL			
k= 30		k= 10		k= 10		k= 3		k= 10		k= 3	
VALOR	MODELO	VALOR	MODELO	VALOR	MODELO	VALOR	MODELO	VALOR	MODELO	VALOR	MODELO
0,194	FRAG	0,080	FRAG	0,270	YAK2	0,084	FRAG	0,748	PAY	0,033	MMD2
0,883	MSD-Y	0,244	MMD	0,303	YAK3	0,100	SARG	0,891	MMD2	0,061	MMD
0,888	MMD	0,252	MSD-Y	0,332	SARG	0,108	MMD2-Y	1,093	MMD2-Y	0,081	MMD2-Y
1,261	MSD	0,348	MSD-D	0,333	MSD-D	0,118	MMD2	1,097	MSD-D	0,091	MSD-D
1,301	MSD-D	0,353	MSD	0,333	MMD-D	0,120	MSD-Y	1,097	MMD-D	0,091	MMD-D
1,373	MMD-Y	0,400	QUI2	0,338	MMD2	0,123	MMD	1,098	MMD	0,126	MSD-Y
1,401	MMD2	0,459	MMD2	0,350	MSD-Y	0,124	YAK3	1,130	MSD-Y	0,128	MSD
1,466	MMD2-Y	0,585	MMD2-D	0,352	FRAG	0,131	MSD-D	1,187	MMD-Y	0,135	MMD-Y
1,526	YAK1	0,634	MMD-D	0,363	MMD2-Y	0,131	MMD-D	1,188	MMD2-D	0,136	MMD2-D
1,903	YAK-A	0,752	DSN	0,379	YAK-A	0,137	MSD	1,208	SARG	0,178	SARG
2,192	QUI1	0,835	DIAN	0,385	MMD2-D	0,144	YAK2	1,253	FRAG	0,179	FRAG
2,212	SHC	0,996	MMD-Y	0,386	MMD	0,152	MMD-Y	1,347	MSD	0,213	PAY
2,409	MMD2-D	1,001	YAK1	0,386	MMD-Y	0,152	MMD2-D	1,478	YAK-A	0,362	DIAN
2,489	DSN	1,043	YAK-A	0,422	DSN	0,192	YAK-A	1,541	YAK2	0,364	QUI2
2,551	MMD-D	1,110	SHC	0,431	MSD	0,231	DSN	1,548	QUI2	0,384	YAK3
2,692	QUI2	1,156	MMD2-Y	0,434	YAK1	0,267	YAK1	1,550	YAK3	0,390	YAK1
2,802	SHM	1,219	QUI1	0,556	SHM	0,275	PAY	1,562	DIAN	0,394	YAK2
3,876	YAK2	1,717	SARG	0,650	SHC	0,379	SHM	1,568	QUI1	0,403	DSN
4,044	DIAN	1,880	SHM	0,674	QUI1	0,510	SHC	1,569	YAK1	0,417	YAK-A
4,154	SARG	1,881	YAK2	0,679	PAY	0,511	QUI1	1,611	DSN	0,438	QUI1
5,596	PAY	2,246	YAK3	0,819	DIAN	0,601	QUI2	1,633	SHM	0,476	SHM
5,801	YAK3	3,213	PAY	0,838	QUI2	0,627	DIAN	1,683	SHC	0,482	SHC

- b) para as correlações mensais: os modelos YAK, SARG, os propostos e FRAG;
 c) para as correlações anuais: os modelos propostos e PAY.

Índice de avaliação global desenvolvido por O'Connell (apud Barbosa, 1980 e Kelman et al, 1983)

Este índice, cuja descrição aqui está transcrita do artigo de Kelman et al. (1983), consiste em calcular para a série histórica e para diversas séries sintéticas com o mesmo comprimento do histórico, estatísticas específicas ou índices. Resultando uma distribuição de probabilidades para os índices e a coerência entre as séries sintéticas pelo modelo e a série histórica pode ser medida pela posição do índice histórico nesta distribuição. Um índice I qualquer é definido como uma função de uma série de vazões, $I=f[Q(1),Q(2),\dots,Q(h)]$. Por exemplo, $I=\max[Q(1),\dots,Q(h)]$. Aplicando-se a função à série de vazões históricas obtém-se o índice histórico $i(hist)$. Com n séries geradas com o mesmo comprimento do histórico obtém-se n índices gerados $i(j)$, $j=1,\dots,n$. O desempenho do modelo é então medido pela proporção de índices gerados maiores do que o histórico, $P[i(j)>i(hist)]$. Se esta proporção for muito pequena ou muito grande, isto é uma indicação de que a observação histórica é atípica para o modelo. Em geral, deseja-se testar m índices, $I(i)$, $i=1,\dots,m$, arranjados no vetor

$$r = \begin{bmatrix} I(1) \\ I(2) \\ \dots \\ I(m) \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$I(i)=f_i [Q(1),\dots,Q(h)] \quad (15)$$

O vetor obtido com o histórico é denotado r_{hist} e existem n vetores r_j , $j=1,\dots,n$, cada um obtido com uma série gerada. Define-se portanto uma distribuição de probabilidades multivariada. Para cada

vetor r_{hist} e para r_j , define-se a distância ao centro da distribuição pelo escalar positivo:

$$d_j = (r_j - \mu)^T \Sigma^{-1} (r_j - \mu) \quad (16)$$

$$d_{hist} = (r_{hist} - \mu)^T \Sigma^{-1} (r_{hist} - \mu) \quad (17)$$

onde

$$\mu = \sum_{j=1}^n r_j \quad (18)$$

$$\Sigma = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (r_j - \mu)(r_j - \mu)^T \quad (19)$$

Nas fórmulas acima, os símbolos em negrito significam notação matricial. A variável d_{hist} é então comparada com as distâncias d_j através de duas medidas de desempenho: a proporção de distâncias geradas maiores que a distância histórica, $P[d_j > d_{hist}]$, e a distância padronizada (nota - ψ) definida por:

$$\psi = \frac{d_{hist} - m}{s} \quad (20)$$

onde m é a média dos valores de d_j , $j=1,\dots,n$ e s é definido como

$$s = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (d_j - m)^2} \quad (21)$$

Quanto mais $P[d_j > d_{hist}]$ se aproximar de 0,5 e quanto menor o valor absoluto de ψ , melhor o desempenho do modelo.

Os índices escolhidos, $m=10$ no total, foram os mesmos escolhidos por Kelman et al. (1983) para a análise do modelo Diana, à exceção do de número 10, volume de espera para enchentes (excluído pelo fato de que o tempo de computação empregado ter sido

considerado excessivo, tendo em vista o grande número de modelos gerados - substituído então pela correlação lag 1 das vazões diárias). Os índices estão relacionados na tabela 6. Para que os modelos de desagregação mensal ou anual em diária competissem em igualdade de condições com os outros, foram comparadas suas características diárias e de máximas, não testando portanto estatísticas médias mensais ou anuais.

Os resultados do índice de análise global estão apresentados na tabela 7, para nota ψ (fórmula (20)) e $P[d_j > d_{hist}]$ (fórmulas (16) e (17)). O critério adotado para avaliação é o seguinte: quanto melhor o modelo, menor o valor absoluto da nota. A terceira coluna desta tabela mostra estes valores em ordem crescente. Pelos resultados desta tabela vê-se que os modelos propostos MSD-D, MMD2, MMD-Y e MMD2-Y foram os que melhor se comportaram com respeito ao critério adotado, e que os outros modelos propostos também se comportaram bem de modo geral, todos eles melhores que o melhor dos modelos paramétricos, o modelo SARG. Isto, somando ao fato de que este índice não inclui estatísticas mensais (ver item 6.1.5), no que os modelos propostos também se destacam, justifica e recomenda plenamente a utilização destes modelos em simulações na prática.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Todos os modelos propostos apresentaram praticamente resultados semelhantes, o que torna difícil dizer qual deles é o melhor. Principalmente pela facilidade computacional da aplicação dos modelos baseados no modelo MSD, é recomendada a sua utilização, em uma primeira tentativa de simular vazões diárias.

Tabela 6 - Índices testados na avaliação global desenvolvida por O'CONNELL

I	Índice
1	Média da vazão diária

2	Desvio-padrão da vazão diária
3	Assimetria da vazão diária
4	Curtose da vazão diária
5	Média da vazão máxima anual
6	Desvio-padrão da vazão máxima anual
7	Assimetria da vazão máxima anual
8	Curtose da vazão máxima anual
9	Vazão máxima de todo o período
10	Correlação lag 1 da vazão média diária

Os modelos propostos foram baseados no modelo FRAG, que teve excelente desempenho em grande parte dos testes efetuados. Entre algumas das vantagens dos modelos propostos sobre o FRAG estão:

* na facilidade prática em desagregar uma série mensal previamente gerada em apenas alguns pontos críticos (por exemplo, seca ou cheia) onde se necessita aumentar a precisão e confiabilidade da simulação. Simulando vazões diárias desta maneira apenas nestes pontos críticos, há um considerável ganho de tempo computacional;

* podem, por sua flexibilidade e variabilidade de modelos, gerar séries mais distintas da série original que o FRAG.

A utilização dos modelos propostos pode ser recomendada na prática devido a suas principais características, que, somadas, parecem mostrar a vantagem deles sobre os demais modelos simulados neste trabalho:

1) têm todas as vantagens dos modelos não-paramétricos (tem uma maior semelhança com a série original que os paramétricos; reproduzem melhor as ascensões rápidas e recessões lentas características das séries históricas);

2) conseguem simular vazões diárias a partir de simulações mensais, preservando assim características anuais, mensais e diárias ao mesmo tempo;

Tabela 7 - Resultados do índice de análise global para nota ψ (fórmula (20)) e $P[d_j > d_{hist}]$ (fórmulas (15) e (16))

MODELO	ABS(ψ)	ψ	$P[d_j > d_{hist}]$
MSD-D	0,058	0,058	0,250
MMD2	0,387	-0,387	0,500
MMD-Y	0,388	-0,388	0,688
MMD2-Y	0,520	0,520	0,438
FRAG	0,523	0,523	0,250
YAK2	0,530	-0,530	0,813
MSD	0,537	-0,537	0,750
MSD-Y	0,616	-0,616	0,813
YAK-A	0,637	0,637	0,125
YAK3	0,695	-0,695	0,813
MMD	0,770	0,770	0,063
MMD-D	0,835	-0,835	0,875
YAK1	0,963	-0,963	1,000
MMD2-D	0,968	-0,968	0,938
SARG	0,990	0,990	0,125
DIAN	4,341	4,341	0,000
DSN	10,259	-10,259	1,000
SHM	53,685	-53,685	1,000
SHC	65,713	65,713	0,000
QUI1	316,029	-316,029	1,000
QUI2	994,119	-994,119	1,000
PAY	1001,989	-1001,989	0,000

3) simulam vazões diárias por modelos não-paramétricos que não preservavam, originalmente, estatísticas mensais.

É possível que em estações com maiores áreas de drenagem e/ou sazonalidade bem pronunciada os modelos propostos, utilizando série original obtida do histórico, não tenham bom desempenho. Isto devido ao fato de que os fragmentos obtidos em um mês não possam ser transferidos para outro, por causa da forma do hidrograma típico existente em cada mês, o que não aconteceu neste estudo. Neste caso uma análise mais aprofundada é necessária, e algumas soluções possíveis são apresentadas no item 5.5. do trabalho de Müller (1997).

Uma hipótese possível é simular os modelos propostos para locais com registros horários, ou simplesmente com períodos de observação menores que o dia. Também pode-se testar os modelos propostos em locais com poucos anos de observação.

Deste modo testar-se-á a flexibilidade dos modelos propostos para situações diferentes das que foram encontradas neste trabalho.

Este trabalho não visa esgotar o assunto: além do aperfeiçoamento dos modelos existentes e criação de novos, um importante campo de estudo, sugerido por Yakowitz (1979), é o da criação de modelos paramétricos matematicamente mais complexos que os existentes, que reproduzam bem a forma dos hidrogramas diários.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece aos professores Fábio Ramos e Eloy Kaviski, respectivamente orientador e co-orientador da dissertação de mestrado que serviu de base para este artigo. E também agradece aos professores participantes da banca, Heinz Dieter Fill e Robin Thomas Clarke,

pelas importantes sugestões e recomendações e pela compreensão.

REFERÊNCIAS

- HARMS, A. A., CAMPBELL, T. H. 1967 An extension to the Thomas-Fiering model for the sequential generation of streamflow. *Water Resources Res.*, v.3, n.3 p.653-661.
- KELMAN, J. DAMÁZIO, J.M. e COSTA, J.P. 1983. Geração de séries sintéticas de vazões diárias - modelo Diana. *Revista Brasileira de Eng.*, v.1, n.2. p.5-22.
- KELMAN, J. 1977. Stochastic modeling on hydrologic, intermittent daily processes. *Hydrology Papers*. Fort Collins: Colorado State University, n.89.
- KELMAN, J. 1987a. Modelos estocásticos para gerenciamento de recursos hídricos. In: *Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel/ABRH. cap.4.
- KELMAN, J. 1987b. *Controle de cheias e aproveitamentos hidrelétricos*. Rio de Janeiro: ABRH. 175p.
- HOSHI, K. et al. 1984. Estimation of log-normal quantiles: Monte Carlo results and first order approximations. *J. of Hydrology*, v.71. p.1-30
- KOTTEGODA, N. T., HORDER, M. A. 1980. Daily flow model based on rainfall occurrences using pulses and a transfer function. *J. of Hydrology*, v.47. p.215-234.
- MINE, M.R.M. 1990. Geração de vazões médias diárias pelo SOSN. *Revista Brasileira de Eng.*, v.8, n.1. p.51-64.
- MÜLLER, F. *Geração univariada de vazões diárias por métodos diretos*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1997.
- Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica). Universidade Federal do Paraná.
- PAYNE, K. et al. 1969. Daily streamflow simulation. *J. of Hydraulics Div.*, HY4. p.1163-1179.
- QUIMPO, R. G. 1968. Stochastic analysis of daily river flows. *J. of Hydraulics Div.*, HY1. p.43-57.
- SARGENT, D. M. 1979. A simplified model for the generation of daily streamflows. *Hydrological Sciences - Bulletin - des Sciences Hydrologiques*, v.24, n.4. p.509-527.
- SVANIDZE, G. G. 1980. *Mathematical modeling of hydrologic series: for hydroelectric and water resources computations*. Fort Collins, Colorado: Water Resources Publ. 314p.
- VALENCIA, D. et al. 1991. Evaluacion critica de los modelos de desagregation en hidrologia. *Avances en Rec. Hidr.*, n.0, p.63-73.
- WEISS, G. 1977. Shot noise models for the generation of synthetic streamflow data. *Water Resources Res.*, v.13, n.1. p.101-108.
- YAKOWITZ, S. J. 1979. A nonparametric Markov model for daily river flow. *Water Resources Res.*, v.15, n.5. p.1035-1043.
- YEVJEVICH, V. 1984. *Structure of daily hydrologic series*. Littleton, Colorado: Water Resources Publ. 252p.

ABSTRACT

Generation of synthetic series of daily flows can be utilized in hydrology in, among

others, maximum flow simulation or decision refinement taken with monthly simulation.

The dissertation aim is the creation of daily flows generation models which resolve the common problems of these kind of models: they do not preserve, at the same time, the temporal series form of daily flows and monthly statistics.

To compare with the proposed models, daily flows series were generated by various existent models.

The proposed models are basically two: DSM (Disaggregation Simplified Model) and DMM (Disaggregation Modified Model). They are based on fragments method (Svanidze, 1980).

The tests made showed that the nonparametric models preserve more efficiently the temporal series form of daily flows. The monthly statistics were well preserved by the proposed models, consequently the study aim was reached.

