

## GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS DE VAZÃO PARA MODELAGEM HIDRODINÂMICA DE RESERVATÓRIOS

*R. B. Miranda<sup>1\*</sup>; M. V. Estigoni<sup>2</sup>; O. Veronez<sup>3</sup>; D. A. Botelho<sup>4</sup> & F. F. Mauad<sup>5</sup>*

**Resumo** – A geração de séries sintéticas tem grande importância no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos e energéticos. O presente trabalho apresenta a geração de séries por meio do Modelo Estacionário Multivariado Autoregressivo de Primeira Ordem (AR1) para dois postos fluviométricos do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Os dados foram consistidos e as séries sintéticas foram geradas para horizontes de 5, 10 e 15 anos, tendo como base o ano de 2012. Este trabalho é parte de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) que apresenta como estudo de caso a PCH Mogi-Guaçu localizada no Estado de São Paulo.

**Palavras-Chave** – Série sintética, posto fluviométrico, modelo autoregressivo.

## GENERATION OF SYNTHETIC SERIES OF FLOW FOR HYDRODYNAMIC MODELING OF RESERVOIR

**Abstract** – The generation of synthetic series is of great importance in the planning and management of water and energy resources. This paper presents the generation of series through the Multivariate Autoregressive Model of First Order (AR1) for two fluviometric stations of the Department of Water and Energy of the State of São Paulo (DAEE). The data was consisted and the synthetic series were generated for horizons of 5, 10 and 15 years, based on the year 2012. This work is part of a Research and Technological Development Project of the Power Sector (R&D ANEEL) that present as case study the SHP Mogi-Guaçu located in São Paulo State.

**Keywords** – Synthetic series, fluviometric station, autoregressive model.

1\* – Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Tel: (16) 3373-8255 < eng.renato.miranda@gmail.com >.

2 – Doutorando em Ciências da Engenharia Ambiental, Núcleo de Hidrometria - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo (NH/CHREA/EESC/USP). Tel: (16) 3373-8255 < marcus.estigoni@usp.br >.

3 – AES Tietê S.A. - Cidade de Mogi-Guaçu - SP < odemberg.veronez@aes.com >.

4 – BMT WBM Pty Ltd. - Cidade de Brisbane, QLD, Austrália < Daniel.Botelho@bmtwbm.com.au >.

5 – Professor da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (EESC/USP). Tel: (16) 3373-8255 < mauadffm@sc.usp.br >.

## INTRODUÇÃO

As séries sintéticas apresentam uma grande importância no gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos e energéticos. Kelman (1983) cita que a série histórica de um local, geralmente utilizada como dado de entrada para modelos de simulação e otimização é apenas uma das possíveis realizações de um processo estocástico. Ainda segundo o autor, pode-se imaginar que a Natureza "sorteou" a série histórica, de acordo com algum conjunto de leis probabilísticas, sendo que um novo sorteio resultaria em outra série, possivelmente diferente da histórica. Desse modo, a geração de séries sintéticas pode apresentar diversos resultados provenientes das simulações, ao invés de apenas um resultado (no caso de utilizar apenas a série histórica) e assim a informação contida na série histórica pode ser melhor extraída.

As séries sintéticas são muito utilizadas como dados de entrada para modelos computacionais, para modelagem hidrodinâmica de reservatórios, para a geração de cenários e análises de sistemas hídricos e de processos que ocorrem nos mesmos. Em se tratando de reservatórios são utilizadas em estudos de gestão e operação e de processos que ocorrem nos mesmos e estudos de assoreamento. Um dos processos que ocorre em reservatório é o assoreamento, sendo este último apontado como o principal problema associado à construção de reservatórios (Morris e Fan, 2010).

O padrão de escoamento de um reservatório está intimamente ligado a sua morfologia e ao escoamento da vazão que entra no sistema e que passa pelos órgãos de descarga, de modo que a variação no tempo, tanto das vazões afluentes, quanto das vazões de descarga, desempenham papel fundamental na modelagem do fluxo hidrodinâmico e do transporte de sedimentos. Modelos computacionais, se corretamente validados, constituem ferramentas poderosas para avaliar o assoreamento de reservatórios. Estes modelos podem avaliar a eficácia de intervenções de engenharia e produzir uma redução de custo significativa no gerenciamento do assoreamento, da quantidade e qualidade de água de reservatórios, auxiliando na escolha e adoção de medidas preventivas e corretivas para mitigação destes problemas, e, conseqüentemente, levar ao prolongamento da vida útil dos mesmos.

Neste contexto, está em andamento um projeto do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) por meio da parceria entre a Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC – USP), a empresa australiana “BMT WBM”, as empresas nacionais “SHS Engenharia Sustentável”, “Farol Consultoria e Pesquisa”, e a concessionária de energia “AES Tietê”, sendo esta última a financiadora do projeto.

O presente trabalho apresenta parte dos resultados obtidos na primeira etapa do referido projeto, onde foi realizado o estudo fluviométrico da área de influência direta da PCH Mogi-Guaçu. Foram levantados dados de descarga dos corpos hídricos afluentes ao reservatório junto ao Departamento de Águas e Energia Elétrica do estado de São Paulo, DAEE. Os dados selecionados foram consistidos e foram geradas as séries sintéticas para os horizontes de 5, 10 e 15 anos, tendo como base o ano de 2012.

## MATERIAIS

Neste trabalho foram utilizados dados secundários de fluviometria obtidos por meio do SigRH que é um banco de dados hidrológicos gratuito e de acesso livre disponibilizado pelo DAEE (SIGRH, 2013). Nele são disponibilizados dados coletados, geralmente até o ano de 2004 de

monitoramento pluviométrico, pluviográfico e fluviométrico, referentes ao nível, vazão, perfil transversal das seções e curva chave.

Os dois postos fluviométricos que foram utilizados neste trabalho apresentam prefixo DAEE 3D-004 e 3D-018, e estão localizados próximos à PCH Mogi-Guaçu.

## GERAÇÃO DE SÉRIES SINTÉTICAS

Salas e colaboradores (1980) apresentam que os dados estocásticos gerados a partir de modelos de séries temporais podem ser utilizados, em alguns casos, em estudos e trabalhos da mesma forma que os dados históricos, uma vez que apresentam propriedades estatísticas semelhantes às séries que os originaram. A partir da década de 60 os métodos para geração de séries sintéticas foram largamente difundidos. Encontram-se na literatura diversos modelos matemáticos para a geração de séries, dentre os quais, pode-se destacar: Modelo Autoregressivo (AR), Modelo Autoregressivo Média Móvel (ARMA), Modelo Autoregressivo Integrado Média Móvel (ARIMA), Fraction Gaussian Noise (FGN), Broken Line (BL), Shifting Level (SL).

Neste trabalho foi utilizado o Modelo Estacionário Multivariado Autoregressivo de Primeira Ordem (AR1), dentre outros motivos, pelo fato dos modelos autoregressivos serem muito utilizados em hidrologia, devido ao fato de considerarem em sua formulação a dependência da variável no tempo e por serem modelos versáteis e com testes em uma grande variedade de situações e estudos.

## MODELO ESTACIONÁRIO MULTIVARIADO AUTOREGRESSIVO DE PRIMEIRA ORDEM AR (1)

A primeira etapa para aplicação de um modelo AR(1) é a sazonalização da série histórica. Desse modo, as variáveis são denominadas:  $X_i(t)$ , para  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ . Em que  $X_i(t)$  são as séries de vazão dos postos fluviométricos.

Neste caso, utilizou-se a função logarítmica neperiana para a obtenção do comportamento periódico das séries históricas, conforme Equação 1.

$$Y_i(t) = \ln X_i(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (1)$$

Sendo  $Y_i(t)$  a série uniforme das variáveis  $X_i(t)$ .

Após a obtenção dos valores de  $Y_i(t)$ , realizou-se a normalização das variáveis por meio da Equação 2.

$$Z_i(t) = \frac{Y_i(t) - \bar{Y}_i(t)}{\sigma_i(t)} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \quad (2)$$

$Y_i(t)$  é definido a partir da Equação 1 e os valores de  $\bar{Y}_i(t)$ , são as médias de cada variável. Os valores de  $\sigma_i(t)$  são os desvios padrões das variáveis  $Y_i(t)$ , e  $Z_i(t)$  são as variáveis de vazão normalizada, média zero e desvio padrão um, para o mês  $t$ , que serão utilizadas no modelo AR(1).

O Modelo AR(1) das series  $Z_i(t)$  foi expresso na forma matricial por meio da Equação 3.

$$Z(t) = A \cdot Z(t - 1) + B \cdot \varepsilon(t) \quad (3)$$

O valor de  $Z(t)$  são  $(n \times 1)$  vetores dos elementos  $Z_i(t)$  da série histórica.  $A$  e  $B$  são matrizes paramétricas  $(n \times n)$  e  $\varepsilon(t)$  é um vetor independente de números aleatórios  $(n \times 1)$  com distribuição normal, média zero e desvio padrão um (conforme conceitos deste modelo).

Ainda segundo os preceitos da metodologia AR(1) o vetor de número aleatórios  $\varepsilon(t)$  é não-correlacionado no tempo e espaço, ou seja,  $E[\varepsilon_i(t)\varepsilon_j(t)] = 0$  para  $i \neq j$  ou  $E[\varepsilon_i(t)\varepsilon_i^T(t)] = I$ , em que  $T$  simboliza a matriz transpostas e  $I$  a matriz identidade.

Desse modo, a Equação 3 pôde ser expressa na sua forma expandida (Equação 4).

$$\begin{bmatrix} Z_1(t) \\ \dots \\ Z_n(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Z_1(t-1) \\ \dots \\ Z_n(t-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & \dots & b_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \dots & b_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \dots \\ \varepsilon_n(t) \end{bmatrix} \quad (4)$$

A partir do método dos momentos apresentado em Matalas (1967) foi possível determinar os parâmetros das matrizes  $A$  e  $B$ .

Com a multiplicação da Equação 3 por  $Z^T(t)$  e a realização de alguns rearranjos na mesma, obtém-se a Equação 5.

$$E[Z(t).Z^T(t)] = A.E[Z(t-1).Z^T(t)] + B.E[\varepsilon(t).Z^T(t-1).A^T + \varepsilon^T(t).B^T] \quad (5)$$

Ainda segundo a metodologia apresentada em Matalas (1967), definiu-se a matriz de covariância ( $M_0$ ), a partir da Equação 6.

$$M_0 = E[Z(t).Z^T(t)] \quad (6)$$

A matriz  $M_1$  foi determinada também em função da Equação 5 e segue descrita abaixo.

$$M_1^T = E[Z(t-1).Z^T(t)] \quad (7)$$

A partir das propriedades de  $\varepsilon(t)$ , a Equação 4 pôde ser simplificada conforme apresentado na Equação 8.

$$M_0 = A.M_1^T + B.B^T \quad (8)$$

Na Equação 8 foi possível observar a relação entre  $M_0$  e  $M_1$  com as matrizes paramétricas  $A$  e  $B$ . A multiplicação da Equação 3 por  $Z^T(t-1)$ , resultou na Equação 9.

$$E[Z(t).Z^T(t-1)] = A.E[Z(t-1).Z^T(t-1)] + B.E[\varepsilon(t).Z^T(t-1)] \quad (9)$$

Utilizando novamente as propriedades de  $\varepsilon(t)$ , obtém-se a Equação 10.

$$M_1 = A.M_0 \quad (10)$$

A partir da estacionariedade do sistema, pôde-se rearranjar a Equação 10 e obter o valor de  $A$  (Equação 11).

$$A = M_1 M_0^{-1} \quad (11)$$

Já para a determinação dos parâmetros da matriz B utilizou-se a metodologia apresentada por Bras e Rodríguez-Iturbe (1985) para rearranjar a Equação 8, conforme apresentado na equação a seguir.

$$B \cdot B^T = M_0 - A \cdot M_1^T = D \quad (12)$$

A matriz B é uma matriz triangular inferior que pode ser representada pela Equação 13.

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ b_{n1} & \cdots & b_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Desse modo, a matriz D foi obtida a partir da multiplicação da matriz B (Equação 13) pela sua transposta.

$$D = \begin{bmatrix} b_{11} \cdot b_{11} & \cdots & b_{11} \cdot b_{n1} \\ \cdots & \cdots & b_{(n-1)1} \cdot b_{n1} + \cdots + b_{(n-1)(n-1)} \cdot b_{n(n-1)} \\ b_{n1} \cdot b_{11} & \cdots & b_{n1}^2 + \cdots + b_{nn}^2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

Por fim, os valores dos coeficientes da matriz B foram obtidos por meio de uma sequência de equações algébricas.

Após a obtenção das matrizes A e B, foram geradas as séries sintéticas para os postos fluviométricos analisados. As equações a seguir ilustram como foi possível determinar as séries sintéticas.

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= a_{11} \cdot Z_1(t-1) + a_{12} \cdot Z_2(t-1) + \cdots + a_{1n} \cdot Z_n(t-1) + b_{11} \cdot \varepsilon_1(t) \\
 Z_2 &= a_{21} \cdot Z_1(t-1) + \cdots + a_{2n} \cdot Z_n(t-1) + b_{21} \cdot \varepsilon_1(t) + b_{22} \cdot \varepsilon_2(t) \\
 &\dots \\
 Z_n &= a_{n1} \cdot Z_1(t-1) + \cdots + a_{nn} \cdot Z_n(t-1) + b_{n1} \cdot \varepsilon_1(t) + \cdots + b_{nn} \cdot \varepsilon_n(t)
 \end{aligned} \quad (15)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos conceitos apresentados na seção anterior, foi possível realizar a geração de séries sintéticas. A escolha dos postos fluviométricos que serviriam como base de dados para a geração das séries foi determinada a partir da proximidade com a PCH Mogi-Guaçu. Desse modo, foram escolhidos os postos fluviométricos 3D-004 e 3D-018 (SIGRH, 2013).

### Posto 3D-004

Como citado anteriormente, foram obtidas diversas informações no Banco de Dados do Sistema de Informações para Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo para o Posto 3D-004.

A Figura 1 apresenta a comparação entre os dados observados e gerados para o período de jan/45 a dez/87 (período dos dados disponíveis para este posto).

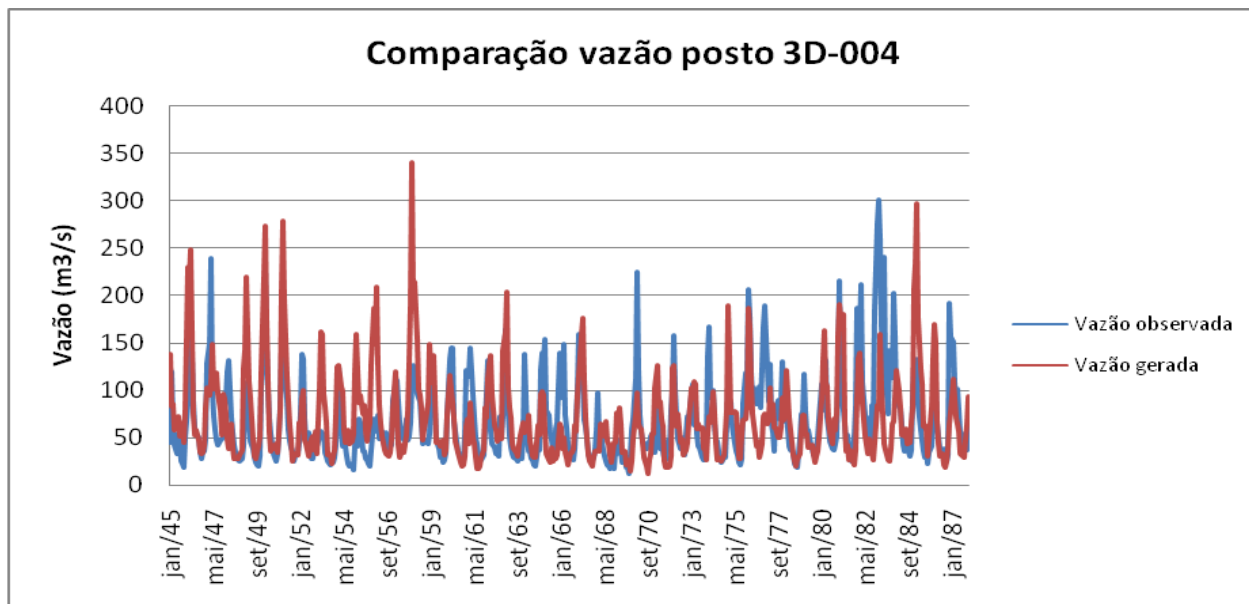


Figura 1. Comparação entre os dados observados e gerados - Posto 3D-004.

As séries sintéticas de descarga líquida geradas para o horizonte de tempo proposto de 5 (2017), 10 (2022) e 15 (2017), tendo como base o ano de 2012, são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Série sintética de descarga líquida gerada para o Posto 3D-004 (média mensal).

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
2012	51,08	69,21	53,91	58,38	65,05	64,57	43,23	33,56	30,96	33,86	45,51	52,38
2013	50,03	72,82	82,77	60,23	48,77	49,46	41,19	55,64	92,28	55,95	65,31	221,17
2014	255,89	197,95	111,83	68,18	57,84	44,90	35,08	32,52	16,22	27,95	57,38	77,13
2015	137,07	127,55	79,95	83,32	75,82	48,01	32,17	21,67	25,40	45,45	48,61	108,66
2016	116,46	75,03	108,23	64,45	50,19	41,45	32,62	25,86	21,58	21,84	34,74	52,52
2017	87,68	103,01	62,64	54,31	41,44	35,38	34,65	20,49	18,10	23,44	21,41	59,66
2018	84,69	101,53	127,02	73,57	77,05	105,33	67,47	62,64	54,88	92,22	120,67	134,42
2019	171,87	155,23	128,22	109,59	82,89	88,04	70,68	70,85	111,38	68,99	70,41	197,92
2020	178,53	180,80	159,04	113,30	83,07	91,07	60,43	72,80	53,56	80,86	127,76	170,32
2021	164,81	80,14	93,17	39,85	38,68	37,81	40,49	31,98	27,72	34,12	42,03	63,86
2022	101,87	103,35	70,34	60,12	49,82	43,17	49,54	38,90	76,01	70,64	70,42	67,97
2023	88,35	139,22	215,00	138,23	59,67	46,36	46,90	53,57	34,58	29,14	28,45	35,01
2024	83,36	175,55	106,60	71,73	57,74	61,61	45,54	35,78	20,69	19,70	46,42	54,20
2025	72,72	74,38	106,00	78,19	40,54	37,08	28,59	27,88	26,14	34,76	54,36	151,25
2026	192,36	155,52	105,28	86,18	79,34	79,76	54,50	34,09	26,80	35,63	78,36	135,34
2027	166,71	195,36	150,15	65,16	75,04	70,26	46,36	64,12	60,12	36,47	52,93	125,05



## Posto 3D-018

A Figura 2 apresenta a comparação entre os dados observados e gerados para o Posto fluviométrico 3D-018 para o período de jan/74 a dez/78 (período dos dados disponíveis para este posto).

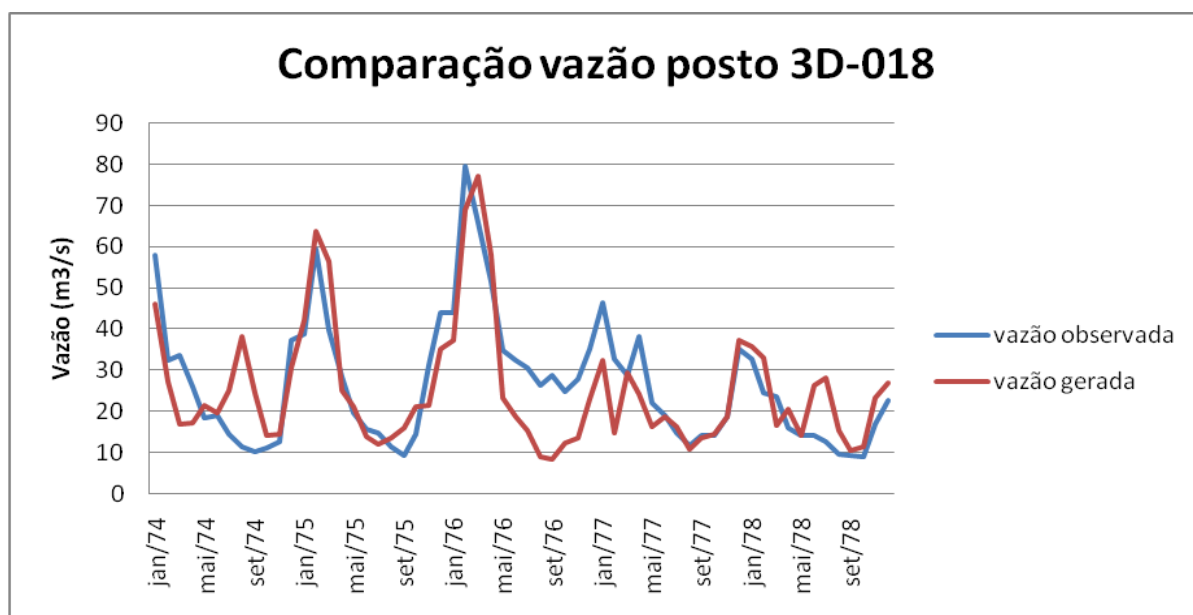


Figura 2. Comparação entre os dados observados e gerados - Posto 3D-018.

As séries sintéticas de descarga líquida geradas para o horizonte de tempo proposto de 5 (2017), 10 (2022) e 15 (2017), tendo como base o ano de 2012, são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Série sintética de descarga líquida gerada para o Posto 3D-018 (média mensal).

Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
2012	39,12	22,74	28,33	18,62	11,69	12,32	15,44	12,27	10,17	12,73	19,32	54,42
2013	51,38	41,58	48,32	51,37	24,88	23,29	19,67	26,46	27,20	14,88	19,93	40,71
2014	55,98	101,80	79,50	26,81	18,07	18,20	18,69	18,19	16,06	19,01	31,13	48,40
2015	54,90	82,26	46,13	44,12	19,62	16,46	24,61	23,15	50,09	38,52	23,78	37,42
2016	38,83	36,00	29,88	21,62	16,89	17,37	20,33	21,34	41,98	16,80	17,28	27,89
2017	29,36	23,15	19,93	12,66	13,03	13,58	16,53	13,04	10,39	8,22	15,71	29,72
2018	41,48	65,27	35,33	32,63	28,95	22,50	12,83	15,83	20,38	18,15	20,47	22,47
2019	39,10	34,73	41,30	25,07	21,93	15,46	13,17	14,28	12,09	23,23	22,62	45,30
2020	45,57	39,42	27,81	40,17	17,76	16,34	10,00	7,89	9,24	12,02	20,00	27,13
2021	45,53	27,30	27,74	26,17	16,54	22,46	21,94	21,93	26,40	12,55	21,34	35,50
2022	61,13	63,01	30,30	24,14	16,21	12,66	10,33	13,28	18,15	19,26	23,39	43,44
2023	33,39	13,78	15,58	9,68	8,76	10,26	11,68	21,50	34,35	15,36	23,30	32,80
2024	41,51	52,47	32,71	27,62	18,19	17,44	21,63	17,27	20,17	26,65	34,73	48,53
2025	58,60	52,31	54,69	51,55	20,84	21,52	22,53	24,42	37,66	17,09	22,34	33,35
2026	34,75	36,30	44,71	63,19	19,67	19,48	26,48	22,92	17,69	15,39	16,99	33,95
2027	41,58	18,78	44,70	21,84	25,88	13,80	13,30	11,29	13,79	14,20	18,84	28,84

É possível verificar pela Figura 1 e 2 que apesar de alguns dados gerados apresentarem uma variação se comparado aos dados disponíveis, a maioria das informações apresentadas nas séries sintéticas geradas representam satisfatoriamente os dados observados.

## CONCLUSÕES

A modelagem hidrodinâmica apresenta-se como uma importante ferramenta para o planejamento e gerenciamento de sistemas hídricos, como os reservatórios. No entanto, os modelos computacionais exigem geralmente uma grande quantidade de dados, principalmente quando são utilizados para simulação de cenários futuros. Desse modo, a geração de séries sintéticas de vazão por meio do modelo estacionário multivariado autoregressivo de primeira ordem AR(1) surge como uma interessante alternativa para a geração de dados hidrológicos confiáveis.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa “AES Tietê S.A” que por meio do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento do Setor de Energia Elétrica (P&D ANEEL) financia esta pesquisa, à “Fundação Para o Incremento da Pesquisa e Aperfeiçoamento Industrial” (FIPAI), à “Escola de Engenharia de São Carlos” (EESC/USP), à “BMT WBM”, à “SHS Engenharia Sustentável”, à “Farol Consultoria e Pesquisa” e ao “Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico” (CNPq).

## REFERÊNCIAS

- BRAS, R.L.; RODRÍGUEZ-ITURBE, I. (1985). *Random Functions and Hydrology*. Reading Mass. Addison-Wesley, 559 p.
- KELMAN, J. (1983). Geração de Séries Sintéticas de Vazões. In: *Curso de Engenharia Hidrológica*. EPUSP, DAEE, ABRH, São Paulo, pp. 1 – 32.
- MATALAS, N.C. (1967). Mathematical Assessment of Synthetic Hydrology. *Water Resources Research*, v.3, n.4, pp. 937 – 945.
- MORRIS, G.L. & FAN, J. (2010). *Reservoir Sedimentation Handbook – Design and Management of Dams, Reservoirs, and Watersheds for Sustainable Use*. McGraw-Hill Book Co., New York, Electronic Version Ver. 1.04, december 2010.
- SALAS, J.D.; DELLEUR, J.W.; YEVJEVICH, V.; LANE, W.L. (1980). *Applied Modelling of Hydrologic Times Series*. Littleton, Water Resources Publications.
- SIGRH - Sistema de Informações para o Gerenciamento de Recursos Hídricos do Estado de São Paulo. (2013). *Banco de Dados Pluviométricos do Estado de São Paulo*. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/cgi-bin/bdhm.exe/plu>>. Acesso em: 10 maio 13.