

O PROCESSO DE ARMAZENAMENTO EM RESERVATÓRIOS NO SEU ESTADO TRANSIENTE E O VOLUME INICIAL DE MÁXIMA CONVERGÊNCIA

Ticiano Marinho de Carvalho Studart¹; José Nilson Beserra Campos¹; Juliana Pontes Machado de Andrade²; Luiz Alberto Alencar de Freitas² & Ricardo Marinho de Carvalho³

Resumo - A influência do volume inicial (V_0) no processo de armazenamento em reservatório tem sido objeto de alguns estudos, de modo que se pode encontrar na literatura alguns procedimentos de como lidar com o problema. O presente trabalho faz uso da Simulação de Monte Carlo para determinar o Volume Inicial de Máxima Convergência para diversos cenários de coeficiente de variação de vazões anuais ($CV=0,2$ a $1,6$), no Nordeste Brasileiro e no sudeste dos Estados Unidos. Os resultados preliminares indicam que o VIMC é função do coeficiente de variação dos deflúvios afluentes ao reservatório e não assume um valor fixo de $50\%K$. Estudos complementares estão sendo desenvolvidos na Universidade Federal do Ceará, no sentido de avaliar como a evaporação e o padrão das precipitações médias mensais afetam este estimador da vazão de equilíbrio.

Abstract - The influence of initial storage (V_0) on the reservoir storage process has been object of a few studies and as a result one can find in literature some procedures to handle the problem. In the present paper it was used Monte Carlo Method to find out the initial storage for faster convergence rate for different scenarios of coefficient of variation of annual inflows ($CV=0.2$ to 1.6) in Northeast Brazil and southeast part of the United States. The preliminary results showed that the VIMC is function of coefficient of variation of annual inflows and does not assume a fixed value of $50\%K$. Further studies are being developed in Universidade Federal do Ceará, in order to verify how evaporation and mean monthly discharge's pattern affect the rate of convergence of the storage process to the steady state.

Palavras – chave - estimador; vazão de equilíbrio; hidrologia estocástica.

¹ Professores do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 713, Fortaleza, Ceará, Brasil, CEP 60.451-970, Fone: (85) 288.9623, Fax: (85) e-mails: ticiano@ufc.br e nilson@ufc.br

² Alunos do Curso de Engenharia Civil e Bolsistas de Iniciação Científica - PIBIC/CNPq - Universidade Federal do Ceará. E-mails: julianapma@bol.com.br e beto@technet.com.br

³ Professor do Departamento de Engenharia de Edificações – Universidade Federal do Ceará. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 710, Fortaleza, Ceará, Brasil

INTRODUÇÃO

Para determinar a disponibilidade hídrica do sistema, há que se compreender o comportamento da vazão regularizada (M) como função de vários parâmetros, tais como capacidade do reservatório (K), Volume inicial assumido para o reservatório (V_0), coeficiente de variação dos deflúvios anuais afluentes ao reservatório (CV), evaporação média durante a estação seca (E_v), fator de forma do reservatório (α), horizonte de simulação (H) e garantia (G).

Considerando-se os demais parâmetros constantes e simulando-se um dado reservatório para vários valores de volume inicial e horizontes de simulação, observa-se que, embora inicialmente as condições iniciais tenham grande influência nos valores da vazão regularizada, com o passar do tempo esta influência vai se tornando cada vez mais tênue. Após um longo período, o processo se estabiliza em uma condição de equilíbrio, na qual a vazão regularizada independe do volume inicial e do horizonte de simulação assumidos inicialmente.

Pode-se então considerar que o processo de armazenamento passa por dois estados distintos:

- **Estado transiente:**

$$Q = f(\mu, \sigma, V_0, H, G, K, \alpha, E_v) \quad (1)$$

- **Estado de equilíbrio:**

$$Q = f(\mu, \sigma, G, K, \alpha, E_v) \quad (2)$$

Sabendo-se que o coeficiente de variação da série dos deflúvios afluentes ao reservatório é dado por:

$$CV = \mu/\sigma \quad (3)$$

E, utilizando-se os fatores adimensionais de capacidade (f_K), de evaporação (f_E) e de retirada (f_M) definidos por CAMPOS (1987):

$$f_K = K/\mu \quad (4)$$

$$f_E = (3\alpha^{1/3}E_v) / \mu^{1/3} \quad (5)$$

$$f_M = Q/\mu \quad (6)$$

O número de parâmetros nas equações (1) e (2) decrescem de oito e seis, para seis e quatro, respectivamente, nas equações (7) e (8):

- **Estado transiente:**

$$f_M = f(CV, G, f_K, f_E, V_0, H) \quad (7)$$

▪ **Estado de equilíbrio:**

$$f_M^* = f(CV, G, f_K, f_E) \quad (8)$$

Como o estado transiente é função de seis parâmetros, a vazão regularizada (representada pelo fator adimensional f_M) só pode ser corretamente identificada ao se dizer, além do coeficiente de variação dos deflúvios naturais (CV), a garantia (G), a capacidade do reservatório (representada por f_K), a evaporação sobre a superfície do lago (representada por f_E), o volume inicial assumido para o reservatório (V_0) e o horizonte de simulação adotado (H).

A Equação (8) mostra que, no estado de equilíbrio, a vazão regularizada (f_M^*) é função apenas dos quatro primeiros parâmetros citados acima.

A INFLUÊNCIA DO VOLUME INICIAL

A influência do volume inicial (V_0) já foi objeto de estudo de alguns pesquisadores, de maneira que se pode encontrar na literatura alguns procedimentos de como lidar com o problema. Os mais comuns são começar com o reservatório cheio ou com metade de sua capacidade e fazer o volume inicial ser igual ao final, entre outros.

JENG (1967), usando um método analítico, criou uma equação para o processo de armazenamento, baseada em cerca de 2.000 pontos os quais representavam várias combinações entre capacidade do reservatório, volume inicial assumido para o reservatório e variância dos influxos, mostrou que quando V_0 é igual a 50% da capacidade do reservatório, o processo de armazenamento converge mais rápido para o estado de equilíbrio.

Os ensaios numéricos realizados por STUDART e CAMPOS (2001), no entanto, mostraram resultados diferentes do estudo acima citado, indicando que a influência do *volume inicial* assumido no início da simulação (V_0), da *capacidade do reservatório* (f_K) e do *nível de garantia* assumido (G) é modulada pelos valores assumidos pela *variabilidade* das vazões naturais (CV). No intuito de gerar recomendações de ordem prática no que se refere ao volume inicial a ser adotado no início da simulação, os autores sintetizaram, em função da variabilidade das vazões afluentes ao reservatório (CV), os resultados obtidos neste trabalho.

Considerando-se $G=90\%$ e oito cenários de CV – 0,2, 0,4, 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4 e 1,6 – foram observados três padrões distintos de comportamento do processo de armazenamento quanto às influências do volume inicial (V_0) e da capacidade do reservatório (f_K):

- CV = 0,2 - o processo de armazenamento é pouco sensível ao volume inicial, ou seja, ao assumir-se valores distintos para este parâmetro, e independentemente do f_K adotado

para o reservatório, o fator adimensional de retirada, para qualquer horizonte de simulação (H), pode ser considerado como sendo a própria vazão adimensional de equilíbrio (f_M^*).

- CV = 0,4 a 0,6 - o processo de armazenamento tem um comportamento considerado como sendo de transição. Para $f_k=1,0$ e 1,5, o mesmo apresentou comportamento semelhante ao anteriormente descrito, ou seja, pouco sensível a V_0 . Para maiores valores de f_k , no entanto, é preciso cautela na escolha do volume inicial.
- CV = 0,8 a 1,6 – o processo de armazenamento é muito sensível ao volume inicial.

O VOLUME INICIAL DE MÁXIMA CONVERGÊNCIA

Estudos efetuados por STUDART e CAMPOS (1999) e STUDART (2000), para rios hipotéticos do Semi-Árido Brasileiro, identificaram faixas de valores assumidos para V_0 , nas quais o processo de armazenamento convergia mais rapidamente para o estado de equilíbrio. Concluíram que esta metodologia, se melhor desenvolvida, resultaria em um estimador *justo, eficiente e consistente* para a vazão regularizada no estado de equilíbrio, o qual foi denominado de Volume Inicial de Máxima Convergência (VIMC).

Para a sua faixa de aplicação – razoavelmente ampla - o estimador VIMC reproduziu com grande precisão, nos trabalhos desenvolvidos, a vazão adimensional de equilíbrio obtida a partir da simulação do reservatório com uma série sintética de vazões com extensão igual a $H=5.000$ anos.

METODOLOGIA

Para analisar o comportamento do VIMC para diferentes cenários de CV, foram selecionados onze rios reais, cinco situados no Nordeste Brasileiro e seis, no sudeste dos Estados Unidos. O coeficiente de variação das vazões anuais dos rios estudados varia de 0,20 (Rio Oconaluftee) a 1,61 (Rio Ceará Mirim). A Tabela 1 mostra as principais características das séries de vazões estudadas.

Para a determinação das vazões regularizadas, fez-se uso do programa SIMRES, desenvolvido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, que simula o comportamento de um reservatório pelo Método de Monte Carlo. Para cada cenário estudado – caracterizado pelo CV do rio original - foram gerados 5.000 traços de vazão anual seguindo uma distribuição Gama II. Essas vazões foram desagregadas em valores mensais através do Método dos Fragmentos (SVANIDZE, 1980); segundo (ARAÚJO,1991), este método produz bons resultados para os rios intermitentes do Semi-Árido Brasileiro. As vazões obtidas pela

simulação do reservatório com estas séries sintéticas são as vazões de equilíbrio de cada cenário (f_M^*).

Tabela 1 – Localização e características das séries de vazões estudadas

Rio	Localização	μ (hm^3/ano)	σ (hm^3/ano)	CV	H (anos)
Oconaluftee	Carolina do Norte, EUA	455,81	89,18	0,20	52
Linville	Carolina do Norte, EUA	134,56	38,80	0,29	78
South Fork Black Creek	Flórida, EUA	132,41	56,12	0,42	61
Ochlockonee	Flórida, EUA	875,50	457,08	0,52	75
Tapacurá	Pernambuco, BRA	75,68	43,58	0,58	34
St. Johns	Flórida, EUA	581,28	341,81	0,59	60
Anclote	Flórida, EUA	56,94	41,74	0,73	54
Rio de Contas	Bahia, BRA	263,23	197,62	0,75	17
Curu	Ceará, BRA	126,31	151,43	1,20	79
Capibaribe	Pernambuco, BRA	172,06	247,72	1,44	33
Ceará-Mirim	Rio Grande do Norte, BRA	76,57	123,15	1,61	54

Fontes: Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas – SIH e United States Geological Survey – USGS

Dados de entrada

No presente trabalho, as variabilidades da evaporação, do nível de garantia e da capacidade do reservatório não foram analisadas. Todos os cenários foram simulados com a mesma curva cota volume (para fixar α). A capacidade do reservatório, no entanto, foi modificada para que se tivesse sempre $f_K=1$. O nível de garantia foi mantido em 90% e o f_E é o existente em cada local.

Assim sendo o reservatório fictício foi simulado tendo os seguintes parâmetros de entrada:

- $G = 90\%$
- $CV = 0,20$ a $1,61$
- $f_K = 1,0$
- $H = 10$ e 20 anos (estado transiente)
- $H = 5.000$ anos (estado de equilíbrio)

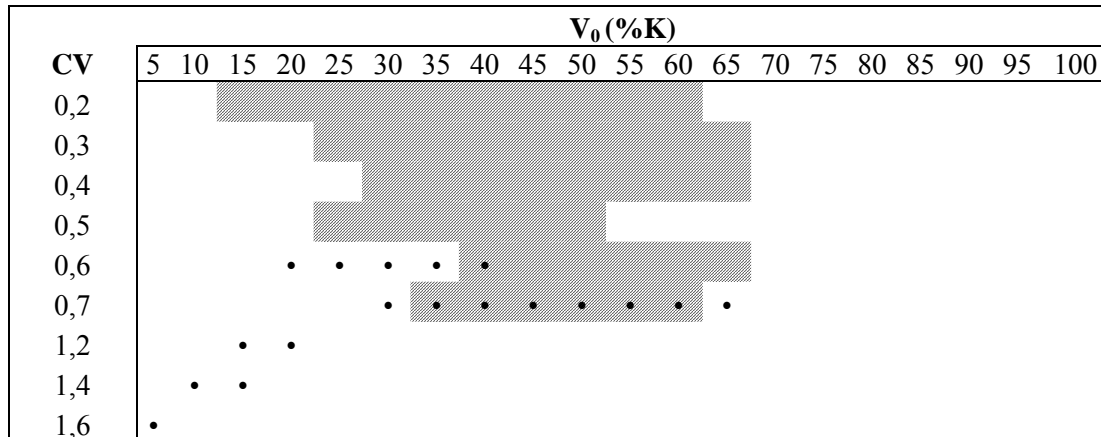
Para achar o VIMC para cada cenário, procurou-se valores de V_0 , para os quais δ , definido como o desvio relativo de f_M (para $H=10$ anos - estado transiente) para f_M^* (para $H=5.000$ anos - estado de equilíbrio), fosse no máximo igual a 5%:

$$\delta = (f_M - f_M^*) / f_M^* \leq 5\% \quad (9)$$

RESULTADOS

Observa-se na Tabela 2 que os valores assumidos para o VIMC, em cenários de baixos CV, se distribuem em uma faixa mais ampla do que aqueles obtidos em cenários de maior variabilidade. Para CV=0,20, por exemplo, o estado de equilíbrio é atingido ao adotar-se valores de V_0 compreendidos entre 15% e 60% da capacidade do reservatório. Por outro lado, para o cenário de maior variabilidade (CV = 1,61), o VIMC é representado por único valor de volume inicial - $V_0 = 10\%K$.

Tabela 2 – Faixas do VIMC para H = 10 anos.



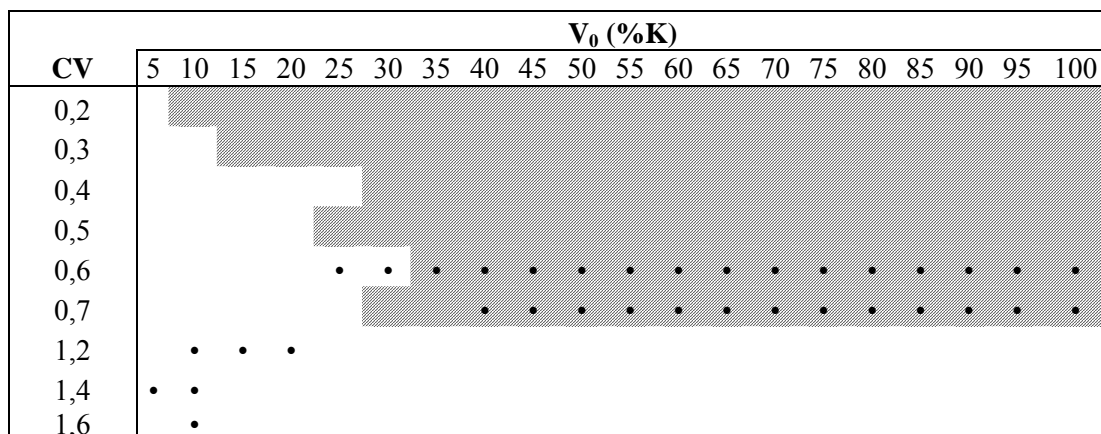
Sendo

■ Faixa de VIMC para rios nos Estados Unidos.

- Faixa de VIMC para rios no Brasil.

Para analisar o comportamento do VIMC, ainda no estado transiente, mas para um horizonte de simulação um pouco maior, o reservatório foi simulado também para H = 20 anos (Tabela 3).

Tabela 3 – Faixas do VIMC para H = 20 anos.



Sendo

■ Faixa de VIMC para rios nos Estados Unidos.

- Faixa de VIMC para rios no Brasil.

A Tabela 3 mostra que, novamente, a faixa do VIMC é mais ampla para CVs entre 0,20 e 0,73 (tanto para rios brasileiros quanto norte-americanos) do que para CVs mais altos. Apesar desse

comportamento ser observado em ambos os horizontes de simulação (10 e 20 anos), a diferença é mais acentuada em para H = 20 anos.

Comparando-se as tabelas 2 e 3 no que se refere a cenários de altos CVs (1,2 a 1,6), observa-se que, mantido o mesmo CV e aumentando-se H de 10 para 20 anos, a amplitude da faixa do VIMC permanece praticamente inalterada. No entanto, para baixos CVs, a faixa para H = 20 anos é consideravelmente mais larga do que a faixa de 10 anos, indicando que o processo de armazenamento é menos sensível ao volume inicial adotado.

Desvios relativos (δ) para $V_0=50\%$

Considerando $V_0 = 50\%K$, como aconselha JENG (1967) e computando-se o desvio relativo – ou erro em relação a vazão de equilíbrio – para rios de altos CVs, obtêm-se um erro mínimo de $\delta = 21,5\%$ (CV = 1,2 e H = 10 anos) e um erro máximo de $\delta = 57,1\%$ (CV = 1,61 e H = 10 anos). Para os demais cenários, $V_0 = 50\%K$ encontra-se na faixa do VIMC, indicando que adotar-se V_0 igual a metade da capacidade é um procedimento correto, exceto em cenários de alta variabilidade de deflúvios naturais. A Tabela 4 mostra os desvios obtidos para o CV = 1,61 e H = 10 anos.

Tabela 4 – Valores do desvio relativo (δ) obtidos na simulação do reservatório, adotando-se V_0 variando de 5 a 100%K para o cenário de CV = 1,6.

CV = 1,6							
V_0 (%K)	Q_{med10} (hm^3/ano)	σ_{reg} (hm^3/ano)	CV_{reg}	Q^* (hm^3/ano)	f_M	f_M^*	δ (%)
5	9,77	9,39	0,96	11,00	0,13	0,14	-11,18
10	11,23	9,38	0,84		0,15		2,09
15	12,77	9,39	0,74		0,17		16,09
20	13,86	9,05	0,65		0,18		26,00
25	14,18	8,73	0,62		0,18		28,91
30	15,61	8,57	0,55		0,20		41,91
35	16,13	8,54	0,53		0,21		46,64
40	16,54	8,52	0,52		0,21		50,36
45	16,94	8,57	0,51		0,22		54,00
50	17,28	8,63	0,50		0,22		57,09
55	17,57	8,67	0,49		0,23		59,73
60	17,85	8,71	0,49		0,23		62,27
65	18,09	8,74	0,48		0,23		64,45
70	18,32	8,75	0,48		0,24		66,55
75	18,54	8,77	0,47		0,24		68,55
80	18,74	8,79	0,47		0,24		70,36
85	18,89	8,82	0,47		0,25		71,73
90	19,00	8,85	0,47		0,25		72,73
95	19,11	8,86	0,46		0,25		73,73
100	19,24	8,91	0,46		0,25		74,91

Onde: V_0 é o volume inicial da simulação; Q_{med10} a vazão regularizada média obtida para $H = 10$ anos; σ_{reg} , o desvio padrão das vazões regularizadas; CV_{reg} , o coeficiente de variação das vazões regularizadas; Q^* , a vazão regularizada para $H = 5000$ anos; f_M , o fator adimensional de retirada $H = 10$ anos; f_M^* , o fator adimensional de retirada para $H = 5000$ anos e δ o erro médio entre os fatores adimensionais de retirada.

CONCLUSÕES

O objetivo maior desta pesquisa, ainda em desenvolvimento, é a obtenção de uma matriz de decisão que auxilie o planejador na determinação das reais disponibilidades hídricas de um reservatório. Esta matriz relacionará f_E , f_K e o CV dos deflúvios afluentes ao reservatório e, a partir desses parâmetros, será sugerido o volume inicial adequado para a simulação, o qual resultará em uma vazão regularizada próxima àquela que seria obtida no estado de equilíbrio. A vantagem deste procedimento é que o reservatório poderá ser simulado com sua série histórica de vazão, normalmente de pequena extensão, sem cometer-se grandes erros de avaliação.

Neste primeiro momento, analisou-se a influência da variabilidade das vazões anuais (traduzida pelo CV) no VIMC. Observou-se que regiões de baixa variabilidade são menos sensíveis ao volume inicial assumido, característica essa traduzida pela faixa mais ampla assumida pelo estimador. Essas faixas contêm o $V_0=50\%K$, significando que, para essas regiões, assumir que o reservatório está com metade da sua capacidade no início da simulação não implicará em erro considerável.

Em regiões semi-áridas, principalmente naquelas com altos valores de CV, a faixa de VIMC é bastante estreita; existindo cenários em que essa faixa é representada por um único valor. Os desvios relativos obtidos quando considera-se $V_0=50\%K$, variam entre 20% e 60%, aproximadamente, indicando que a adoção de um valor para V_0 há que ser criteriosa.

Os resultados preliminares apontam no sentido de considerar a variabilidade dos deflúvios o parâmetro mais importante na determinação da vazão regularizada. Prova disto é o comportamento similar do VIMC para CVs de mesma ordem de grandeza (0,6 e 0,7), em regiões de precipitação e evaporação distintas, como o Nordeste Brasileiro e o sudeste americano. Percebe-se que as regiões de climas mais variáveis são exatamente aquelas em que o estudo do VIMC se torna imprescindível.

Os resultados ainda não são conclusivos e a continuidade natural desta pesquisa será a avaliação da influência do f_E no VIMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, J.K. (1991). **Método dos Fragmentos Aplicado a Rios Intermitentes: Avaliação dos Erros Introduzidos no Cálculo da Disponibilidade de Reservatórios**. Fortaleza, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará (Dissertação de Mestrado).
- CAMPOS, J.N.B. (1987). **A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers Under High Evaporation Rate**. Fort Collins, Colorado State University. PhD thesis.
- JENG, R.I., (1967). Time-Dependent Solutions for Water Storage Problem. Fort Collins, Colorado State University, USA, Ph.D. Dissertation.
- STUDART, T.M.C; CAMPOS, J.N.B.(2001) *Incertezas nas Estimativas da Vazão Regularizada por um Reservatório*. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n.3, p. 81-94.
- STUDART, T.M.C; CAMPOS, J.N.B (1999) **Reservoir Storage Problem: The Faster Convergence Rate From Transient To Steady State Conditions**. In: HYDROLOGY DAYS, Proceedings of the 19th Annual American Geophysical Union. Fort Collins: Hydrology Days Publications, v. 1, p. 421-432.
- STUDART, T.M.C. (2000). **Análises de Incertezas na Determinação de Vazões Regularizadas em Climas Semi-Áridos**. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Universidade Federal do Ceará. Tese de doutorado.
- SVANIDZE, G.G. (1980). **Mathematical Modeling of Hydrologic Series**. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, USA.