

EFICIÊNCIA DE ACUMULAÇÃO DE RESERVATÓRIOS ANUAIS:

Aplicação da Equação de Esvaziamento

*Vanessa Ueta*¹; *Andréa Pereira Cysne*² & *José Nilson Bezerra Campos*³

RESUMO --- Os reservatórios de águas superficiais têm sido a solução mais aplicada por governos e particulares para conviver com o regime hidrológico adverso dos sertões nordestinos. Aos pequenos reservatórios é reservado o papel de regularização intra-anual de águas e, por isso, são denominados reservatórios anuais. Esse artigo aborda a questão relacionada aos açudes anuais, da região semi-árida brasileira. Foi desenvolvida uma equação para estimar o tempo de esvaziamento de um reservatório em função das retiradas e da evaporação. Em seguida a equação foi aplicada para avaliar as eficiências dos reservatórios por meio da relação entre o volume utilizado para fins hidroagrícolas e o volume acumulado no final da estação úmida. O reservatório assume a forma de um cone ($V = \alpha h^3$) com os valores de α de 1.000, 5.000 e 10.000 e alturas variando de um a oito metros. Os tempos de esvaziamento foram feitos iguais a quatro e seis meses. Os resultados mostraram que o rendimento reativo à capacidade varia muito com a profundidade e, praticamente, não depende da abertura do cone.

ABSTRACT --- The reservoirs of superficial waters have been the most applied solution for governments and people to live together with the hydrologic adverse regime of the Northeastern interiors. To the small reservoirs the paper of intra-annual regularization of waters is reserved and, for that, annual reservoirs are denominated. This article approaches the subject related to the annual dams, of the Brazilian semi-arid area. An equation was developed to esteem the time of emptying of a reservoir in function of the retreats and of the evaporation. Soon afterwards the equation was applied to evaluate the efficiencies of the reservoirs through the relationship among the volume used for hydro agriculture and the accumulated volume in the end of the humid station. The reservoir assumes the form of a cone ($V = \alpha h^3$) with the values of α equal to 1000, 5000 and 10000 and heights varying from one to eight meters. The times of emptying were taken equals to four and six months. The results showed that the efficiency with respect to the capacity varies a lot with the depth and, practically, it doesn't depend on the opening of the cone.

Palavras-chave: reservatórios anuais, eficiência de reservatórios, equação de esvaziamento.

¹ Engenheira Civil, mestre e doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsista do CNPq. Campos do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza - Ceará. vanessa_ueta@yahoo.com.br.

² Engenheira Civil, mestrando em Recursos Hídricos pela Universidade Federal do Ceará e bolsistas do CAPES. Campos do Pici, CEP-60445-760. Bloco 713. Fortaleza - Ceará. andreacysne1@yahoo.com.br

³ Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental. Campus do Pici, Centro de Tecnologia, Bl. 713, Fortaleza-Ceará, Brasil, CEP 60.445-760, Fone: (085) 3366.9623, e-mail: nilson@ufc.br.

1. INTRODUÇÃO

A construção de pequenos reservatórios tem sido uma prática secular aplicada nos sertões Nordestinos para a convivência com os rios secos da região. Nas políticas de água propostas nos anos 1960, (SUDENE,1967) aos reservatórios anuais cabe o papel de armazenar água na estação úmida e usá-las totalmente na estação seca. O conhecimento do tempo de esvaziamento para uma determinada retirada constitui-se em um importante elemento para planejar a operação desses reservatórios. No geral, procura-se a partir do conhecimento dos estoques de água acumulados no final da estação úmida conhecer o tempo de esvaziamento da reserva para uma determinada retirada. O tempo de esvaziamento, ou tempo de atendimento da demanda, é associado à duração do ciclo de vida da cultura.

Nesse artigo apresenta-se uma equação de esvaziamento de um reservatório desenvolvida com o software Maple e sua aplicação para calcular o rendimento de reservatórios anuais. Os reservatórios hipotéticos assumem a forma de um cone ($V = \alpha h^3$) com os valores de α de 1000, 5000 e 10000 e alturas variando de um a oito metros. A eficiência de armazenamento é definida pela relação entre o volume aplicado para fins hidroagrícola e volume de água no reservatório no final da estação úmida. Foram avaliados tempos de esvaziamento de quatro e seis meses.

2. METODOLOGIA

A estimativa da eficiência de estocagem de água foi feita a partir da equação analítica para diversas profundidades, retiradas para irrigação e tempos de esvaziamento.

2.1 A equação de esvaziamento

A equação de esvaziamento apresentada (Campos, 2006) foi desenvolvida no âmbito de uma curso de Hidrologia de Reservatórios na Universidade Federal do Ceará utilizando as premissas do Método do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996) e o programa matemático Maple 9.5.

Assim, as formulações matemáticas, utilizadas neste estudo, tomam como base a morfologia da bacia através das equações:

$$V(h) = \alpha h^3 \quad (1)$$

$$A(h) = 3\alpha h^2 \quad (2)$$

Onde $V(h)$ denota o volume do reservatório com profundidade h ; α denota o fator de forma do reservatório; $A(h)$ a área do lago pelo reservatório com profundidade h .

Considerando-se que a variação do volume no reservatório pode ser dada por:

$$dV = \alpha h^3 - \alpha(h-dh)^3 \quad (3)$$

Onde dh é a variação infinitesimal na profundidade. Assim, a equação (3) pode ser expandida através de uma expansão polinomial para a seguinte forma:

$$dV = \alpha h^3 - [\alpha h^3 - 3\alpha h^2 dh + 3\alpha h dh^2 - \alpha dh^3] \quad (4)$$

Considerando que dh é um incremento muito pequeno, suas potências acima de dois podem ser desprezadas, fazendo com que a equação (4) se transforme em:

$$dV = 3\alpha h^2 dh \quad (5)$$

Por outro lado, a variação do volume em um reservatório pode ser estimada através de uma combinação de fatores pertinentes: o volume retirado para irrigação e o volume perdido por evaporação do lago. Assim, tem-se:

$$dV = qdt + e3\alpha h^2 dh \quad (6)$$

Onde: e representa a intensidade de evaporação, q o volume retirado e t o intervalo de tempo.

Igualando-se as equações (5) e (6) tem-se:

$$dt = \left[\frac{3\alpha h^2}{q + 3e\alpha h^2} \right] dh \quad (7)$$

Esta é uma equação diferencial de 1ª ordem e 2º grau que permite relacionar a vazão regularizada com o tempo de esvaziamento. Resolvendo a equação (7) para as condições do estudo, tem-se:

$$t_E = \frac{h}{e} \cdot \frac{q\sqrt{3} \cdot \arctan\left(\frac{e\alpha h\sqrt{3}}{\sqrt{qe\alpha}}\right)}{3e\sqrt{qe\alpha}} \quad (8)$$

Onde t_E denota o tempo de esvaziamento, q a vazão retirada, e a intensidade de evaporação, α o fator de forma do reservatório.

2.2 A eficiência de armazenamento do reservatório

No estudo admite-se que o reservatório, de capacidade K está cheio no final da estação úmida e retira-se do mesmo uma vazão constante e contínua q durante um intervalo de tempo t . Os valores do tempo de esvaziamento foram admitidos iguais a quatro e a seis meses. A intensidade de evaporação e foi admitida igual a 191 mm por mês que corresponde, aproximadamente, às condições do sertão da vale do rio Jaguaribe no Ceará.

A eficiência de acumulação é avaliada pela relação entre o volume efetivamente utilizado ($q.t$) e o volume acumulado no final da estação úmida (K), calculada através da Equação 9.

$$\eta = \frac{q.t_E}{K} \quad (9)$$

Onde η denota a eficiência de acumulação, q o volume retirado em m^3 por mês, t_E o tempo de esvaziamento e K o volume na reserva no final da estação úmida.

3. RESULTADOS

Para fins de análise, os resultados foram agrupados segundo os tempos de esvaziamento de quatro e seis meses. Com isso foi possível fazer algumas verificações importantes para esses tempos de esvaziamento, e algumas conclusões puderam ser obtidas.

3.1 Tempo de esvaziamento de quatro meses

Para quatro meses de esvaziamento, os resultados mostraram que a eficiência de acumulação de reservatórios anuais cresce significativamente com a profundidade do reservatório e permanecendo praticamente constante com a forma do cone equivalente (α). Para profundidades em torno de um metro o rendimento é quase zero. Para profundidade em torno de oito metros o rendimento chega a aproximadamente 83%. O formato da curva de rendimento, Figura 1, mostra esse acentuado crescimento do rendimento com a profundidade da água

Tabela 1 – Valores das retiradas e eficiência de capacidade e de retiradas para reservatórios anuais com utilização de quatro meses para fatores de forma de 1000, 5000 e 10.000. Tempo de esvaziamento de quatro meses.

h (m)	$\alpha = 1000$			$\alpha = 5000$			$\alpha = 10000$		
	K (hm^3)	q ($hm^3/mês$)	η	K (hm^3)	q ($hm^3/mês$)	η	K (hm^3)	q ($hm^3/mês$)	η
1	0,001	0,000	0,060	0,005	0,000	0,064	0,010	0,000	0,060
2	0,008	0,001	0,420	0,040	0,004	0,410	0,080	0,008	0,420
3	0,027	0,004	0,593	0,135	0,020	0,593	0,270	0,040	0,593
4	0,064	0,011	0,688	0,320	0,055	0,688	0,640	0,110	0,688
5	0,125	0,023	0,736	0,625	0,115	0,736	1,250	0,230	0,736
6	0,216	0,042	0,778	1,080	0,210	0,778	2,160	0,420	0,778
7	0,343	0,070	0,816	1,715	0,350	0,816	3,430	0,700	0,816
8	0,512	0,106	0,828	2,560	0,530	0,828	5,120	1,060	0,828

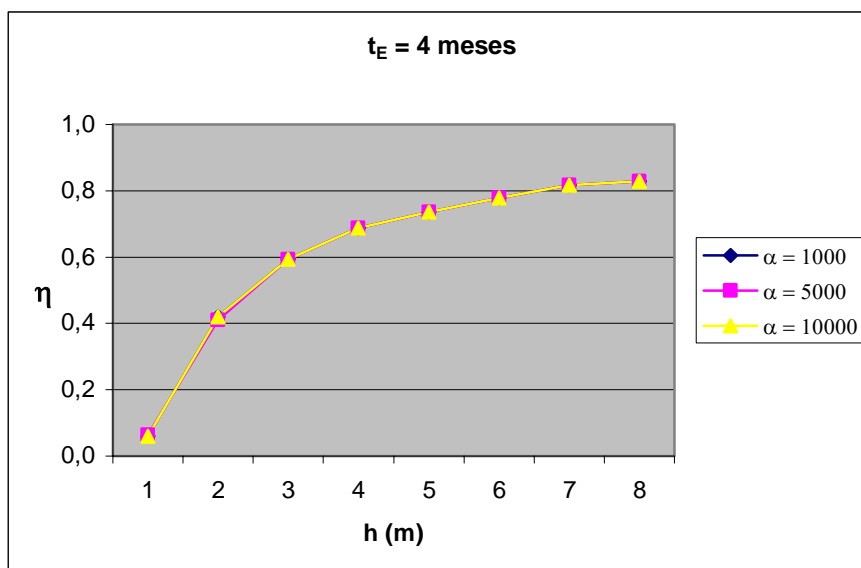


Figura 1 – Rendimento com a altura média para um tempo de esvaziamento de 4 meses.

3.2 Tempo de esvaziamento de seis meses

Para seis meses de esvaziamento, o tempo de oportunidade para evaporação cresce em relação ao de quatro meses. Pode-se observar que a eficiência de acumulação de reservatórios anuais cresce significativamente com a profundidade do reservatório e permanecendo praticamente constante com a forma do cone equivalente (α). Para profundidades em torno de um metro o rendimento é quase zero. Para profundidade em torno de oito metros o rendimento chega a aproximadamente 76%. O formato da curva de rendimento, Figura 2, mostra esse acentuado crescimento do rendimento com a profundidade da água

Tabela 2 –Valores das retiradas e eficiência de capacidade e de retiradas para reservatórios anuais com utilização de quatro meses para fatores de forma de 1000, 5000 e 10.000. Tempo de esvaziamento de seis meses.

h (m)	$\alpha = 1000$			$\alpha = 5000$			$\alpha = 10000$		
	K (hm ³)	q (hm ³ /mês)	η	K (hm ³)	q (hm ³ /mês)	η	K (hm ³)	q (hm ³ /mês)	η
1	0,001	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000	0,01	0,000	0,000
2	0,008	0,000	0,203	0,04	0,001	0,210	0,08	0,003	0,203
3	0,027	0,002	0,422	0,135	0,009	0,409	0,27	0,019	0,422
4	0,064	0,006	0,544	0,32	0,029	0,544	0,64	0,058	0,544
5	0,125	0,013	0,624	0,625	0,065	0,624	1,25	0,130	0,624
6	0,216	0,025	0,681	1,08	0,121	0,672	2,16	0,245	0,681
7	0,343	0,041	0,717	1,715	0,205	0,717	3,43	0,410	0,717
8	0,512	0,065	0,762	2,56	0,320	0,750	5,12	0,650	0,762

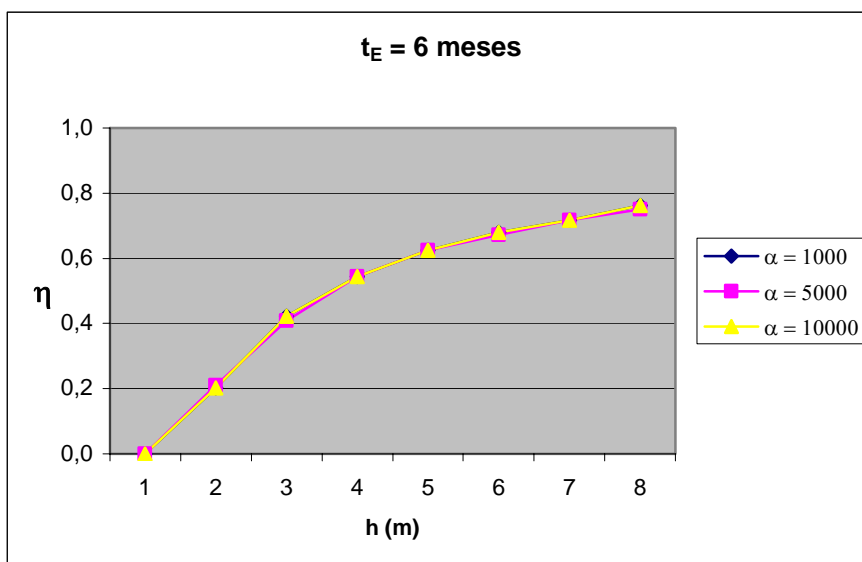


Figura 2 – Rendimento com a altura média para um tempo de esvaziamento de 6 meses.

4. CONCLUSÕES

Após um conjunto de simulações e análise dos principais resultados com relação ao rendimento hidrológico de um reservatório em função de vários parâmetros considerados no estudo, pode-se concluir que:

- A eficiência de acumulação de reservatórios anuais pode variar acentuadamente com a profundidade do lago, podendo chegar a valores superiores a 80% caso a profundidade seja da ordem de oito metros.
- Os reservatórios rasos, com profundidade inferiores a dois metros são significativamente ineficiente, mesmo operados de forma eficiente.
- A forma do lago não interfere no rendimento de acumulação (água útil/ estoque de água no início da estação seca).
- A redução da eficiência de acumulação, com o tempo de esvaziamento, menos sensível para reservatórios profundos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa-CNPq e à Coordenadoria de Capacitação de Recursos Humanos Programa de Demanda Social-CAPES, pelo apoio à pesquisa.

BIBLIOGRAFIA

CAMPOS, J. N. B. (2006) *Curso de Hidrologia de Reservatório: Notas de Aula*. Não publicado. UFC 2006.

CAMPOS, J. N. B (1996) *Dimensionamento de Reservatórios – O Método do Diagrama Triangular de Regularização*, Fortaleza, Ceará;

BRASIL – SUDENE (1967) *Estudo Geral de Base do Vale do Jaguaribe*, vol. 7, Política das Águas.