

OTIMIZAÇÃO DA ALTURA DE UMA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA

João César Amorim de Freitas¹; José Carlos de Araújo² & Antônio Macário Cartaxo de Melo³

Resumo - Atualmente o dimensionamento de uma barragem parte da determinação da capacidade mínima que o reservatório tem que possuir, necessária para se regularizar uma quantidade que é estipulada com base na demanda necessária da região, fixando posteriormente a altura do barramento independente do custo da construção. Um dos parâmetros principais que caracterizam uma barragem é a sua altura que, dentro de uma análise econômica, influencia no custo da construção do reservatório e dentro de uma análise de eficiência hídrica, influência na vazão regularizada a ser destinada aos pontos de consumo. O presente trabalho propõe uma metodologia para o pré-dimensionamento de uma barragem, que utiliza técnicas numéricas de otimização para determinação da altura de uma barragem, tendo como objetivo minimizar o custo da água. Este procedimento foi aplicado na barragem do Rosário reservatório construído pelo PROURB (Projeto de Desenvolvimento Urbano e Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará). Encontrou-se uma altura ótima global para a lâmina d'água de 20,70m com uma vazão de regularização de 29,73hm³/ano resultando num custo da água de 13,97 R\$/1000m³.

Abstract - Now the dimension of a reservoir leaves of the determination of the minimum capacity that the reservoir has to possess, necessary to regularize her an amount that is stipulated with base in the necessary demand of the area, fastening the height of the independent reservoir of the cost of the construction later. One of the main parameters that characterize a barrage is your height that, inside of an economical analysis, it influences in the cost of the construction of the reservoir and inside of an analysis of efficiency water, influence in the flow regularized to be destined to the consumption points. The present work proposes a methodology for the previous dimension of a reservoir, that uses numeric techniques of optimization, for determination of the height of a barrage, tends as objective minimizes the cost of the water. This procedure was applied in the of the Rosário reservoir built by PROURB (Project of Urban Development and Administration of the water

¹ Graduando em Engenharia Civil, UFC. Av: J, N° 1531 3° etapa, José Walter – Fortaleza – Ceará, Cep: 60750 – 090, Tel: 291 1845/ 469 1273, E-mail: amorimf@ufrnet.br

² Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC.

³ Professor do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil, UFC.

resources of the State of Ceará). The great height found for the reservoir it was of 20,70m with a vazão of regularization of 29,73hm³/ano resulting in a cost of the water of 13,97 R\$/1000m³.

Palavras-chave – Otimização, Barragem

INTRODUÇÃO

Desde os primórdios da civilização o homem modifica o meio em que vive, muitas vezes lutando pela sua própria sobrevivência, realizando atividades na natureza, remodelando a paisagem e adaptando os acontecimentos naturais aos anseios impostos pela sociedade em sua contínua mutação entre os tempos. Uma das atividades mais antigas promovidas pelo homem é a estocagem d'água, bem essencial e necessária a qualquer forma de vida. Uma das técnicas de estocagem de água é a construção de grandes barragens (açudes), que segundo CAMPOS (1996) consiste em uma intervenção do Homem na natureza com o objetivo de adaptar os padrões das vazões naturais dos rios, aos padrões demandados pela sociedade. Dessa forma, um açude atua como veículo que transporta a água ao longo dos tempos: os excedentes dos períodos úmidos, são estocados para o uso nos períodos de estiagem, fazendo também com que haja diminuição nas águas que são perdidas para o mar na foz dos grandes rios.

No Ceará cerca de 93% do abastecimento humano provem das barragens, assim torna-se necessário um planejamento racional dos recursos hídricos buscando sempre a melhor maneira de se construir uma barragem de forma a atender a demanda exigida e necessária para o desenvolvimento do estado dentro daquilo que o usuário do sistema pode pagar, respeitando sempre a capacidade hídrica e não comprometendo todo o sistema hídrico.

Em virtude de tudo isso o processo de dimensionamento é fundamental para um bom aproveitamento dos recursos hídricos. O presente trabalho busca dimensionar uma barragem tal que o custo d'água seja mínimo, para isso procura-se determinar a altura ótima da barragem, variável associada diretamente ao volume de acumulação e ao custo total da construção: a medida que a altura aumenta o custo eleva-se bem como o volume de represamento conseqüentemente o mesmo acontece com a vazão de regularização. Existe um valor ótimo da altura tal que a relação entre custo e vazão de regularização é o mínimo possível.

Uma barragem é caracterizada principalmente pelo barramento utilizado para impedir a passagem d'água, pelo vertedouro por onde a água excedida extravasa e pelo espelho d'água que é a área inundada pela água armazenada. Os parâmetros principais que definem o dimensionamento de uma barragem são os níveis máximo (N.A.Max) e mínimo (N.A.Min) do espelho d'água da

barragem. A elevação do N.A.Max aumenta a capacidade de armazenagem da barragem portanto o volume que pode ser disponibilizado por ela. Por outro lado, elevam-se os custos de construção da barragem, vertedor e estruturas principais, além de aumentar a área inundada, conseqüentemente os gastos com aquisição de terras.

O princípio básico que norteia o dimensionamento de uma barragem é a busca por parâmetros de projeto que minimizem o custo d'água dado por R\$/m³. O cálculo dos custos pode ser avaliado por meio de orçamentos, ainda que aproximados, para cada conjunto de parâmetros de dimensionamento que caracterizam uma barragem (Donato *et al* 2002). Opcionalmente, podem ser utilizadas funções de custo que definam o custo do empreendimento para cada valor de N.A.Max. Loucks *et al.* (1981) *apud* Donato *et al.* (2002), definem modelos para determinação da capacidade de armazenagem das barragens que se referem basicamente à minimização do de seu volume útil, garantido com certa confiabilidade preestabelecida, uma vazão regularizada mínima de jusante. Conclui-se que o tamanho final da barragem depende sensivelmente da política de operação adotada e da seqüência de vazões afluentes utilizada durante o estudo.

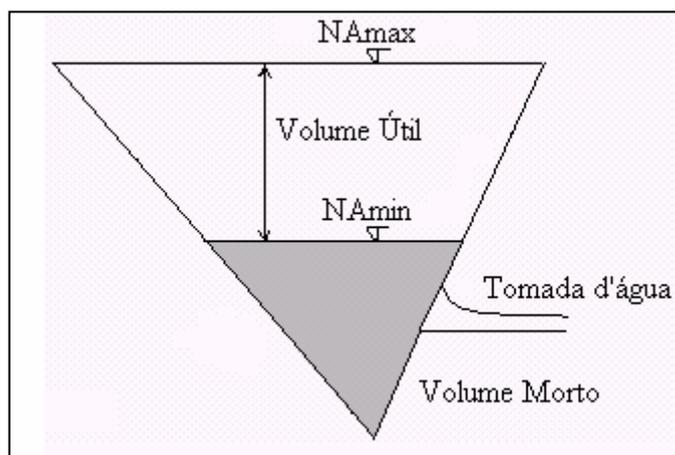


Figura 1: Corte Esquemático de uma barragem.

METODOLOGIA

O custo da água, em (R\$/m³), é dado por:

$$F = (IT.C)/Q_r \quad , \quad (1)$$

onde o IT é o investimento total da barragem (R\$); C é o fator de recuperação de capital (ano⁻¹) e Q_r é a Vazão de regularização (m³/ano).

Determinação do investimento total da barragem

A estimativa do custo total da barragem é algo extremamente complexo. Portanto, será levado em conta somente o custo total de construção ($C_r(y)$) e o custo de aquisição de terras inundadas. A função investimento total é a soma dessas duas parcelas, desta forma:

$$IT = C_r(y) + A(y) \cdot K_3, \quad (2)$$

$A(y)$ é a área inundada, em Km^2 ; K_3 é o custo unitário da aquisição de terras, em $\text{R\$/Km}^2$. Para a determinação de um custo de construção aproximado, será levado em consideração apenas o custo do aterro de terra (barramento) e do vertedouro, e é:

$$C_r(y) = C_b(y) + C_v(y), \quad (3)$$

onde $C_b(y)$ é o custo do aterro; $C_v(y)$ é custo do vertedouro. A função custo do aterro é:

$$C_b(y) = K_1 \cdot V_{at}(y), \quad (4)$$

onde K_1 é o custo unitário do aterro, em $\text{R\$/m}^3$; $V_{at}(y)$ é o volume do aterro, que é obtido de:

$$V_{at}(y) = \frac{1}{2} \cdot (B \cdot y \cdot (L_1(y) + L_2) + \frac{1}{6} \cdot y^2 \cdot (m+n) + y^2 \cdot (L_1(y) \cdot 2 + L_2)), \quad (5)$$

sendo B a largura da crista da represa; m o declive da montante da barragem; n o declive da jusante da barragem; y a altura da lâmina d'água (m); $L_1(y)$ o comprimento da represa na crista em função da altura y ; L_2 o comprimento da represa no fundo (m).

A função custo do vertedouro é:

$$C_v(y) = K_2 \cdot L(y), \quad (6)$$

onde K_2 é o custo unitário do vertedouro, dado em $\text{R\$/m}$; $L(y)$ a largura do Vertedouro.

As constantes K_1 e K_2 foram estimadas e majoradas em função da planilha de custo para compensar os custos não considerados (mão de obra, escavação, etc). Assim, a função investimento total fica:

$$IT(y) = \{ [K_1.V_{at}(y)] + [K_2.L(y)] \} + \{ A(y).K_3 \} \quad (7)$$

Determinação da Vazão de Regularização.

A função vazão de regularização é determinada por meio da simulação da operação da barragem usando a série sintética dos deflúvios naturais. Com a aproximação de uma função cúbica. Assim:

$$Q_r(y) = K_4 + K_5 \cdot y + K_6 \cdot y^2 + K_7 \cdot y^3 \quad (8)$$

PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

Um problema de otimização, pode ser composto na forma geral: determinar o vetor das variáveis de projeto $x \in R^n$, tal que:

Minimize $f(x)$,

denominada função objetivo, sujeito às restrições

$$h_j(x,u) = 0, j = 1, \dots, l$$

$$g_j(x,u) \leq 0, j = l+1, \dots, m$$

onde h_j são restrições de igualdade e g_j são restrições de desigualdade.

Função Objetivo

A função objetivo é:

$$f(y) = \frac{\{ [K_1.V_{at}(y)] + [K_2.L(y)] \} + \{ A(y).K_3 \} \cdot C}{K_4 + K_5 \cdot y + K_6 \cdot y^2 + K_7 \cdot y^3} \quad (9)$$

As restrições limitam a largura do vertedouro, maior que 10 metros,

$$g_1(y) = 10 - L(y) \leq 0;$$

a área inundada, menor que 15 km²,

$$g_2(y) = A(y) - 15 \leq 0;$$

o volume do aterro, menor que 500.000 m³,

$$g_3(y) = V_{at}(y) - 500000 \leq 0;$$

a vazão de regularização, maior que zero,

$$g_4(y) = -Q_r \leq 0;$$

e a altura, tem que ser maior que 5 m,

$$g_5(y) = 5 - y \leq 0.$$

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Para a aplicação da metodologia foi utilizada a barragem do Rosário caracterizada na Tabela 1.

Tabela 1: Barragem do Rosário.

LOCALIZAÇÃO	
Município:	Lavras da Mangabeira
Latitude:	6°53'27
Longitude:	39°05'31
Bacia:	Salgado
BARRAGEM	
Tipo:	Terra Homogênea
Capacidade(milhões de m ³):	47,2
Bacia Hidrográfica(Km ²):	329,000
Bacia Hidráulica(ha):	697,000
Vazão Regularizada(m ³ /s):	0,81
Extensão pelo Coroamento(m):	670,0
Largura do Coroamento(m):	6,00
Cota do Coroamento(m):	290,50
Altura da lâmina d'água(m):	18,7
SANGRADOURO	
Tipo:	Creager
Largura(m):	100
Lâmina Máxima(m):	2,1
Cota da Soleira(m):	288,0

Fonte: SRH,1996

Determinação das variáveis dependentes

Através da planta topográfica da região foram calculadas as áreas de inundação, bem como o volume de água armazenada pela barragem.

Tabela 2: Variáveis dependentes

COTA	Altura(m)	Área(m ²)	Volume(m ³)
269,3	0	0,00	0,00
270	0,7	3.911,25	3.911,25
271	1,7	20.386,02	20.386,02
272	2,7	59.542,43	59.542,43
273	3,7	181.070,11	181.070,11
274	4,7	421.433,12	485.045,21
275	5,7	711.173,60	1.051.348,57
276	6,7	964.353,21	1.889.111,98
278	8,7	1.636.448,59	4.489.943,78
280	10,7	3.070.037,43	9.196.399,80
282	12,7	3.652.712,60	15.919.149,83
284	14,7	4.635.143,61	24.207.006,04
286	16,7	5.703.313,15	34.545.462,80
288	18,7	6.969.750,55	47.218.526,50
289	19,7	7.836.989,37	54.621.896,46
290	20,7	8.876.392,43	62.978.587,36
291	21,7	9.915.795,45	72.374.681,32
292	22,7	10.955.198,55	82.810.178,34

Fonte: EngeSoft

Função Área de Inundação do espelho d'água

A função foi determinada por meio do gráfico de dispersão da área de inundação em função da altura, se aproximando pela função real.

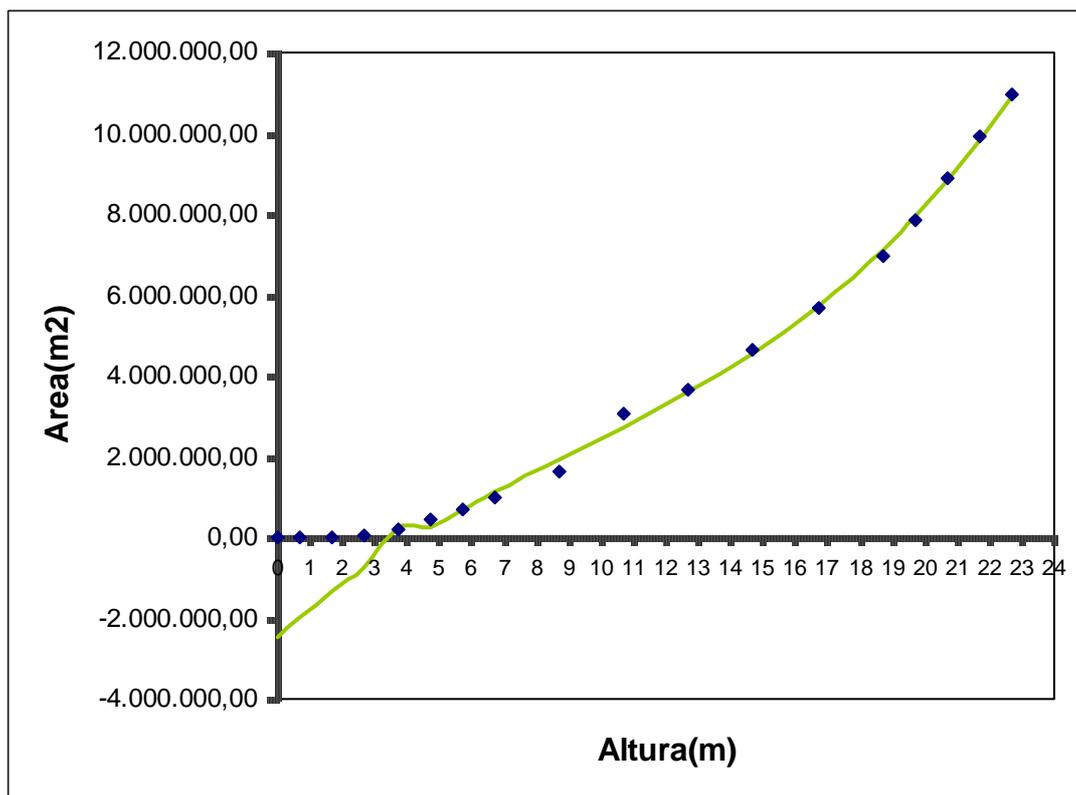


Figura 2: Função área de inundação

$$A(y) = -2449807,204 + 716937,5935 \cdot y - 36017,52024 \cdot y^2 + 1339,783350 \cdot y^3. \quad (10)$$

Função Volume de Acumulação

A função foi determinada a partir do gráfico de dispersão do volume em função da altura, aproximando-se pela função real

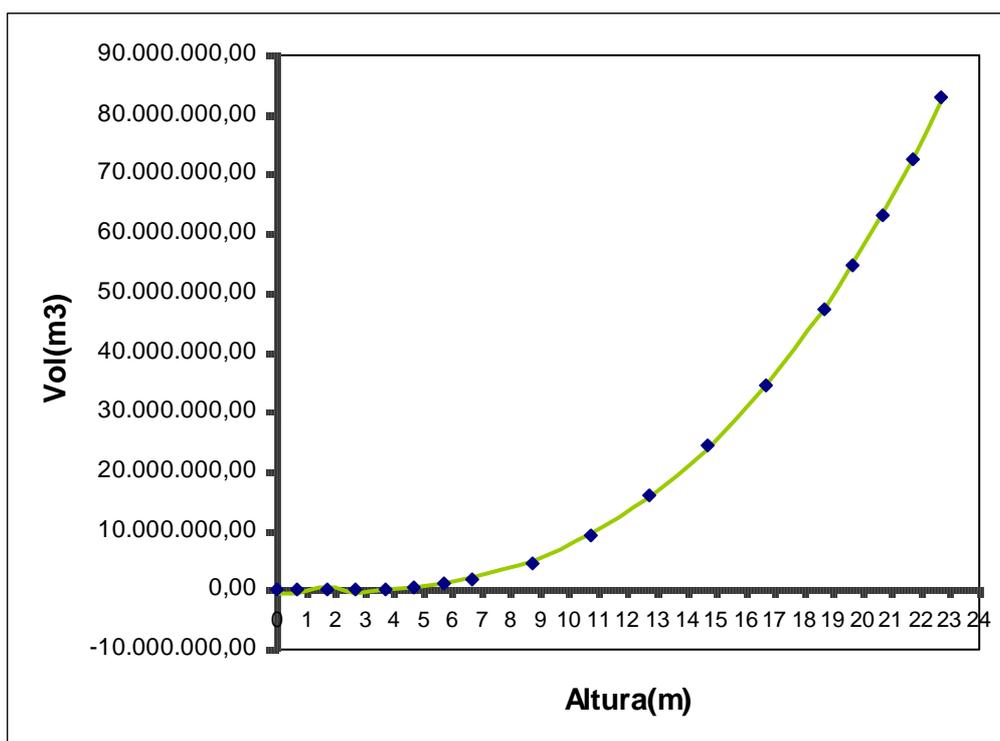


Figura 3: função volume.

$$\text{Vac}(y) = -470866,0099 - 151459,8724 \cdot y + 40068,11541 \cdot y^2 + 5610,889089 \cdot y^3. \quad (11)$$

Função Vazão de Regularização

As vazões de regularização em função da altura são :

Tabela 3: Altura x Vazão de Regularização

Altura	Qr(m ³ /ano)
14,7	17.679.513,60
15,7	19.889.452,80
16,7	21.467.980,80
17,7	23.677.920,00
18,7	25.572.153,60
19,7	27.782.092,80
20,7	29.676.326,40

Fonte: EngeSoft/1996

A função foi obtida do gráfico de dispersão da vazão de regularização em função da altura, resultando em

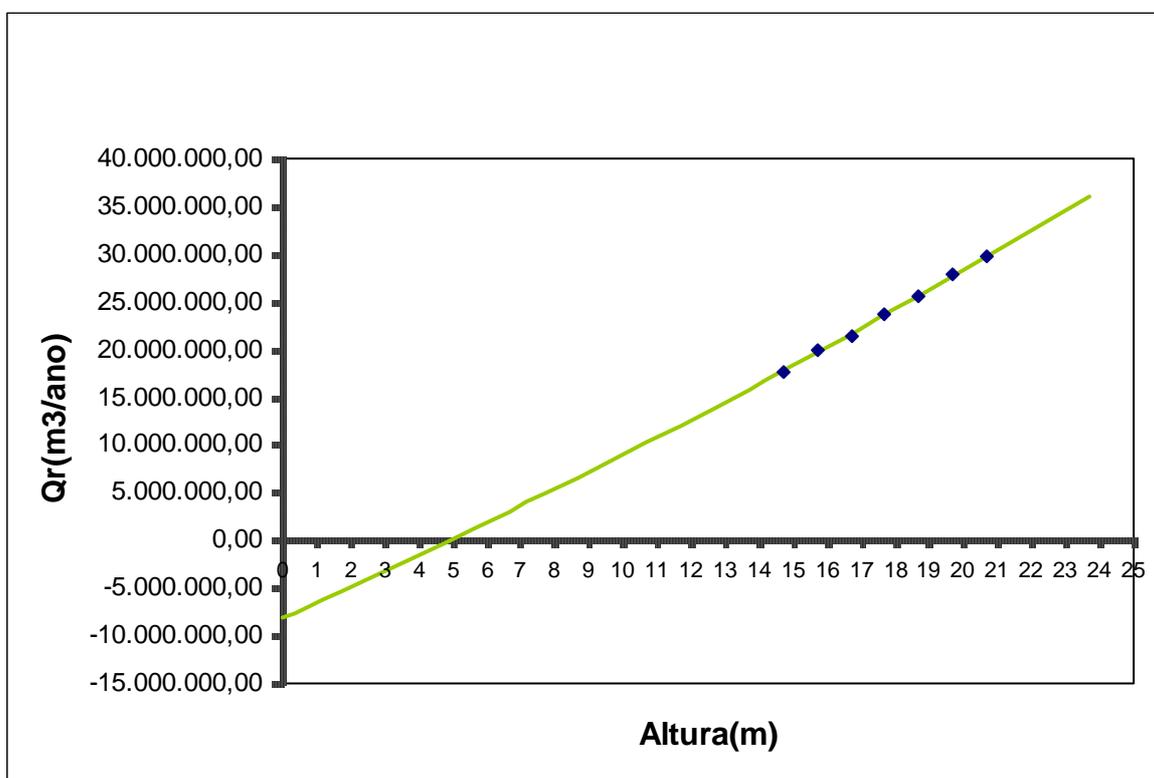


Figura 4: função vazão de regularização.

$$Qr(y) = -8158847,467 + 1596568,319 \cdot y + 11275,20005 \cdot y^2 - 8,76547E-07 \cdot y^3 \quad (12)$$

Função Largura do Sangradouro

No projeto do Rosário fez-se um dimensionamento do sangradouro para diferentes alturas, estes dados estão na Tabela 4.

Tabela 4: Largura do vertedouro x Altura

Altura	L(m)
14,7	140,00
16,2	130,00
17,7	120,00
18,7	100,00

Fonte: EngeSoft

Através dos dados da tabela 4 foi criado um gráfico de valores dispersos e se determinou , a partir dos pontos, a função

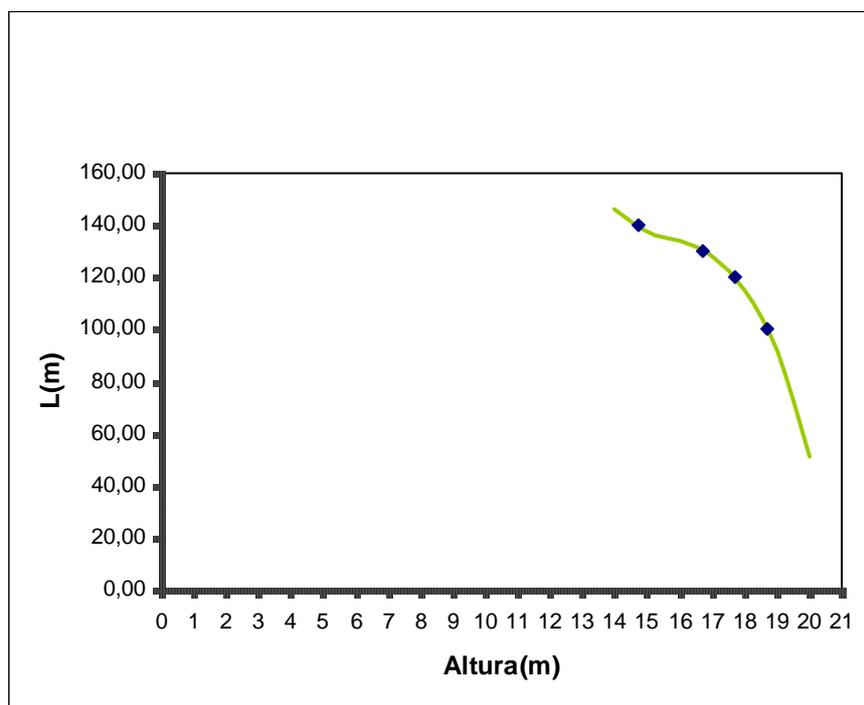


Figura 5: função vertedouro.

$$L(y) = -3425,3 - 620,39 \cdot y + 39,25 \cdot y^2 - 0,8333 \cdot y^3 \quad (13)$$

Determinação dos Custos Unitários (K_1 , K_2 , K_3)

A determinação dos custos unitários foram encontrados a partir dos quantitativos que constam na Tabela 5.

Tabela 5: Resumo dos Custos

ITEM	DISCRIMINAÇÃO	CUSTO(R\$)
1	Administração e Fiscalização	76.920,00
2	Trabalhos Preparatórios	194.411,35
3	Barragem	2.129.189,94
4	Dique de Proteção	285.790,57
5	Sangradouro	815.084,74
6	Tomada d'água	235.489,71
7	Desmatamento e Aquisição de terras	849.651,56
Total Geral		4.586.537,87

Fonte: EngeSoft, /1996

A constante K_1 é o custo unitário majorado do volume de terra dado em R\$/m³, somando-se todos os gastos na construção do barramento (itens 1,2,3,4,6 da tabela 5) dividido pelo volume total de terra. Assim, $K_1 = 10,25625$.

A constante K_2 é o custo unitário majorado do vertedor dado em R\$/m, somando-se todos os gastos na construção do vertedor (item 5 da tabela 5) dividido pelo seu comprimento total. Assim, $K_2 = 8.150,84$.

A constante K_3 é o custo unitário majorado referente à aquisição de terras dado em R\$/km², somando-se os gastos referentes a desmatamento e aquisição de terras (item 7 tabela 5) dividido pela área de inundação total. Assim, $K_3 = 121.905$.

VALORES ÓTIMOS ENCONTRADOS PARA A ALTURA DA BARRAGEM DO RÓSARIO

O problema de otimização não-linear foi resolvido usando-se o aplicativo Solver da planilha Excel (Figura 6).

<u>Otimização da altura de uma Barragem de Terra</u>	
<u>Constantes</u>	
$f_1 = 1$	$k_1(\text{R\$/m}^3) = 10,25625$
$f_2 = 1$	$k_2(\text{R\$/m}) = 8150,84$
$C(\text{ano}^{-1}) = 0,081742858$	$k_3(\text{R\$/Km}^2) = 121905$
<u>Variáveis dependentes</u>	
<u>- Volume do aterro</u>	
$Vat(\text{m}^3) = 382.458,20$	$B(\text{m}) = 6$
	$D.\text{Jus.} = 2$
	$D.\text{Mont} = 2,5$
	$L1(\text{y}) = 719,7962671$
	$L2(\text{m}) = 105$
<u>- Largura do vertedor</u>	
$L(\text{m}) = 10$	
<u>- Área de inundação</u>	
$A(\text{km}^2) = 8,845491993$	
<u>- Vazão de Regularização</u>	
$Qr(\text{m}^3/\text{a}) = 29.730.793,11$	
$Qr(\text{m}^3/\text{s}) = 0,941725237$	
<u>Variável independente</u>	$\text{Vol.Acum.}(\text{m}^3): 63.369.434,00 \text{ m}^3$
altura $y = 20,70453904$	$\text{Custo Barram.}: 3.922.586,96 \text{ R\$}$
<u>Função Objetivo</u>	$\text{Custo Total}: 5.082.405,06 \text{ R\$}$
$f =$	$0,013973738$ $\text{Custo da Água } 13,97373805 \text{ R\$/1000m}^3$
<u>Restrições</u>	
$L(\text{m}) = 10,00000001$	> 10
$A(\text{km}^2) = 8,845491993$	< 15
$Vat(\text{m}^3) = 382458,2042$	< 500000
$Qr(\text{m}^3/\text{a}) = 29730793,11$	> 0
$y(\text{m}) = 20,70453904$	> 5

Figura 6: Planilha de Cálculos

RESULTADOS

Tabela 6: Projetos Ótimos

PROJETOS ÓTIMOS				
inicial	final	Custo da água	Custo da Construção	Vazão de Regularização
Y	Y	R\$/1000m ³	R\$	hm ³ /ano
--	11	22,77	3.000.310,38	10,77
--	12	18,30	2.826.596,67	12,62
--	13	15,98	2.835.139,14	14,50
--	14	14,89	2.989.276,24	16,40
--	15	14,51	3.252.586,33	18,33
--	16	14,47	3.588.902,70	20,27
--	17	14,56	3.962.328,56	22,24
--	18	14,63	4.337.252,03	24,23
--	19	14,57	4.678.361,13	26,24
--	20	14,31	4.950.658,76	28,28
--	21	14,14	5.248.516,12	30,34
--	22	15,13	6.000.289,25	32,42
1010	15,63	14,46	3.459.044,82	19,55
0,00001	13,09	14,49	3.283.374,57	18,52
10001	12,81	16,30	2.821.390,93	14,15
10,111	20,70	13,97	5.082.405,06	29,73
1	20,70	13,97	5.082.405,06	29,73
10000	12,81	16,30	2.821.390,93	14,15
23	20,70	13,97	5.082.405,06	29,73
10	13,09	14,49	3.283.374,57	18,52

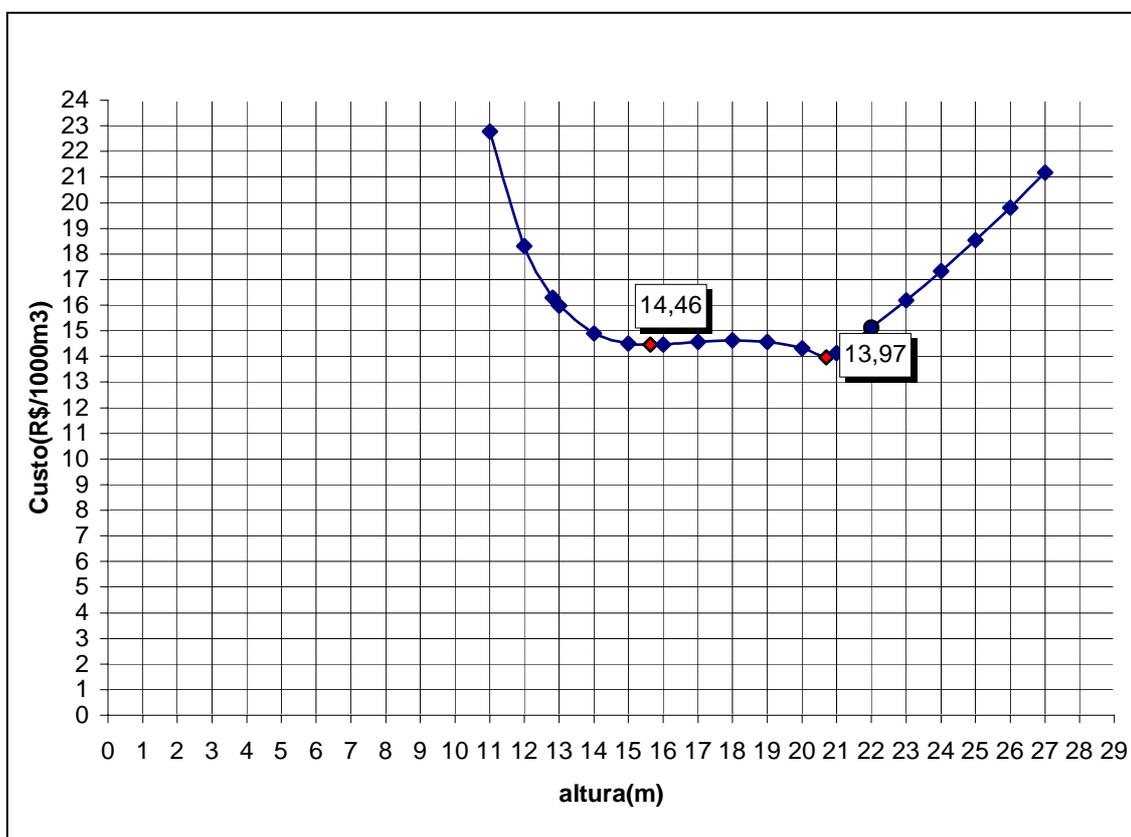


Figura 6: Gráfico custo da água.

CONCLUSÃO

A Barragem do Rosário foi executada a um custo total de construção de R\$ 4.586.537,87 (Valores referentes a dezembro de 1996), com altura da lâmina d'água de 18,7m e vazão de regularização de 25hm³/ano tendo um custo d'água de 14,60 R\$/1000m³.

A otimização forneceu dois valores ótimos para a altura da lâmina d'água, um mínimo local e o mínimo global, resultados bastante satisfatórios. Para uma altura ótima local de 15,63m, tem-se vazão de regularização de 19,55 hm³/ano a um custo d'água de 14,46 R\$/1000m³ e custo total de construção de R\$ 3.459.044,53. Levando-se em consideração o projeto que foi executado, haveria uma economia no custo d'água de 0,15 R\$/1000m³, bem como uma diminuição no custo total de R\$ 1.127.493,32. Devido à diminuição da altura da lâmina d'água há uma redução da vazão de regularização de 5,45 hm³/ano. Para altura ótima global de 20,70m, tem-se uma vazão de regularização de 29,73hm³/ano, a um custo d'água de 13,97 R\$/1000m³ e custo total de construção de R\$ 5.082.405,06. Em relação ao projeto que foi realizado, haveria um aumento no custo total de construção de R\$ 495.867,19 bem como um aumento considerável na vazão de regularização de 4,73hm³/ano. Devido ao valor custo d'água(13,97 R\$/1000m³), haveria uma economia de 0,63 R\$/1000m³.

Quanto à eficiência hídrica, a solução global se caracteriza como resultado ideal, uma vez que possui uma maior vazão de regularização para uma faixa de custo d'água mínima. Esses resultados mostram que o barragem não foi construído na altura ótima mais em uma faixa satisfatória no qual o custo d'água(14,60 R\$/1000m³) ficou bem próximo do mínimo(13,97 R\$/1000m³).

Os resultados encontrados, sugerem dois projetos com alturas ótimas para o barragem, com custos mínimos d'água praticamente iguais, mas com vazões de regularização e custos de investimento bem diferentes, servindo de ferramenta importante aos projetistas que dentro de uma análise econômica e de eficiência hídrica poderão adotar a altura ideal para o barragem, levando em consideração a demanda a ser regularizada bem como o investimento disponível para a sua construção. Mostra-se assim os benefícios da utilização de métodos de otimização que sistematicamente exploram o espaço de soluções, servindo de instrumento de decisão para a solução mais racional.

BIBLIOGRAFIA

- ARAÚJO, J.C -- Estudos de Tarifa d'água e hidrológicos. COGERH, Fortaleza,1996.
- BEZERRA, Débora Maria Rios. Estudo comparativo das bacias hidrográficas do estado do Ceará: aspectos hídricos, agrícolas e sócio – econômicos. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1999.
- CAMPOS, Nilson. Dimensionamento de reservatórios. Edições UFC.Fortaleza,1996.
- DONATO DA SILVA F^O, ADRIANO A.F.M CARNEIRO. Modelo de Otimização Evolutivo para Dimensionamento de Usinas Hidroelétricas. XV Congresso Brasileiro de Automática, Natal-RN, 2002.
- IPLANCE. Atlas do Ceará. Fortaleza,1997.
- MOTA, Francisco Antônio. Análise dos custos do volume regularizado e da eficiência hídrica de reservatórios do Ceará. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídrico – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 1995.
- NASCIMENTO, R. Q. do - ANDRADE, M. G. de - Otimização de um sistema hidrotérmico via programação geométrica XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional. Campos do Jordão, 2001.
- SUDENE.Normais Climatológicas (1961 – 1990).
- SRH-CE/ EngeSoft -- Projeto executivo da Barragem do Rosário. Relatório de concepção – Volume III. EngeSoft, Fortaleza,1996.
- VICENTE P.P.B. VIEIRA - ANTÔNIO GOUVEIA NETO – ANTÔNIO NUNES DE MIRANDA – VANDA TEREZA C. MALVEIRA. Roteiro para projeto de pequenos Açudes. Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Fortaleza, 1996.
- VILELA, SWAMI MARCONDES – ARTHUR MATTOS. Hidrologia aplicada. São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, 1975.