

# OTIMIZAÇÃO DA ALTURA DE UMA BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA

**José Carlos de Araújo**

jcaraujo@ufc.br

**Antônio Macário Cartaxo de Melo**

macario@ufc.br

**João César Amorim de Freitas**

amorim\_f@yahoo.com.br

## Resumo

Atualmente, o dimensionamento de uma barragem parte da determinação da capacidade mínima que o reservatório tem que possuir, necessária para regularizar uma quantidade que é estipulada com base na demanda necessária para região, fixando, posteriormente, sua altura, independente do custo de construção. Um dos parâmetros principais que caracterizam uma barragem é a sua altura, que, dentro de uma análise econômica, influencia no custo do reservatório e dentro de uma análise de eficiência hídrica, influencia na vazão regularizada. O presente trabalho propõe uma metodologia para o pré-dimensionamento de uma barragem, que utiliza técnicas numéricas de otimização para determinação da sua altura, 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 20,70 m, com uma vazão de regularização de 29,73 hm<sup>3</sup>/ano resultando num custo da água de R\$ 13,97/1000m<sup>3</sup>.

**Palavras-chave:** engenharia, otimização, altura, barragem, custo da água.

## Abstract

Nowadays the dimension of a reservoir should consider the determination of the minimum capacity that the reservoir has to possess, necessary to regularize the yield based on the demand. One of the main parameters that characterize a dam is its height that, inside of an economical analysis, influences the cost of the reservoir water and according to an analysis of hidrological efficiency, influences the regularized. 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 dam, with the objective of minimizing the cost of the water. This procedure was applied to the Rosário reservoir built by PROURB (Project of Urban Development and Administration of the water resources of the State of Ceará). The height found for the reservoir was of 20.70 m, with yield of 29.73 hm<sup>3</sup>/ano resulting in a cost of the water of R\$ 13.97/1000m<sup>3</sup>.

**Keywords:** engineering, optimization, height, barrage, cost of the water.

## 1 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 91% do abastecimento humano provém 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 da água seja mínimo possível. Para isso, procura-se determinar a altura ótima da barragem, variável associada diretamente ao volume de acumulação e ao custo total da construção: à 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 sangradouro 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 o nível máximo (N.A. Max) e mínimo (N.A. Min ou cota do volume morto) do espelho d'água da barragem como mostrado na Fig. 1. 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, sangradouro e estruturas principais, além de aumentar a área inundada, conseqüentemente os gastos com aquisição de terras.

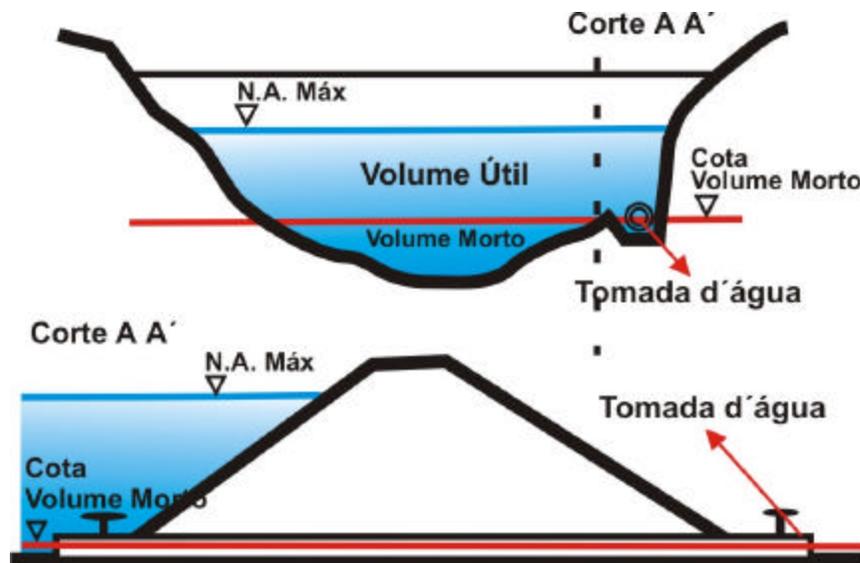


Figura 1- Corte esquemático de uma barragem.

O princípio básico que norteia o dimensionamento de uma barragem é a busca por parâmetros de projeto que minimizem o custo d'água, dado em R\$/m<sup>3</sup>. Segundo SILVA e CARNEIRO (2002), 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. 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 SILVA e CARNEIRO (2002), definem modelos para determinação da capacidade de armazenagem das barragens que se referem basicamente à minimização do 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.

## 2 Metodologia

O custo da água, em (R\$/m<sup>3</sup>), é dado por:

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

Sendo IT o investimento total da barragem (R\$); C é o fator de recuperação de capital (ano<sup>-1</sup>), para o seu cálculo foi utilizado uma taxa de juros anuais de 8% a.a. com a amortização dos investimentos em 50 anos, e Q<sub>r</sub> é a vazão de regularização (m<sup>3</sup>/ano).

### 2.1 Determinação do investimento total da barragem

A estimativa do custo total da barragem para diferentes alturas é algo extremamente complexo. Portanto, será levado em conta somente o custo total de construção (C<sub>r</sub>(y)) e o custo de aquisição de terras inundadas. A função investimento total é a soma destas duas parcelas, ou seja:

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

Onde A(y) é a área inundada, em Km<sup>2</sup>; K<sub>3</sub> é o custo unitário da aquisição de terras, em R\$/ Km<sup>2</sup>. Para a determinação de um custo de construção aproximado, será levado em consideração o custo do aterro de terra (barramento) e do sangradouro, assim:

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

Sendo C<sub>b</sub>(y) o custo do aterro e C<sub>v</sub>(y) o custo do sangradouro. A função custo do aterro é dada por:

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

Sendo K<sub>1</sub> o custo unitário do aterro, em R\$/m<sup>3</sup> e V<sub>at</sub>(y) é o volume do aterro. O volume do aterro é obtido utilizando a Eq. (5), constante no plano diretor para a utilização dos recursos hídricos do estado do Paraná, aplicável a barragens de terra.

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

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<sub>1</sub>(y) o comprimento da represa na crista em função da altura y; L<sub>2</sub> o comprimento da represa no fundo (m).

A função custo do sangradouro é:

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

Sendo K<sub>2</sub> o custo unitário do sangradouro, dado em R\$/m e L(y) a largura do Sangradouro. As constantes K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub> 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:

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

### 2.2 Determinação da Vazão de Regularização

A função vazão de regularização (com garantia de 90%) é obtida a partir da simulação da operação da barragem usando uma série sintética dos deflúvios naturais, sendo necessário o conhecimento do volume de acumulação do reservatório para as suas diferentes alturas (V<sub>ac</sub>(y)). Segundo CAMPOS (1996) as séries de vazões anuais podem ser obtidas a partir da geração de números aleatórios seguindo uma dada função densidade de probabilidade. Os dados obtidos da simulação da operação do reservatório fornecerão pontos discretos que serão utilizados para a aproximação, utilizando o método dos mínimos quadrados, de uma função cúbica. Assim:

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

## 3 Problema de Otimização

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

Mínimize  $f(x)$ ,

denominada função objetivo, sujeito às restrições

$$h_j(x,u) = 0, j = 1, \dots, l \quad (9)$$

$$g_j(x,u) \leq 0, j = l+1, \dots, m \quad (10)$$

$$x_{i, \inf} \leq x_i \leq x_{i, \sup}, i = 1, \dots, n \quad (11)$$

Onde  $h_j$  são restrições de igualdade,  $g_j$  são restrições de desigualdade e  $x_{i,inf}$  e  $x_{i,sup}$  são respectivamente os limites inferiores e superiores das variáveis de projeto.

### 3.1 Função Objetivo

A função objetivo que representa o custo da água é:

$$f(y) = \frac{\{ [K_1 \cdot V_{at}(y)] + [K_2 \cdot L(y)] \} + \{ A(y) \cdot K_3 \} \cdot C}{K_4 + K_5 \cdot y + K_6 \cdot y^2 + K_7 \cdot y^3} \quad (12)$$

O problema de Otimização se caracteriza como sendo um problema de programação não-linear (PPNL) com restrições e única variável independente contínua.

### 3.2 Restrições do problema

As restrições impõem que: o sangradouro, maior que 10 metros,

$$g_1(y) = 10 - L(y) \leq 0; \quad (13)$$

a área inundada, menor que 15 km<sup>2</sup>,

$$g_2(y) = A(y) - 15 \leq 0; \quad (14)$$

o volume do aterro, menor que 500.000 m<sup>3</sup>,

$$g_3(y) = V_{at}(y) - 500000 \leq 0; \quad (15)$$

a vazão de regularização, maior que zero,

$$g_4(y) = -Q_r \leq 0; \quad (16)$$

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

$$g_5(y) = 5 - y \leq 0. \quad (17)$$

## 4 Aplicação da Metodologia

Para efeito de aplicação da metodologia, foi escolhida a barragem do Rosário localizada a aproximadamente 2 km do distrito de Quitaiús, no sudoeste do Estado do Ceará (Fig. 2). Tanto o projeto como a construção da Barragem do Rosário estão inseridos no programa de Desenvolvimento Urbano e Gestão dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará (PROURB/CE) e propicia, além de outros usos, o abastecimento de água para a cidade de Lavras da Mangabeira e do distrito de Quitaiús.

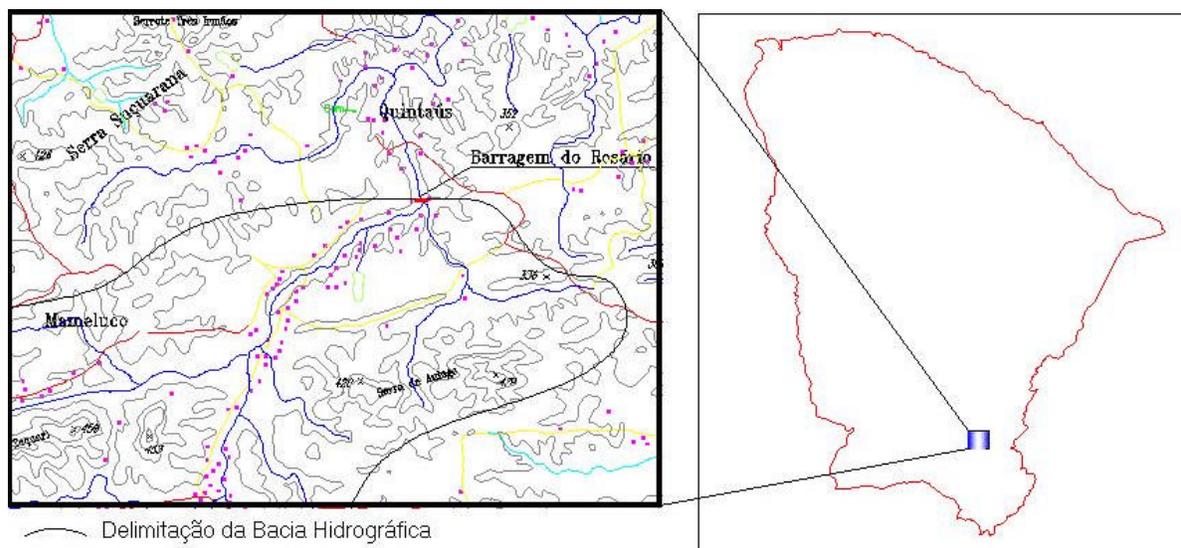


Figura 2 - Localização da barragem do Rosário.

O projeto executivo da barragem do Rosário foi elaborado em dezembro de 1996 pela Engesoft – Engenharia e Consultoria Ltda, de acordo com contrato firmado com a COGERH. A Tabela (1) apresenta suas características, segundo ENGESOFT/SRH-CE (1996).

**Tabela 1 - Características da barragem do Rosário**

| <b>LOCALIZAÇÃO</b>                       |                      |
|--|----------------------|
| Município:                               | Lavras da Mangabeira |
| Latitude:                                | 6°53'27              |
| Longitude:                               | 39°05'31             |
| Bacia:                                   | Salgado              |
| <b>BARRAGEM</b>                          |                      |
| Tipo:                                    | Terra Homogênea      |
| Capacidade (milhões de m <sup>3</sup> ): | 47,2                 |
| Bacia Hidrográfica (Km <sup>2</sup> ):   | 329,000              |
| Bacia Hidráulica (ha):                   | 697,000              |
| Vazão Regularizada (m <sup>3</sup> /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                 |
| <b>SANGRADOURO</b>                       |                      |
| Tipo:                                    | Creager              |
| Largura(m):                              | 100                  |
| Lâmina Máxima(m):                        | 2,1                  |
| Cota da Soleira(m):                      | 288,0                |

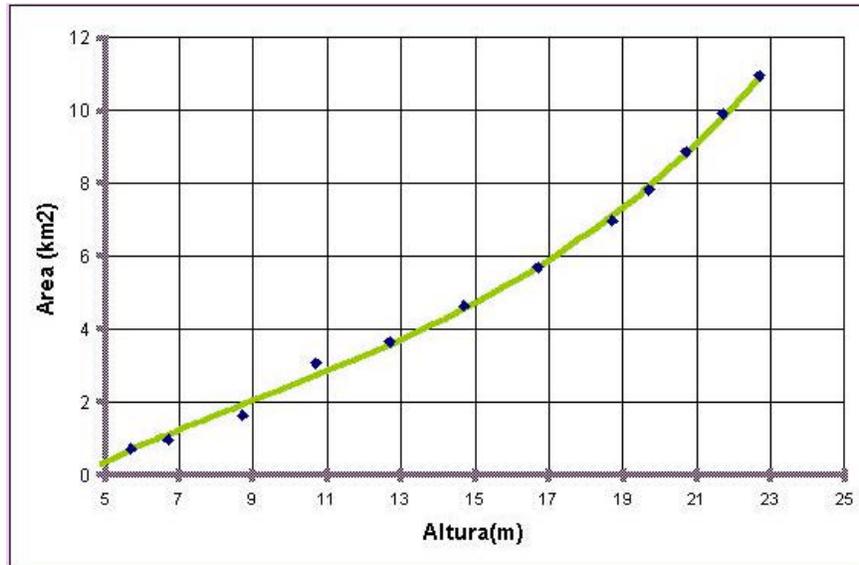
#### 4.1 Expressões das variáveis dependentes

As variáveis de projeto dependentes, envolvidas na otimização, são: área de inundação (A(y)), volume de acumulação (Vac(y)), largura do sangradouro (L(y)) e vazão de regularização (Qr(y)), obtidos a partir dos estudos topográficos constantes na Tab. (2), segundo ENGESOFT/SRH-CE (1996).

**Tabela 2 - Dados resultantes dos estudos topográficos da barragem do Rosário.**

| COTA  | Altura (m) | Área (m <sup>2</sup> ) | Volume (m <sup>3</sup> ) |
|-------|------------|------------------------|--------------------------|
| 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            |

Foram determinadas equações contínuas em todos os pontos para todas as variáveis dependentes de projeto, usando os gráficos de dispersão de cada variável em função da altura, utilizando o método dos quadrados mínimos para a aproximação de uma equação cúbica.

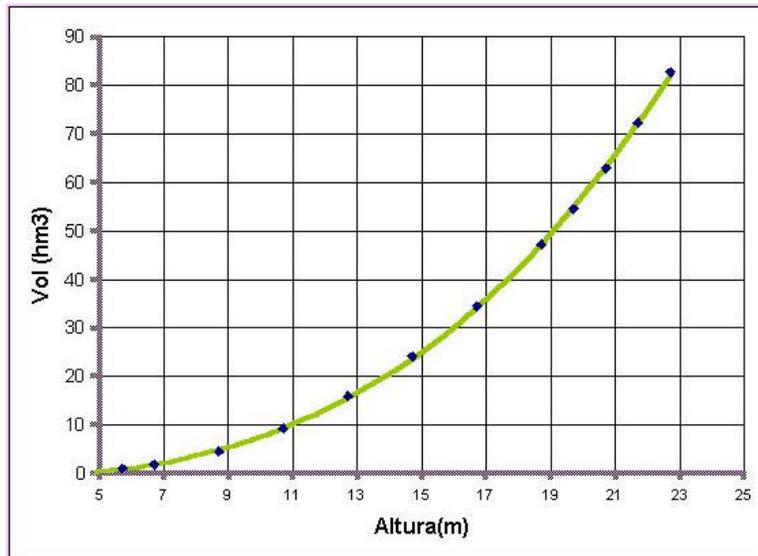


**Figura 3** - Função área de inundação.

A equação cúbica da área de inundação obtida foi:

$$A(y) = -2449807,20 + 716937,59 \cdot y - 36017,52 \cdot y^2 + 1339,78 \cdot y^3 \quad (18)$$

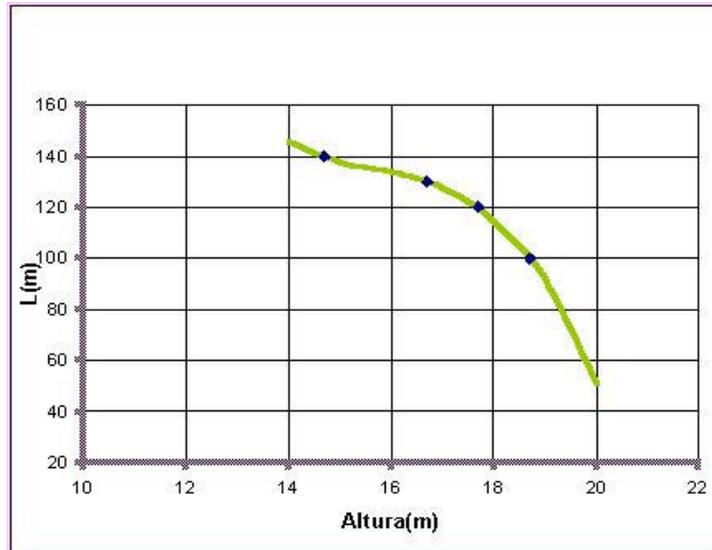
Onde y é a altura da lâmina d'água (m).



**Figura 4** - Função volume de acumulação.

A equação cúbica do volume de acumulação obtida foi:

$$Vac(y) = -470866,00 - 151459,87 \cdot y + 40068,11 \cdot y^2 + 5610,88 \cdot y^3 \quad (19)$$



**Figura 5** - Função largura do sangradouro.

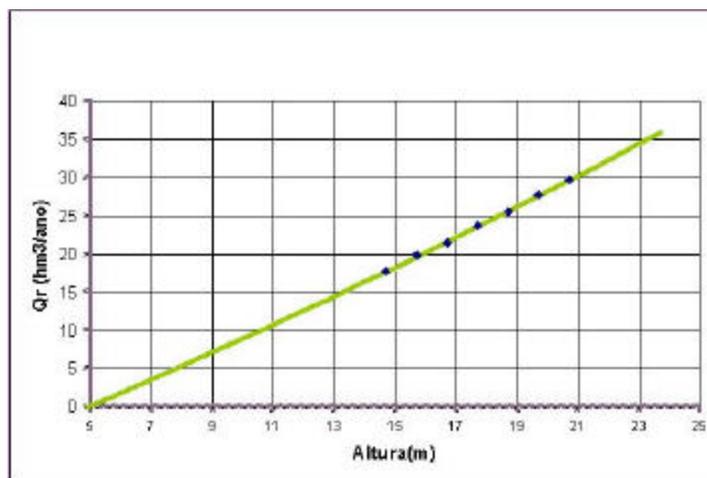
A equação cúbica da largura do sangradouro obtida foi:

$$L(y) = 3425,30 - 620,39 \cdot y + 39,25 \cdot y^2 - 0,83 \cdot y^3 \quad (20)$$

Os pontos que foram determinados para a largura do sangradouro são resultados dos estudos hidrológicos para diferentes alturas como mostrado na Tab. 3. Estes dados estão contidos no relatório de concepção do projeto da barragem do Rosário (ENGESOFT/SRH-CE, 1996).

**Tabela 3** - Largura do sangradouro para diferentes alturas da barragem do Rosário

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



**Figura 6** - Função vazão de regularização.

A equação cúbica da vazão de regularização obtida foi:

$$Qr(y) = 3425,30 - 620,39 \cdot y + 39,25 \cdot y^2 - 0,83 \cdot y^3 \quad (21)$$

#### 4.2 Determinação dos Custos Unitários ( $K_1$ , $K_2$ , $K_3$ )

A condição simplificadora para a determinação dos custos unitários foi considerá-los constantes, desta forma eles foram determinados a partir dos quantitativos que constam na Tab. (4), extraídos da planilha de orçamento do projeto que foi executado.

**Tabela 4 - Custos da barragem do Rosário em dezembro 1996.**

| 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 |

A constante  $K_1$  é o custo unitário majorado do volume de terra dado em R\$/m<sup>3</sup>, somando-se todos os gastos na construção do barramento (itens 1,2,3,4,6) dividido pelo volume total de terra. Assim,  $K_1 = 10,25$ .

A constante  $K_2$  é o custo unitário majorado do sangradouro dado em R\$/m, somando-se todos os gastos na construção do sangradouro (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\$/km<sup>2</sup>, somando-se os gastos referentes a desmatamento e aquisição de terras (item 7 tabela 5) dividido pela área de inundação total. Assim,  $K_3 = 121.905$ .

#### 4.3 Otimização e Simulação

O modelo de otimização foi implementado em planilha de Excel e o PPNL foi resolvido usando-se a ferramenta Solver do Excel (Microsoft) vários trabalhos utilizam este ferramental do Excel para a solução de problemas de otimização, podendo ser destacados os trabalhos desenvolvidos por LIMA, PEIXOTO E MAUAD (2001). Segundo os autores, a otimização usando o Excel é usada de duas maneiras, (1) para formular o objetivo e (2) para alcançar o objetivo.

O Solver do Excel é usado para achar o resultado ótimo possibilitando: análise de sensibilidade, otimização, avaliação de múltiplos cenários e comparação gráfica utilizando o algoritmo Simplex, com limites sobre as variáveis e o método do desvio e limite, implementado, para resolver problemas lineares e de inteiros, para problemas de programação não linear utiliza um algoritmo de otimização denominado *Generalized Reduced Gradient* (GRG2), baseado na técnica de gradientes reduzidos generalizados.

A implementação do problema de otimização para a barragem do Rosário utilizando o Solver do Excel pode ser vista na Tab. (5).

**Tabela 5** - Formulação do problema de otimização utilizando o Excel.

|                                 |               |  |               |
|---------------------------------|---------------|--|---------------|
| <b>Constantes</b>               |               |  |               |
| $k_1(\text{R\$/m}^3) =$         | 10,25         |  |               |
| $k_2(\text{R\$/m}) =$           | 8150,84       |  |               |
| $k_3(\text{R\$/ Km}^2) =$       | 121905        |  |               |
| $C(\text{ano}^{-1}) =$          | 0,0817        |  |               |
| <b>Variáveis dependentes</b>    |               |  |               |
| <i>- Volume do aterro</i>       |               |  |               |
| $Vat(\text{m}^3) =$             | 382.458,20    | $B(\text{m}) =$                              | 6             |
|                                 |               | $D.\text{Jus.} =$                            | 2             |
|                                 |               | $D.\text{Mont} =$                            | 2,5           |
|                                 |               | $L1(\text{m}) =$                             | 719,7962671   |
|                                 |               | $L2(\text{m}) =$                             | 105           |
| <i>- Largura do sangradouro</i> |               |  |               |
| $L(\text{m}) =$                 | 10            |  |               |
| <i>- Área de inundação</i>      |               |  |               |
| $A(\text{km}^2) =$              | 8,845491993   |  |               |
| <i>- Vazão de Regularização</i> |               |  |               |
| $Qr(\text{m}^3/\text{a}) =$     | 29.730.793,11 |  |               |
| $Qr(\text{m}^3/\text{s}) =$     | 0,941725237   |  |               |
| <b>Variável independente</b>    |               | $\text{Vol.Acum.}(\text{m}^3) =$             | 63.369.434,00 |
| altura $y(\text{m}) =$          | 20,70453904   | $\text{Custo Barram}(\text{R\$}) =$          | 3.922.586,96  |
| <b>Função Objetivo</b>          |               | $\text{Custo Total}(\text{R\$}) =$           | 5.082.405,06  |
| $f =$                           | 0,013973738   | $\text{Custo da Água}(\text{R\$/1000m}^3) =$ | 13,97373805   |
| <b>Restrições</b>               |               |  |               |
| $L(\text{m}) =$                 | 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             |

## 5 Resultados e discussão

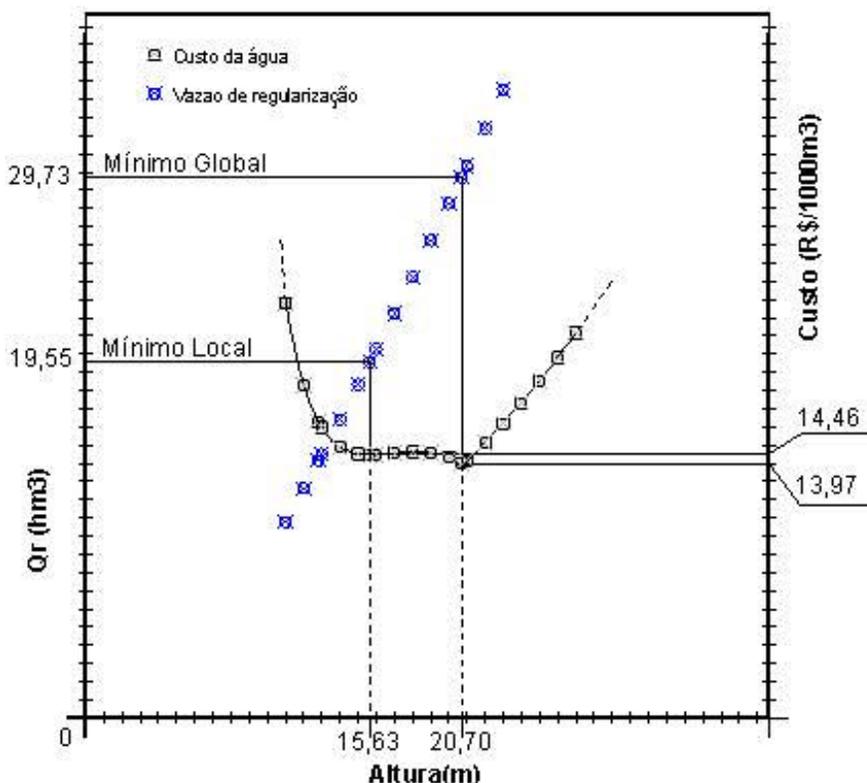
Os resultados de todos os projetos podem ser verificados na Tab. (6) para a identificação dos projetos ótimos foi necessária uma estimativa inicial da altura para que fosse encontrada a altura ideal ( $y$  final). Este valor de  $y$  inicial pode ser qualquer valor, tanto valores baixos como valores altos, foram simulados vários projetos com alturas iniciais diversas, de forma a identificar todos os pontos de mínimo.

**Tabela 6 -** Projetos ótimos para barragem do Rosário.

| PROJETOS SIMULADOS   |             |   |                   |                           |
|----------------------|-------------|---|-------------------|---------------------------|
| y (m) inicial        | y (m) final | Custo da água (R\$/1000m <sup>3</sup> ) | Custo Total (R\$) | Qr (hm <sup>3</sup> /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                     |
| PROJETOS ÓTIMOS      |             |   |                   |                           |
|                      | y (m)       | Custo da água (R\$/1000m <sup>3</sup> ) | Custo Total (R\$) | Qr (hm <sup>3</sup> /ano) |
| <b>Mínimo Global</b> | 20,70       | 13,97                                   | 5.082.405,06      | 29,73                     |
| <b>Mínimo Local</b>  | 15,63       | 14,46                                   | 3.459.044,82      | 19,55                     |

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 25hm<sup>3</sup>/ano tendo um custo d'água de R\$ 14,60/1000m<sup>3</sup>.

A otimização forneceu dois valores ótimos para a altura da lâmina d'água, um mínimo local e o mínimo global, como mostrado na Fig. (7). Para uma altura ótima local de 15,63m, tem-se vazão de regularização de 19,55 hm<sup>3</sup>/ano a um custo d'água de R\$ 14,46/1000m<sup>3</sup> 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 R\$ 0,15/1000m<sup>3</sup>, 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 hm<sup>3</sup>/ano. Para altura ótima global de 20,70m, tem-se uma vazão de regularização de 29,73hm<sup>3</sup>/ano, a um custo d'água de R\$ 13,97/1000m<sup>3</sup> 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 4,73 hm<sup>3</sup>/ano. Devido ao valor custo d'água (R\$ 13,97/1000m<sup>3</sup>), haveria uma economia de R\$ 0,63/1000m<sup>3</sup>.



**Figura 7 -** Valores ótimos da altura da barragem do Rosário.

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 a barragem não foi construída na altura ótima, mas em uma faixa satisfatória na qual o custo d'água (R\$ 14,60/1000m³) ficou bem próximo do mínimo (R\$ 13,97/1000m³).

Essa metodologia produz uma liberdade no processo de dimensionamento através da incorporação de ferramentas numéricas de otimização, dando um caráter dinâmico ao dimensionamento, no qual analisam todos os resultados possíveis, identificando o ideal dentro de um conjunto de soluções.

No caso da barragem do Rosário, a vazão de demanda não foi considerada podendo fazer parte da simulação como sendo uma das restrições do problema, optou-se por não incluí-la com objetivo de proceder com uma nova concepção de dimensionamento de barragens que não se “prende” à vazão a ser demandada. No caso da barragem do Rosário, a vazão de demanda foi atendida, mas, caso não tivesse sido, não implicaria no abandono da metodologia, mas na incorporação de “n” variáveis independentes de projeto, que representariam “n” alturas de barragens dentro de uma mesma bacia hidrográfica, no processo de simulação utilizando ferramentas numéricas de otimização.

A otimização se daria determinando as alturas ótimas de “n” barragens, dentro de uma mesma bacia hidrográfica tendo o mesmo objetivo: minimizar o custo da água, não mais sendo a água armazenada em um único reservatório, mas em “n” reservatórios, ou seja, minimizar o custo da água armazenada em uma bacia hidrográfica. Existe, no meio acadêmico, uma discussão de qual seria a melhor forma de armazenagem de água: grandes barragens ou pequenas barragens?. Estudos comprovam, através de análise de eficiência hídrica, que as grandes barragens são mais eficientes, no entanto, a construção de grandes barragens pode acarretar um custo muito maior do que “n” reservatórios otimizados, dentro de uma mesma bacia hidrográfica, com uma eficiência hídrica maior ou compatível com as das grandes barragens. A resolução desta outra aplicação da metodologia fica como recomendação a estudos posteriores. Vale salientar que, para a otimização de “n” barragens dentro de uma mesma bacia hidrográfica, terão que ser incorporadas outras variáveis dependentes de projeto como a influência de uma barragem a montante sobre outra a jusante.

## 6 Conclusão

Os resultados encontrados, para a otimização da altura da barragem do Rosário, sugerem dois projetos com alturas ótimas, 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 a barragem, levando em consideração a demanda a ser regularizada, bem como o investimento disponível para a sua construção.

Em virtude de tudo isso, pode-se concluir que a metodologia propõe a realização de uma nova concepção para o dimensionamento de barragens. Levando em consideração um equilíbrio de quanto o meio físico natural pode dispor de oferta hídrica, em harmonia com a sustentabilidade econômica. Ou seja, o regime físico natural é o determinante da altura do barramento e, portanto, da vazão de regularização ideal que resulte num mínimo de vulnerabilidade econômica do sistema. Mostram-se assim os benefícios da utilização de métodos de otimização que sistematicamente exploram o espaço de soluções, servindo de instrumento de auxílio à decisão. Bem como a verificação do potencial da metodologia como instrumento de planejamento da oferta hídrica em uma bacia hidrográfica.

## Agradecimentos

Os autores agradecem, primeiramente, ao Programa Especial de Treinamento por sua atuação e importância fundamental na luta constante na melhoria da graduação no qual um dos autores faz parte, a Engesoft pelo fornecimento dos dados, sem o qual não seria possível a realização desta pesquisa. A todos os colegas da Universidade Federal do Ceará representados por Alexandre Cunha Costa, Francisco Gildemir, Érico George, Juliana Pontes, Ricardo Alves Parente, Júlia Braba e Dante Rosado, por todo apoio e incentivo dado durante toda esta pesquisa.

## Referências

- ARAÚJO, J. C. *Estudos de tarifa d'água e hidrológicos*. Fortaleza: COGERH, 1996. 101 p.
- BEZERRA, D. M. R. *Estudo comparativo das bacias hidrográficas do estado do Ceará: aspectos hídricos, agrícola e sócio-econômicos*. 1999. 153 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- CAMPOS, N. B. *Dimensionamento de reservatórios*. Fortaleza: UFC, 1996. 56 p.
- ENGESOFT/SRH-CE. *Projeto executivo da barragem do Rosário*: relatório de concepção. Fortaleza: EngeSoft, 1996. v. 3, 31 p.
- LIMA, G. de; PEIXOTO, L S; MAUAD, F. F. A aplicação do modelo de simulação Mike Basin 2000 no planejamento e gerenciamento de recursos hídricos. In: IBERIAN LATIN-AMERICAN CONGRESS ON COMPUTATIONAL METHODS IN ENGINEERING, 22., 2001, Campinas. *Anais...* Campinas: AMC/USP, 2001. v. 2. p. 1-18
- MOTA, F. A. *Análise dos custos do volume regularizado e da eficiência hídrica de reservatórios do Ceará*. 1995. 48 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.
- NASCIMENTO, R. Q. do; ANDRADE, M. G. de. Otimização de um sistema hidrotérmico via programação geométrica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE PESQUISA OPERACIONAL, 33., 2001, Campos do Jordão. *Anais...* Campos do Jordão: SBPO, 2001. p. 530-537.
- SILVA, F. D. da; CARNEIRO, A. F. M. Modelo de otimização evolutivo para dimensionamento de usinas hidroelétricas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 2002, Natal. *Anais...* Natal: SBA, 2002. p. 1822-1827.
- VIEIRA, V. P. P. B. et al. *Roteiro para projeto de pequenos açudes*. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 1996. 160 p.
- VILELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

## **SOBRE OS AUTORES**

### **José Carlos de Araújo**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará em 1985, M.Sc. Eng. Civil pela Universidade de Hannover (Alemanha) em 1989, Dr. Eng. Civil – Hidráulica e Saneamento pela EESC/USP em 1994. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental da Universidade Federal do Ceará, onde atua em nível de graduação e pós-graduação, Pesquisador e Consultor ad-hoc CNPq.

### **Antônio Macário Cartaxo de Melo**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará em 1982, M.Sc. Eng. Aeronáutica pelo ITA em 1985, Dr. em Ciências em Eng. Civil pela COPPE/UFRJ em 2000. Atualmente ocupa o posto de professor adjunto junto ao Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará onde atua em nível de graduação. Coordenador do GPOE – Grupo de Pesquisa em Otimização e Estruturas.

### **João César Amorim de Freitas**

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Ceará, bolsista do Programa Especial de Treinamento do curso de Engenharia Civil da UFC (PET-CIVIL/UFC). Integrante do grupo de pesquisa em hidrossedimentologia da UFC. Membro do Fórum de entidades do Centro de Tecnologia da UFC e Diretor do Centro Acadêmico do curso de Engenharia Civil.