

# OTIMIZAÇÃO DO SAM - SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO DA GRANDE SÃO PAULO

Eng<sup>o</sup> John Edward Anderson \*

## RESUMO

A primeira etapa de construção do Sistema Adutor Metropolitano é chamada Alça Norte, e compreende uma rede ramificada, que partindo da Estação de Tratamento do Guaraú, vai alimentar reservatórios situados ao Norte da cidade de São Paulo, indo desde o Município de Osasco a Oeste, até o outro extremo, a Leste, em São Miguel Paulista.

Da exposição se conclui que a fonte é única, as saídas são localizadas, com vazão conhecida, o

traçado físico da tubulação é ramificado e pré-determinado, e o escoamento é todo por gravidade (pelo menos até o ano de 1975).

Através da programação linear, cujas equações foram calculadas por processamento em computador IBM 1130, otimizou-se o Sistema, quanto a custos, resultando os diâmetros da tubulação mais econômica. Com isso, o método apresentado integra e otimiza alternativas possíveis em uma rede de distribuição ramificada.

\* do Departamento de Integração da COMASP

# OTIMIZAÇÃO DO SAM — SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO

## APRESENTAÇÃO

Apresenta-se a seguir, o equacionamento e os resultados obtidos com o método que foi utilizado na determinação preliminar do diâmetro e do comprimento de cada trecho da 1.<sup>a</sup> etapa do distribuidor principal de água (Alça Norte) do Sistema Adutor Metropolitano da Grande São Paulo.

Através do estudo da setorização da área a ser abastecida ficou-se de posse dos seguintes dados: locação dos reservatórios, cotas dos níveis de água nos reservatórios e o traçado das linhas que unem a fonte de suprimento aos vários reservatórios.

Deve-se, com base nesses dados, determinar o diâmetro de cada trecho da canalização de maneira a satisfazer as condições hidráulicas e minimizar o custo total (implantação + operação) do sistema.

A nomenclatura referente ao sistema é a seguinte (fig. 1):

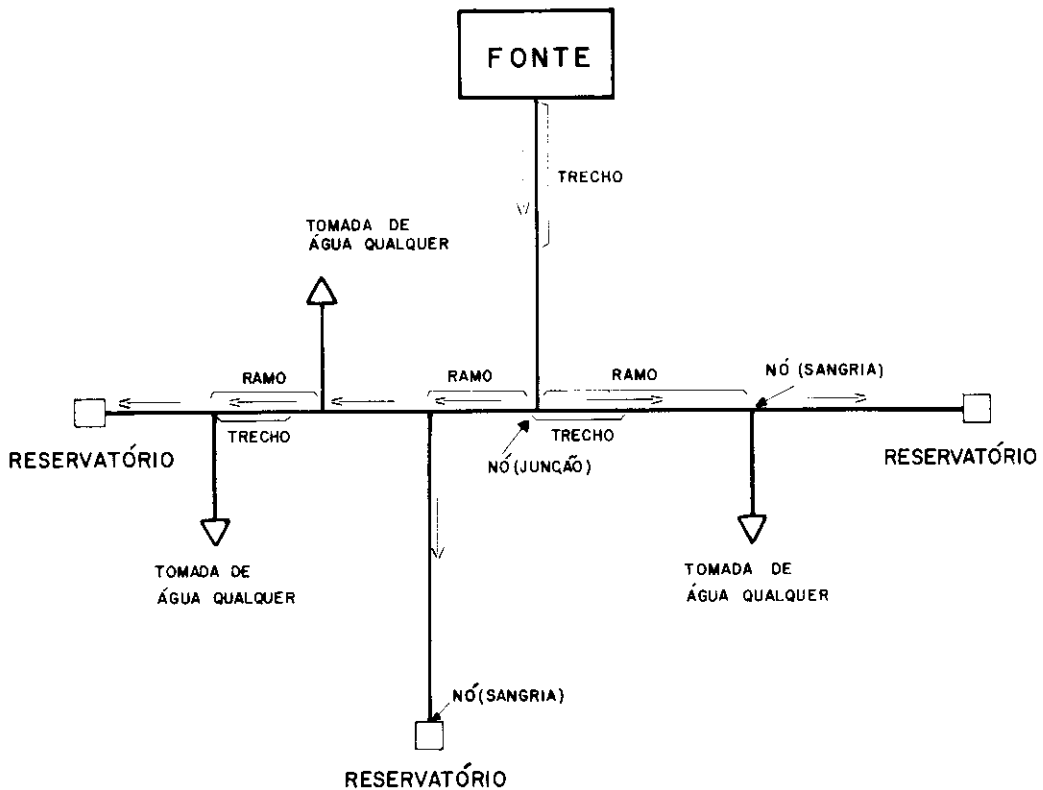
— fonte: ponto em que há suprimento de água.

- sangria: ponto em que há retirada de água da tubulação (por exemplo: a tomada de água para um reservatório).
- junção: ponto em que estão conectados três ou mais tubos.
- nó: qualquer sangria ou junção.
- ramo: tubulação compreendida entre dois nós consecutivos.
- trecho: fração de um ramo, isto é, porção de tubulação com comprimento menor do que o comprimento do ramo correspondente.

## HIPÓTESES

O equacionamento está estruturado com base nas seguintes hipóteses:

- 1 — O traçado da canalização é determinado "a priori".
- 2 — O sistema não possui malhas.
- 3 — Há somente uma fonte de suprimento.
- 4 — As sangrias têm posições fixas e determinadas e as vazões da saída são fixas e conhecidas.



A razão dessas hipóteses é que cada ramo da canalização em estudo deve ter conhecidos "a priori", isto é, antes de qualquer otimização, seu comprimento, a vazão que por ele escoar e o sentido deste escoamento.

## ESQUEMA DE CÁLCULO

O esquema de cálculo consiste em dividir-se cada ramo da canalização em vários trechos de maneira que cada trecho seja uma tubulação de diâmetro constante e que o valor desse diâmetro varie de trecho para trecho (os valores desses diâmetros são fixados "a priori", segundo critérios que variam de acordo com o caso: ve-

locidade do fluido, condições de fabricação dos tubos, assentamento dos tubos etc.). Obtém-se, então, através da programação linear, o comprimento de cada um desses trechos de maneira a minimizar o custo total do sistema. Os vínculos a serem observados pela programação linear são as condições físicas e hidráulicas que o sistema deve satisfazer.

## NOTAÇÃO

- L — comprimento do ramo (m)  
 X — comprimento do trecho (m)  
 D — diâmetro (m)  
 Q — vazão (m<sup>3</sup>/s)  
 $\gamma$  — peso específico do fluido kgf/m<sup>3</sup>)  
 p — pressão (kgf/m<sup>2</sup>)  
 z — cota do centro de gravidade da seção em relação ao plano horizontal de referência (m)  
 H =  $\frac{p}{\gamma} + z$  carga piezométrica na seção (m)  
 l — perda de carga unitária (m/m)  
 C — coeficiente de atrito da fórmula de HAZEN-WILLIAMS  
 k — custo unitário anual dos tubos (deve incluir todas as despesas de implantação e operação do sistema, isto é, todas as despesas decorrentes da amortização do ca-

- pital utilizado na compra e instalação da tubulação, mais as despesas de manutenção e operação do sistema, incluindo uma taxa de reposição) (Cr\$/m.ano)  
 K — custo total do sistema (Cr\$)  
 i — índice que designa um nó e o ramo imediatamente a montante do referido nó. A fonte será designada com o índice i = 0.  
 j — índice que designa um trecho de diâmetro constante de um ramo  
 n — número total de nós (e ramos) do sistema  
 T (i) — número total de trechos do ramo i  
 T =  $\sum_{i=1}^n T(i)$  número total de trechos do sistema  
 r — índice que designa um ramo situado no percurso entre a fonte e um determinado nó (percurso este que obedece sempre o sentido do escoamento do fluido).

## EQUAÇÕES

Nos casos em que o abastecimento é feito, em sua totalidade, por gravidade, isto é, nos casos em que não há bombeamento em nenhum ponto do sistema (inclusive na fonte), e quando é conhecida a carga piezométrica na fonte, valem as seguintes relações:

### 1 — Função objetivo:

Exprime o custo anual total do sistema. É a função a ser minimizada:

$$K = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{T(i)} k(i, j) \cdot X(i, j)$$

### 2 — Vínculos:

a — A soma dos comprimentos de todos os trechos de um ramo é igual ao comprimento do referido ramo.

$$\sum_{j=1}^{T(i)} X(i, j) = L(i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

b — Em cada nó, a carga piezométrica

na seção deve ser maior ou igual a um valor mínimo dado:

$$H(i) \geq H_{\min.}(i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

ou seja:

$$H(0) - \sum_r \sum_{j=1}^{T(i)} X(r, j) \cdot l(r, j) \geq H_{\min.}(i) \quad i = 1, 2, \dots, n$$

No caso de um reservatório,  $H_{\min.} =$  cota do nível da água do reservatório em relação ao plano horizontal de referência + altura de folga (segurança).

No caso de uma junção qualquer (ou um ponto intermediário qualquer da tubulação)  $H_{\min.} = z + \frac{P_{\min.}}{\gamma}$ , onde  $P_{\min.}$  é a menor pressão que pode ocorrer no ponto sem que haja formação de bolhas de vapor ou ar ou risco de colapso do tubo.

- c — Os comprimentos de todos os trechos da canalização são não-negativos.

$$X(i, j) \geq 0$$

As equações apresentadas não levam em conta a existência de bombeamento na fonte porque, por razões que serão expostas posteriormente, no presente estudo foi admitido que o distribuidor principal é uma canalização de abastecimen-

to por gravidade e é conhecida a cota piezométrica  $H(0)$  na fonte (reservatórios de água tratada da Estação de Tratamento de Água do Guaraú). De qualquer maneira, a introdução de  $H(0)$  como variável nas expressões apresentadas acima não é difícil (ref. 1).

No nosso caso a programação linear terá 2  $n$  vínculos ( $n$  vínculos de comprimento e  $n$  vínculos de carga) e  $T$  variáveis (comprimento dos trechos).

## VALORES NUMÉRICOS

O sistema estudado possui 44 trechos e 23 reservatórios (fig. 2). Foram impostas restrições de carga somente nos reservatórios, sendo que a carga nas junções foi verificada "a posteriori", isto é, após terem sido traçadas as linhas piezométricas. Nos cálculos foi utilizado um computador IBM 1130. Os processamentos ficaram a cargo do Eng.º Alexandre Yudenitsch e sua equipe da Divisão de Processamento de Dados da COMASP.

Foi admitido que o abastecimento seria feito, em sua totalidade, por gravidade, pois os níveis de água em todos os reservatórios a serem supridos têm cota menor do que o nível de água nos reservatórios de água tratada da E.T.A. Guaraú (que, no caso, vale  $H(0) = 828,62$  m) e porque os dados disponíveis relativos ao consumo de água correspondem ao consumo no ano de 1975, ou seja, em data relativamente próxima. Nessas condições, já que este sistema deverá abastecer normalmente a região até o ano 2 000, convém que em 1975 se tenha abastecimento por gravidade, reservando-se o bombeamento para reforço de sistema numa data mais distante.

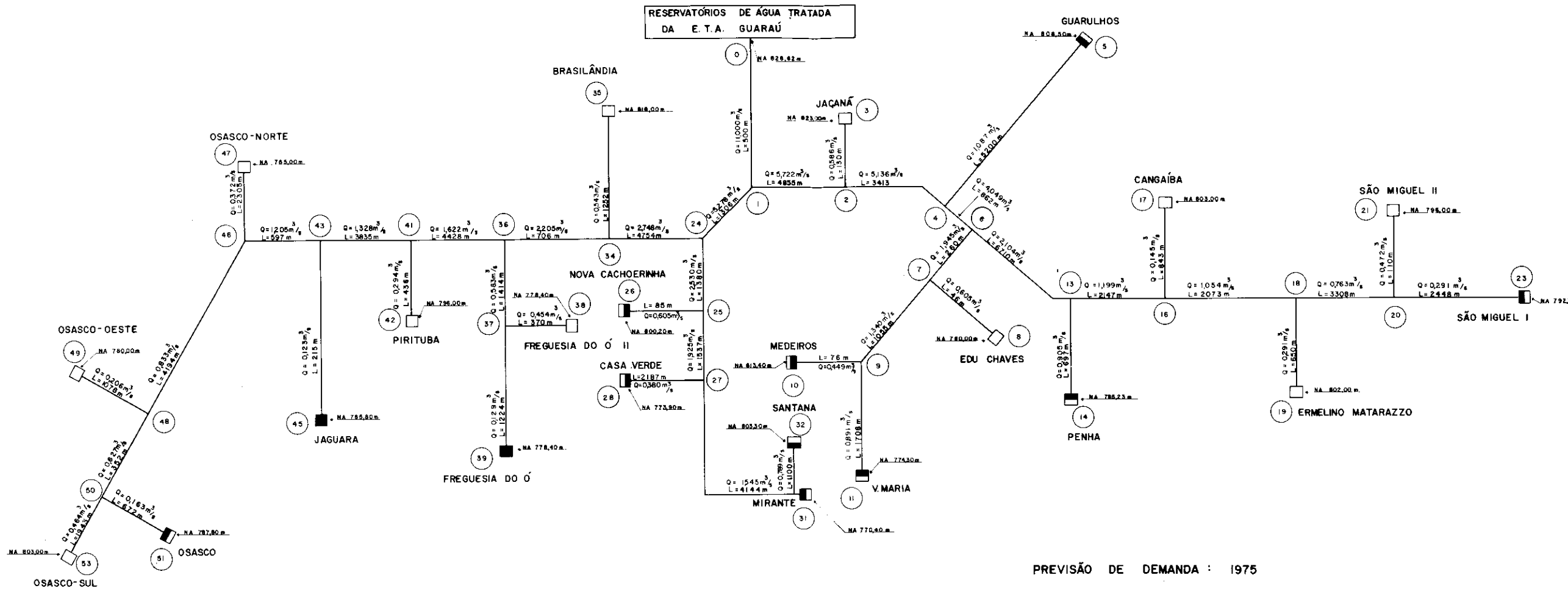
Os dados utilizados para o dimensionamento do

sistema para o ano de 1975, constam das tabelas 1 e 2. Na tabela 1, estão relacionados o comprimento dos ramos, a vazão que escoar nos ramos, o nível de água nos reservatórios e o diâmetro dos tubos a serem considerados no dimensionamento. Na tabela 2 está apresentada uma estimativa do custo unitário (por unidade de comprimento) de tubos de aço com diâmetros iguais aos que estão relacionados na tabela 1. Este custo leva em conta somente o custo do material e o custo da instalação do tubo. Assim, a função objetivo passa a exprimir o custo de instalação do sistema e não mais o custo anual total. Ao ser feito o levantamento do custo do material do tubo, deve-se estimar a pressão de trabalho a ser suportada pelo tubo (para determinação da espessura da parede do tubo). Portanto, uma vez obtidos os resultados, deve-se verificar se a pressão de trabalho é coerente com o valor adotado.

Para o cálculo da perda de carga, foi utilizada a fórmula de HAZEN-WILLIAMS com  $C = 130$ :




$$l = 10,699 \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} \cdot D^{-4,87}$$

Obs.: Carga mínima = nível de água máximo no reservatório + 2 m. (folga)



PREVISÃO DE DEMANDA : 1975

LEGENDA

-  RESERVATÓRIO EXISTENTE A AMPLIAR
-  RESERVATÓRIO A CONSTRUIR
-  RESERVATÓRIO EXISTENTE

**TABELA 1 — DADOS**

Ramo ou nó	Comprimento (m)	Vazão (m <sup>3</sup> /s)	Diâmetros considerados (m)	Carga mínima (m)
1	500	11,000	2,4; 2,6; 2,8; 3,0; 3,2	
2	4855	5,722	2,0; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8	
3	130	0,586	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	825,00
4	3413	5,136	1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2	
5	5200	1,087	0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4	810,50
6	862	4,049	1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0	
7	260	1,945	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
8	46	0,605	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	782,00
9	1055	1,340	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
10	76	0,449	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	815,40
11	1708	0,891	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	776,30
13	6710	2,104	1,0; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8	
14	697	0,905	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	787,23
16	2147	1,199	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
17	843	0,145	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	805,00
18	2073	1,054	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
19	650	0,291	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	804,00
20	3308	0,763	0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4	
21	1100	0,472	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	798,00
23	2448	0,291	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	794,70
24	1306	5,278	1,4; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2	
25	1380	2,530	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
26	85	0,605	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	802,20
27	1537	1,925	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
28	2187	0,380	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	775,90
31	4144	1,545	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	772,40
32	1100	0,789	0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2	805,30
34	4754	2,748	1,2; 1,4; 1,6; 1,8; 2,0	
35	1252	0,543	0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2	820,00
36	706	2,205	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
37	1414	0,583	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	
38	370	0,454	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	780,40
39	1224	0,129	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	780,40
41	4428	1,622	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
42	436	0,294	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	798,00
43	3835	1,328	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
45	215	0,123	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	787,80
46	597	1,205	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
47	2305	0,372	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	787,00
48	4194	0,833	0,8; 1,0; 1,2; 1,4; 1,6	
49	1078	0,206	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	782,00
50	352	0,627	0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4	
51	672	0,163	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0	789,80
53	1943	0,464	0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2	805,00

**TABELA 2 — CUSTOS DOS TUBOS**

Diâmetro (m)	Custo Unitário (Cr\$/m)
3,2	4.650,00
3,0	4.080,00
2,8	3.390,00
2,6	3.100,00
2,4	2.830,00
2,2	2.350,00
2,0	2.130,00
1,8	1.900,00
1,6	1.340,00
1,4	1.100,00
1,2	780,00
1,0	660,00
0,8	520,00
0,6	240,00
0,4	110,00
0,2	60,00

Os resultados obtidos constam da tabela 3.

**TABELA 3 — RESULTADOS**

Ramo	Diâmetros escolhidos (m)	Comprimento (m)
1	2,8	500
2	2,2 2,6	4335 520
3	1,2	130
4	1,6 2,0	1795 1618
5	0,8 1,0	80 5120
6	1,6	862
7	1,2	260
8	0,2 0,4	26 20
9	1,2	1055
10	0,6	76
11	0,4 0,6	227 1481
13	1,2 1,4	2256 4454
14	0,4 0,6	143 554
16	1,2	2147
17	0,4 0,6	327 516
18	1,2	2073
19	0,6	650
20	0,8 1,0	2474 834
21	0,4 0,6	4 103
23	0,6	2448
24	1,6 2,0	713 593

Ramo	Diâmetros escolhidos (m)	Comprimento (m)
25	1,2	1380
26	0,2 0,4	12 73
27	1,2	1537
28	0,2 0,4	3 2184
31	1,0 1,2	3351 793
32	0,8	1100
34	1,6	4754
35	0,8	1252
36	1,2	706
37	0,4 0,6	607 807
38	0,4	370
39	0,2 0,4	91 1133
41	1,2	4428
42	0,2	33
	0,4	403
43	1,2	3835
45	0,2	215
46	1,2	597
47	0,4	1119
	0,6	1186
48	1,0	2927
	1,2	1267
49	0,2	108
	0,4	970
50	1,0	352
51	0,2	130
	0,4	542
53	0,8	1943

Nessas condições, o custo estimado de instalação da tubulação é de Cr\$ 66.110.000,00 (material + instalação)

## CONCLUSÕES:

Ao se projetar um sistema de abastecimento de água, surgem várias alternativas possíveis e, em geral, a escolha da solução a ser adotada resulta de uma comparação econômica das alternativas. O método apresentado permite obter, de maneira relativamente rápida e simples, os dados para uma comparação desta natureza, além de possibilitar um aprimoramento dos valores obtidos para um dado caso, pois, podemos facilmente alterar níveis de reservatórios, diâmetros etc., conforme sejam os valores obtidos em cálculo

anterior. É, pois, um método muito útil no cálculo de sistemas que satisfaçam as hipóteses citadas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

1. "Design of optimal water distribution networks" — D. Karmeli, Y. Gadish e S. Meyers — Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Pipeline Division, Outubro, 1968 — pág. 1 a 10.