

DIMENSIONAMENTO TÉCNICO-ECONÔMICO DAS REDES HIDRÁULICAS RAMIFICADAS

PROF. TUFI M. ASSY (*)

1. INTRODUÇÃO

Instalações de redes hidráulicas ramificadas de grande porte vem sendo executadas pela SABESP na área Metropolitana da Grande S. Paulo. O dimensionamento ótimo dessas redes tem sido obtido pela técnica da programação linear. O presente artigo descreve essa técnica, particularizada, a título de exemplo, à instalação do Sistema Adutor Metropolitano Extremo Norte (SAM-EN).

2. FUNDAMENTOS DO MÉTODO

O método é aplicável às redes hidráulicas ramificadas, de traçado conhecido, em que há uma única fonte de suprimento (seção de entrada da rede) e em que são dadas as demandas nas seções de saída da rede e, conseqüentemente, são facilmente obtidas as vazões em cada um de seus trechos. A adução pode ter lugar por recalque ou por gravidade a partir da fonte de suprimento.

Considere-se, então, uma rede formada por l trechos enumerados por $i = 1, 2, \dots, l$. Cada um desses trechos i pode ser dividido em J_i seções (sub-trechos) enumerados por $j = 1, 2, \dots, J_i$. Para cada uma das seções j do trecho i , de comprimento L_{ij} a determinar e onde a

vazão é $Q_i = Q_{ij}$, atribui-se um diâmetro D_{ij} e calcula-se a perda de carga distribuída unitária h_{ij} por qualquer fórmula de perda de carga. Com estes elementos, as seguintes equações podem ser escritas:

a) Os comprimentos L_{ij} , são tais que:

$$L_{ij} \geq 0$$

b) Para cada trecho i , a soma dos comprimentos das diversas seções em que o trecho foi subdividido, é igual ao comprimento total do referido trecho:

$$\sum_{j=1}^{J_i} L_{ij} = L_i \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (2)$$

c) A carga piezométrica em cada seção de saída da rede e nas seções em que há necessidade de um mínimo de altura de pressão (por razões técnicas), não pode ser inferior à carga piezométrica exigida nessas seções. Indicando por H_0 a carga manométrica da bomba na seção de entrada da rede e por H_i a carga piezométrica na seção de jusante do trecho i , tem-se pela aplicação da equação de Bernoulli entre as referidas seções:

$$H_i = H_0 - \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^{J_i} h_{ij} L_{ij} \geq H_i \quad (3)$$

onde i' simboliza os trechos que ligam a seção de entrada da rede à seção ex-

(*) Professor Titular da Escola Politécnica da Universidade de S. Paulo. Engenheiro da Consultoria de Estudos Especiais da Companhia de Saneamento Básico do Estado de S. Paulo (SABESP).

trema de juzante do trecho i . Na Eq. 3, o plano horizontal de referência foi suposto, por comodidade, coincidente com o plano da superfície livre no reservatório da secção de entrada da rede.

d) A carga H_i é tal que:

$$H_i \geq 0$$

e) A função custo C , normalmente usada, é a soma do custo inicial da instalação convertido em custo anual C_1 e do custo operacional C_2 :

$$C = C_1 + C_2 \quad (5)$$

onde:

$$C_1 = A \left(C_0'' W + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^{J(i)} C_{ij} L_{ij} \right) \quad (6)$$

$$C_2 = (12 C_0' + 8760 \alpha C_0'') W \quad (7)$$

Nestas expressões: A é o coeficiente de recuperação do capital para um dado número de períodos de tempo e para uma dada taxa de juros; W é a potência transmitida ao conjunto moto-bomba (em KW); C_0'' é o custo unitário do grupo moto-bomba (em Cr/Ww); C_{ij} é o custo unitário da tubulação instalada (incluindo material, mão de obra, benefícios e despesas indiretas), da seção j do trecho i (em Cr/m); C_0' é o custo unitário da demanda de potência (em Cr/KW/mês); α é um coeficiente que caracteriza o tempo de funcionamento do grupo moto bomba (se contínuo, $\alpha = 1$); C_0'' é o custo unitário de energia consumida pelo grupo moto-bomba (em Cr/KWh).

Nas expressões (6) e (7) a potência do grupo moto-bomba deve ser feita igual a zero no caso em que a adução se faz por pravidade e igual a $W = \gamma Q_0 H_0 / \eta$ no caso em que a adução se faz por recalque. Na expressão de W , as variáveis γ e η significam respectivamente o peso específico do líquido e o rendimento do conjunto moto-bomba.

À vista do exposto, o problema admite o seguinte enunciado: determinar as variáveis L_{ij} e H_0 de modo que satisfaçam às Eqs. (1), (2), (3) e (4) e tornem mínima a função custo (5). Este problema pode ser resolvido pela técnica da programa-

ção linear, com o auxílio de um computador digital quando a instalação é de porte razoável.

3. SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO EXTREMO NORTE (SAM-EN)

A Fig. 1 mostra, esquematicamente, o arranjo do SAM-EN. Para os efeitos da análise acima descrita, o arranjo da rede compreende 13 trechos, onde estão indicados os comprimentos, as vazões e as cotas geométricas das secções extremas de juzante. Cada um dos trechos foi subdividido em 4 secções de diâmetros e de custos unitários indicados na Tabela 1. Para os cálculos da perda de carga unitária foi utilizada a fórmula de Hazen-Williams com $C = 120$. Os demais custos unitários foram assumidos iguais a $C_0'' = 160$ Cr/KW, $C_0' = 0,02$ Cr/KWh, e $C_0' = 20$ Cr/KW/mês. O coeficiente de recuperação do capital adotado corresponde a um período de 20 anos e a uma taxa de juros de 10% a.a. O dimensionamento da rede hidráulica foi obtido para a seguinte condição operacional: as demandas (e, portanto, as vazões nos trechos) e as cargas mínimas requeridas nas diversas secções (com exceção da carga \bar{H}_1) são as indicadas na Fig. 1; Estudaram-se três casos de otimização: a carga H_1 , na secção extrema de juzante do trecho 1, foi relacionada à carga requerida na mesma secção, \bar{H}_1 , por: a) $H_1 \geq \bar{H}_1 = 70,0$ m; b) $H_1 = \bar{H}_1 = 85,0$ m; c) $H_1 = \bar{H}_1 = 100,0$ m. Os resultados obtidos para cada um desses casos estão indicados na Tabela 2 e as linhas piezométricas correspondentes foram traçadas na Figura 2. O caso a) revelou-se mais econômico, exigindo, em compensação, um estudo mais detalhado das implicações que as condições de operação, particularmente, em regime transitório, poderiam ter sobre o custo final da instalação. Os custos das soluções b) e c) são majorados com o custo decorrente da caixa de passagem na secção extrema de juzante do trecho 1. Esta caixa torna-se indispensável nestes casos em virtude da fixação da carga H_1 nos valores 85,0 m para o caso b) e 100,0 para o caso c). Entretanto, tais soluções podem oferecer a vantagem de ser operacionalmente mais flexíveis que a solução do caso a).

RESERVATÓRIOS

G = Guaraú
 GN = Brasília Norte
 PN = Piratuba Norte
 P = Peris
 C = Coelras
 FR = Franco da Rocha
 FM = Francisco Morato

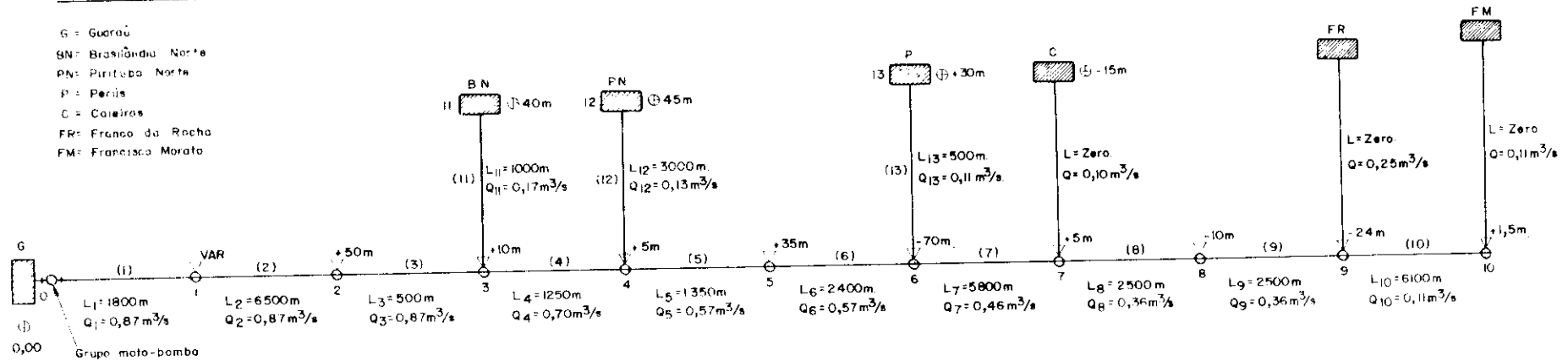


Fig 1 - Traçado esquemático da rede ramificada do Sistema Adutor Metropolitano Extremo Norte

4. RESUMO E CONCLUSÕES

A técnica de «otimização» aqui descrita só é aplicável às redes hidráulicas ramificadas, com vazões conhecidas em todos os seus trechos, mas com uma única fonte de suprimento. É indiferente a essa técnica que o escoamento se realize por gravidade ou por recalque. Onde for aplicável, é uma técnica simples e eficiente, podendo ser utilizada com vantagens em relação aos métodos usuais de cálculo. E do modo como foi apresentado neste artigo, o método pode ser utilizado com proveito para o dimensionamento de instalações diversas (sistemas de irrigação, instalações industriais e prediais, de grande porte) e transporte de outros tipos de fluido (como gás natural e petróleo).

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

- KARMELI D.; GADISH, Y. & MEYERS, S. — «Design of Optimal Water Distribution Systems» Journal of the Pipeline Division, Proceeding of ASCE Outubro de 1968
- CALHOUN, Charles A. — «Optimization of Pipe Systems by Linear Programming» Artigo apresentado em «Control of Flow in Closed Conduits», Colorado State University, Fort Collins Colorado, Agosto de 1970
- DOUGLAS James, L. & R. LEE, Robert — Economics of Water Resources Planning — McGraw Hill — 1971.
- Engineering Systems Analysis of the Primary Water Distribution Network of New York City — Technical Appendix — Vol 1 MIT — Department of Civil Engineering — Cambridge — Massachusetts, Julho de 1969.
- ASSY, Tufi M. — Análise da Elevatória do ABV — Parque do Estado — COMASP — 1973 (Pub Int)

TABELA - 1 DIÂMETROS E CUSTOS UNITÁRIOS ASSUMIDOS PARA O SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO EXTREMO NORTE (SAM EN)

TRECHO Nº	SEÇÃO Nº	Q (m³/s)	D (m)	CUSTOS UNITÁRIOS C _U (Cr/m)
1	1	0,87	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
2	1	0,87	0,6	839,30
	2		0,7	1054,40
	3		0,8	1287,20
	4		0,9	1540,60
3	1	0,87	0,6	839,30
	2		0,7	1054,40
	3		0,8	1287,20
	4		0,9	1540,60
4	1	0,7	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
5	1	0,87	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
6	1	0,57	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
7	1	0,46	0,4	490,80
	2		0,5	650,40
	3		0,6	839,30
	4		0,7	1054,40
8	1	0,56	0,4	490,80
	2		0,5	650,40
	3		0,6	839,30
	4		0,7	1054,40
9	1	0,56	0,4	490,80
	2		0,5	650,40
	3		0,6	839,30
	4		0,7	1054,40
10	1	0,11	0,4	490,80
	2		0,5	650,40
	3		0,6	839,30
	4		0,7	1054,40
11	1	0,17	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
12	1	0,13	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20
13	1	0,11	0,5	650,40
	2		0,6	839,30
	3		0,7	1054,40
	4		0,8	1287,20

TABELA 2 - RESULTADO DA OTIMIZAÇÃO PARA A REDE RAMIFICADA DO SAM - EXTREMO NORTE

CASO	CARGA MANOMÉTRICA (m)	CUSTO ANUAL (Cr/Ano)	VARIÁVEIS DETERMINADAS	TRECHO Nº														
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		
a	165,90	$3,80 \times 10^6$	DIÂMETRO (mm)	700	700	700	600	600	600	600	600	500	500	400	300	300	300	
			COMPRIMENTO (m)	1800	6500	500	1250	1350	2400	5800	2500	2500	6100	1000	3000	500		
			CARGA PIEZOMÉTRICA* (m)	154,099	111,394	-	-	87,886	-	47,798	31,298	14,798	1,5	88,329	60,352	68,202		
b	96,80	$4,07 \times 10^6$	DIÂMETRO (mm)	700	800	800	700	700	700	700	600	600	600	400	300	400	300	300
			COMPRIMENTO (m)	1800	6500	500	1250	1350	2400	3947	1853	2500	2500	6100	1000	2824	176	500
			CARGA PIEZOMÉTRICA* (m)	85	62,705	-	-	51,452	-	28,348	21,573	14,798	1,5	41,20	45,00	39,836		
c	111,83	$3,97 \times 10^6$	DIÂMETRO (mm)	700	800	800	700	700	700	600	600	600	600	400	300	400	300	300
			COMPRIMENTO (m)	1800	6500	500	1250	1350	590	1810	5800	2500	2500	6100	1000	1170	1830	500
			CARGA PIEZOMÉTRICA* (m)	100	77,705	-	-	66,452	-	28,348	21,572	14,797	1,50	56,210	45,00	48,752		

* ENTENDIDA NA SECÇÃO EXTREMA DE JUZANTE DE CADA TRECHO

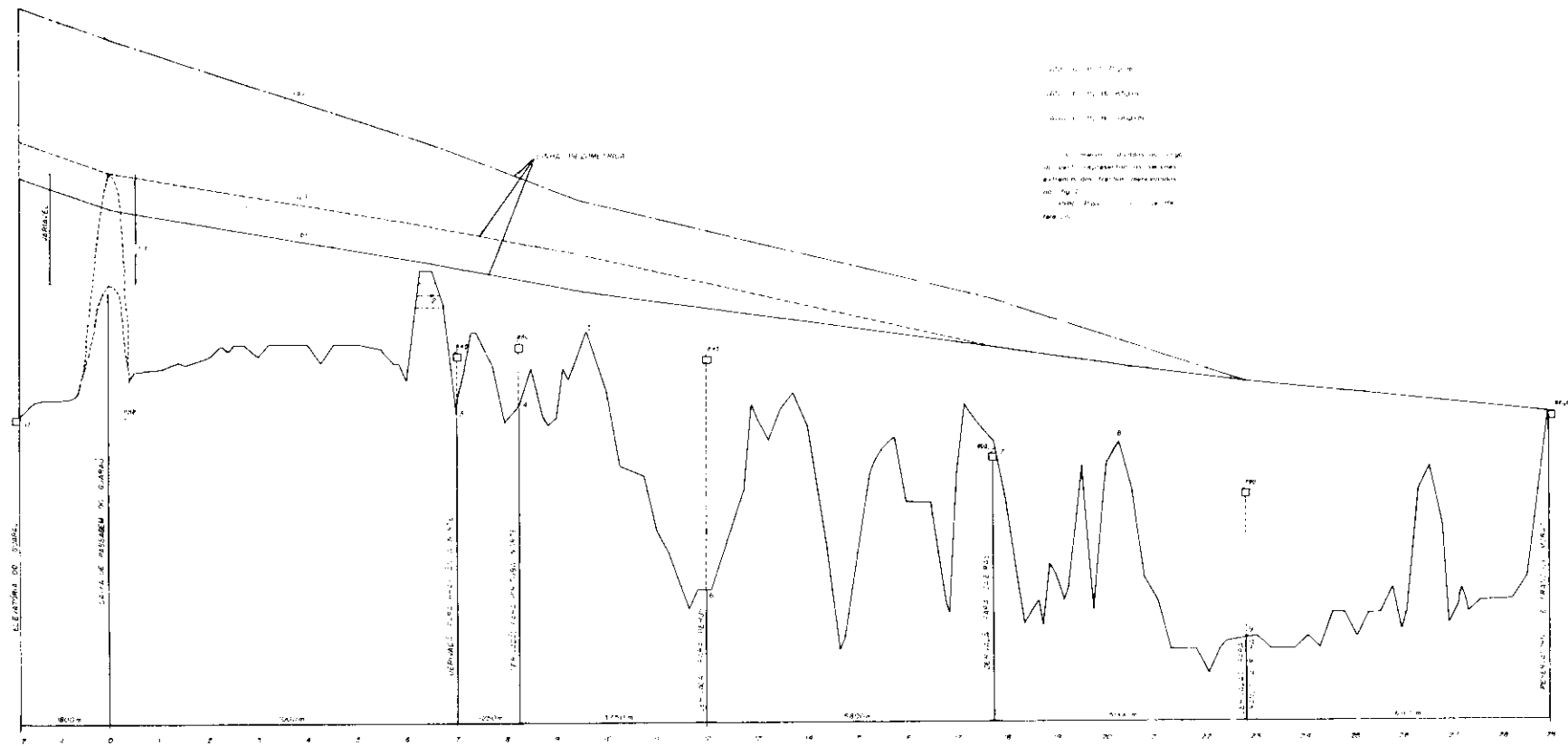


FIG 2 - PERFIL DO SISTEMA ADUTOR METROPOLITANO EXTREMO NORTE