



XI-090 - MÉTODO DE DIMENSIONAMENTO ECONÔMICO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ACOPLADO AO MODELO EPANET

Heber Pimentel Gomes⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela UFPB. Mestre em Hidrologia pela UFPB (1980). Doutor em Hidráulica pela Universidad Politécnica de Madrid (1992). Atualmente é Professor do Centro de Tecnologia da UFPB.

Paulo Sergio Oliveira de Carvalho

Engenheiro Civil pela Universidade Federal da Paraíba – UFPB (1989). Tecnólogo de Nível Superior em Processamento de Dados pela Associação Paraibana de Ensino Renovado – ASPER (2001). Mestre em Engenharia Urbana pela UFPB (2007). Atualmente é Servidor Público Federal; lotado no Departamento de Engenharia Civil do Centro de Tecnologia da UFPB e Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Saulo de Tarso Marques Bezerra

Engenheiro Civil pela UFPB. Mestre em Engenharia Civil e Ambiental na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Doutor em Engenharia Mecânica da UFPB. Atualmente é Professor do Instituto Federal da Paraíba e Pesquisador do LENHS-UFPB.

Moisés Menezes Salvino

Engenheiro Civil pela UFPB (2005). Bacharel em Ciências da Computação pela UFPB (2008). Mestre em Engenharia Mecânica da UFPB (2009). Atualmente é Doutorando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Endereço⁽¹⁾: Rua Jardim Universitário, s/n – Castelo Branco - João Pessoa - PB - CEP: 58051-900 - Brasil - Tel: +55 (83) 3216-7037- e-mail: heberp@uol.com.br

RESUMO

O presente trabalho apresenta um método de dimensionamento econômico de sistemas pressurizados de distribuição de água. A solução ótima obtida minimiza o custo total do sistema: investimento da rede de tubulações mais energia capitalizada do bombeamento. O método de otimização é utilizado, também, em ampliações de redes já existentes. A metodologia desenvolvida compreende um processo dinâmico de cálculo, iterativo, associado a um modelo de simulação hidráulica. O método proposto foi testado em dois sistemas de distribuição de água citados na literatura. Os resultados obtidos demonstraram a exequibilidade do método proposto. O emprego do método é facilitado, devido sua aplicação ser realizada na mesma interface do modelo hidráulico EPANET2.

PALAVRAS-CHAVE: redes de abastecimento, Lenhsnet, otimização econômica, energia.

INTRODUÇÃO

O projeto otimizado de sistemas pressurizados de distribuição de água tem recebido uma atenção especial de engenheiros projetistas e pesquisadores da área de saneamento e afins, devido aos altos custos de implantação e operação destes sistemas. As variáveis determinantes no projeto otimizado de ampliações e concepções de sistemas de distribuição de água são os diâmetros das tubulações dos trechos da rede pressurizada de distribuição e a altura manométrica do sistema de propulsão.

O dimensionamento dos sistemas de distribuição de água é matematicamente indeterminado, admitindo inúmeras soluções. A busca da solução ótima, que minimiza o custo total de implantação e operação do sistema é o objetivo dos modelos matemáticos e hidráulicos desenvolvidos para este fim.

Historicamente, foram propostos vários métodos para o dimensionamento de redes hidráulicas. Os primeiros, denominados clássicos, se restringiam à escolha dos diâmetros da rede que proporcionassem o equilíbrio hidráulico do escoamento permanente nas malhas do sistema de distribuição. No entanto, a busca do custo mínimo do sistema de abastecimento é um problema de otimização, que vem sendo pesquisado por inúmeros profissionais há vários anos.

Na década de 70, com a consolidação do uso dos microcomputadores, tornou-se possível o desenvolvimento de técnicas matemáticas voltadas para o dimensionamento de redes hidráulicas, surgindo os primeiros métodos



de otimização baseados nos modelos matemáticos de programação linear (KARMELI et al., 1968), programação não linear (JACOBY, 1968) e programação dinâmica (KALLY, 1969).

No final da década de 90 surgiu, também, o emprego do Algoritmo Genético ou Evolucionário (AG) para o dimensionamento de redes pressurizadas. Podem-se destacar os trabalhos desenvolvidos por LANSEY e MAYS (1989); EIGER et al. (1994); SAVIC e WALTERS (1997); LIONG e ATIQUZZAMAN (2004); PRASAD e NAM-SIK (2004); ARAÚJO et al. (2006); JIMENEZ et al. (2007).

Mais recentemente, alguns pesquisadores têm empregados métodos baseados na organização e/ou evolução de determinadas espécies de seres vivos. EUSUFF e LANSEY (2003) propuseram o Shuffled Frog-Leaping Algorithm (SFLA), um algoritmo meta-heurístico baseado na evolução de rãs. MAIER et al. (2003) e ZECCHIN et al. (2006) utilizaram uma nova técnica chamada Ant Colony Optimisation (ACO), que é baseada na analogia do comportamento de uma colônia de formigas, bem como a sua capacidade para determinar o trajeto mais curto entre o seu ninho e uma fonte de alimentação. Estes métodos apresentaram bons resultados, porém, assim como o AG, requerem um tempo computacional muito elevado. CUI e KUCZERA (2003) destacaram o problema do tempo computacional e propuseram que estas análises sejam manuseadas por super computadores ou por computação paralela.

Apesar da existência de vários métodos de otimização na literatura, as técnicas mais utilizadas no dimensionamento da grande maioria das redes implantadas no Brasil e no mundo são, ainda, baseadas em análises de tentativa e erro; isso ocorre porque a maioria dos modelos de dimensionamento otimizado é de difícil acesso e aplicabilidade pelo usuário. JIMENEZ et al. (2007) afirmam que a otimização de redes hidráulicas ainda não é usual na engenharia e o surgimento de programas com interfaces amigáveis está apenas começando.

O objetivo do presente trabalho é o desenvolvimento de um modelo de otimização, denominado aqui de Lenhsnet, que busca alcançar a solução ótima de uma rede pressurizada de distribuição de água sob o controle das variáveis de estado (pressão e velocidade da água), juntamente com seu sistema de bombeamento. O algoritmo do modelo se baseia numa programação dinâmica iterativa, onde se obtém, em cada iteração, uma solução ótima parcial, em função dos custos das tubulações e da energia necessária para o bombeamento do sistema. O método proporciona, como resposta ao dimensionamento, os diâmetros dos trechos da rede e a altura manométrica de bombeamento, de forma a encontrar o custo mínimo total do sistema (custo de implantação mais custo energético).

METODOLOGIA

O processo iterativo do método parte de uma solução inicial, de contorno, onde a rede de distribuição é composta, pelos diâmetros mínimos admitidos para o projeto. Esta solução inicial possui o custo mínimo de implantação da rede, já que é composta pelos diâmetros mínimos atribuídos. No entanto, esta solução não é uma alternativa factível, na prática, pois ela proporciona perdas de carga excessivas nos trechos da rede, acarretando uma elevada altura manométrica na cabeceira de origem do sistema.

A partir da solução inicial da metodologia proposta, o processo de cálculo se desenvolve, iterativamente, de maneira que cada solução subsequente, a ser obtida, dependerá da solução anterior. As soluções subseqüentes serão obtidas, aumentando-se os diâmetros de cada trecho da rede, de forma que o acréscimo de custo da rede seja o mínimo possível. O processo iterativo termina quando a configuração dos diâmetros da rede atende às restrições impostas no projeto (velocidade máxima, velocidade mínima, pressão máxima, pressão mínima e/ou cota de cabeceira admitida).

O algoritmo do método é associado a um simulador hidráulico, que fornecerá a cada iteração, o equilíbrio hidráulico do sistema e os valores das variáveis de estado do escoamento do fluxo d'água na rede (vazões, velocidades, perdas de carga e pressões). O simulador escolhido foi o Epanet2 (ROSSMAN, 2008). A Figura 1 mostra o menu principal, do método Lenhsnet, associado ao Epanet2.

Com a solução inicial estabelecida efetua-se a simulação de escoamento na rede para a obtenção das pressões em todos os nós. Uma vez detectado o nó mais desfavorável, inicia-se o processo de cálculo otimizado. Em cada iteração, testar-se-ão as várias configurações de diâmetros sob o controle das variáveis de estado. A mudança efetiva do diâmetro, em uma iteração, será definida em função do menor acréscimo de custo da rede em relação ao alívio de pressão proporcionado à rede e dentro dos limites pré-estabelecidos. O trecho que terá



confirmada a sua modificação será o que proporcionar o menor gradiente de custo. O gradiente de custo (G_c) relativo a um determinado trecho da rede é dado pela equação (1). Ele representa o custo marginal do acréscimo de pressão no nó mais desfavorável, proporcionado pela troca do diâmetro do trecho da rede pelo seu adjacente superior.

$$G_c = \frac{P_2 - P_1}{\Delta p} \quad \text{equação (1)}$$

onde G_c é o gradiente de custo, em unidades monetárias por metro de alívio de perda de carga (em \$/m); P_1 é o custo da tubulação do trecho com o seu diâmetro atual (em \$); P_2 é o custo da tubulação do trecho com o diâmetro imediatamente superior ao atual (em \$); Δp é o ganho de pressão, no nó mais desfavorável, em mca. Em cada iteração haverá “n” gradientes de pressão, correspondentes às “n” configurações de mudanças de diâmetros dos “n” trechos da rede; o gradiente de custo ótimo (G_c^*) será o menor entre todos os calculados e dentro dos limites pré-estabelecidos. O trecho correspondente ao G_c^* será chamado de trecho ótimo (t^*). O trecho ótimo assumirá uma nova configuração, onde o diâmetro será o seu imediatamente superior (testado). Esta última configuração será a configuração de partida para a iteração seguinte. O processo iterativo de otimização segue a metodologia antes mencionada até atingir a solução ótima buscada.

O método trabalha com duas alternativas de dimensionamento. Na primeira, a rede é abastecida por uma cota piezométrica na cabeceira fixa e conhecida. Neste caso, o custo do sistema corresponderá ao custo fixo de implantação da rede hidráulica. Na segunda alternativa, a água é bombeada diretamente para o sistema ou para um reservatório elevado, através de bombeamento e o custo total do sistema será composto pelo custo da rede de tubulações mais o custo energético, atualizado, da estação elevatória. Neste último caso a cota na cabeceira será uma variável de decisão a mais no processo de otimização.

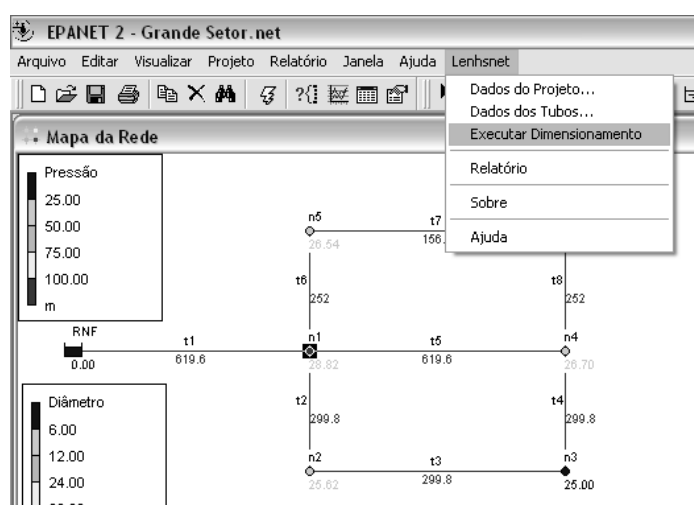


Figura 1: Tela principal do simulador Epanet com o Lenhsnet.

Cota de cabeceira fixa na origem

Na primeira alternativa, a condição de parada das iterações ocorrerá quando a pressão em algum nó da rede atingir o valor mínimo admitido. O custo total do sistema de distribuição (função objetivo), que compreende o custo de implantação da rede, pode ser expresso pela equação (2).

$$C(D_i, Q_i) = \sum_{i=1}^m L_i \times P(D_i) \quad \text{equação (2)}$$

onde “ $C(D_i, Q_i)$ ” é o custo da rede hidráulica; “ L_i ” é o comprimento do trecho “i”; “ $P(D_i)$ ” é o preço unitário do tubo do trecho “i” com o diâmetro “ D_i ”; e “ m ” é o número de trechos.

Cota de cabeceira variável na origem

No dimensionamento do sistema, em que a rede é pressurizada através de uma estação elevatória, o método leva em conta o custo da energia de bombeamento ao longo da vida útil do projeto. A função objetivo que representa o custo total do sistema de distribuição compreende o custo de implantação da rede mais o custo atualizado de energia da estação de bombeamento (equação 3).

$$C(D_i, Q_i, H) = \sum_{i=1}^m L_i \times P(D_i) + Ce \times H \times FVP \quad \text{equação (3)}$$

onde “Ce” é o custo de operação da estação de bombeamento por unidade de altura manométrica (equação 4); “H” é a altura manométrica de bombeamento; e “FVP” é o fator de valor presente (equação 5).

$$Ce = \frac{9,81 \times Q}{\eta} \times T \times nb \quad \text{equação (4)}$$

onde Q é a vazão em m³/s, T é a tarifa relativa ao consumo de energia elétrica, em R\$/kWh; e nb é o número de horas de bombeamento por ano. O fator de valor presente para o alcance do projeto (“t” anos), que efetua a conversão de uma série de custos anuais para um valor presente, sujeito a uma taxa de juros “i” e de um aumento de energia “e”, é dado pela equação 5.

$$FVP = \left[\frac{(1+e)^t - (1+i)^t}{(1+e) - (1+i)} \right] \times \left[\frac{1}{(1+i)^t} \right] \quad \text{equação (5)}$$

O processo de otimização do dimensionamento leva em consideração o custo energético através da grandeza denominada gradiente energético (Ge). O Ge representa o custo, atualizado, de pressurização da água, por metro de elevação, e é dado pela equação 6.

$$Ge = Ce \times FVP \quad \text{equação (6)}$$

Analogamente ao procedimento anterior, executa-se o processo iterativo, obedecendo a metodologia antes descrita, com a diferença de que ao final de cada iteração do processo, compara-se o Gc* com o Ge calculado. Caso o Gc* seja inferior ao Ge, o custo de investimento para diminuir as perdas de energia na rede de tubulações - e consequentemente aumentar a pressão no nó mais desfavorável - será inferior ao custo energético para aumentar a carga na rede. O processo iterativo seguirá aumentando os diâmetros dos trechos até que o valor do Gc* supere o valor do Ge e enquanto todos os limites sejam alcançados. Com a obtenção desta última solução, determina-se a altura manométrica, de modo que a pressão mínima do sistema seja igual à pressão mínima requerida. A metodologia é sintetizada no fluxograma apresentado na figura 2.

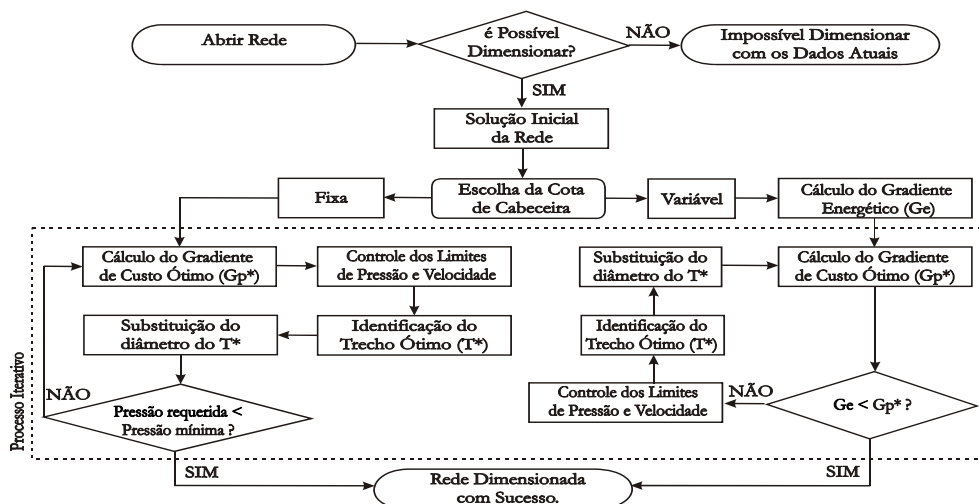


Figura 2: Fluxograma do método Lenhsnet



APLICAÇÕES E RESULTADOS

O método desenvolvido foi aplicado no dimensionamento otimizado do sistema de distribuição de água da Cidade de Hanoi (FUJIWARA e KHANG, 1990) e do Grande Anel apresentado por Gomes (2004), mostrados em seguida.

Exemplo 1 - Rede Hanoi

O sistema de distribuição de água da cidade de Hanoi (Vietnã) é composta por três anéis, trinta e quatro trechos, trinta e um nós e um reservatório de nível fixo (ver figura 3). Essa rede foi utilizada originalmente por Fujiwara e Khang (1990), sendo utilizada, posteriormente, por diversos autores (CUNHA e SOUSA, 1999; WU e BOULOS, 2001; EUSUFF e LANSEY, 2003; LIONG e ATIQUZZAMAN, 2004; SURIBABU e NEELAKANTAN, 2006; ZECCHIN et al., 2006). Os dados do sistema e os custos das tubulações estão apresentados na tabela 1. A cota piezométrica de cabeceira é de 100 mca e a pressão mínima admitida para os nós da rede é de 30 mca.

A equação utilizada para a perda de carga, foi a fórmula de Hazen-Williams (equação 7), assumindo o valor de α igual à 10,6792 (valor default do Epanet2) e o coeficiente de rugosidade C igual a 130.

$$H_L = \frac{\alpha L Q^{1,852}}{C^{1,852} D^{4,871}} \quad (7)$$

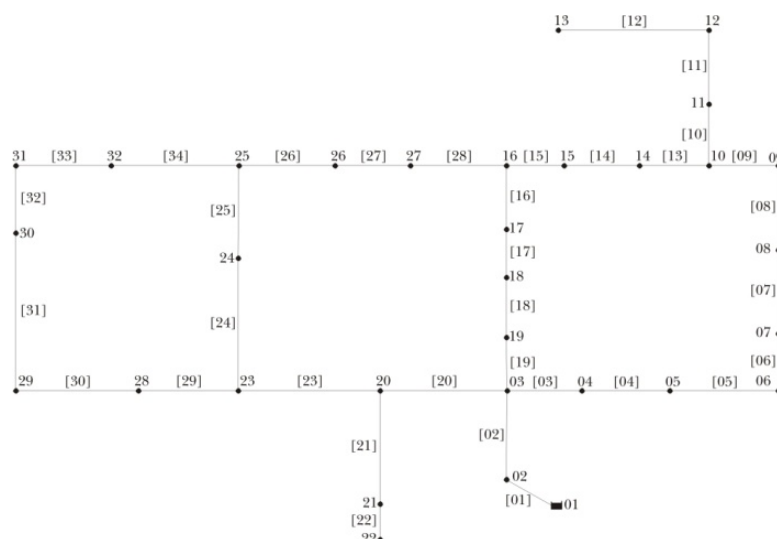


Figura 3: Traçado da Rede Hanoi


Tabela 1 - Dados da rede Hanoi e custo das tubulações.

Nó	Demanda (m³/h)	Trecho	Comp. (m)	Custo das Tubulações	
				Diâmetro (mm)	Custo de implantação (\$)
01	-	[01]	100	304,8	45,73
02	890	[02]	1.350	406,4	70,40
03	850	[03]	900	508,0	98,38
04	130	[04]	1.150	609,6	129,30
05	725	[05]	1.450	762,0	180,80
06	1.005	[06]	450	1016,0	278,30
07	1.350	[07]	850	1.231,2 ^A	375,27 ^B
08	550	[08]	850	1.435,4 ^A	477,76 ^B
09	525	[09]	800	1.537,0 ^A	532,76 ^B
10	525	[10]	950	1.638,6 ^A	590,42 ^B
11	500	[11]	1.200		
12	560	[12]	3.500		
13	940	[13]	800		
14	615	[14]	500		
15	280	[15]	550		
16	310	[16]	2.730		
17	865	[17]	1.750		
18	1.345	[18]	800		
19	60	[19]	400		
20	1.275	[20]	2.200		
21	930	[21]	1.500		
22	485	[22]	500		
23	1.045	[23]	2.650		
24	820	[24]	1.230		
25	170	[25]	1.300		
26	900	[26]	850		
27	370	[27]	300		
28	290	[28]	750		
29	360	[29]	1.500		
30	360	[30]	2.000		
31	105	[31]	1.600		
32	805	[32]	150		
		[33]	860		
		[34]	950		

^A Diâmetros dos tubos de ferro dúctil classe K7.

^B Valores encontrados, utilizando a ferramenta Curva de Tendência da planilha Excel®.

Para o dimensionamento do sistema foram consideradas duas situações. Na primeira foram acrescentados diâmetros maiores para atender à restrição de velocidade máxima imposta, enquanto na segunda o dimensionamento foi executado apenas com os diâmetros disponibilizados originalmente por Fujiwara e Khang (1990). Com a execução deste exemplo, através do modelo proposto, se obtiveram os dados do dimensionamento ótimo da rede, que estão mostrados na tabela 2. Nesta tabela são apresentados, também, nas colunas A, B e C, os resultados do mesmo dimensionamento, efetuado através de outros modelos citados na literatura. A tabela 3 fornece as pressões e os custos para o Lenhsnet e outras soluções citadas na literatura.



Tabela 2 - Soluções da Rede Hanoi – Diâmetros (mm).

Trecho	Autor ¹				
	LENHSNET	A	B	C	
[01]	1638,6	1016	1016	1016	1016
[02]	1638,6	1016	1016	1016	1016
[03]	1016	1016	1016	1016	1016
[04]	1016	1016	1016	1016	1016
[05]	1016	1016	1016	1016	1016
[06]	1537	1016	1016	1016	1016
[07]	762	1016	1016	1016	1016
[08]	762	1016	1016	762	1016
[09]	762	1016	1016	762	1016
[10]	609,6	762	762	762	762
[11]	609,6	762	762	762	609,6
[12]	508	609,6	609,6	609,6	609,6
[13]	508	609,6	406,4	406,4	508
[14]	406,4	609,6	406,4	304,8	406,4
[15]	406,4	609,6	304,8	304,8	304,8
[16]	304,8	304,8	406,4	609,6	304,8
[17]	406,4	406,4	508	762	406,4
[18]	508	609,6	609,6	762	609,6
[19]	1016	609,6	609,6	762	609,6
[20]	1016	1016	1016	1016	1016
[21]	406,4	508	508	508	508
[22]	304,8	406,4	304,8	304,8	304,8
[23]	762	1016	1016	762	1016
[24]	609,6	762	762	762	762
[25]	508	609,6	762	609,6	762
[26]	406,4	508	508	304,8	508
[27]	406,4	508	304,8	508	304,8
[28]	406,4	609,6	304,8	609,6	304,8
[29]	406,4	406,4	406,4	406,4	406,4
[30]	304,8	406,4	406,4	406,4	304,8
[31]	304,8	304,8	304,8	304,8	304,8
[32]	304,8	406,4	304,8	406,4	406,4
[33]	406,4	406,4	406,4	508	406,4
[34]	508	609,6	508	609,6	609,6
Custo²	5,81	6,33	6,18	6,22	6,09

¹ A - Wu e Boulos (2001); B - Liong e Atiquzzaman (2004); C - Suribabu e Neelakantan (2006).

² Custo total em milhões.

Utilizando apenas os diâmetros disponibilizados originalmente por Fujiwara e Khang (1990), a solução apresentada Cunha e Sousa (1999) foi a de mínimo custo (\$ 6,06 milhões), porém, as pressões foram inferiores a 30 mca em 6 nós da rede, quando simulado através do Epanet2. Suribabu e Neelakantan (2006) encontraram a solução de mínimo custo para α igual à 10,6792 (valor default Epanet2). No entanto, o Lenhsnet se apresenta como uma alternativa prática de cálculo de redes hidráulicas, já que sua interface de entrada de dados é acoplada ao Epanet2 e possui um baixo tempo de processamento dos cálculos. O tempo de processamento foi aproximadamente 32 segundos, utilizando um computador Core 2 Duo de 1.7 GHz e 2 GB de memória RAM.



Tabela 3: Resultados do dimensionamento da Rede Hanoi – Pressões (mca) obtidas pelo Epanet2.

Nó	Autor ¹					
	D ²	E ²	B	F	Lenhsnet	
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	97,14	97,14	97,14	97,14	97,14	99,72
3	61,63	61,67	61,67	61,67	61,67	96,26
4	56,82	56,88	57,54	57,08	56,53	91,08
5	50,86	50,94	52,43	51,38	50,14	84,63
6	44,57	44,68	47,13	45,40	43,36	77,78
7	43,10	43,21	45,92	44,01	41,74	77,56
8	41,33	41,45	44,55	42,36	39,76	69,41
9	39,91	40,04	40,27	41,06	38,16	62,78
10	38,86	39,00	37,24	40,11	36,95	57,79
11	37,30	37,44	35,68	38,55	35,39	53,16
12	33,87	34,01	34,52	35,12	34,23	49,73
13	29,66	29,80	30,32	30,91	30,03	39,51
14	34,94	35,13	34,08	37,21	34,52	51,61
15	32,88	33,14	34,08	32,89	33,93	46,98
16	29,79	30,23	36,13	32,16	33,59	44,26
17	29,95	30,32	48,64	41,36	36,46	57,79
18	43,81	43,97	54,00	48,55	53,66	81,31
19	55,49	55,57	59,07	54,33	58,92	96,00
20	50,43	50,44	53,62	50,61	51,56	86,72
21	41,07	41,09	44,27	41,26	42,21	58,99
22	35,90	35,93	39,11	36,10	40,94	53,83
23	44,24	44,21	38,79	44,53	46,27	67,07
24	38,50	38,90	36,37	39,39	42,14	56,60
25	34,79	35,55	33,16	36,18	35,09	42,82
26	30,87	31,53	33,44	32,55	33,31	40,00
27	29,59	30,11	34,38	31,61	33,33	40,40
28	38,60	35,50	32,64	35,90	37,63	58,18
29	29,64	30,75	30,05	31,23	32,95	38,28
30	29,90	29,73	30,10	30,29	32,00	37,13
31	30,18	30,19	30,35	30,77	32,12	37,56
32	32,64	31,44	31,09	32,04	33,39	38,76
Vel. máx. (m/s)	6,83	6,83	6,83	6,83	6,83	3,48
Custo³	6,062	6,072	6,22	6,13	6,33	5,81

¹B - Liong e Atiquzzaman(2004); D - Cunha e Sousa(1999); E - Eusuff e Lansey(2003); F - Zecchin et al.(2006).

² Cunha e Sousa (1999) utilizou um valor de α (equação 7) igual a 10,51 e Eusuff e Lansey (2003) igual a 10,67.

³ Custo total em milhões.

Como os diâmetros disponibilizados originalmente se mostraram insuficientes para atender à restrição de velocidade máxima, foram acrescentados à série original novos diâmetros (1231,2 a 1638,6 mm), aumentando o campo de busca de possibilidades de 634 ($2,87 \times 10^{26}$) para 10^{34} alternativas. O custo total obtido foi de \$ 5,806 milhões, inferior aos demais custos dos demais trabalhos citados na literatura (ver tabelas 2 e 3). A tabela 4 apresenta os custos totais para as soluções obtidas.

Tabela 4: Soluções para a rede Hanoi modificada.

Solução	Velocidade Máxima (m/s)	Custo (milhões de \$)
1	4,65	5,439
2	4,44	5,444
3	3,65	5,618
4	4,84	5,679
5-final	3,48	5,807



Exemplo 2 - Grande Setor (Gomes, 2004)

Este exemplo consiste em projetar o sistema de distribuição de água de do Grande Setor do bairro do Bessa (João Pessoa, Brasil), que foi modelado originalmente por Gomes (2004). Pretende-se dimensionar, com o menor custo possível, os trechos da rede e a altura do reservatório elevado, considerando-se os preços de implantação das tubulações e o custo de energético do conjunto motor-bomba, que impulsionará a água para o reservatório. O nível da água de captação (poço de sucção) está na cota 30 metros. A tabela 5 apresenta os dados da rede. A pressão mínima requerida nos nós é de 25 mca, e as velocidades máximas e mínimas admitidas são de 3,0 m/s e 0,2 m/s, respectivamente. Na figura 4 encontram-se a numeração dos nós e dos trechos da rede. A tabela 6 fornece os diâmetros disponíveis, o material, os coeficientes de rugosidade “C” (Hazen-Williams) e os preços unitários de implantação dos tubos.

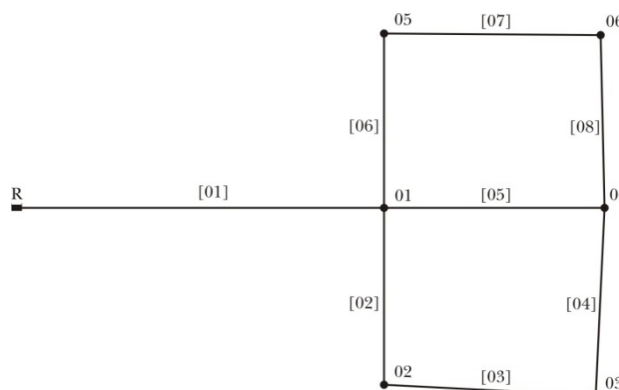


Figura 4: Configuração da rede Grande Setor.

Os custos e regime do bombeamento são: número de horas de bombeamento diário = 20, rendimento do conjunto motor-bomba = 75%, alcance do projeto = 20 anos, taxa de juro anual = 12%, taxa de aumento anual da energia = 6%, custo do kWh (incluindo a tarifa de demanda) = R\$ 0,20.

Tabela 5: Dados do Grande Setor (GOMES, 2004).

Dados dos nós			Dados dos trechos	
Nó	Vazão (l/s)	Cota (m)	Trecho	Comp. (m)
1	0,00	6,0	[01]	2.540
2	47,78	5,5	[02]	1.230
3	80,32	5,5	[03]	1.430
4	208,60	6,0	[04]	1.300
5	43,44	4,5	[05]	1.490
6	40,29	4,0	[06]	1.210
Total	420,43		[07]	1.460
			[08]	1.190

Tabela 6: Dados das tubulações disponíveis.

DN	Diam. (mm)	Material do tubo	Coef. “C”	Custo (R\$/m)
100	108,4	PVC	145	47,09
150	156,4	“	145	63,80
200	204,2	“	145	87,62
250	252,0	“	145	118,59
300	299,8	“	145	152,24
350	366,2	FoFo	130	317,86
400	416,4	“	130	375,00
450	466,6	“	130	436,23
500	518,0	“	130	515,60
600	619,6	“	130	640,30



Com base nos dados fornecidos, calcula-se, através da equação 6, o valor do gradiente energético (G_e), que é igual à \$ 89.324,72. O processo iterativo de cálculo se dá aumentando os diâmetros dos trechos e baixando a cota piezométrica de alimentação, até se alcançar a solução que proporcione o custo mínimo do sistema (intervenções físicas e energia elétrica) e obedecer os limites de velocidades máxima e mínima, e pressão mínima.

Estabelecida a condição de parada, o método calcula a cota piezométrica final para a cabeceira, que foi de 13,35 m. Multiplicando-se a cota manométrica pelo G_e , determina-se o custo atualizado da energia elétrica do Grande Setor: \$ 1.192.399,31. O custo de investimento das tubulações é de \$ 3.375.240,40. Por conseguinte e o custo total do sistema de distribuição de água é \$ 4.566.921,71.

Os resultados do dimensionamento são apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7: Soluções do Dimensionamento do Grande Setor - Diâmetros (mm) dos trechos.

Trecho	LENHSNET	PNL2000
[01]	619,6	619,6
[02]	299,8	416,4
[03]	299,8	416,4
[04]	299,8	299,8
[05]	518,0	299,8
[06]	252,0	416,4
[07]	156,4	299,8
[08]	252,0	299,8

Tabela 8: Resultados do Dimensionamento do Grande Setor - Pressões dos nós (mca).

Nó	LENHSNET	PNL2000 ^A
1	30,53	34,72
2	26,22	30,53
3	25,00	27,46
4	25,93	25,00
5	27,61	33,70
6	26,19	28,45

^A Foi utilizado um valor de α (equação. 7) igual a 10,66, diferente do Epanet2.

Comparando os resultados obtidos, para o dimensionamento da rede, pelo Lenhsnet com o método PNL2000 (GOMES e FORMIGA, 2001), conclui-se que o modelo proposto obteve um resultado mais vantajoso em termos econômicos, reduzindo o valor do custo total da rede em 16,54% (ver tabela 9).

Tabela 9: Custos dos Métodos PNL2000 e LENHSNET.

Componente	PNL2000	LENHSNET
Tubulações	3.905.797,60	3.375.240,40
Energia	1.566.782,30	1.192.399,31
Custo total (\$)	5.472.579,90	4.567.639,71

CONCLUSÕES

O método apresentado neste trabalho representa uma importante alternativa para o dimensionamento econômico de sistemas de distribuição de água. O método, baseado em um processo dinâmico de programação, permite ao analista acompanhar, através do módulo desenvolvido, diversas alternativas de dimensionamento uma vez que possibilita limitar as variáveis de estado (pressão e velocidade da água) opcionalmente. Neste estudo, o algoritmo de otimização – Lenhsnet, foi aplicado a dois sistemas de distribuição de água, cujos resultados foram comparados aos obtidos através de outros modelos, que utilizaram diferentes técnicas de otimização (ACO, GA, SFLA, programação não-linear). O trabalho mostrou que o Lenhsnet apresentou custos totais otimizados, na maioria dos casos, inferiores aos dos estudos citados na literatura. O tempo de processamento computacional requerido pelo método é reduzido e a interface de inclusão e obtenção dos resultados é facilitado porque o método funciona no ambiente do programa Epanet2.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. ARAUJO, L.S.; RAMOS, H.; COELHO, S.T. Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Journal Water Resources Management*, v.20, n.1, p. 133-149, 2006.
2. CUI, L.; KUCZERA, G. Optimizing urban water supply headworks using probabilistic search methods. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.129, n.5, p. 380-387, 2003.
3. CUNHA, M.D.C.; SOUSA, J. Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.125, n.4, p. 215-221, 1999.
4. EIGER, G.; SHAMIR, U.; BEN-TAL A. Optimal design of water distribution networks. *Water Resources Research*, v.30, n.9, p. 2637-2646, 1994.
5. EUSUFF, M.M.; LANSEY, K.E., Optimization of Water Distribution Network Design Using the Shuffled Frog Leaping Algorithm. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.129, n.3, p. 210-225, 2003.
6. FUJIWARA, O., KHANG, D.B. A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resources Research*, v.26, n.4, p. 539-549, 1990.
7. GOMES, H. Sistemas de abastecimento de água - Dimensionamento econômico. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária / UFPB, 2004, 242.
8. GOMES, H., FORMIGA, K.T.M. PNL2000: Método prático de dimensionamento econômico de água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Porto Alegre: ABRH, v. 6, n. 4, p. 91-108, 2001.
9. JACOBY, S. Design of optimal hydraulic networks. *Journal of Hydraulic Division*, ASCE, 94, KY3, p. 641-661. 1968.
10. JIMÉNEZ M., M.R.; RODRÍGUEZ, K.; FUENTES M., O.A.; DE LUNA C., F. Diseño óptimo de redes utilizando um algoritmo genético. In: GOMES, H.; GARCIA, R.; REY, L.I. (Org.). *Abastecimento de Água - O Estado da Arte e Técnicas Avançadas*. 1 ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB, 2007, único.
11. KALLY, E. Automatic planning of the least-cost water distribution network. *War. and War. Engng.* 148-152, 1968.
12. KARMELI, D.; GADISH, Y.; MEYERS, S. Design of optimal water distribution networks. *Journal of Pipeline Division*, ASCE, 94, 10, 1-10. New York, NY, USA, 1968.
13. LANSEY, K.E.; MAY, L.W. Optimization model for water distribution system design. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 115, 10, 1401-1419, 1989.
14. LIONG, S.Y.; ATIKUZZAMAN, M. Optimal design of water distribution network using shuffled complex evolution. *J. Institution Engineers*, Singapore, v.44, p. 93-107, 2004.
15. MAIER, H.R.; SIMPSON, A.R.; ZECCHIN, A.C.; FOONG, W.K.; PHANG, K.Y.; SEAH, H.Y.; TAN, C.L. Ant Colony Optimization for the design of water distribution systems, *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v.129, n.3, p. 200-209, 2003.
16. PRASAD, T.D.; NAM-SIK. Multiobjective Genetic Algorithms for Design of Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 130, n. 1, p. 73-82, 2004.
17. ROSSMAN, L.A. EPANET2: User's manual. U. S. Environment Protection Agency, Cincinnati, Ohio, USA, 2000.
18. SAVIC, D.A.; WALTERS, G.A. Genetic algorithms for least-cost of water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, v. 123, n. 2, p. 67-77, 1997.
19. SURIBABU, C.R.; NEELAKANTAN, T.R. Design of water distribution networks using particle swarm optimization. *Urban Water J.* v. 3, n. 2, p. 111-120, 2006.
20. WU, Z.Y.; BOULOS, F.; ORR, C.H.; RO, J.J. Using genetic algorithms to rehabilitate distribution system, *Journal for American Water Works Association*, p. 74-85, 2001.
21. ZECCHIN A.C.; SIMPSON A.R.; MAIER H.R.; LEONARD M.; ROBERTS A.J.; BERRISFORD M.J. Application of two ant colony optimisation algorithms to water distribution system optimisation. *Mathematical and Computer Modelling*, v. 44, p. 451-468, 2006.