

DIMENSIONAMENTO OPTIMIZADO DE REDES MALHADAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Joaquim José Oliveira SOUSA¹; Maria da Conceição M. O. CUNHA²

RESUMO

As redes de distribuição de água constituem uma parte importante dos sistemas públicos de abastecimento de água.

Os investimentos públicos, usualmente avultados, necessários para concretizar estes sistemas exigem que as soluções a adoptar sejam aquelas que, cumprindo aspectos regulamentares e de funcionamento hidráulico, correspondem a soluções de custo mínimo.

Nesta comunicação é tratado o problema do dimensionamento optimizado de redes malhadas de distribuição, supondo conhecido o respectivo traçado.

Para a resolução desta questão é aplicado um método de pesquisa aleatória, baseado no processo físico de recozimento simulado ("simulated annealing").

São resolvidos dois casos reais, um relativo ao dimensionamento de uma rede que virá a ser construída (a rede da cidade de Hanoi), e outro relativo à reabilitação de uma rede já existente (a rede da cidade de Nova Iorque). Estes dois exemplos foram escolhidos por se tratar de casos que aparecem recorrentemente na literatura para ilustrar a evolução (melhoria) das soluções encontradas, decorrentes da aplicação de diferentes métodos de resolução. Os resultados obtidos, quando comparados com os que constam da literatura, revelam as capacidades da heurística proposta.

Palavras-Chave: redes malhadas, optimização, algoritmos de recozimento simulado.

¹ Mestre em Hidráulica e Recursos Hídricos. Equiparado a Professor Adjunto - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra - IPC

² Doutora em Engenharia Civil. Professora Coordenadora - Instituto Superior de Engenharia de Coimbra – IPC. Investigadora do IMAR - DEC Universidade de Coimbra.

ISEC- Quinta da Nora - 3000 Coimbra

1- INTRODUÇÃO

As redes de distribuição de água constituem uma parte importante dos sistemas públicos de abastecimento de água.

O bom funcionamento destes sistemas vai depender da criteriosa escolha do seu traçado, da escolha dos materiais adequados, da escolha dos diâmetros e diferentes órgãos e acessórios, e da sua correcta exploração.

Os investimentos públicos, usualmente avultados, necessários para concretizar estes sistemas exigem que as soluções a adoptar sejam aquelas que, cumprindo aspectos regulamentares e de funcionamento hidráulico, correspondem a soluções de custo mínimo.

Nesta comunicação vai ser tratado o problema do dimensionamento optimizado de redes malhadas de distribuição, supondo conhecido o respectivo traçado.

Para a resolução deste problema poderão existir diferentes soluções, que cumprindo as regras estabelecidas e apresentando um correcto funcionamento, dão origem a diferentes custos. A questão está em saber qual a rede que apresenta custo mínimo.

Para a resolução desta questão vai ser usado um método de pesquisa aleatória, baseado no processo físico de recozimento simulado ("simulated annealing").

São resolvidos dois casos reais, um relativo ao dimensionamento de uma rede que virá a ser construída (a rede da cidade de Hanoi), e outro relativo à reabilitação de uma rede já existente (a rede da cidade de Nova Iorque). Estes dois exemplos foram escolhidos, por se tratar de casos que aparecem recorrentemente na literatura, para ilustrar a evolução (melhoria) das soluções encontradas, decorrentes da aplicação de diferentes métodos de resolução.

2 – BREVE SÍNTESE DA LITERATURA

O dimensionamento optimizado de redes de distribuição, ou seja, a determinação da rede a que corresponde o mínimo custo, supondo conhecido o seu traçado, é um problema que tem vindo a ser investigado nos últimos 20 anos. O interesse que despertou reflecte-se no elevado número de contribuições que a literatura da especialidade tem recebido.

As redes malhadas são as que se revestem de maior complexidade. De facto, ao contrário das redes ramificadas, em que o conhecimento dos consumos nos nós implica a definição de caudais em todos troços, nas redes malhadas são várias as alternativas de distribuição de caudais (para os mesmos valores de consumos nos nós) que satisfazem as equações de equilíbrio hidráulico. Importa saber qual a distribuição que dá lugar à rede de custo mínimo.

Várias questões continuam em aberto na investigação realizada neste contexto.

Há as questões relacionadas com a variabilidade dos consumos que se podem verificar ao longo da vida útil da rede, especialmente aqueles que se podem considerar excepcionais (como nas situações em que se deve acorrer a incêndios). As redes malhadas dimensionadas para um único conjunto de solicitações nos nós, se não for imposto um diâmetro mínimo, darão como solução óptima uma rede ramificada (ou seja, haverá condutas de diâmetro igual a zero). Se for imposto um diâmetro mínimo, encontrar-se-á uma rede óptima com troços possuindo esse diâmetro (talvez aqueles troços que, no caso de não se fazer tal imposição, teriam diâmetro igual a zero). As economias de escala levam a que um nó seja abastecido por duas condutas, uma de grande diâmetro e outra de diâmetro mínimo, em detrimento da solução retendo duas condutas de diâmetro médio.

A questão da fiabilidade das redes é, também, uma questão importante. De facto, o colapso de um dos seus elementos altera seguramente o respectivo desempenho. A avaliação

desse desempenho é, portanto, um elemento importante a ter em consideração no momento do dimensionamento.

Os aspectos referidos — variabilidade de consumos e fiabilidade das redes — tem merecido destaque na investigação realizada nos últimos anos [ver MAYS et al., (1989), QUIMPO e SHAMIR, (1991) e SCHNEITER et al., (1996)].

Aspecto também relevante é o da resolução do problema de dimensionamento optimizado em si mesmo, estando apenas em causa uma visão determinística em relação aos consumos e não atendendo a aspectos de fiabilidade. É este o problema tratado nesta comunicação.

A sua formulação realista dá lugar a um modelo decisional (secção 3), com características matemáticas que o tornam de difícil resolução. O facto de se fazer a escolha dos diâmetros a usar entre a gama disponível no mercado, leva à consideração dos diâmetros como variáveis discretas.

Tendo como base a ideia de que a resolução deste problema passa pela determinação da distribuição de caudais que conduz à rede de custo mínimo, [ALPEROVITS e SHAMIR, (1977)] apresentaram uma metodologia em que, através de um processo iterativo era encontrada a distribuição de caudais desejada. Este processo iniciava-se por uma proposta de distribuição de caudais. Os troços da rede eram tomados como estando divididos em segmentos de diferentes diâmetros, cujo comprimento era determinado por um programa linear. Era, assim, obtida a rede de custo mínimo (para os caudais definidos), cumprindo as limitações de pressões nos nós e mantendo a consistência hidráulica (observação das equações de continuidade e conservação de energia). Seguidamente, era alterada a distribuição de caudais proposta, de acordo com o gradiente da função objectivo, sendo realizado novo dimensionamento. O processo iterativo decorria até ser obtida a sua convergência. Este método, dito método do gradiente linear, foi sucessivamente aplicado com algumas variações [QUINDRY et al. (1981), BHAVE e LAM, (1983), FUJIWARA et al., (1987) e EIGER et al., (1994)]. Este procedimento de decomposição do problema em duas fases foi usado por outros autores em relação à fixação de outras variáveis, nomeadamente as pressões nos nós [FUJIWARA e KHANG, (1990) e KESSLER e SHAMIR, (1991)]. Alguns autores facilitaram a resolução usando simuladores hidráulicos externos aos programas de optimização [GESSLER, (1982) e LANSEY e MAYS, (1989)].

[WALSKI, (1985) e GOULTER, (1992)] resumiam uma extensa revisão dos clássicos métodos de optimização aplicados à resolução destes problemas.

Mais recentemente, os desenvolvimentos havidos no domínio da optimização estocástica permitiram pensar a resolução destes mesmos problemas enquanto formulados como programas não-lineares de características combinatorias. Entre os trabalhos onde se recorre algoritmos genéticos podem citar-se: [GOLDBERG e KUO, (1987), HADJI e MURPHY, (1990), MURPHY e SIMPSON, (1992), WALTERS e CEMBROWICZ, (1993), SIMPSON et al., (1994) e SAVIC e WALTERS, (1997). LOGANATHAN, et al., (1995)] apresentam uma resolução usando o método de recozimento simulado (incorporado num processo iterativo idêntico ao proposto em [ALPEROVITS e SHAMIR, (1977)]).

A nossa proposta é a de ser usado um algoritmo de recozimento simulado directamente no problema formulado na secção 3.

O primeiro exemplo de um algoritmo de recozimento simulado é devido a [METROPOLIS *et al.* (1953)] e foi desenvolvido para um problema na área da termodinâmica, que não era explicitamente um problema de optimização. Há pouco mais de dez anos, alguns autores, nomeadamente [KIRKPATRICK *et al.* (1983) e CERNY (1985)] tiveram a ideia inovadora de aplicar os princípios do algoritmo de Metropolis a um problema

combinatório bem conhecido, o do caixeiro viajante, para o qual foram obtidos muito bons resultados.

A ideia básica do algoritmo de recozimento simulado pode ser descrita da forma seguinte: seja o custo de uma configuração corrente, s , de um dado sistema (no caso presente o custo da rede) $c(s)$; pode ser demonstrado [AARTS e KORTS(1989)] que se a transição dessa configuração para uma configuração candidata aleatoriamente escolhida, s' , de custo $c(s')$, for realizada com probabilidade $p = \min\{1, \exp(-Dc/t)\}$, em que $D(c) = c(s) - c(s')$, sendo t um parâmetro, e se t for diminuído de maneira adequada, o sistema convergirá para a configuração de custo globalmente mínimo. Esta propriedade de convergência para uma configuração globalmente ótima deriva do facto de não serem automaticamente excluídas as transições de configurações de baixo custo para configurações de custo elevado; elas poderão ser ou não aceites dependendo da diferença entre os custos e do nível da temperatura t ; inicialmente, mesmo transições muito negativas serão aceites; à medida que a temperatura vai diminuindo a taxa de aceitação será cada vez mais baixa. Verifica-se que esta propriedade de se conseguir "sair" de ótimos locais, permite ultrapassar as dificuldades dos métodos clássicos de optimização na obtenção de ótimos globais.

3 – FORMULAÇÃO DO MODELO

O modelo que se apresenta diz respeito à minimização do custo de uma rede malhada, supondo conhecido o seu traçado:

$$\min_D \sum_{k=1}^{NP} c_k(D_k) L_k \quad (1)$$

s.a.

$$\sum_{i=1}^{NP_{in,n}} Q_i - \sum_{j=1}^{NP_{out,n}} Q_j = S_n, \quad \forall n = 1, \dots, NN \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^{NP_l} \Delta H_k = 0, \quad \forall l = 1, \dots, NL \quad (3)$$

$$\Delta H_k = H_{1,k} - H_{2,k} = w \frac{L_k}{C_k^a D_k^b} Q_k |Q_k|^{a-1}, \quad \forall k = 1, \dots, NP \quad (4)$$

$$H_n \geq H_{nmin}, \quad \forall n = 1, \dots, NN \quad (5)$$

$$D_k \geq D_{min}, \quad \forall k = 1, \dots, NP \quad (6)$$

$$D_k \in \{D\}, \quad \forall K = 1, \dots, NP \quad (7)$$

$c_k(D_k)$: custo da conduta k ; D_k : diâmetro da conduta k ; L_k : comprimento da conduta k ; Q_i : caudal na conduta i ; S_n : caudal solicitado no nó n ; $NP_{in,n}$, $NP_{out,n}$: número de condutas que entram e que saem do nó n , respectivamente; NN : número de nós da rede; DH_k : perda de energia na conduta k ; NP_l : número de condutas da malha l ; NL : número de malhas da rede; C_k : coeficiente da fórmula de Hazen-Williams para a conduta k ; a e b : expoentes da fórmula de

Hazen-Williams; NP : número de condutas da rede; H_n : energia no nó n ; H_{min} : energia mínima no nó n ; D_{min} : diâmetro mínimo; $\{D\}$: conjunto de diâmetros comerciais .

A função objectivo (1) exprime a minimização dos custos das condutas que formam a rede de distribuição.

As restrições (2) exprimem a equação de continuidade nos nós da rede.

As restrições (3) exprimem a equação de conservação de energia nas malhas da rede.

As restrições (4) exprimem a perda de energia em cada da conduta.

As restrições (5) asseguram que a energia em cada nó seja não inferior a H_{min} .

As restrições (6) asseguram que o diâmetro das condutas seja não inferior a D_{min} .

As restrições (7) asseguram que o diâmetro das condutas seja escolhido entre os diâmetros comerciais contidos no conjunto $\{D\}$.

Este modelo não-linear na função objectivo e nas restrições contém variáveis discretas relativas aos diâmetros, o que o torna de natureza combinatoria.

A expressão para a determinação da perda de energia é a expressão de Hazen-Williams.

4 – RESOLUÇÃO E APLICABILIDADE DO MODELO

Para a implementação do algoritmo referido foi desenvolvido um programa em linguagem FORTRAN 77. A primeira fase consistiu na elaboração da subrotina que calcula o equilíbrio hidráulico da rede. De entre as formulações matemáticas possíveis, optou-se por empregar a formulação dos nós, visto permitir facilmente modelar o funcionamento de acessórios como bombas, válvulas, etc. (pensando numa fase posterior do trabalho a realizar). A aplicação desta formulação resulta num sistema de equações não lineares. Para a sua resolução recorreu-se ao método de Gessler [WALSKI et al. (1990)] que, com base numa qualquer estimativa de caudais, transforma o sistema inicial num sistema de equações lineares. Por sua vez, para resolver o sistema de equações lineares, aplicou-se a factorização de Cholesky à matriz dos coeficientes e determinou-se a solução por substituição progressiva seguida de substituição regressiva. Todos estes procedimentos foram implementados tomando partido da simetria e esparsidade da matriz dos coeficientes por forma a otimizar o tempo cálculo. Numa segunda fase elaborou-se o programa que aplica o algoritmo de recozimento simulado e invoca a subrotina anterior cada vez que é necessário calcular o equilíbrio hidráulico de uma rede. Um aspecto que talvez seja importante realçar é o facto de na elaboração do programa se ter procurado simplificar o trabalho de quem o utiliza (limitar os dados necessários ao mínimo e apresentar os resultados de forma explícita e facilmente assimilável) bem como torná-lo o mais versátil possível. Existe uma ideia pré-concebida de que as ferramentas de optimização são algo de complicado, tanto em termos de utilização como no que respeita à informação de que necessitam. No presente caso, tal ideia não tem cabimento, já que a informação que é necessário fornecer ao programa é pedida pelo mesmo e consiste simplesmente na definição da rede a estudar, os diâmetros disponíveis e os respectivos preços unitários. No que respeita aos resultados, para além do equilíbrio hidráulico da rede (cotas piezométricas, pressões, caudais, velocidades, perdas de carga, ...) é fornecido um quadro em que constam as quantidades necessárias de cada diâmetro, o custo associado a esse diâmetro e o custo global da rede.

Concluída a implementação do algoritmo, foi necessário proceder à calibração dos parâmetros da heurística, como a temperatura e o seu modo de arrefecimento (para desenvolvimento deste procedimento ver [CUNHA e SOUSA (1997)]. Para tal, aplicou-se o

algoritmo a problemas publicados na literatura da especialidade, dos quais já se conheciam à partida várias soluções (soluções que variam de autor para autor, de acordo com o método de resolução usado). Assim sendo, observou-se o comportamento do algoritmo desenvolvido, face a diversos conjuntos de parâmetros e compararam-se os resultados obtidos com os já conhecidos. Após efectuar 100 testes a cada problema, acabou por se concluir que se obtinham melhores resultados quando se aplicavam as seguintes regras:

- i) iniciar o processo a uma temperatura relativamente baixa;
- ii) pesquisar a muitas temperaturas efectuando um número relativamente reduzido de avaliações em cada uma;
- iii) considerar um arrefecimento inicial rápido e diminuir a sua cadência à medida que o algoritmo vai prosseguindo.

Procedendo desta forma e tendo como base os resultados obtidos nos testes realizados, pode afirmar-se que em cada problema testado pelo menos em 70 % das vezes o algoritmo encontrou soluções óptimas (iguais ou melhores que as soluções apontadas por outros investigadores) e nas restantes encontrou soluções quase óptimas (diferem menos de 1 % das soluções óptimas).

Para explicitar melhor a potencialidade do algoritmo desenvolvido apresenta-se de seguida a sua aplicação a dois dos problemas testados.

O primeiro problema corresponde ao dimensionamento do sistema de distribuição de água à cidade de Hanoi, representado na Figura 1 [Fujiwara and Khang (1990)]. Este sistema é constituído por trinta e dois nós e trinta e quatro condutas e o objectivo deste estudo consiste em determinar os diâmetros óptimos, por forma a que se consiga fazer face aos consumos com cotas piezométricas superiores a 30 m (valor da pressão mínima já que todos os nós estão situados à cota zero).

A determinação das perdas de carga é efectuada através da fórmula de Hazen Williams adoptando um coeficiente igual a 130 para todas as condutas.

Os dados referentes aos nós e às condutas da rede encontram-se sistematizados no Quadro 1 e no Quadro 2, respectivamente.

Quadro 1
Dados referentes aos nós da rede do Problema 1

Nó	Consumo (m ³ /h)	Nó	Consumo (m ³ /h)	Nó	Consumo (m ³ /h)
1 (Res.)	-19 940	12	560	23	1 045
2	890	13	940	24	820
3	850	14	615	25	170
4	130	15	280	26	900
5	725	16	310	27	370
6	1 005	17	865	28	290
7	1 350	18	1 345	29	360
8	550	19	60	30	360
9	525	20	1 275	31	105
10	525	21	930	32	805
11	500	22	485		

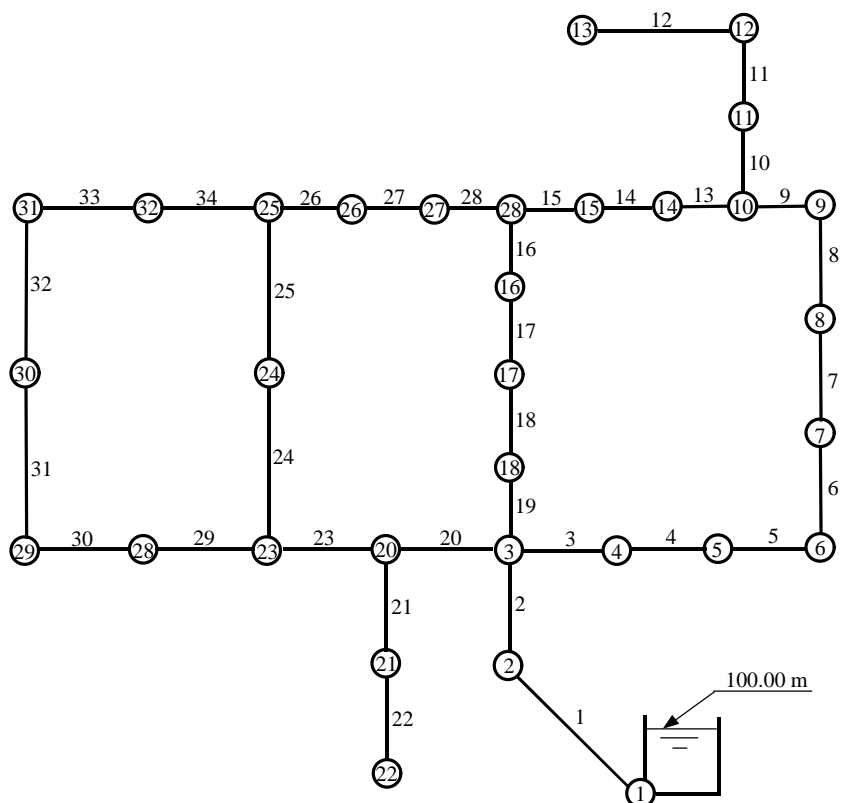


Figura 1 – Esquema da rede de Hanoi (Problema 1)

Quadro 2
Dados referentes às condutas da rede do Problema 1

Conduta	Comprimento (m)	Conduta	Comprimento (m)	Conduta	Comprimento (m)
1	100.00	13	800.00	25	1300.00
2	1350.00	14	500.00	26	850.00
3	900.00	15	550.00	27	300.00
4	1150.00	16	2730.00	28	750.00
5	1450.00	17	1750.00	29	1500.00
6	450.00	18	800.00	30	2000.00
7	850.00	19	400.00	31	1600.00
8	850.00	20	2200.00	32	150.00
9	800.00	21	1500.00	33	860.00
10	950.00	22	500.00	34	950.00
11	1200.00	23	2650.00		
12	3500.00	24	1230.00		

Para o dimensionamento dispõe-se de um conjunto de diâmetros, cujos custos unitários são definidos pela função $C = 1.1 D^{1.5}$ (D em polegadas) e se apresentam no Quadro 3.

Quadro 3
Custos unitários das condutas referentes ao Problema 1

Díâmetro (in.)	Díâmetro (mm)	Custo (unidades/m)
12	304.8	45.726
16	406.4	70.400
20	508.0	98.387
24	609.6	129.333
30	762.0	180.748
40	1016.0	278.280

O algoritmo de recozimento simulado é um algoritmo que usa números aleatórios em algumas das suas fases. Assim, para verificar se a solução varia com a consideração de diferentes números aleatórios e avaliar a eficiência do conjunto de parâmetros adoptados, ordenou-se ao programa que executasse 50 vezes o cálculo deste problema para diferentes conjuntos desses números. Ao analisar os resultados obtidos (mencionados nos quadros por “Simulated Annealing”) verificou-se que a melhor solução encontrada (Quadro 4) apresentava um custo (6.056.370) da mesma ordem de grandeza das melhores soluções encontradas na literatura. Outro pormenor interessante é o facto de nos 50 testes efectuados esta solução ter sido encontrada 40 vezes e de entre as restantes soluções encontradas apenas uma diferia mais de 0.14% desta. Daqui se pode concluir que o conjunto de parâmetros adoptado proporciona bons resultados. No que respeita à geração de números aleatórios verifica-se que apesar de influenciar o processo, não se manifesta importante em termos de resultado final. É importante referir ainda que, em média, o programa levou cerca de 8 minutos e 35 segundos para encontrar cada solução do problema (Pentium 166MHz). Em [SAVIC e WALTERS (1997)], para este mesmo problema, são referenciados tempos de execução de 3 horas num PC 486/DX2 50. Em termos de avaliações, é de salientar que o universo de combinações possíveis era de $6^{34}=2.87 \times 10^{26}$ e o programa efectuou uma média de 59000 avaliações por solução, o que significa que o algoritmo estuda apenas uma ínfima parte do universo das combinações possíveis para achar a solução.

Quadro 4
Solução da rede do Problema 1

Nó	Cota Piezométrica (m)	Conduta	Díâmetro (in.)	Díâmetro (mm)
1 (Reserv.)	100.000	1	40	1016.0
2	97.165	2	40	1016.0
3	61.996	3	40	1016.0
4	57.227	4	40	1016.0
5	51.315	5	40	1016.0
6	45.073	6	40	1016.0
7	43.607	7	40	1016.0
8	41.848	8	40	1016.0
9	40.442	9	40	1016.0
10	39.402	10	30	762.0

11	27.849	11	24	609.6
12	34.434	12	24	609.6
Nó	Cota Piezométrica (m)	Conduta	Diâmetro (in.)	Diâmetro (mm)
13	30.239	13	20	508.0
14	35.490	14	16	406.4
15	33.438	15	12	304.8
16	30.358	16	12	304.8
17	30.513	17	16	406.4
18	44.291	18	20	508.0
19	55.900	19	20	508.0
20	50.887	20	40	1016.0
21	41.576	21	20	508.0
22	36.423	22	12	304.8
23	44.733	23	40	1016.0
24	39.030	24	30	762.0
25	35.344	25	30	762.0
26	31.442	26	20	508.0
27	30.154	27	12	304.8
28	39.118	28	12	304.8
29	30.206	29	16	406.4
30	30.468	30	12	304.8
31	30.749	31	12	304.8
32	33.204	32	16	406.4
		33	16	406.4
		34	24	609.6

Para que se faça um melhor juízo da solução encontrada apresenta-se no Quadro 5 uma comparação desta solução com as soluções de outros investigadores. Na literatura encontram-se vários trabalhos que consideram os diâmetros das condutas como variáveis contínuas, no entanto, neste quadro apenas se incluíram soluções que utilizam diâmetros comerciais (soluções que poderiam ser postas em prática).

Quadro 5
Custos de diferentes soluções para a rede do Problema 1

Autores	Custo (milhões)	Tipo de solução
Fujiwara and Khang (1991)	6.319	Diâmetros combinados
Sonak and Bhave (1993)	6.045	Diâmetros combinados
Eiger et al. (1994)	6.027	Diâmetros combinados
Varma et al. (1997)	6.163	Diâmetros combinados
Savic and Walters (1997)	6.073 – 6.195*	Diâmetros simples
Sherali et al. (1997)	6.059	Diâmetros combinados
Simulated Annealing (1997)	6.056 – 6.183*	Diâmetros simples

* Custo dependente dos parâmetros utilizados na fórmula de Hazen-Williams
($w=10.5088$, $\alpha=1.85$, $\beta=4.87$ - $w=10.5088$, $\alpha=1/0.54$, $\beta=2.63/0.54$)

As soluções apresentadas podem dividir-se em dois grupos distintos: as soluções que dividem cada conduta em troços de diferentes diâmetros (Diâmetros combinados) e as soluções que consideram que cada conduta é composta por um só diâmetro (Diâmetros simples). Regra geral, o segundo tipo de soluções apresenta custos ligeiramente superiores ao primeiro. No entanto, as soluções que combinam diâmetros consideram mudanças de diâmetro ao longo das condutas o que tem como consequência custos adicionais para executar as respectivas juntas e que não são contabilizados no custo global da rede. Como tal, há que ter em consideração que a diferença de custos apresentada nas diferentes soluções pode não corresponder à realidade e que as soluções de diâmetros simples são mais fáceis de implementar na prática.

O segundo problema testado corresponde à expansão do sistema de distribuição de água à cidade de Nova York representado na Figura 2 [Schaake and Lai (1969)]. Este sistema é constituído por vários túneis e o objectivo deste estudo consiste em determinar os diâmetros dos túneis a construir paralelamente aos já existentes, por forma a que se consiga fazer face aos novos consumos sendo impostas cotas piezométrica mínimas para cada nó. Para o dimensionamento existe um conjunto de diâmetros disponíveis (36, 48, 60, 72, 84, 96, 108, 120, 132, 144, 156, 168, 180, 192 e 204 polegadas), cujos custos unitários são definidos pela função $C = 1.1 D^{1.24}$ (D em polegadas).

A determinação das perdas de carga foi novamente efectuada através da fórmula de Hazen Williams adoptando um coeficiente igual a 100 para todos os túneis.

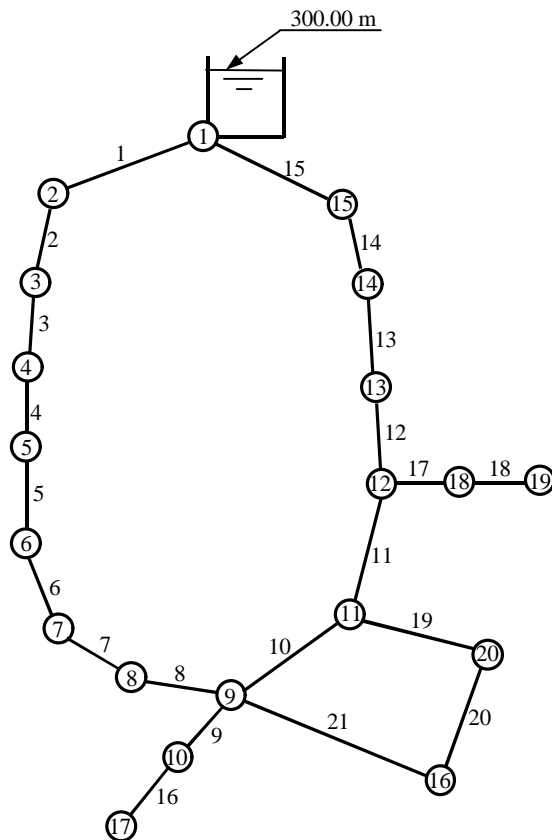


Figura 2 – Esquema da rede de Nova York (Problema 2)

Mais uma vez se ordenou ao programa que executasse 50 vezes o cálculo deste problema considerando diferentes conjuntos de números aleatórios. A solução encontrada apresenta um custo equivalente aos das melhores soluções encontradas na literatura (Quadro 6). Há apenas um pequeno reparo a fazer relativamente às soluções apresentadas por [Savic and Walters (1997)]. Estes autores aperceberam-se de que na literatura a fórmula de Hazen-Williams era utilizada sempre com a mesma estrutura mas considerando diferentes parâmetros (coeficiente independente, expoente do diâmetro e expoente do caudal). Então, para poderem comparar as soluções do seu algoritmo com outras soluções, averiguaram quais eram os parâmetros mais e menos desfavoráveis em termos de cálculo das perdas de carga e implementaram o seu algoritmo com ambos. Obviamente, aos parâmetros mais desfavoráveis (maiores perdas de carga) corresponde uma solução mais cara (40.4 Milhões) e aos menos desfavoráveis (menores perdas de carga) corresponde uma solução mais barata (37.1 Milhões). A aplicação do algoritmo apresentado neste trabalho, empregando os parâmetros mais comuns ($w=10.6744$, $\alpha=1.85$, $\beta=4.87$), determina uma solução cujo custo é de 38.796.312. Nos 50 testes efectuados esta foi a solução encontrada 36 vezes e nos restantes testes as soluções encontradas apresentavam custos que diferiam menos de 0.7% deste, resultados que vêm novamente confirmar o bom desempenho do algoritmo desenvolvido. Em média o tempo necessário para achar cada solução foi de 5 minutos e 18 segundos sendo avaliadas 93000 soluções de entre um universo de $15^{21}=4.99 \times 10^{24}$.

Quadro 6
Custos de diferentes soluções para a rede do Problema 2

Autores	Custo (milhões)	Tipo de solução
Gessler (1982)	41.8	Diâmetros simples
Morgan and Goulter (1985)	38.9	Diâmetros combinados
Morgan and Goulter (1985)	39.2	Diâmetros simples
Kessler (1988)	39.0	Diâmetros combinados
Fujiwara and Khang (1990)	36.6	Diâmetros combinados
Murphy et al. (1993)	38.8	Diâmetros simples
Loganathan et al. (1995)	38.0	Diâmetros combinados
Dandy et al. (1996)	38.8	Diâmetros simples
Savic and Walters (1997)	37.1 – 40.4*	Diâmetros simples
Simulated Annealing (1997)	37.1 – 40.4*	Diâmetros simples

* Custo dependente dos parâmetros utilizados na fórmula de Hazen-Williams

($w=10.5088$, $\alpha=1.85$, $\beta=4.87$ - $w=10.5088$, $\alpha=1/0.54$, $\beta=2.63/0.54$)

Para finalizar é importante referir que apesar de apenas se ter apresentado a resolução de dois problemas, o programa foi desenvolvido com uma versatilidade que lhe permite estudar problemas com estruturas perfeitamente distintas destes. Em termos de dimensões (número de nós, número de condutas ou número de reservatórios de distribuição) o programa é praticamente ilimitado, podendo considerar condutas de diferentes materiais ou com diferentes idades, formando estruturas ramificadas, malhadas ou mistas. No que respeita à aplicação do programa, existe a possibilidade de estudar redes novas (dimensionamento de uma rede que ainda não existe), efectuar estudos de ampliação de redes existentes (dimensionar a parte da rede a ser expandida) ou reforçar a capacidade de redes existentes (reforçar a rede com condutas paralelas às já existentes para fazer face ao aumento dos consumos). Para além destas potencialidades, o programa admite que se definam diferentes pressões mínimas para

cada nó de junção permitindo estudar redes com zonas de diferentes patamares de pressão mínima (p.e., uma zona em que se exige 18 mca e outra em que se exige 30 mca) ou então diferentes diâmetros mínimos para cada conduta permitindo zonas com diâmetros mínimos distintos (p.e., uma zona em que a própria rede serve para o combate a incêndios sendo exigido um determinado diâmetro mínimo e outra zona provida de reservas específicas para o efeito sendo permitido um diâmetro mínimo inferior). Todas estas opções foram concebidas mantendo a mesma estrutura quer em relação aos dados exigidos, quer em relação aos resultados fornecidos.

5 - CONCLUSÕES

O problema do dimensionamento optimizado de redes malhadas de distribuição de água é um problema de resolução complexa, em consequência das características matemáticas do modelo decisional que o traduz. Daí resulta que, desde há vinte anos, época em que foi iniciada a sua investigação, tenham aparecido várias contribuições na literatura da especialidade.

Os algoritmos recentes, baseados em processos de pesquisa aleatória, parecem ser prometedores para a resolução do problema, sem se tornar necessária a introdução de simplificações na respectiva formulação.

A qualidade dos resultados obtidos com a heurística usada na preparação desta comunicação (baseada no método de recozimento simulado), evidencia as grandes potencialidades deste tipo de heurística, especialmente tendo em conta os curtos tempos de execução.

Sumariam-se algumas das virtualidades do algoritmo desenvolvido:

— é de fácil implementação, não recorrendo a cálculo de derivadas nem a inversão de matrizes;

— necessita de poucos dados (basicamente os necessários à definição da rede) e é pouco exigente em termos de memória de computador;

— o número de configurações analisadas é bastante pequeno relativamente ao número total de configurações possíveis, pelo que o tempo de cálculo é reduzido;

— não fica “preso” em óptimos locais, ou pelo menos pode, em teoria, encontrar sempre o óptimo global;

— a solução é expressa em diâmetros comerciais e não há necessidade de dividir cada conduta em troços de diâmetros diferentes;

— consegue realizar o dimensionamento de redes ramificadas, malhadas ou mistas. O dimensionamento efectuado pode referir-se a redes completamente novas, assim como a ampliações ou reforço de redes existentes, permitindo a consideração de novas condutas em paralelo com as já existentes para aumento da capacidade de vazão;

— as soluções apresentadas, para além de garantirem os consumos exigidos nos nós, verificam as restrições de diâmetro mínimo impostas nas condutas e as de pressão mínima impostas nos nós de junção;

— elabora um relatório final em que são apresentados os parâmetros que caracterizam o equilíbrio hidráulico da rede óptima, bem como um breve resumo do orçamento das obras a efectuar.

Embora a formulação usada não inclua nem acessórios, nem reservatórios, a sua consideração não alteraria a natureza do modelo. Contudo, a implementação do algoritmo de recozimento simulado teria de ser revista, para considerar não só a escolha de diâmetros, mas

também a localização e as características desses órgãos. Este aspecto, bem como os que dizem respeito à consideração da variabilidade de consumos e da fiabilidade das componentes da rede constituem a preocupação dominante na nossa actual e futura investigação.

BIBLIOGRAFIA

AARTS, E., AND KORTS, J. - Simulated Annealing and Boltzman Machines: A Stochastic Approach to Combinatorial Optimization and Neural Computing, John Wiley & Sons Ltd., England, 1989.

ALPEROVITS, E., AND SHAMIR, U. - "Design of optimal water distribution systems." *Water Resour. Res.*, 1989, 13(6), 885-900,

BHAVE, P., AND LAM, C. - "Optimal layout for branching distribution networks". *J. Transp. Engrg.*, ASCE, 1989, 109(4), 534-544

CERNY, V. - "A Thermodynamical Approach to the Travelling Salesman Problem", *Journal of Optimization Theory and Applications* , 1985, 45, 41-51.

CUNHA, M.C., AND SOUSA, J.J. - "Simulated annealing algorithms for water network distribution systems optimization". EUROXV – INFORMS XXXIV Joint International Meeting, Barcelona. 1997.

DANDY, G. C., SIMPSON, A. R., MURPHY, L. J.- "An improved genetic algorithm for pipe network optimization". *Water Resour.* 1996, *Res.*, 32(2), 449-458.

EIGER, G., SHAMIR, U., AND BEN-TAL, A. "Optimal design of water distribution networks." *Water Resour.* 1994, *Res.*, 30(9), 2637-2646.

FWJIWARA, O., JENCHAIMAHAKOON, B., AND EDIRISINGHE, N.C.P. - "A modified linear programming gradient method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resour.* 1987, *Res.*, 23(6), 977-982.

FUJIWARA, O., AND KHANG, D.B. - "A two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resour.* 1990, *Res.*, 26(4), 539-549.

FUJIWARA, O., AND KHANG, D.B. - "Correction to a two-phase decomposition method for optimal design of looped water distribution networks." *Water Resour.* 1991, *Res.*, 27(5), 985-986.

GESSLER, J. - "Optimization of pipe networks." *Proc., Int. Symp. on Urban Hydro., Hydr. And Sediment Control*, University of Kentucky, Lexington, Ky., 1982, 165-171.

GOLDBERG, D.E., AND KUO, C.H. "Genetic algorithms in pipeline optimization." *J. Comp. in Civ. Engrg.*, 1987, 1(2), 128-141.

GOULTER, I.C. - "Systems analysis in water-distribution network design: from theory to practice." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 1992 , 118(3), 238-248.

HADJI, G., AND MURPHY, L.J. - "Genetic algorithms for pipe network optimization." *4th Year Student Civ. Engrg. Res. Rep.*, University of Adelaide, Australia. 1992.

KESSLER, A. - Optimal design of water supply networks using graph theory (in Hebrew), D.Sc. thesis, Technion – Israel Inst. Of Technol., Haifa, Israel. 1988.

KESSLER, A., AND SHAMIR, U. - "Decomposition technique for optimal design of water supply networks." *Engrg. Optimization*, 1991, 17(1), 1-19.

KIRKPATRICK, S., GELATT C. AND VECCHI, M. - "Optimization by Simulated Annealing". 1983, *Science*, 220(4598), 671-680.

LANSEY, K.E., AND MAYS, L.W.- "Optimization model for design of water distribution systems." *Reliability analysis of water distribution systems*, L.R. Mays, ed., ASCE, New York, N.Y. 1989.

LOGANATHAN, G.V., GREENE, J.J. AND AHN, T.J.- "Design heuristic for globally minimum cost water-distribution systems". *J. of Wat Resour. and Manage.*, 1995, 121(2), 182-192.

MAYS, L.W., BAO, Y., BRION, L., CULLINANE, M.L., DUAN, N., LANSEY, K., SU, Y.-C, AND WOODBURN, J. -"New methodologies for reliability-based analysis and design of water distribution systems". *Tech. Rep. CRWR-227*, Cent. for Res. in Water Resour., of Eng. Res., Univ. of Tex. at Austin. 1989.

METROPOLIS, N., A. ROSENBLUTHE, M. ROSENBLUTH, TELLER, A., AND TELLER, E. - "Equations of State Calculations by Fast Computing Machines". *Journal of Chemical Physics* , 1953, 21, 1087-1092.

MORGAN, D. R., GOULTER, I. C. - "Optimal Urban Water Distribution Design". *Water Resour.* 1985, *Res.*, 21(5), 642-652.

MURPHY, L.J., AND SIMPSON, A.R. - "Genetic algorithms in pipe network optimization." *Res. Rep. No. R93*, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Univ. of Adelaide, Australia. 1992.

MURPHY, L.J., AND SIMPSON, A.R., AND DANDY, G.C.- "Pipe network optimization using an improved genetic algorithm." *Res. Rep. No. R109*, Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Univ. of Adelaide, Australia. 1993.

QUIMPO, R.G., AND SHAMIR, U.M. - "Reliability-based distribution system maintenance". *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 1991, 117, 321-329.

QUINDRY, G.E., BRILL, E.D., AND LIEBMAN, J.C - "Optimization of looped water distribution systems." *J. Envir. Engrg.*, . 1981, ASCE, 107(4), 665-679.

SAVIC, D.A., AND WALTERS, G.A. "Genetic algorithms for least-cost design of water distribution networks" *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 1997, ASCE, 123(2), 67-77.

SCHAAKE, J., AND LAI, D.- "Linear programming and dynamic programming applications to water distribution network design." *Rep. 116*, Dept. of Civ. Engrg., Massachusetts Inst. of Technol., Cambridge, Mass. 1969.

SCHNEITER, C.R., HAIMES, Y.Y., LI, D. AND LAMBERT, H. - "Capacity reliability of water distribution networks and optimum rehabilitation decision making". *Water Resour.* 1996, *Res.*, 32(7), 2271-2278.

SHERALI, H. D., TOTLANI, R., LOGANATHAN, G. V. - "Enhanced Lower Bound for the Global Optimization of Water Distribution Networks." *Rep. HDS97-4*, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg. 1997.

SIMPSON, A.R., DANDY, G.C., AND MURPHY, L.J. - "Genetic algorithms compared to other techniques for pipe optimization." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 1994, ASCE, 120(4), 423-443.

SONAK, V:V., AND BHAVE, P.R. - "Global optimum tree solution for single-source looped water distribution networks subjected to a single loading pattern." *Water Resour.* 1993, *Res.*, 29(7), 2437-2443.

VARMA, K.V.K., NARASIMHAN, S., AND BHALLAMUDI, S.M. - "Optimal design of water distribution systems using an NLP method." *J. Envir. Engrg.*, 1997, ASCE, 123(4), 381-388.

WALSKI, T.M. - "State-of-the-art: pipe network optimization." *Computer applications in water resources*, Buffalo, N.Y. 1985.

Walski, T.M., Gessler, J., Sjostrom. (1990). *Water distribution systems: simulation and sizing*. Lewis Publishers, Inc.. Chelsea, Michigan.

Walters, G.A., and Cembrowicz, R.G. (1993). "Optimal design of water distribution networks." *Water supply systems, state of the art and future trends*, E. Cabrera and F. Martinez, eds., Computational Mechanics Publications, Southampton, 91-117