



XI SILUBESA

Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental

28/03 a 02/04/2004 - Natal - Rio Grande do Norte - Brasil

I-035 – MAXIMIZAÇÃO DO DESEMPENHO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA ATRAVÉS DA INSERÇÃO E AJUSTE DE VÁLVULAS

Luiz S. Araujo⁽¹⁾

Prof. Adjunto da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil – Graduado em Engenharia Sanitária (UFBa – 1985) – Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental (UFPb – 1991) – Estudante de Doutorado em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST/Lisboa/Portugal). Desenvolve actividades de ensino e pesquisa no domínio da Engenharia Sanitária e Ambiental.

Endereço⁽¹⁾: Tv. Do Giestal, 40 – 2º/E – Lisboa – Portugal – CP: 1300-278 - Tel: (+ 351) 21.361.1293

 araujols@ufc.br ou araujols@civil.ist.utl.pt

Helena Ramos

Profª. Auxiliar do Instituto Superior Técnico, Lisboa, Portugal – Licenciada em Engenharia Civil (IST - 1983) – Mestrado em Hidráulica e Recursos Hídricos (IST - 1987) – Doutorado em Eng. Civil (IST - 1995). Desenvolve actividade profissional no domínio da Hidráulica, Regimes transitórios, Aproveitamentos Hidroeléctricos e Detecção de fugas em sistemas hidráulicos no I.S.T.

Sérgio Teixeira Coelho

Investigador Principal, Departamento de Hidráulica e Ambiente, LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil (Portugal) – Licenciado em Eng. Civil (IST – 1984) – Mestre em Eng. Recursos Hídricos (Newcastle, Reino Unido - 1988) – Doutorado em Eng. Civil (Edimburgo, Reino Unido – 1996). Desenvolve pesquisa no domínio da engenharia de abastecimento de água.

RESUMO

Os autores propõem um modelo capaz de suportar a tomada de decisão, no que diz respeito à quantificação, localização e ajuste na abertura de válvulas numa rede de distribuição de água, tendo em vista a optimização do desempenho da rede em termos de pressões, e consequentemente das perdas de água. Estabelecem-se dois módulos operacionais: (1) responsável pela avaliação de uma função-objectivo estabelecida por forma a optimizar a localização das válvulas; (2) responsável pelo ajustamento de abertura das válvulas de modo a optimizar o desempenho através da avaliação de uma função de aptidão. Os novos valores dos parâmetros operacionais, para ambos os módulos, são gerados aleatoriamente utilizando-se, para o efeito, a técnica dos algoritmos genéticos, para que o sistema atinja o seu valor óptimo em termos de maximização do desempenho e minimização das fugas. O modelo utiliza rotinas programáveis do simulador EPANET 2.0 como instrumento da análise do comportamento hidráulico da rede.

PALAVRAS-CHAVE: algoritmos genéticos, controlo de pressões, análise de desempenho, controlo de fugas, utilização de válvulas, quantificação de válvulas, EPANET 2.0, simulação de redes de abastecimento de água.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, uma das principais preocupações dos gestores de sistemas de abastecimento de água, em todo o mundo, tem sido a minimização de perdas de água, que atingem frequentemente valores superiores a 30%, ou mesmo 40%, de toda a água que entra nos sistemas. Deste modo, o problema das perdas e do seu controlo em sistemas de adução e distribuição de água assume importância cada vez mais preponderante na actual tendência para privilegiar a sustentabilidade dos serviços e a protecção do ambiente. É um tema de considerável visibilidade mediática e política, sobretudo quando ocorrem períodos de escassez dos recursos hídricos ou quando os sistemas de abastecimento são postos à prova em áreas de rápido crescimento.

A garantia de um desempenho técnico adequado exige uma avaliação global do sistema, que inclua diferentes cenários de actuação mediante as condições operacionais de funcionamento, face aos condicionalismos que podem surgir em cada componente. Nesta conformidade, só através de uma análise integral, baseada em diversos instrumentos de apoio relativamente ao comportamento do sistema, se poderá responder aos requisitos necessários à sua adequada eficiência.

Jowitt & Xu (1990), Vitkovský *et al.* (2000), Alonso *et al.* (2000) e Ulanicka *et al.* (2001), entre outros, apresentam técnicas para minimização da pressão, como parâmetro condicionante dos índices de fugas de água nas redes de distribuição. No que diz respeito à metodologia a ser utilizada na diminuição das pressões no sistema, Jowitt & Xu (1990), Reis *et al.* (1997), Kalanithy & Lumbers (1998), Tucciarelli *et al.* (1999), Reis & Chaudhry (1999) e Ulanicka *et al.* (2001), sugerem que a melhor solução passa pela utilização de elementos provocadores de perdas de carga, tais como válvulas redutoras de pressão (PRV). Vairavamoorthy & Lumbers (1998) abordam a determinação da localização óptima de válvulas. A determinação do número óptimo de válvulas a instalar é o outro passo crucial deste processo.

Savic & Waters (1995a, b) e Reis & Chaudhry (1997), entre outros, desenvolveram modelos que localizam, de forma optimizada, válvulas na rede de distribuição de água. Deve notar-se, porém, que os primeiros trabalham com as válvulas operando no estado completamente aberto ou fechado e utilizam a simulação estática. Por sua vez, Reis & Chaudhry (1997), embora investiguem a localização de válvulas em simulação estática, exploram vários cenários de consumo durante o mesmo processo de optimização. O número total de válvulas a utilizar é previamente especificado.

Araujo *et al.* (2002 e 2003), desenvolveram dois modelos capazes de orientar os gestores de sistemas de distribuição de água no sentido de qual a melhor solução a adoptar na localização e quantificação de válvulas, bem com o ajustamento óptimo para a abertura das válvulas.

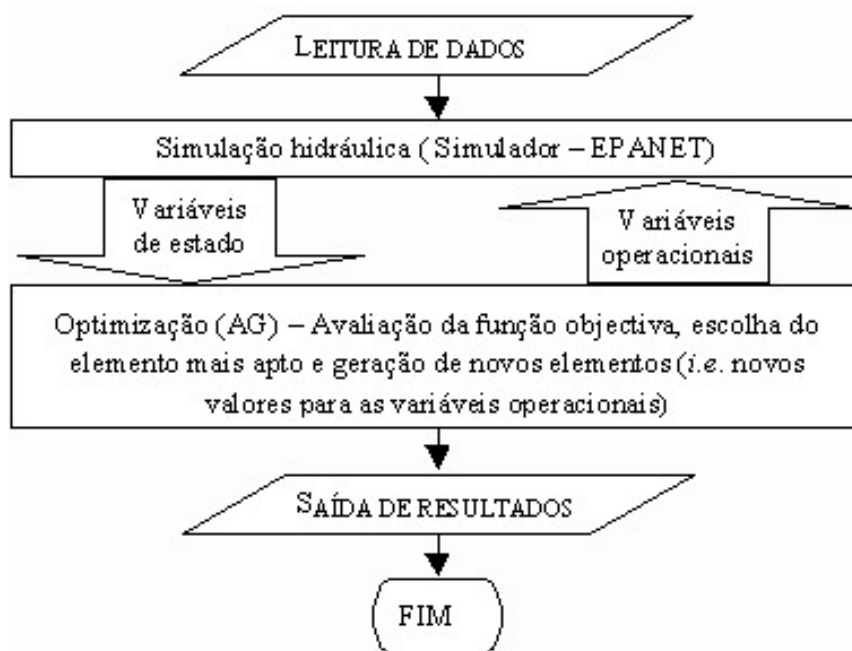


Figura 1 – Esquema geral da metodologia proposta

METODOLOGIA

A simulação hidráulica do sistema é efectuada com base nas rotinas programáveis (DLL) do modelo EPANET 2.0 (Rossman, 2002), que necessita, para cada intervalo de tempo, de conhecer os valores das variáveis intervenientes no processo que se pretende modelar, nomeadamente, valores de coeficiente de rugosidade em cada troço e coeficientes de perda de carga unitária, ou pressão de saída, para cada válvula. A geração destes valores é obtida a partir de um algoritmo genético (GA), que também permitirá efectuar a optimização do desempenho do sistema.

O GA utilizado é do tipo convencional geracional. Toda a população é substituída por novos elementos gerados pelo processo de selecção e aplicação de operadores do tipo *mutação* e *cruzamento*. Para não haver a possibilidade de perdas de bons indivíduos é utilizado a aplicação de *elitismo*, ou seja, preserva-se o melhor elemento de uma geração passando, directamente, uma cópia para a próxima geração. Para manter um bom nível de competição e evitar uma convergência prematura durante a execução do GA, adoptou-se a técnica do *escalonamento linear*.

Os índices de desempenho foram pensados por forma a constituir um mecanismo referencial, para cálculo dos níveis de qualidade do serviço prestado à comunidade ou, até mesmo, para aferição do desempenho técnico-sócio-económico e ambiental.

A avaliação dos índices de desempenho toma por base análises específicas, das características ou comportamento da rede, utilizando as seguintes variáveis (Coelho & Alegre, 1999):

- o valor numérico de uma propriedade ou variável de estado: no caso, foram escolhidas as pressões nos nós, uma vez que esta variável pode ser manipulada operacionalmente de forma a otimizar o sistema em termos de superfície piezométrica (a pressão em cada ponto deve estar dentro de um valor mínimo e máximo e satisfazer o seu funcionamento hidráulico); e o coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams, usado para simular o ajustamento de abertura de possíveis válvulas na rede, e que deve estar compreendido entre um valor mínimo (igual a 0,1 para válvula fechada) e um valor máximo (sem válvula) igual ao inicialmente atribuído a cada troço de conduta.
- uma curva de desempenho, que traça a relação entre os valores da variável (pressão e rugosidade) e uma escala de classificação de desempenho, para cada nó e troço da rede, conforme as figuras 2 e 3. Com esta mudança de variável, pode tratar-se os resultados em função do seu efeito prático (suficiência ou insuficiência das pressões, por exemplo), e confere-se ao método uma maior flexibilidade no estudo das soluções óptimas.

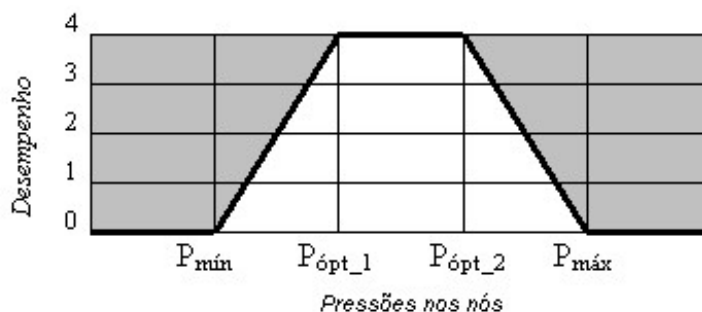


Figura 2 – Curva de desempenho para a condicionante pressão

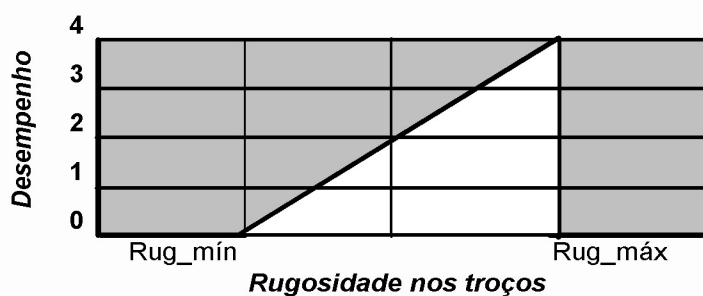


Figura 3 – Curva de desempenho para a condicionante número de válvulas

- um operador que permita a agregação espacial entre os valores elementares, por forma a poderem ser obtidos valores globais para a totalidade do sistema ou para um dado subsistema. Definiu-se uma função de agregação, conforme equação (1), que pudesse representar a importância do nó, relativamente à rede, em termos de pressão e consumo e a equação (3) de forma a condicionar o número de possíveis válvulas na rede:

$$D_{gp} = W[dn_i] = \sum_{i=1}^N (w_i * dn_i) \quad \text{equação (1)}$$

onde D_{gp} representa o valor global do desempenho condicionado pelas pressões, dn_i o valor do desempenho em cada nó i , e w_i os pesos nodais, dados pela fracção do consumo total:

$$w_i = \frac{q_i}{\sum_{i=1}^N q_i}$$

equação (2)

onde q_i representa o consumo no nó i

$$Dgr = W[dc_i] = \frac{\sum_{i=1}^{NC} dc_i}{NC}$$

equação (3)

onde Dgr representa o valor global do desempenho condicionado pelo número de válvulas, dc_i o valor do desempenho em cada troço i , e NC o número total de troços da rede que também serve como factor agregador.

VALIDAÇÃO DO MODELO

O caso de estudo, escolhido para testar a metodologia proposta, é um exemplo amplamente divulgado em vários artigos, nomeadamente em Jowitt & Xu (1990), Savic & Waters (1995a, b) e Reis & Chaudhry (1997), tendo inclusivamente sido utilizado por Araujo *et al.* (2002^a, 2002^b, 2003 e 2004). Adoptaram-se os mesmos valores para o expoente β (1,18). Distribuíram-se, entre os nós, valores para o coeficiente de fuga (K_f). Para a distribuição destes coeficientes, bem como dos novos valores dos factores de consumo, adoptou-se a metodologia desenvolvida por Araujo *et al.* (2004). A figura 4 mostra a rede utilizada, bem como um padrão de consumo associado e inclusivamente com a numeração dos troços, nós e reservatórios. Sendo estes os nós 23, 24 e 25, cujos níveis médios de água se encontram definidos na tabela 1. Nas tabelas 2 e 3 encontram-se os dados físicos e de distribuição dos consumos de base pelos nós da rede e seus respectivos coeficientes de fuga (K_f).

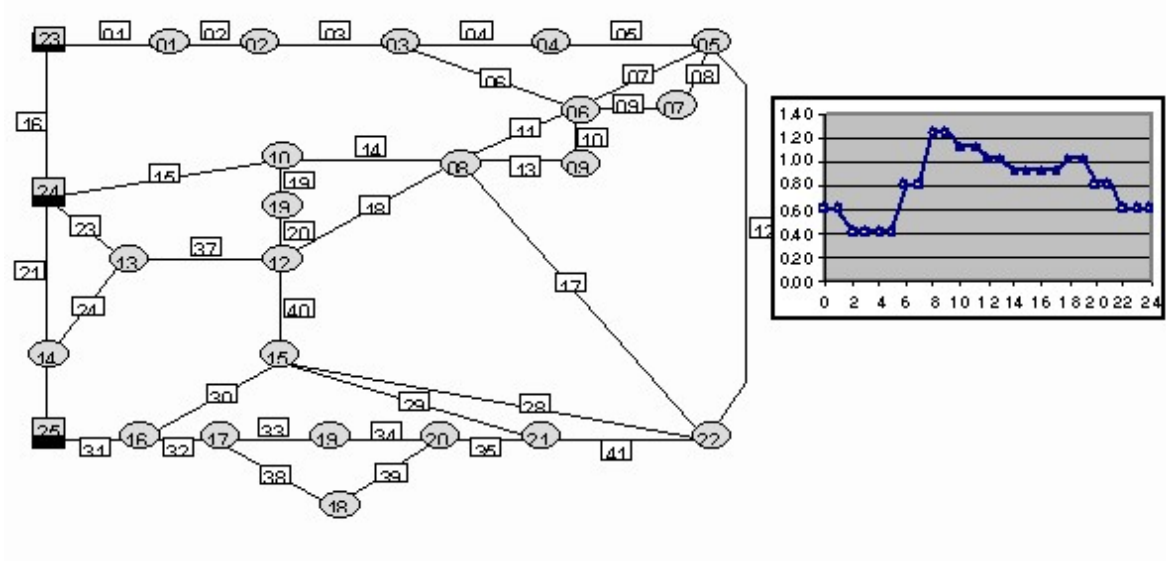


Figura 4 – Rede apresentada em Jowitt & Xu (1990) e respectivo padrão de consumo unitário

Tabela 1- Dados dos níveis médios de água para os reservatórios da rede da figura 4

Identificação do reservatório	Nível médio de água (m)
Nó 23	54,66
Nó 24	54,60
Nó 25	54,50

Tabela 2- Dados das características físicas e hidráulicas para a rede da figura 4

ID_Troço	Comprimento	Diâmetro	Rugosidade	ID_Node	Cota	Cons. Base	Emissor (K_f)
	m	mm			m	l/s	
T_01	606	457	110	N_01	18,0	5,0	0,012055
T_02	1930	457	110	N_02	18,0	10,0	0,033656
T_03	5150	305	10	N_03	14,0	0,0	0,032088
T_04	326	152	100	N_04	12,0	5,0	0,005562
T_05	844	229	110	N_05	14,0	30,0	0,018383
T_06	1274	152	100	N_06	15,0	10,0	0,019238
T_07	1115	229	90	N_07	14,5	0,0	0,005300
T_08	500	381	110	N_08	14,0	20,0	0,018853
T_09	615	381	110	N_09	14,0	0,0	0,003532
T_10	300	299	90	N_10	15,0	5,0	0,019837
T_11	743	381	110	N_11	12,0	10,0	0,006270
T_12	1408	152	100	N_12	15,0	0,0	0,024410
T_13	443	229	90	N_13	23,0	0,0	0,016842
T_14	249	305	105	N_14	20,0	5,0	0,019490
T_15	3382	305	100	N_15	8,0	20,0	0,028884
T_16	454	457	110	N_16	10,0	0,0	0,013467
T_17	931	229	125	N_17	7,0	0,0	0,010957
T_18	1600	457	110	N_18	8,0	5,0	0,005286
T_19	542	229	90	N_19	10,0	5,0	0,009203
T_20	777	229	90	N_20	7,0	0,0	0,010819
T_21	2782	229	105	N_21	10,0	0,0	0,020118
T_24	1014	381	135	N_22	15,0	20,0	0,034997
T_28	2334	229	100				
T_29	832	152	90				
T_30	914	229	125				
T_31	1097	381	6				
T_32	822	305	140				
T_33	1072	229	135				
T_34	864	152	90				
T_35	711	152	90				

T_37	762	457	110
T_38	411	152	100
T_39	701	229	110
T_40	1996	229	95
T_41	2689	152	100
T_23	1767	475	110
T_36	304	381	135

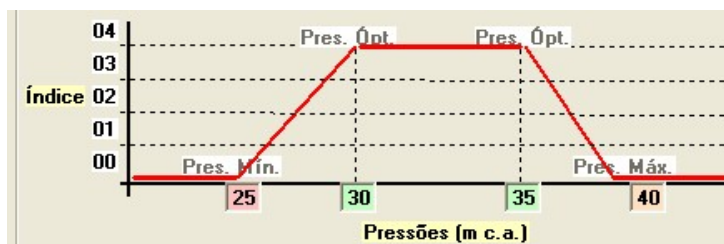


Figura 5 – Função de desempenho utilizada na análise das pressões

Tabela 3- Dados para os padrões (1) no nó de consumo e dos níveis (2, 3, e 4) nos reservatórios R 23, R 24 e R 25 respectivamente

Número	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,613	0,613	0,408	0,408	0,407	0,406	0,815	0,815	1,229	1,229	1,126	1,126
2	1,010	1,010	1,012	1,012	1,019	1,019	1,021	1,021	1,025	1,025	1,014	1,014
3	1,007	1,007	1,011	1,011	1,013	1,013	1,015	1,015	1,016	1,016	1,009	1,009
4	1,007	1,007	1,011	1,011	1,015	1,015	1,017	1,017	1,018	1,018	1,009	1,009
Número	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	1,025	0,923	0,923	0,923	0,924	1,026	1,027	0,819	0,819	0,614	0,614	1,025
2	1,008	1,010	1,003	1,003	0,999	0,999	0,997	0,997	1,001	1,001	1,004	1,004
3	1,004	1,004	1,002	1,002	1,000	1,000	0,998	0,998	1,002	1,002	1,004	1,004
4	0,998	0,998	0,994	0,994	0,991	0,991	0,996	0,996	1,002	1,002	1,007	1,007

A metodologia de optimização, propriamente dita, desenvolve-se em duas fases como descrita a seguir e utilizam uma função de desempenho, para a avaliação das pressões, baseada no gráfico mostrado na figura 5.

PRIMEIRA FASE: QUANTIFICAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE VÁLVULAS

Optimiza a quantificação e localização de possíveis válvulas na rede de distribuição de água. A introdução de *pseudo válvulas* na rede, em cada troço de conduta, é simulada se fazendo variar o coeficiente de rugosidade dos troços de forma a provocar perdas de carga que minimizem as pressões nos nós. Os cenários de localização das *pseudo válvulas* e suas respectivas perdas de carga (*i.e.*, grau de abertura) são gerados aleatoriamente, para que o sistema atinja o objectivo determinado em termos de pressões, número (*i.e.*, número de condutas com rugosidade inferior à rugosidade real) e localização das válvulas que optimize o desempenho da rede. A metodologia proposta aplica-se a redes funcionando em regime permanente ou em regime alargado e utiliza a seguinte formulação:

- formulação matemática para maximizar o desempenho global face a optimização das pressões (*i.e.*, ajustamento dos coeficientes de rugosidade de Hazen-Williams – pseudo válvulas)

$$f(Dgp_t) \Big|_{t-1}^T = \sum_{i=1}^N f(dn_i, p_i) \Big|_{t-1}^T$$

equação (4)

- formulação matemática para maximizar o desempenho global face à optimização do número de válvulas

$$f(Dgr_t) \Big|_{t-1}^T = \sum_{i=1}^N f(dc_i, nv_i) \Big|_{t-1}^T$$

equação (5)

onde nv_i é o número de válvulas calculadas para o intervalo t (i.e., número de condutas com coeficiente de rugosidade inferior ao inicial) e p_i a pressão no nó i .

- a função de aptidão é obtida pela soma das equações (4) e (5)

$$\text{maximize } f(Dg_t) \Big|_{t-1}^T = \{ f(Dgp_t) + f(Dgr_t) \} \Big|_{t-1}^T$$

equação (6)

RESULTADOS DA PRIMEIRA FASE

Após a execução desta fase, o programa gera ficheiros de resultados que podem ser usados – com o próprio EPANET ou por folhas de cálculo – de forma a propiciar ao utilizador a possibilidade de analisar onde e quantas válvulas serão utilizadas para modelar a rede na segunda fase. A tabela 4 apresenta os resultados finais obtidos após análise dos dados gerados, em uma série de simulações, obedecendo-se o critério que as válvulas teriam um ajuste a cada hora ou um único ajuste ao longo do dia. Observa-se que, para um ajuste a cada intervalo de hora, seria indicada a inserção de válvulas nas condutas 1, 15, 18, 28, 31, 37 e 40, já para um ajuste único ao longo do dia, o mais indicado é a inserção de válvulas nas condutas 1, 15, 18, 37 e 40. Mostra, também, comparações entre os caudais de fugas iniciais e modelados, bem como o índice de desempenho ponderado (IDP) obtido em cada simulação, tendo inclusive alcançado valores bastantes bons para ajustes horários e satisfatórios para ajuste único diário.

No tocante à estabilidade, o modelo foi capaz de obter cenários bastante semelhantes para qualquer situação. Na tabela 4 pode-se observar a frequência, em percentagem, com que cada conduta é indicada como ponto de localização de válvula. Nota-se que esta frequência se situa acima de 69% na quase totalidade das indicações para ambos os casos estudados.

Tabela 4 – Condutas que tiveram o coeficiente de rugosidade alterado em mais 20% do total das simulações efectuadas

Conduta	1	15	18	28	31	37	40	Nº de Vál.	Caudais (l/s)			IDP	
Tempo (h)	Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams									Fugas		Faixa	
									Total	Inicial	Mod.	0 a 4	
0	4	14	42	39	3	28	12	7	120	28.08	22.44	3.19	
1	6	26	16	35	4	3	3	7	120	28.08	22.78	3.18	
2	3	32	29	56	3	5	20	7	90	28.84	22.59	2.79	
3	4	26	-	33	2	13	23	6	90	28.84	22.37	2.91	
4	3	83	-	8	4	4	60	6	90	29.00	22.24	2.82	
5	4	3	14	36	3	11	19	7	90	29.00	22.68	2.87	
6	5	42	57	75	4	41	5	7	150	27.77	22.64	3.33	
7	6	56	31	6	4	43	36	7	150	27.77	22.74	3.33	
8	8	39	31	63	5	59	60	7	210	25.71	22.87	3.46	

9	8	49	8	57	5	53	76	7	210	25.71	22.89	3.47
10	13	76	56	42	5	67	6	7	195	26.12	23.22	3.42
11	10	60	57	53	4	51	46	7	195	26.12	23.02	3.43
12	8	31	68	28	3	55	53	7	165	26.26	22.72	3.44
13	8	29	71	28	4	47	69	7	165	26.26	22.72	3.43
14	7	36	70	52	3	43	63	7	165	26.55	22.62	3.42
15	7	6	9	47	4	44	5	7	165	26.55	22.83	3.38
16	8	47	-	39	5	38	69	6	180	26.42	22.75	3.37
17	8	54	63	47	5	48	42	7	180	26.42	22.68	3.40
18	7	54	-	53	5	52	53	6	165	26.02	22.87	3.41
19	8	58	52	35	5	58	7	7	165	26.02	22.77	3.44
20	7	66	42	62	3	26	57	7	150	27.10	22.98	3.29
21	7	26	43	55	3	5	55	7	150	27.09	22.56	3.36
22	5	25	16	58	4	24	24	7	120	27.97	22.80	3.18
23	6	27	4	54	5	24	28	7	120	27.97	22.70	3.21
Real	110	100	110	100	6	110	95					
Média	7	40	39	44	4	35	37	7	150	27.15	22.73	3.27
Freq.(%)	90	88	35	84	79	80	91					
24 Horas	-	50	55	-	3	55	72	5	150	27.19	24.66	2.36
	7	64	42	-	-	55	51	5		27.19	24.22	2.49
	7	1	-	-	-	55	71	5		27.19	24.22	2.50
	7	28	50	-	-	62	72	5		27.19	24.23	2.48
	7	54	-	-	-	42	76	4		27.19	24.25	2.50
Média	7	39	49	-	3	54	68	5	150	27.19	24.32	2.47
Freq.(%)	80	100	60	0	20	100	100					

A figura 6 apresenta a rede com as válvulas localizadas na conformidade das análises acima referida e que servirá de base para a continuação deste estudo, com a aplicação da segunda fase do modelo proposto.

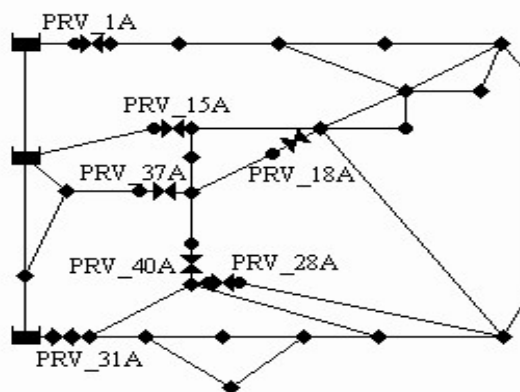


Figura 6 – Rede base a ser estudada na segunda fase da metodologia proposta neste estudo

SEGUNDA FASE: AJUSTAMENTO DO GRAU DE ABERTURA DAS VÁLVULAS

Esta fase do estudo tem a finalidade de estabelecer valores de ajustamento de abertura das válvulas reguladoras de pressão (PRV) de forma a propiciar, ao gestor do sistema, a melhor solução, para sua tomada de decisão, quanto ao número e localização de válvulas realmente necessárias e que sejam económica e tecnicamente viáveis, na optimização do sistema em termos de desempenho, tendo-se as pressões nos nós de consumo como variáveis de decisão na função de aptidão utilizada – equação (7). Esta análise tanto pode ser usada independentemente, desde que já se tenha válvulas instaladas, como complementarmente à primeira fase, como no caso deste estudo. No sentido de verificar as combinações propostas (figura 6 da primeira fase), foram usadas válvulas reguladoras de pressão (PRV), muito embora se possa, também, utilizar válvulas reguladoras de caudal (TCV). Para além disso, foram acrescentados aos ficheiros gerados na primeira fase os controlos do estado das válvulas correspondentes aos cenários simulados. Estes controlos constituem as variáveis accionadas pelo algoritmo genético, por forma a maximizar o desempenho da rede no quesito pressões nos nós de consumo.

A formulação matemática para esta componente da optimização baseia-se na seguinte função de aptidão, que define os valores do índice de desempenho da rede:

$$\underset{\text{maximize}}{f(Dg_t)} \Big|_{t=1}^T = \sum_{i=1}^N f(dn_i, p_i) \Big|_{t=1}^T \quad \text{equação (7)}$$

RESULTADOS DA SEGUNDA FASE

Primeiramente verificou-se a rede para a condição de ajuste único ao longo do dia. Analisando-se os resultados, tabela 5, observa-se que as válvulas 15A e 18A estão permanentemente abertas, o que indica a sua não utilização e, por conseguinte, podem ser suprimidas do sistema sem que o desempenho final seja afectado, para esta condição operacional.

Tabela 5 – Condições de funcionamento das válvulas para uma simulação com controlo único para as 24 horas do dia

Válvula	1A	31A	37A	40A	28A	15A	18A
Estado	Activa	Activa	Activa	Activa	Fechada	Aberta	Aberta
Ajuste (pressão a jusante em m c. a.)	30	30	32	32	29	38	52

De seguida simulou-se a rede, novamente com as 7 válvulas, mas para controlos de ajuste feitos a cada hora do dia, apresentando-se os resultados na tabela 6. Observa-se que a válvula 18A continua inoperante, a válvula 28A alterna entre aberta e fechada e as válvulas 15A, 31A e 40A estão a maior parte do tempo funcionando abertas.

Tabela 6 –

Vál.	1A	31A	37A	40A	28A	15A	18A	1a.	31a	37a	40a	28a	15a	18a
Hora	Estado							Ajuste (pressão a jusante em m c. a.)						
0	Activa	Aberta	Activa	Activa	Fechada	Fechada	Aberta	32	53	32	32	26	24.9	50
1	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Aberta	Fechada	Activa	32	26	30	60	60	27.1	31
2	Activa	Aberta	Activa	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	32	30	31	26	30	44.2	58
3	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	32	30	30	60	60	22.7	39
4	Activa	Aberta	Activa	Fechada	Fechada	Aberta	Aberta	30	30	32	32	25	38.2	44
5	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	32	30	30	60	59	27.0	51
6	Activa	Fechada	Activa	Activa	Fechada	Aberta	Aberta	32	30	33	33	32	56.3	40
7	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	32	29	32	60	60	31.6	34
8	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	32	47	35	56	27	54.5	47
9	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	32	59	32	60	60	32.3	45
10	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	32	52	34	48	33	39.5	59
11	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	32	33	35	60	60	32.1	56
12	Activa	Activa	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	32	32	32	55	30	39.0	47
13	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	32	31	31	60	60	31.8	44
14	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	30	25	32	43	28	40.7	41
15	Activa	Activa	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	30	33	32	60	60	31.7	51
16	Activa	Aberta	Activa	Aberta	Fechada	Activa	Aberta	32	56	33	51	31	32.0	34
17	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Aberta	Aberta	Aberta	32	29	32	60	60	53.6	45
18	Activa	Activa	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	30	32	32	45	28	33.8	32
19	Activa	Activa	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	32	33	34	60	60	31.9	36
20	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Fechada	Aberta	Aberta	30	24	32	54	27	53.5	41
21	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Aberta	Activa	Aberta	30	27	32	60	60	31.6	50
22	Activa	Aberta	Activa	Activa	Fechada	Aberta	Aberta	32	55	32	32	32	52.9	47
23	Activa	Fechada	Activa	Aberta	Aberta	Fechada	Aberta	32	27	32	60	60	25.1	45
24	Activa	Aberta	Activa	Activa	Activa	Aberta	Aberta	30	37	32	32	25	48.9	34

Análise da figura 7, que representam o desempenho agregado do sistema, em termos de pressões, para uma solução sem válvulas de controlo, e 3 soluções com válvulas (5, 3 e 1), verifica-se que há ganhos significativos de desempenho com a introdução de 1 válvula. Com 3 válvulas, o desempenho melhora marginalmente em relação à solução com uma válvula. Aumentando para 5 válvulas, já não se consegue um retorno correspondente, provavelmente por ter sido esgotada a capacidade que o sistema tem para regularizar a superfície piezométrica (para a curva de desempenho considerada, figura 5), entretanto observa-se uma melhora no período que corresponde ao consumo mínimo onde as pressões são mais elevadas.

A figura 8, representam o desempenho agregado do sistema, em termos de pressões, para solução sem válvulas de controlo e 3 soluções com válvulas (1, 3 e 5), e controlos definidos para cada hora no período das 24 horas simulada. Observa-se o mesmo comportamento do desempenho que é obtido na situação de simulação com controlo único (figura 7).

Se fizermos uma análise comparando os dois tipos de situação (com um único controlo – Dia, e com controlos a cada Hora) simulados, observa-se que as diferenças nos ganhos de desempenho são, no geral, pouco significativas, havendo uma pequena diferença para o uso de 1 válvula nos dois casos.

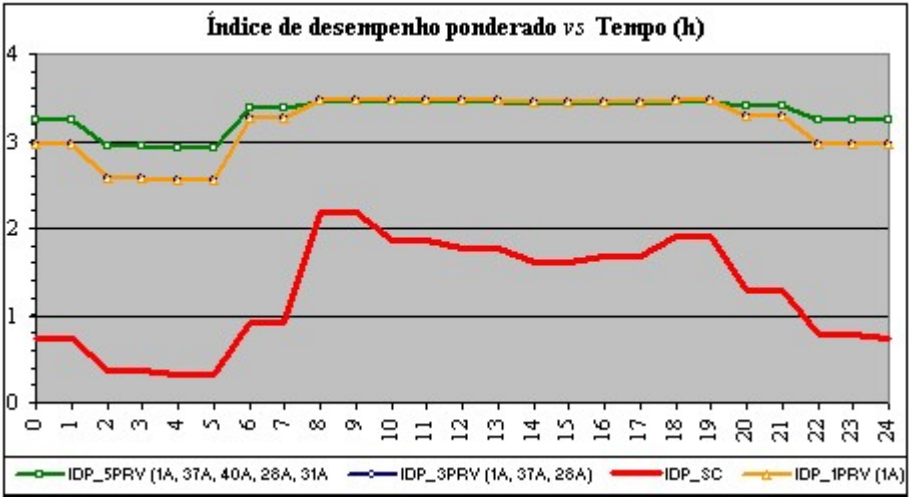


Figura 7 – IDP para estudo de caso com um controle para todo o dia (1)

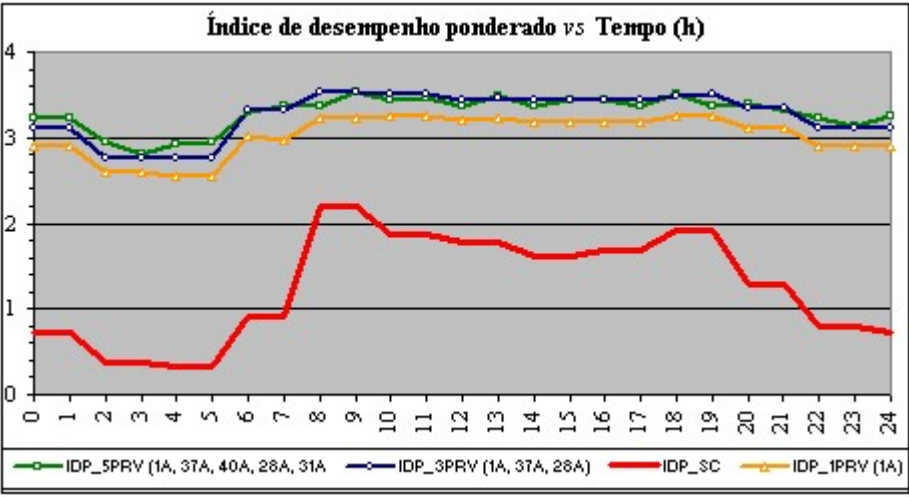


Figura 8 – IDP para estudo de caso com controle para cada hora do dia (24)

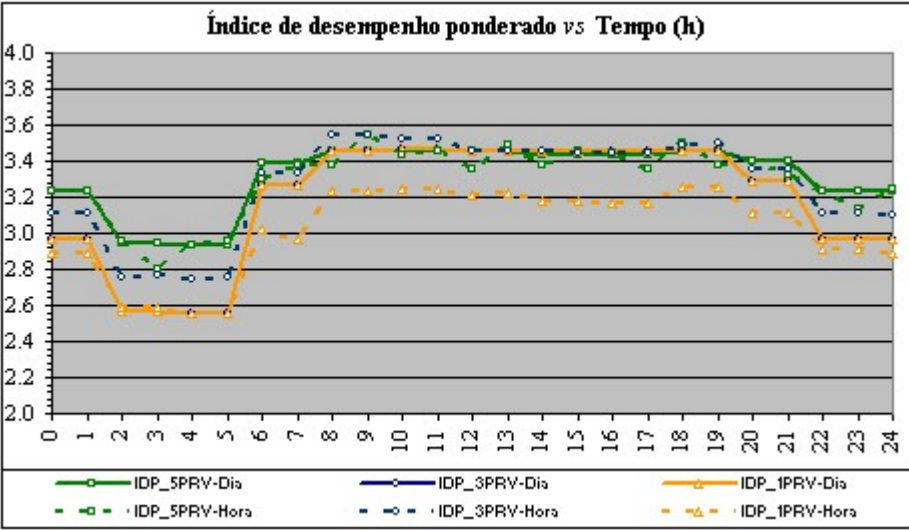


Figura 9 – IDP para os dois casos estudados (único = dia e 24 = Hora)

CONCLUSÕES

A utilização de uma ferramenta eficiente no controlo e na minimização das pressões permite a definição de uma boa estratégia operacional para a redução das fugas nas redes de sistemas de abastecimento de água, sem comprometer a sua operacionalidade. Entretanto, quando as metodologias do ajuste de abertura e da posição das válvulas associadas à estratégia do controle são optimizadas, as vantagens são indubitavelmente mais significativas.

O modelo proposto neste trabalho optimiza o número e a posição das válvulas, assim como seus ajustes de abertura. O modelo mostrou capacidade para encontrar uma solução que satisfaça inteiramente o controlo das pressões extremas sem introduzir constrangimentos significativos à eficiência e à funcionalidade do sistema

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia – Portugal – pela atribuição da bolsa de doutoramento (SFRH/BD/1148/2000), à Universidade Federal do Ceará – Brasil – pelo apoio financeiro em forma de salários, e ao DECivil do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa – Portugal pelo apoio em equipamento e instalações disponibilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alonso, J.M., Fernando, A., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P.A., Vidal, A.M., Martinez, F., Vercher, J. & Ulanicki, B., 2000. Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*, ASCE, July/August, pp. 251-260.
2. Araujo, L.S., Ramos, H.M. & Coelho, S.T., 2002^a. Gestão Integrada de Sistemas de Distribuição de Água para um Melhor Controlo de Perdas. 6º Congresso da Água, 12/22 de março de 2002. Porto, Portugal.
3. Araujo, L.S., Ramos, H.M. & Coelho, S.T., 2002^b. Optimização da Localização de Válvulas numa Rede de Distribuição para a Minimização de Fugas. 10º ENASB/SILUBESA, 16/19 de setembro de 2002. Braga, Portugal.
4. Araujo, L. S, Ramos, H. M. & Coelho, S. T. 2003. Estimation of Distributed Pressure-Dependent Leakage and Consumer Demand in Water Supply Networks. *Advance in Water Supply Management*. Imperial College London, UK, 15 – 17 September 2003.
5. Araujo, L. S, Coelho, S. T. & Ramos, H. M 2004. Estimativa de Fugas e Consumos nas Redes de Distribuição de Água em Função da Pressão. XI SILUBESA: Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 28 de março a 02 de abril de 2004. Natal, Rio Grande do Norte, Brasil.
6. Coelho, S.T., Alegre, H., 1999. Indicadores de Desempenho de Sistemas de Saneamento Básico. Laboratório Nacional de Engenharia Civil – LNEC, ITH 40, Lisboa, Portugal.
7. Goldberg, D.E. 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*, Adison-Wesley, USA.
8. Goldberg, D.E., 1994. Genetic and Evolutionary Algorithms Come of Age. *Communications of the ACM*, Vol. 37, nº 3, pp. 113-119.
9. Hernández, V. Martinez, F., Vidal, A.M., Alonso, J.M., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Ruiz, P.A. & Vercher, j. 1999. HIPERWATER: A high Performance Computing EPANET-Based Demonstrator for Water Network Simulation and Leakage Minimisation. *Water Industry Systems: Modeling and Optimization Applications*, Vol. 1, Research Studies Press Ltd., Baldock. Hertford shire, England. pp. 141-153.
10. Holland, J.H. 1975. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor.
11. Jowitt, P.W. & Xu, C., 1990. Optimal Valve Control in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources planning and Management*, ASCE, July/August, pp. 455-472.
12. Kalanithy, V. & Lumbers, J., 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, November. pp 1146-1154.
13. Lambert, A., Mayers, S. & Trow, S., 1998. Managing Water Leakage: economic and technical issues. *Financial Times Energy*. <http://www.ftenergy.com>.
14. Martínez, F., Conejos, P. & Vercher, J., 1999. Developing an Integrated Model for Water Distribution Systems Considering both Distributed Leakage and Pressure-Dependent Demands. *Proceedings of the 26th ASCE water Resources Planning and Management Division Conference*. July. Tempe, Arizona.
15. Prescott, S.L. & Ulanicki, B. 2001. Time Series Analysis of Leakage in Water Distribution Networks. *Water*

Software Systems: Theory and Applications. Vol. 2, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England. pp. 17-28.

16. National Water Council Standing Technical Committee Report 26, 1980. Leakage Control Policy and Practice. Technical Working Group on Waste of Water. ISBN 0 904561 95 X.
17. Reis, F.R. & Chaudhry, F.H., 1999. Hydraulic Characteristics of Pressure Reducing Valves for Maximum Reduction of Leakage in Water Supply Networks. Water Industry Systems: Modelling and Optimization Applications, Vol. 1, Research Studies Press Ltd., Baldock, Hertfordshire, England. pp 259-267.
18. Reis, F.R., Porto, R.M. & Chaudhry, F.H., 1997. Optimal Location of Control Valves in Pipe Networks by Genetic Algorithm". Journal of Water Resources Planning and Management, November/December. pp 317-326.
19. Rossman, L.A., 2002. EPANET 2 Users Manual. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati, OH 45268, September, 2000 (traduzido para português por D. Loureiro e S.T. Coelho, LNEC 2002 – www.dh.lnec.pt/Nes/epane).
20. Sakarya, A.B.A. & Mays, L.W. 2000. Optimal Operation of Water Distribution Pumps Considering Water Quality. Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, July/August. pp. 210-220.
21. Savic, D.A. & Waters G.A. 1995a. Integration of a Model for Hydraulic Analysis of Water Distribution Networks with an Evolution Program for Pressure Regulation. Microcomputers in Civil Engineering, Vol. 10. pp. 219-229.
22. Savic, D.A. & Waters G.A. 1995b. An Evolution Program for Optimal Pressure Regulation in Water Distribution Networks. Engineering Optimization. Vol. 24, N° 3. pp. 197-219.
23. Tucciarelli, T., Criminisi, A. & Termini, D., 1999. Leak Analysis Systems by Means of Optimal Valve Regulation. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, March. pp 277-285.
24. Vairavamoorthy, K. & Lumbers, J., 1998. Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, November, pp 1146-1154.
25. Viana, G.V.R., 1998. Meta-heurísticas e Programação Paralela em Otimização Combinatória. Edições UFC, Fortaleza. 250 p.
26. Vitkovský, J.P., Simpson, A.R. & Lambert, M.F. 2000. Leak Detection and Calibration using Transients and Genetic Algorithms. Water Resources Planning and Management, ASCE, July/August. pp. 258-262.