

METODOLOGIA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO PARA AMELHORIA DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Nuno Dias, Dídia Isabel Covas y Helena Ramos

Resumo:

Este trabalho consistiu na aplicação do conceito de desempenho hidráulico para a avaliação do comportamento de um sistema de distribuição de água, em termos de pressões, velocidades de escoamento e perdas de água. Numa primeira fase, procedeu-se à concepção e ao dimensionamento do sistema em análise de acordo com a regulamentação em vigor, utilizando o ferro fundido dúctil. De seguida, compararam-se os desempenhos hidráulicos do sistema com os referentes a outras soluções alternativas para diferentes materiais das condutas (i.e., polietileno de alta densidade e policloreto de vinilo), diferentes factores de consumo (i.e., regulamentares e específicos de uma determinada zona) e configurações do sistema.

Procedeu-se à avaliação do efeito da introdução de válvulas redutoras de pressão no controlo das perdas e consequente melhoria dos desempenhos associados às pressões. Esta análise consistiu na adopção de três tipos distintos de válvulas redutoras de pressão (VRP): com carga a jusante constante, com perda de carga constante e com perda de carga variável no tempo, em duas configurações do sistema distintas (i.e., malhado e ramificado). Concluiu-se que a utilização de VRP diminui as perdas de água, uma vez que reduz as pressões, e que a VRP mais eficiente é a válvula com perda de carga variável no tempo.

Palabras clave: sistemas de distribuição de água, avaliação do desempenho, controlo de perdas, gestão da pressão

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural insubstituível nas actividades humanas, sendo simultaneamente uma componente essencial dos ecossistemas naturais e uma componente natural do ambiente (Art. 7º da Lei de Bases do Ambiente, Lei n.º 11/87 de 7 de Abril).

É fundamental a consciencialização de que os recursos hídricos são limitados e que é necessário protegê-los e conservá-los. Se a questão da escassez do recurso apenas é colocada em algumas zonas do planeta, a questão da qualidade é discutida na sua globalidade. Este processo de consciencialização deve ser acompanhado de medidas concretas que conduzam à alteração das práticas relativas à gestão e à utilização da água, nomeadamente através do desenvolvimento de estratégias para uso eficiente da água aplicáveis aos diversos níveis:

nacional, regional e local (Almeida *et al.*, 2001). Em relação à eficiência actual da água, o Plano Nacional para o Uso Eficiente da Água ilustra que nem toda esta procura de água é efectivamente aproveitada, na medida em que há uma parcela importante associada à ineficiência de uso, sob a forma de perda e desperdícios, que corresponde à diferença entre o volume da água que é captado e o volume que é efectivamente necessário. Trata-se, portanto, de uma componente que tem custos para a sociedade, sem quaisquer benefícios. Estes elevados volumes indicam, assim, importantes poupanças potenciais que importa analisar.

Uma das principais preocupações das entidades gestoras de sistemas de distribuição de água tem sido o controlo de perdas de água, que atingem por vezes valores superiores a 30% do volume total de água que entra nos sistemas de abastecimento (WRC, 1994).

Instituto superior Técnico, 1049-001 Lisboa, Portugal. email: nuno.dias@netcabo.pt ; didia.covas@civil.ist.utl.pt ; hr@civil.ist.utl.pt

Artículo recibido el 4 de abril de 2005, recibido en forma revisada el 27 de marzo de 2006 y aceptado para su publicación el 6 de abril de 2006 . Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo siguiendo lo indicado en las "Instrucciones para autores". En el caso de ser aceptadas, éstas serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores.

Nesta conformidade, a problemática 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.

Devido às necessidades de adaptação à nova Directiva Quadro, as entidades gestoras (e.g., entidades distribuidoras) têm que aumentar a qualidade da água nas origens e, consequentemente, reduzir as necessidades de tratamento, aumentar a fiabilidade do serviço prestado através de um intenso programa de monitorização e controlo dos recursos hídricos, promover uma utilização mais eficiente da água (i.e., redução dos consumos e controlo das perdas no sistema, reutilização da água, reciclagem de subprodutos e melhor manutenção do sistema) e reavaliar as origens de água para protecção do meio hídrico. Nesta conformidade, o desenvolvimento de instrumentos que permitam a avaliação quantitativa torna-se indispensável. Estes instrumentos podem assumir a forma de indicadores de desempenho, que descrevam o grau de sucesso obtido num dado conjunto de objectivos da entidade gestora. Estes indicadores são, portanto, medidas de eficiência e eficácia das entidades gestoras relativamente a aspectos específicos da actividade desenvolvida ou do comportamento do sistema (Baptista, 1998) e consistiram na principal motivação para o desenvolvimento deste estudo.

Desta forma, o objectivo principal deste estudo consistiu na aplicação de metodologias que permitam avaliar e analisar os níveis de desempenho do sistema em termos de pressões, velocidades e perdas, com vista a um desenvolvimento sustentável relativamente à utilização a dar à água. Neste contexto procedeu-se à simulação hidráulica de um sistema de distribuição de água, em regime quase permanente (com duração de 24 horas), à avaliação do seu desempenho hidráulico e à quantificação das perdas de água.

2. INDICADORES DE DESEMPEÑO

Para dar resposta às exigências em relação ao nível de serviço de abastecimento de água com a garantia de desenvolvimento e sustentabilidade do mercado da água (Alegre, 1992), introduziu-se o conceito de indicador de desempenho do sistema de distribuição de água e aplicou-se às pressões e velocidades de escoamento. O objectivo destes

indicadores era constituírem ferramentas de apoio à decisão das entidades gestoras, tornando directa e transparente a comparação entre os diferentes objectivos de gestão e os resultados conseguidos (Baptista, 1998 e Matos *et al.*, 1998).

A utilização dos indicadores de desempenho como ferramentas para a comparação de alternativas de investimento e tomadas de decisão têm vindo a ser utilizadas por diversas entidades nacionais e internacionais. Em Portugal, têm sido realizados vários estudos neste domínio – Alegre (1992), Matos *et al.* (1993), Alegre e Almeida (1995), Faria e Alegre (1995), Coelho (1997) e Coelho e Alegre (1997). No quadro internacional foram desenvolvidos diversos projectos em que se destacam o sistema de avaliação do desempenho vigente em Inglaterra e no País de Gales, as iniciativas da AWWARF (i.e., "American Water Works Association Research Foundation"), as iniciativas de entidades financiadoras como o Banco Mundial e o Banco Asiático para o Desenvolvimento e o projecto IWA sobre indicadores de desempenho cujos resultados foram a realização de diversos encontros científicos e técnicos, permitindo a constituição de um Manual de Boa Prática intitulado "Performance Indicators for Water Supply Services" (Alegre *et al.*, 2000).

Dias (2004) efectuou a análise do comportamento que um sistema de distribuição de água terá ao longo da sua vida útil, por forma a comparar diversos cenários alternativos de investimento. Aplicou-se a metodologia que utiliza os indicadores de desempenho hidráulicos apresentada em Alegre (1992) e em Coelho (1997). Para a avaliação do desempenho hidráulico, avaliam-se as *variáveis de estado* de um sistema de distribuição (e.g., as pressões, as flutuações de pressão e as velocidades) recorrendo a *funções de penalidade*, que se definem com base nos níveis de serviço, i.e., em critérios de avaliação da qualidade do serviço prestado pelas entidades gestoras. Por forma a alargar as bandas de dispersão e efectuar uma melhor comparação entre diversas soluções alternativas, procedeu-se a um reajustamento das funções de penalidade propostas por Coelho (1997) relativas à avaliação das pressões e das velocidades, para além de as redefinir numa escala dos níveis de serviço em percentagens, i.e., entre 0 e 100%.

Apresentam-se na Figura 1 as funções de penalidade adoptadas, sendo de referir que a Figura 1 é apresentada com o padrão de cores adoptado

nas figuras de isolinhas de pressão, por forma a que o leitor tenha uma melhor interpretação da distribuição das pressões no sistema em análise e dos respectivos desempenhos. Apresentam-se duas funções de penalidade de velocidades, uma adaptada de Coelho (1997) (Figura 1c) e outra proposta pelos autores (Figura 1d), dado que a primeira é muito penalizadora.

Relativamente à avaliação de perdas de água no sistema de distribuição, adoptou-se a metodologia proposta por Rossman (2000) e Araujo *et al.* (2004). Esta metodologia estabelece um coeficiente de vazão fixo para todas as condutas do sistema de distribuição, por forma a determinar os coeficientes de fuga para cada nó da rede. Com estes coeficientes, calculam-se os caudais de perdas para cada nó e para cada hora, por aplicação da Equação (1) proposta por Alonso *et al.* (2000):

$$q_i = K_{fi} \cdot p_i^{1.18} \quad (1)$$

em que

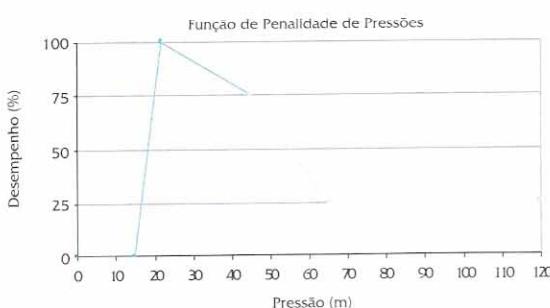
q_i : caudal de perdas no nó i (l/s);

p_i : pressão no nó i (m c.a.);

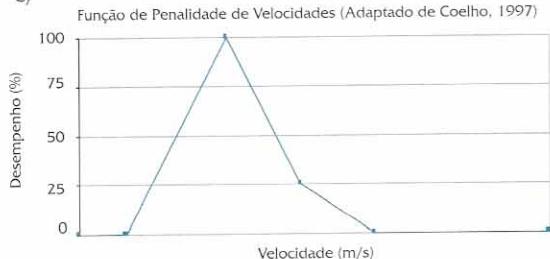
K_{fi} : coeficientes de fuga dados por:

$$K_{fi} = c \cdot \sum_j \frac{L_{ij}}{2}$$

a)



c)



c: coeficiente de vazão (e.g., $c=1 \cdot 10^{-5}$);
 L_{ij} : comprimentos das condutas confluentes no nó (m).

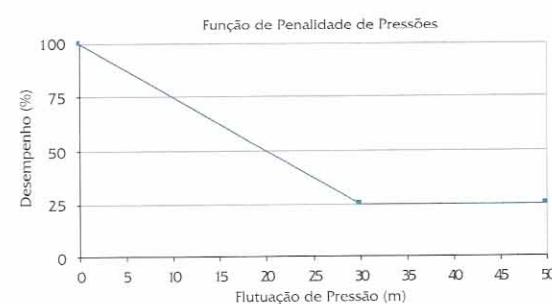
Desta forma foi possível obter as representações gráficas das curvas de consumos e de perdas e das percentagens de perdas de água em relação aos consumos, permitindo, assim, a comparação de cenários alternativos.

Com o objectivo de efectuar uma análise económico-financeira que permita comparar diversos cenários alternativos ao sistema de distribuição de água em estudo, recorreu-se a uma abordagem clássica, que consiste na determinação de todos os custos directos associados a cada cenário alternativo, onde se incluem os custos iniciais de construção e os custos actualizados de exploração, manutenção e demolição de todos os elementos constituintes do sistema, a que se acrescentou o custo indirecto associado às perdas de água (Dias, 2004).

3. DESCRIÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Com base na análise da topografia da área onde se pretende implantar o sistema de distribuição de água (Figura 2), optou-se por dividi-la em duas zonas: uma com cotas mais elevadas (entre 45 e 100 m), designada por Zona Alta (Zona A) e outra com cotas mais baixas (entre 5 e 45 m),

b)



d)



Figura 1. Funções penalidade em termos de (a) pressões, (b) flutuação de pressões e (c) e (d) velocidades de escoamento.

designada Zona Baixa (Zona B), por forma a que as pressões não excedessem os valores máximos regulamentares (i.e., 60 m c.a.). Ambas as zonas são abastecidas por um reservatório apoiado de distribuição às populações (RNFI).

De modo a satisfazer as pressões mínimas e máximas em toda a rede, o abastecimento da Zona A é assegurado por uma torre de pressão que é alimentada por bombagem a partir do reservatório apoiado RNV1, enquanto que a Zona B é alimentada através de uma conduta adutora desde o reservatório até a uma câmara de perda de carga (RNFI2).

A partir da torre de pressão e da câmara de perda de carga traçaram-se as redes de distribuição que abastecem as duas zonas. A rede de distribuição que abastece a Zona A é totalmente ramificada, enquanto que a rede da Zona B tem quatro malhas o que lhe confere uma maior flexibilidade em termos de variação de consumos e futuras expansões da rede, e uma maior fiabilidade em caso de avaria ou incêndio.

Considerando como dados base da população a abastecer, no ano horizonte de projecto (ano 20), uma população de 10 000 habitantes e uma captação de 180 l/(hab.dia), determinou-se a população e o caudal médio de cada zona, assim como os respectivos factores de ponta e caudais de ponta horários. Apresentam-se no Quadro 1, os factores de ponta e os caudais de ponta horários para as Zonas A e B no ano horizonte de projecto.

Quadro 1. População, factores de ponta e caudais de ponta horários das Zonas A e B para o ano horizonte de projecto.

Zona	População (hab.)	Factor de Ponta Horário (-)	Caudal de Ponta Horário (l/s)
A	3300	3.22	24.06
B	6700	2.86	44.08
Total	10000	-	68.14

Aplicando a metodologia correntemente utilizada em projecto e respeitando os valores impostos pelo DR23/95, de 23 de Agosto,

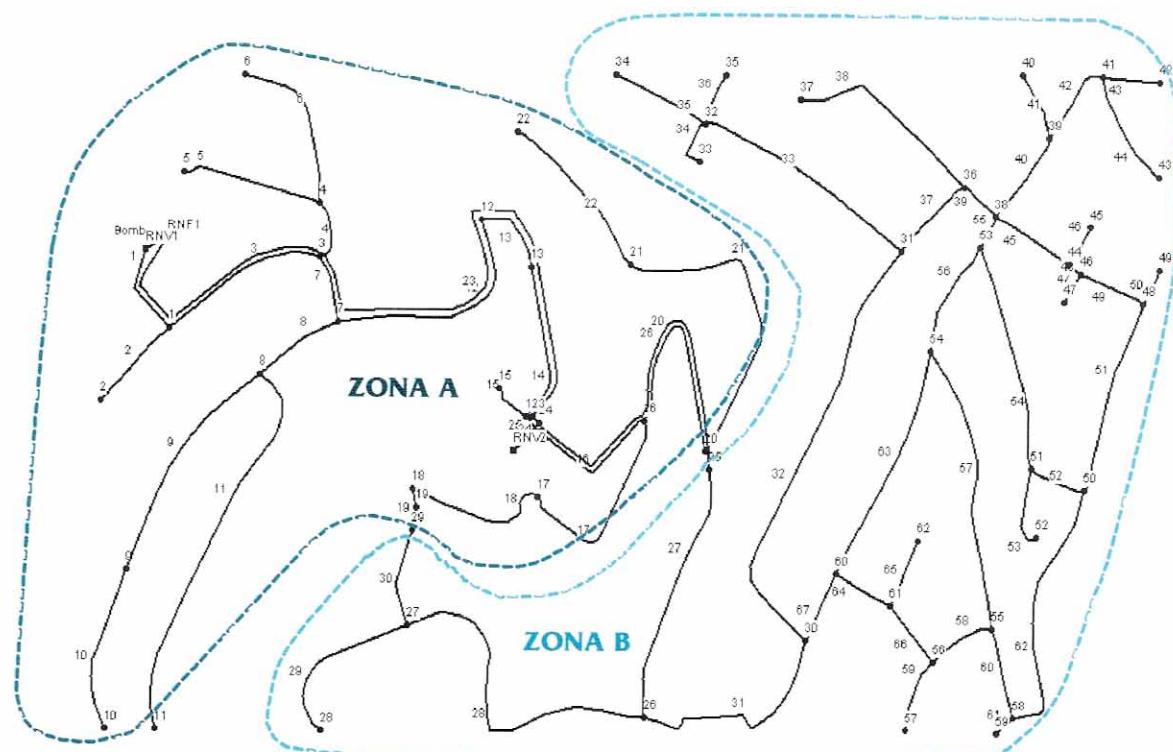


Figura 2. Topologia do sistema de distribuição de água no EPANET.

determinaram-se os caudais associados a cada nó e dimensionou-se o reservatório apoiado, assim como a torre de pressão.

Quer a estação elevatória, quer a conduta adutora foram dimensionadas para o caudal de ponta horário. Deste modo, foram instalados na torre de pressão e na câmara de perda de carga, automatismos (i.e., flutuadores) que fazem arrancar ou desligar a bomba e abrir ou fechar a válvula de controlo de caudal (VCC) instalada na conduta adutora. Os níveis em que esses automatismos accionam a bomba ou a válvula foram colocados o mais próximo possível dos limites mínimos e máximos dos reservatórios, por forma a aproveitar o maior volume possível de água.

Para dimensionar a rede de condutas das duas zonas, efectuou-se uma simulação estática, com base nos valores do caudal de ponta verificado no ano horizonte de projecto, usando o programa de cálculo EPANET. Foram adoptadas, nesta primeira fase, condutas em FFD com um coeficiente de Hazen-Williams de $120\text{ m}^{0.37}/\text{s}$.

4. AVALIAÇÃO DO DESEMPEÑO PARA DIFERENTES CENÁRIOS ALTERNATIVOS

4.1. Efeito da Curva de Consumos (Casos 0 e 1)

Após o dimensionamento hidráulico do sistema de distribuição de água, efectuaram-se duas simulações com duas curvas de factores de consumo diárias: uma proposta no MSBII – Manual de Saneamento Básico II (1991) (Caso 0) e correntemente utilizada em projecto, e outra estimada por Araujo *et al.* (2004) para a povoação de Medrosa (Caso 1) (Figura 3). Esta última curva de factores de consumo diário foi considerada

devido à semelhança em termos do número de habitantes e à proximidade geográfica das zonas, assumindo os mesmos hábitos de consumo. Os factores de consumo de ponta na curva do MSBII são claramente superiores aos factores de consumo propostos para a povoação de Medrosa, i.e., as pontas máximas horárias variam de 2.67 (MSBII) para 1.75 (Medrosa) (Figura 3).

Com base nos resultados do simulador EPANET e nas rotinas de cálculo desenvolvidas especificamente para o efeito, determinaram-se os desempenhos hidráulicos relativos às pressões, flutuações de pressão, velocidades e perdas de água do sistema de distribuição de água. Calcularam-se, também, o número de arranques e paragens da bomba, aberturas e fechos da válvula de controlo de caudal e as curvas de isolinhas de pressão para as horas de menor consumo. Para estimar os custos das condutas foram adoptados os valores fornecidos nas empresas consultadas em Dias (2004). Os resultados desta análise apresentam-se nas Figuras 4 e 5 para o Caso 0 e Figuras 6 e 7 para o Caso 1.

No que se refere às representações gráficas dos desempenhos associados às pressões, os percentis indicados nas Figuras 5a e 5b, representam a percentagem de caudal que é distribuído com desempenhos inferiores a determinado nível de desempenho, enquanto que os percentis apresentados na Figura 5c, relativos aos desempenhos associados às velocidades de escoamento, referem-se à percentagem de volume de troços que tem desempenhos inferiores a determinado nível de desempenho.

A análise dos resultados de simulação obtidos para os Casos 0 e 1 permitiu concluir o seguinte

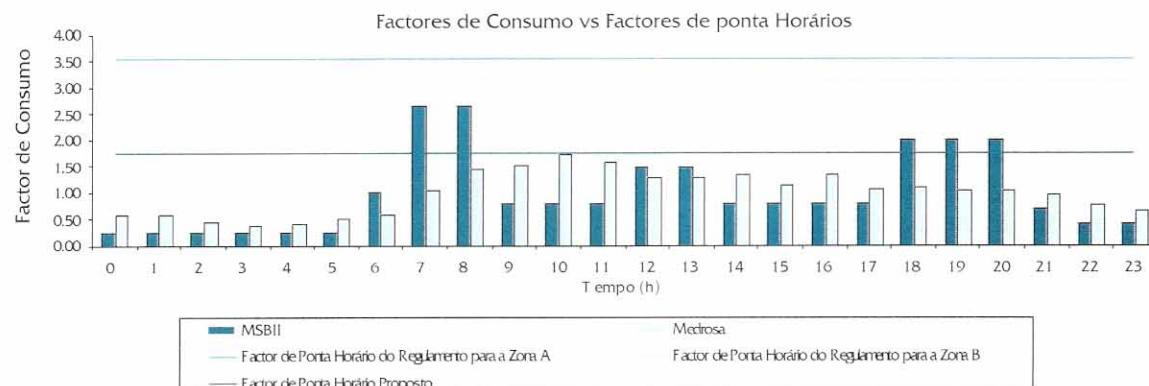


Figura 3. Factores de consumo vs. Factores de ponta horários.

- (i) O sistema de distribuição apresenta um indicador de pressão com um desempenho global baixo da ordem de **65%**, ao longo das 24 horas para ambos os Casos 0 e 1. Isto deve-se ao facto de cerca de 70% do caudal ser distribuído com desempenhos inferiores a 75%, devido a pressões elevadas (Figuras 4, 5a, 6 e 7a).
- (ii) O indicador de flutuação de pressão também tem um comportamento idêntico em ambas as simulações, com uma curva média próxima de **97%** (Figuras 5b e 7b). Este comportamento é explicado pelas flutuações inferiores a 1.5 m que a torre de pressão e a câmara de perda de carga permitem.
- (iii) O indicador de velocidades, adaptado de Coelho (1997), revela que estas são geralmente muito baixas, com um valor médio de ca. **10%** e **5%** no caso de se considerar a curva teórica do MSBII (1991) ou a curva real de Medrosa, respectivamente (Figuras 5c e 7c). Quando se adopta a função de penalidade de velocidades proposta, estes valores aumentam para ca. **51%** em ambos os casos (Figuras 5d e 7d). Esta diferença deve-se ao facto de na primeira função se penalizar o sobredimensionamento da rede, o que origina baixas velocidades e que poderá implicar elevados tempos de percurso, o decaimento do cloro residual e eventuais problemas de estagnação e de sedimentação nas zonas de extremidade, enquanto que na segunda função se assume que sempre que ocorram velocidades não nulas a água está a ser renovada, evitando a sedimentação nas zonas de extremidade.
- (iv) Devido às elevadas pressões na rede, as perdas físicas de água atingem cerca de **31%** do volume total distribuído (Figuras 5e e 7e).
- (v) Relativamente ao número de arranques da bomba que alimenta a torre de pressão e abertura da válvula de controlo de caudal colocada a montante da câmara de perda de carga, verifica-se que estes componentes apresentam comportamentos positivos, uma vez que a bomba nunca arranca mais de **2** vezes por hora e a válvula abre, em média, **9** vezes por hora, sendo 12 vezes o número máximo de aberturas.

Para os Casos 0 e 1, o sistema foi dimensionado para caudais de ponta elevados, calculados com base no regulamento ($f_p = 3.22$ e $f_p = 2.86$,

para as Zonas A e B, respectivamente), pelo que, em populações com consumos de ponta inferiores, poderão surgir índices de desempenho baixos no que se refere às velocidades e, consequentemente, à qualidade de água, devido ao maior tempo de percurso. Nesta conformidade, é aconselhável efectuar uma análise concreta dos hábitos de consumo das populações, por forma a considerar factores de ponta horários mais próximos da realidade (i.e., menores) para efeitos de dimensionamento do sistema e, em consequência, melhorar os desempenhos hidráulicos e de qualidade da água.



Figura 4. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 0).



Figura 6. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 1).



Figura 8. Isolinhas de pressão para a hora de (a) maior e de (b) menor consumo (Caso 2).

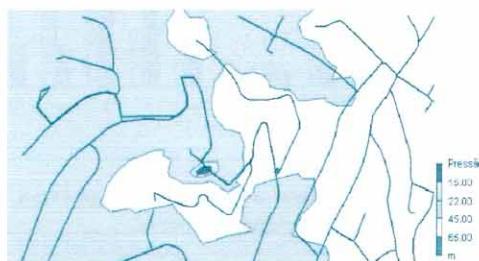


Figura 10. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 3).

METODOLOGIA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO PARA AMELHORIA DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

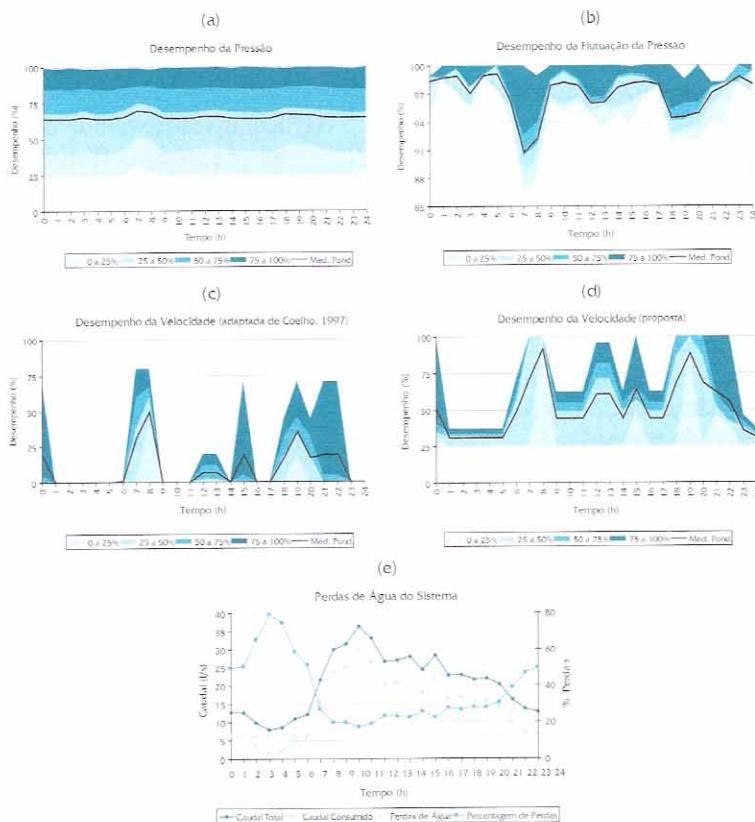


Figura 5. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 0).

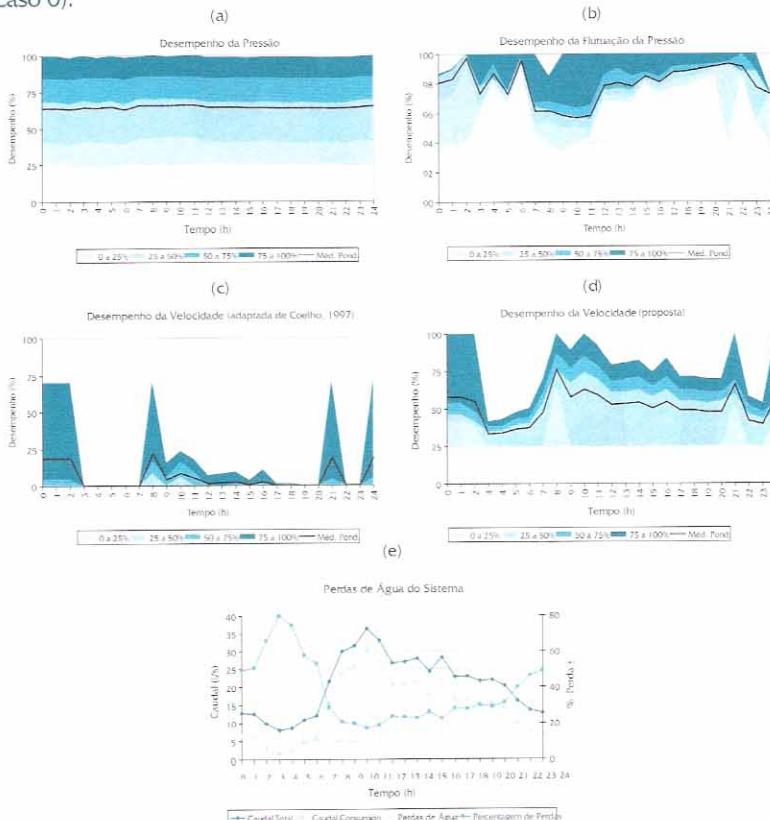


Figura 7. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 1).

4.2. Efeito dos Custos (Casos 2 e 3)

Por forma a minimizar o investimento inicial nas condutas, redimensionou-se a rede de distribuição para condutas em PVC (Caso 2) e em PEAD (Caso 3). Por se tratar de um sistema de distribuição de água onde as pressões máximas atingem, e até excedem em alguns nós, os 60 m c.a., utilizaram-se condutas com pressões de serviço de 10 bar (i.e., PN 10), no entanto, devem ser tidos em conta outros critérios que podem influenciar a decisão final do material de tubagem a adoptar, como sendo o tipo de terreno, os diâmetros, ou experiências com um determinado tipo de material.

4.2.1. Condutas em PVC (Caso 2)

Para efectuar o dimensionamento do sistema de distribuição de água com condutas de PVC considerou-se o coeficiente de Hazen-Williams de $140\text{ m}^{0.37}/\text{s}$ e procedeu-se à simulação para as condições de ponta horárias correspondentes ao ano horizonte de projecto. Para avaliar o desempenho deste sistema, simulou-se o seu funcionamento durante 24 horas considerando a curva de consumos de Medrosa proposta por Araujo *et al.* (2004).

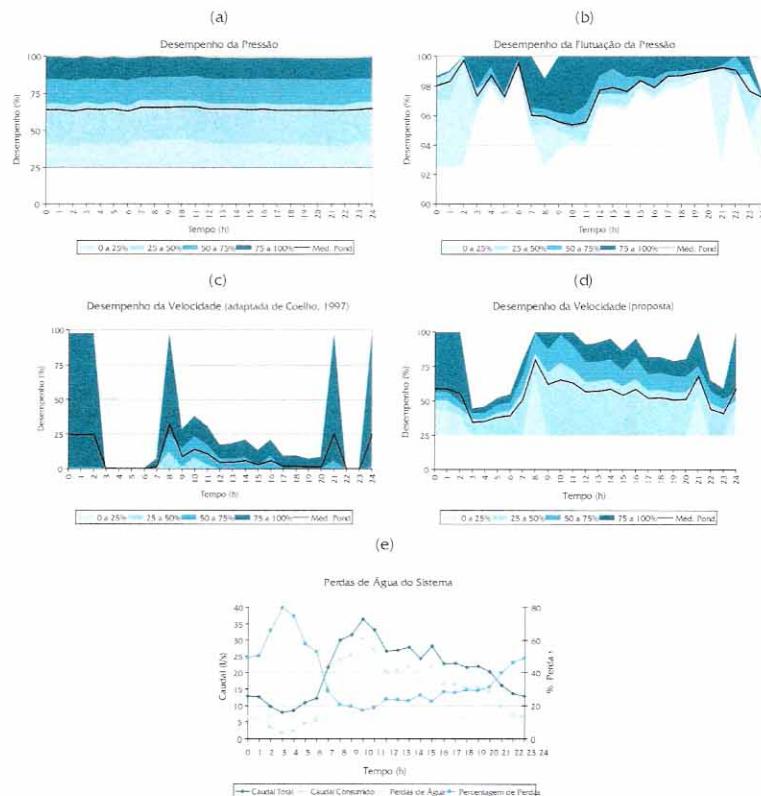


Figura 9. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 2).

As conclusões que se podem tirar deste caso (Caso 2) são as seguintes:

- Relativamente aos desempenhos associados às pressões e flutuações de pressão, estes permanecem quase inalteráveis face aos desempenhos obtidos para o Caso 1 (Figuras 8, 9a e 9b).
- No que se refere aos indicadores de velocidades, surgem algumas melhorias devido à menor resistência ao escoamento, apresentando um valor médio de cerca de **9%** e de **54%** (Figuras 9c e 9d).
- Devido ao facto de não terem havido alterações significativas nas pressões, as perdas de água não variam face à solução de condutas em ferro fundido dúctil (Caso 1), mantendo-se em cerca de **31%** do volume total distribuído (Figura 9e).
- A mais valia na utilização deste material deve-se à elevada redução de custos, da ordem de **18%**.

(v) No que se refere aos desempenhos da bomba e da válvula de controlo de caudal, verifica-se que têm comportamentos idênticos aos obtidos para o Caso 1, uma vez que a bomba nunca arranca mais de 2 vezes por hora e a válvula abre, em média, 9 vezes por hora, sendo 12 vezes o número máximo de aberturas.

4.2.2. Condutas em PEAD (Caso 3)

Para o material das condutas PEAD, considerou-se o coeficiente de Hazen-Williams de $140\text{ m}^{0.37}/\text{s}$ e dimensionou-se o sistema para as condições regulamentares. Para a avaliação do seu desempenho, efectuou-se a simulação de 24 horas com a curva de factores de consumo diário de Mendrosa proposta por Araujo *et al.* (2004).

A análise desta alternativa permitiu retirar as seguintes conclusões:

(i) Relativamente aos desempenhos de pressões e de flutuações de pressão, sistema apresenta comportamentos semelhantes aos dos Casos 1 e 2 (Figuras 10, 11a e 11b).

(ii) Quanto aos indicadores de velocidades, surgem algumas melhorias devido à menor resistência ao escoamento, relativamente ao FFD, mas inferiores às conseguidas com o PVC, uma vez que o valor médio deste indicador é da ordem de 8% e de 54% (Figuras 11c e 11d).

(iii) As perdas de água não apresentam variação devido ao facto de não haver alterações nas pressões, mantendo-se em cerca de 31% do volume total distribuído (Figura 11e).

(iv) O PEAD é um material mais económico do que o FFD, mas não consegue atingir custos tão baixos como os do PVC para a gama de diâmetros utilizada neste sistema de distribuição, sendo inferior em 14% face ao custo da solução com condutas e acessórios em FFD e excedendo em 4% o custo do sistema com condutas e acessórios em PVC.

(v) Avaliando os desempenhos da bomba e da válvula de controlo de caudal, pode afirmar-se que têm comportamentos idênticos aos obtidos para os outros materiais (Casos 1 e 2),

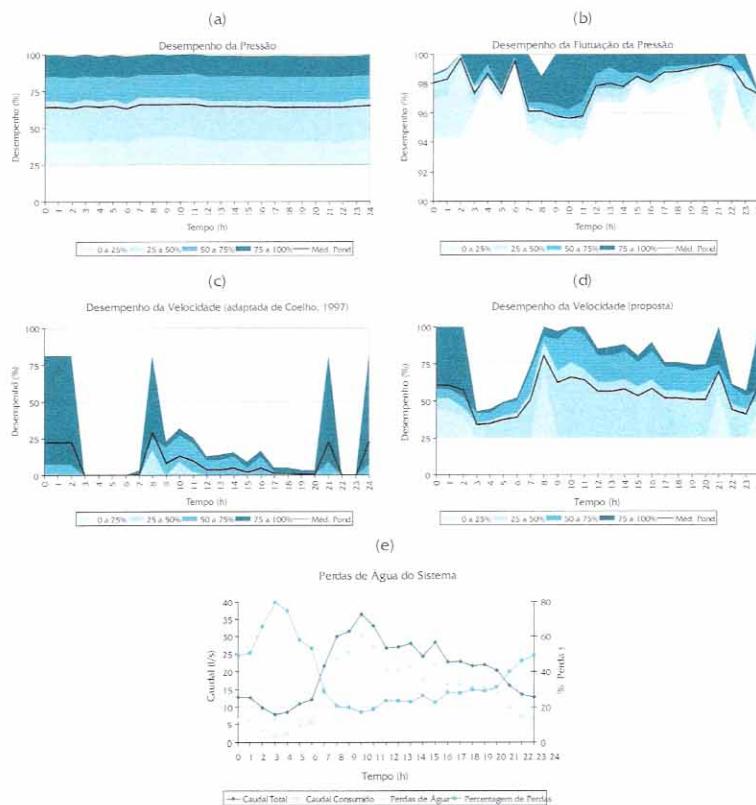


Figura 11. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 3).

uma vez que a bomba nunca arranca mais de 2 vezes por hora e a válvula abre, em média, 9 vezes por hora, sendo 12 vezes o número máximo de aberturas.

4.3. Efeito do Factor de Punta de Dimensionamento (Caso 4)

Por forma a melhorar o desempenho do sistema em termos de velocidades, analisou-se o efeito da alteração do factor de punta horário utilizado no dimensionamento. Com esta alteração procurou-se que as condutas fossem dimensionadas para o caudal máximo que efectivamente se prevê que passe no sistema na hora de maior consumo do ano horizonte de projecto, em vez dos valores de punta regulamentares calculados em função do número de habitantes. Para este efeito, utilizou-se a curva de consumos reais de Medrosa determinada em Araujo *et al.* (2004).

Adoptando como material das condutas o PVC, uma vez que é o mais económico, efectuou-se o redimensionamento das condutas para o factor de punta de 1.75 (Figura 3). Após redimensionar as condutas, efectuou-se a simulação durante 24 horas com a curva de factores de consumo real Araujo *et al.* (2004) e determinaram-se os desempenhos do sistema.

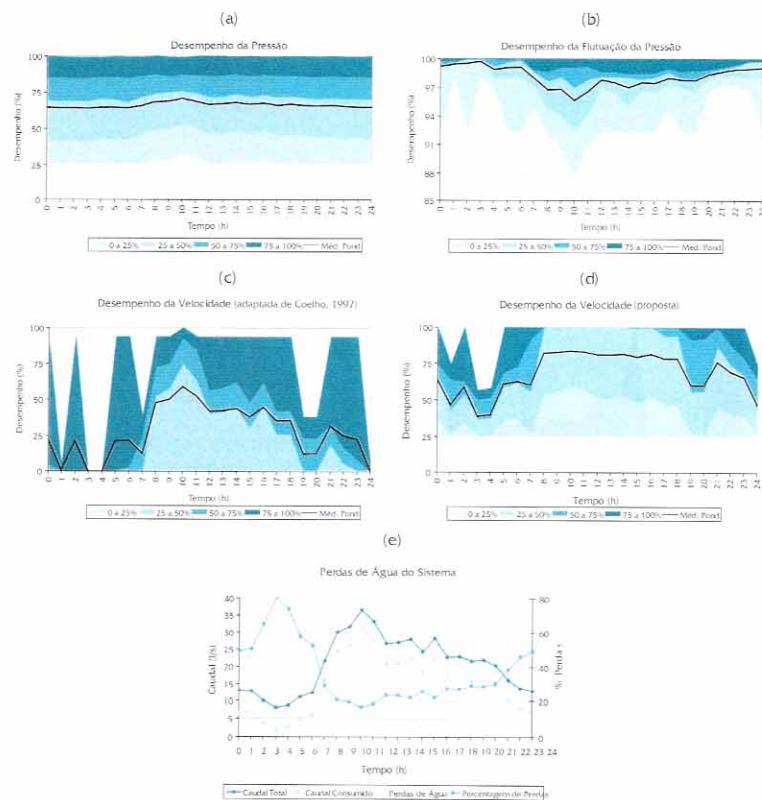


Figura 13. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 4).

Esta avaliação permitiu verificar que:

(i) O sistema de distribuição de água ainda apresenta um indicador de pressão com um desempenho global da ordem de **74%** ao longo das 24 horas. Isto deve-se ao facto de cerca de 70% do caudal ser distribuído com desempenhos inferiores a 75%, devido à ocorrência de pressões elevadas (Figuras 12 e 13a), contudo, o seu desempenho melhora, em média, cerca de 10% face aos cenários preconizados pelo regulamento (Casos 1, 2 e 3).

(ii) O indicador de flutuação de pressão tem um bom comportamento, com um valor médio próximo de **96%** (Figura 13b). A explicação deste comportamento mantém-se, uma vez que as flutuações do nível de água no interior da torre de pressão e da câmara de perda de carga, são inferiores a 1.5 m.

(iii) Os indicadores de velocidades revelam melhorias significativas, com um valor médio de ca. **28%** e de **68%** (Figuras 13c e 13d). Ainda assim, este desempenho mantém valores relativamente baixos devido ao facto de existirem muitas condutas de extrema velocidade, que, para atingirem velocidades próximas da velocidade de referência (ou máxima),

teriam que ter dimensões inferiores às mínimas regulamentares. Nestas condutas devem prever-se dispositivos adequados para a descarga periódica do sistema.

(iv) Devido ao facto de se aumentarem as perdas de carga contínuas, o desempenho das pressões no sistema melhorou e, consequentemente, as perdas de água reduziram ligeiramente de 31% para ca. 29% do volume total distribuído (Figura 13e).

(v) Para além das melhorias hidráulicas, a nível económico consegue-se uma redução de custos no sistema da ordem de 4% devido à diminuição dos diâmetros das condutas principais, em comparação com o custo da solução analisada no Caso 2.

(vi) Relativamente ao número de arranques da bomba e abertura da válvula de controlo de caudal, estes têm comportamentos melhores, uma vez que a bomba nunca arranca mais de 2 vezes por hora e a válvula abre, em média, 5 vezes por hora, sendo 7 vezes o número máximo de aberturas.



Figura 12. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 4).

5. EFEITO DA UTILIZAÇÃO DE VRP NO CONTROLO DE PERDAS E NÍVEL DE SERVIÇO

5.1. Considerações Gerais

Com o objectivo de melhorar os desempenhos relativamente às pressões elevadas e às perdas de água, introduziram-se três válvulas redutoras de pressão em locais estratégicos, i.e., em troços de conduta que intersectam a isolinha de pressão dos 45 m c.a., para garantir indicadores de desempenho associados às pressões superiores a 75%.

Da aplicação desta metodologia, resultou que seria necessário introduzir uma válvula na rede da Zona A (Válvula 16) e duas válvulas na rede da Zona B (Válvulas 37 e 67) (ver Figura 14).

Uma vez que as duas válvulas da Zona B se encontram em dois troços de uma malha, então testaram-se dois cenários alternativos: (i) malha com todos os seus troços abertos e (ii) malha com o troço em que o caudal se anula fechado (Troço 39 na Figura 14), i.e., a malha passa a ter um funcionamento semelhante a dois ramos.

Para esses dois cenários alternativos, utilizaram-se três tipos de válvulas redutoras de pressão analisadas em Covas e Ramos (1998): (i) com carga hidráulica a jusante constante (Casos 5 e 6), (ii) com perda de carga constante (Casos 7 e 8) e (iii) com perda de carga variável em função do tempo (Casos 9 e 10).

Esta análise teve como objectivo principal avaliar qual o tipo de válvula redutora de pressão que proporciona o melhor desempenho hidráulico ao sistema de distribuição em estudo, em termos de pressões e perdas de água.

5.2. VRP com Carga a Jusante Constante (Casos 5 e 6)

Efectuaram-se duas simulações com este tipo de válvula redutora de pressão, uma com o Troço 39 da malha aberto e outra com este troço fechado, recorrendo a uma válvula de seccionamento.

Para efectuar simulações com válvulas redutoras de pressão com carga constante a jusante, o programa EPANET requer, como dados iniciais, o diâmetro da válvula e o valor da carga hidráulica no nó de jusante. Para obter estes valores efectuaram-se os seguintes cálculos para a hora de maior consumo, i.e., às 10 horas da manhã: (i) o diâmetro foi determinado por forma a que o escoamento se fizesse com uma velocidade menor que a velocidade máxima; (ii) o valor da carga hidráulica no nó de jusante foi determinado por forma a que a pressão no nó com menor pressão (i.e., nó crítico) fosse de 22 m c.a..

Com base nesses dados, efectuaram-se as simulações que permitiram obter, à semelhança com as análises anteriores, os desempenhos de pressões, de flutuações de pressão, de velocidades e de perdas de água, para além de curvas de variação no tempo, da pressão nos nós críticos.

Com os resultados das simulações efectuadas, verificou-se que:

- (i) Estes cenários (Casos 5 e 6) apresentam indicadores de pressão com um desempenho global da ordem de **88%** ao longo das 24 horas, sendo 90% do caudal distribuído com indicadores de desempenho superiores a 75% (Figuras 15, 16a, 17 e 18a), resultando numa melhoria de desempenho de cerca de **13%**, em média, face ao cenário sem válvulas redutoras de pressão (Caso 4).
- (ii) Os indicadores de flutuação de pressão têm comportamentos semelhantes em ambos os cenários (Casos 5 e 6), com um valor médio próximo de **98%** (Figuras 16b e 18b). A explicação destas melhorias deve-se ao facto de as flutuações que ocorrem no interior da torre de pressão e da câmara de perda de carga apenas se fazerem sentir nos nós a montante das válvulas, uma vez que a jusante as pressões são controladas pelas válvulas redutoras de pressão.
- (iii) Os indicadores de velocidades revelam poucas melhorias, pois não se alteraram os diâmetros das condutas. O valor médio do

desempenho de velocidades é de ca. **28%** (Figuras 16c e 18c) e de **68%** (Figuras 16d e 18d). Este desempenho mantém valores relativamente baixos por existirem muitas condutas terminais, que para atingirem velocidades próximas da velocidade de referência (ou máxima) teriam que ter dimensões inferiores às mínimas regulamentares. Conforme referido em casos anteriores, nestas condutas devem prever-se dispositivos adequados para a descarga periódica.

- (iv) Como as pressões são controladas pelas válvulas redutoras de pressão, o sistema obtém melhorias muito significativas nas perdas físicas de água, tendo reduzido de 29% para cerca de **21%** do volume total distribuído (Figuras 16e e 18e).
- (v) O sistema com o Troço 39 fechado proporciona melhores desempenhos (cerca de **1%** melhores), mas estes são acompanhados por uma perda de fiabilidade, pelo que não é vantajoso optar pelo Caso 6 em detrimento do Caso 5.

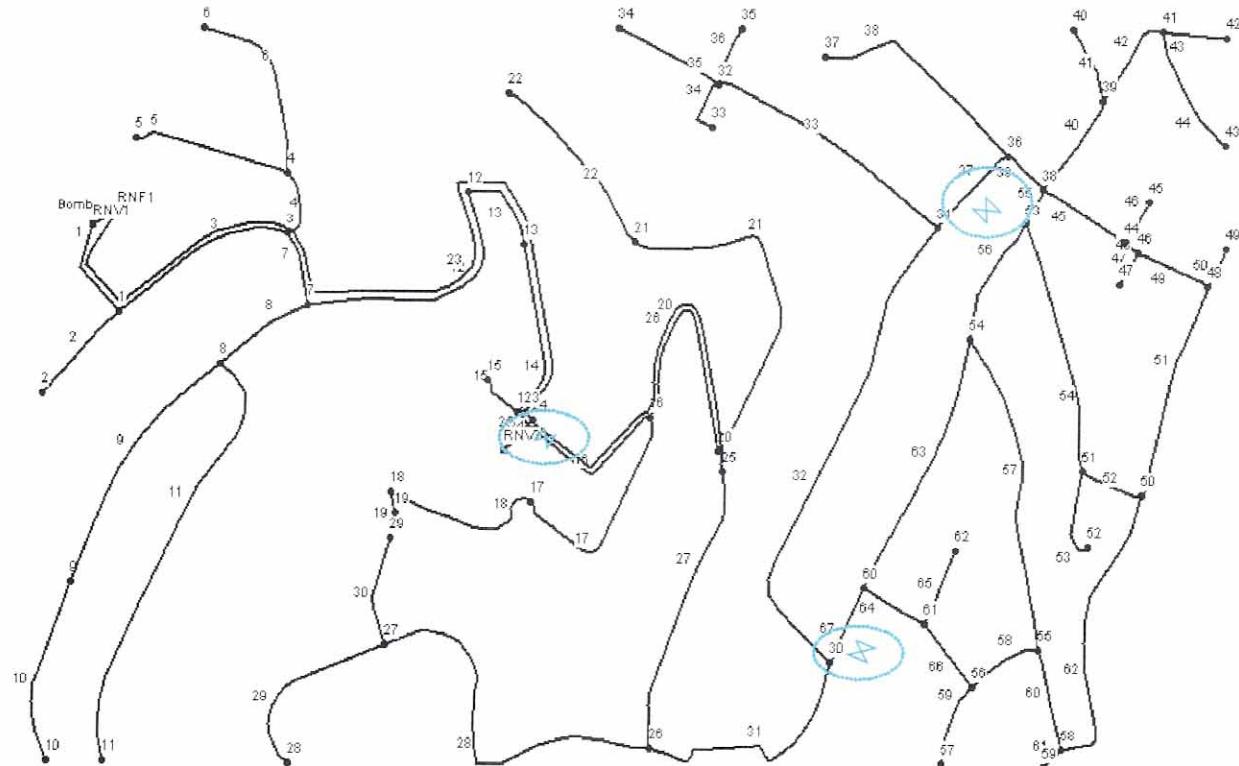


Figura 14. Topologia do sistema de distribuição de água no EPANET com VRP (Casos 5 a 10).

METODOLOGIA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO PARA AMELHORIA DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

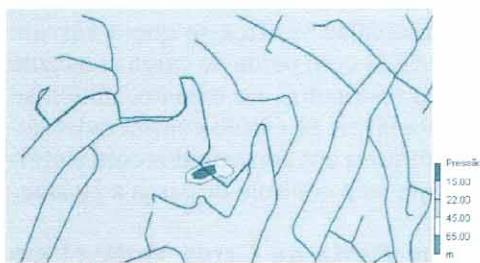


Figura 15. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 5).

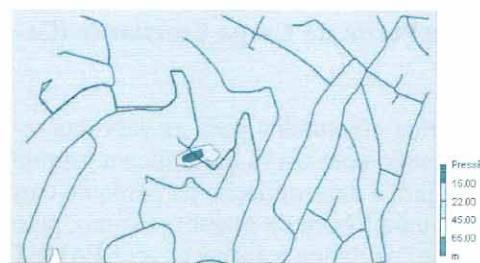


Figura 17. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 6).

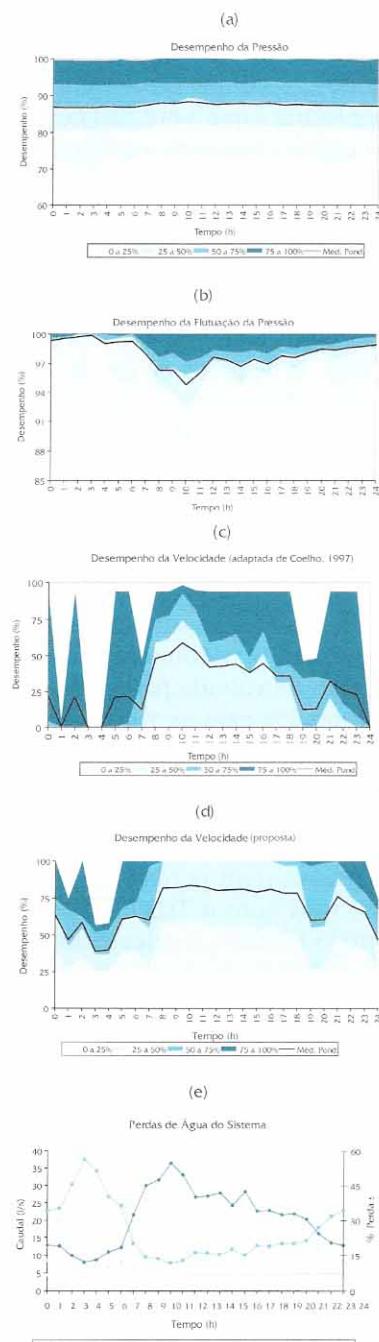


Figura 16. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 5).

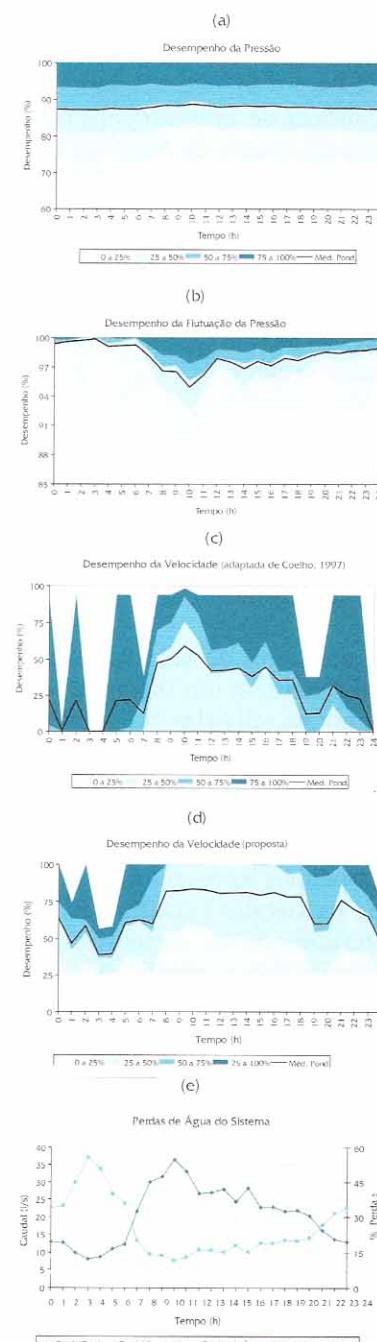


Figura 18. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 6).

5.3. VRP com Perda de Carga Constante (Casos 7 e 8)

Os cálculos efectuados para as válvulas redutoras de pressão com carga hidráulica a jusante constante exigem a determinação da perda de carga na válvula para a hora de maior consumo, pelo que, nesta fase, os dados a fornecer ao EPANET já foram determinados nos Casos 5 e 6. A análise permitiu concluir o seguinte:

- (i) Tal como foi verificado para a válvula redutora de pressão com carga a jusante constante (Casos 5 e 6), estes cenários apresentam indicadores de pressão com desempenhos globais da ordem de **86%** ao longo das 24 horas. Isto, porque cerca de 90% do caudal é distribuído com indicadores de desempenho superiores a 75% (Figuras 19, 20a, 21 e 22a). No entanto, os desempenhos obtidos para este tipo de válvulas são cerca de 1% piores do que os obtidos para as válvulas de carga a jusante constante.
- (ii) Os indicadores de flutuação de pressão têm comportamentos semelhantes em ambos os cenários, com valores médios próximos de **97%** (Figuras 20a e 22b), cerca de 1% piores do que os obtidos para as válvulas com carga a jusante constante (Casos 5 e 6).
- (iii) Os indicadores de velocidade mostram que este sistema tem um funcionamento pior do que para as válvulas redutoras de pressão com carga a jusante constante, uma vez que os valores médios dos desempenhos são da ordem de **27%** (Figuras 20c e 22c) e de **67%** (Figuras 20d e 22d). Do mesmo modo, estes desempenhos apresentam valores relativamente baixos por existirem muitas condutas que teriam que ter dimensões inferiores às mínimas regulamentares para que verificassem os critérios das velocidades.
- (iv) Uma vez que as pressões estão controladas, este sistema de distribuição obteve melhorias muito significativas nas perdas físicas de água, tendo sido reduzidas para cerca de **22%** do volume total distribuído (Figuras 20e e 22e), 1% acima dos Casos 5 e 6.
- (v) As melhorias quando se considera o Troço 39 fechado não são suficientes para compensar a perda de fiabilidade do sistema, pelo que o Caso 7 é melhor que o Caso 8.

Com esta análise verifica-se que a válvula redutora de pressão com perda de carga constante apresenta bons resultados, no entanto, obtém-se para todas as variáveis de estado consideradas desempenhos inferiores aos conseguidos com a utilização da válvula com controlo de carga a jusante.

5.4. VRP com Perda de Carga Variável em Função do Tempo (Casos 9 e 10)

As válvulas redutoras de pressão com perda de carga variável em função do tempo têm como objectivo introduzir perdas de carga localizadas em função do caudal que efectivamente passa na válvula, por forma a que a pressão nos nós críticos seja, tanto quanto possível, constante e igual ao mínimo regulamentar, i.e. 22 m c.a.. Para simular estas condições, recorreu-se à utilização de regras que estabelecessem a perda de carga hora a hora. Esta metodologia permite que a pressão nos nós a jusante das válvulas redutoras de pressão sejam apenas função dos níveis de água na torre de pressão ou na câmara de perda de carga.

Efectuaram-se duas simulações – uma com o Troço 39 da malha aberto e outra com este troço fechado recorrendo a uma válvula de seccionamento – por forma a verificar qual dos cenários teria melhores desempenhos.

Para efectuar estas simulações, o EPANET requer como dados o diâmetro e os valores da perda de carga da válvula para cada hora. Os diâmetros adoptados para as válvulas redutoras de pressão nos Casos 9 e 10 foram os mesmos que os diâmetros das válvulas analisadas nos Casos 5 a 8. Para obter as perdas de carga horárias, efectuaram-se duas simulações com as válvulas abertas (i.e., sem provocarem perdas de carga localizadas), sendo uma com o Troço 39 aberto e outra com este troço fechado, e calcularam-se as perdas de carga necessárias para que nos nós críticos se verificassem sempre 22 m c.a. de pressão. Com estes resultados, definiram-se regras de operação das válvulas redutoras de pressão. Um exemplo de uma dessas regras no períodos das 1h às 2h é a seguinte:

```
RULE 6  
IF SYSTEM CLOCKTIME >= 1 AM  
AND SYSTEM CLOCKTIME < 2 AM  
THEN VALVE 16 SETTING IS 27.23
```

onde o “*setting*” representa a perda de carga na válvula 16.

METODOLOGIA DE APOIO AO DIAGNÓSTICO PARA AMELHORIA DO DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

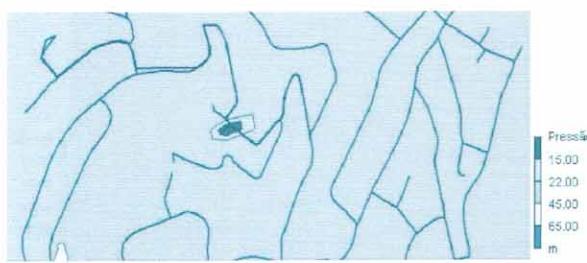


Figura 19. Isolinhas de pressão para a hora de (a) maior e de (b) menor consumo (Caso 7).

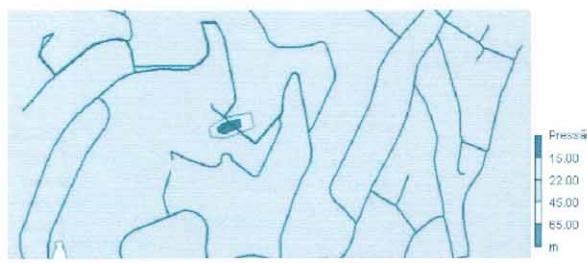


Figura 21. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 8).

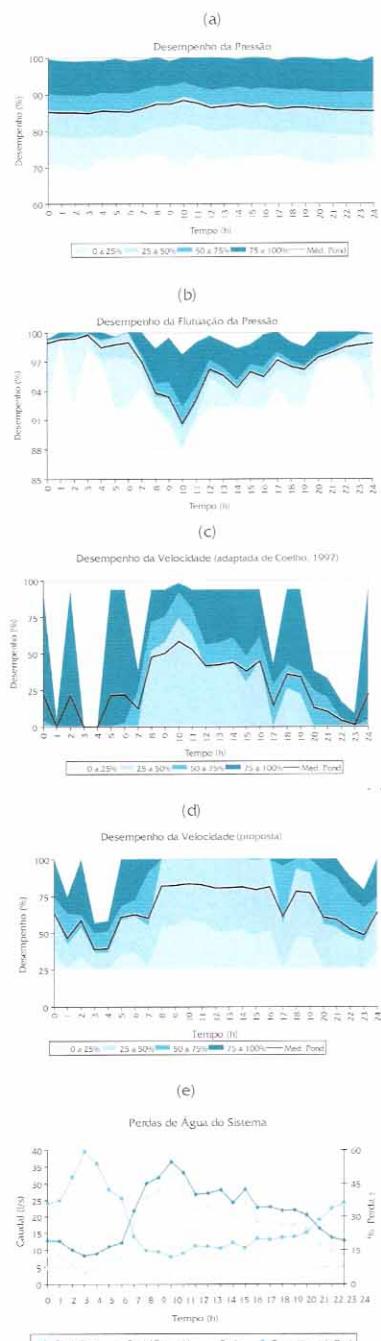


Figura 20. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 7).

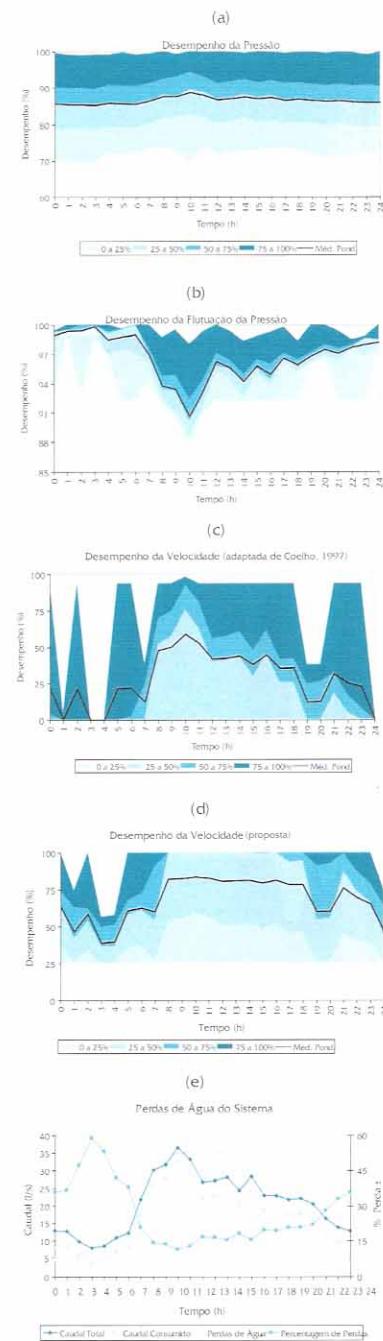


Figura 22. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 8).

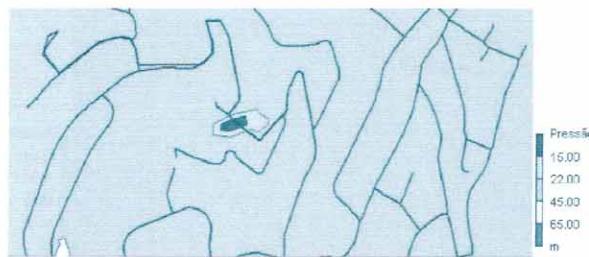


Figura 23. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 9).

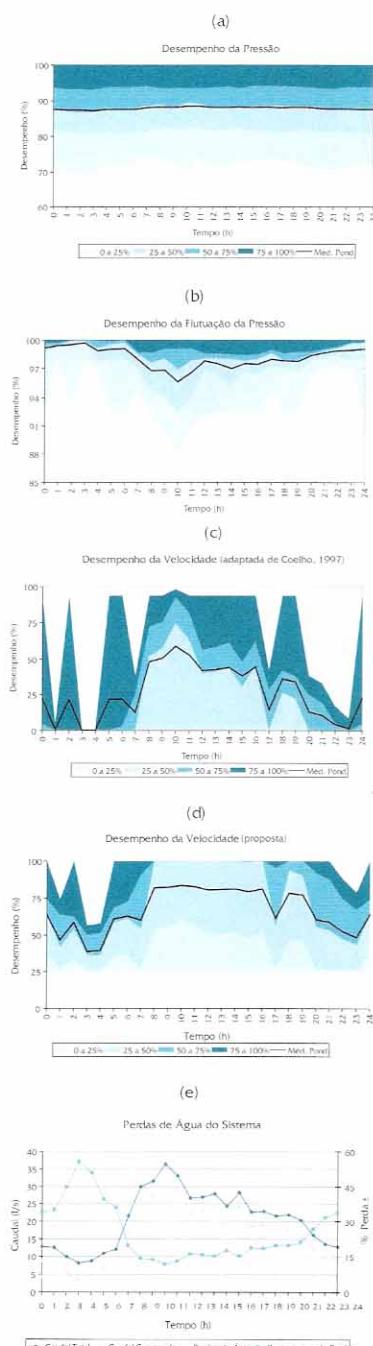


Figura 24. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) e (d) velocidades e (e) perdas de água (Caso 9).



Figura 25. Isolinhas de pressão para a hora de menor consumo (Caso 10).

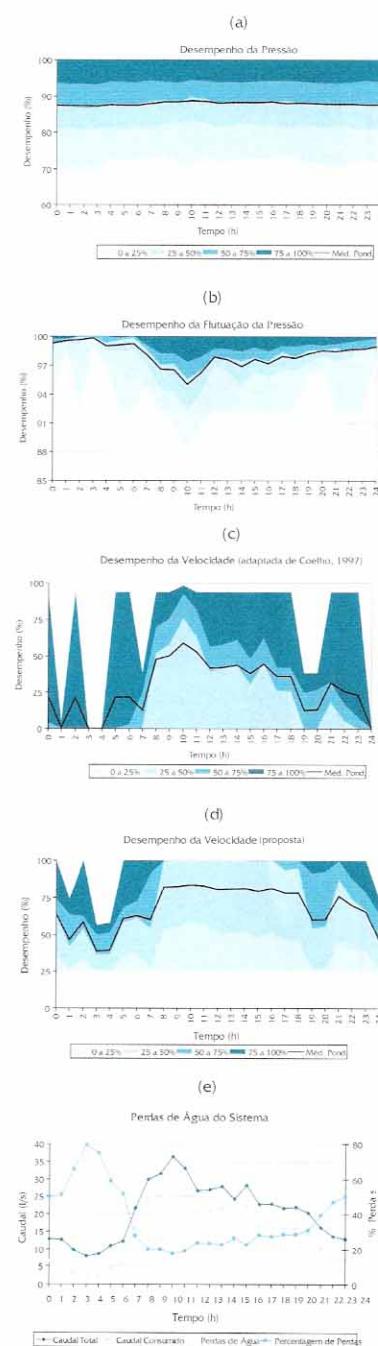


Figura 26. Desempenho do sistema de distribuição em termos de: (a) pressões, (b) flutuações de pressão, (c) velocidades e (d) perdas de água (Caso 10).

A análise permitiu concluir o seguinte:

- (i) Esta é a válvula redutora de pressão que conduz aos melhores desempenhos do sistema, uma vez que se verifica que ambos os cenários apresentam indicadores de pressão com desempenhos globais da ordem de **88%** ao longo das 24 horas, porque cerca de 90% do caudal é distribuído com indicadores de desempenho superiores a 75% (Figuras 23, 24a, 25 e 26a). No entanto, estes desempenhos não apresentam melhorias superiores a 0.5% face aos obtidos para as válvulas de carga a jusante constante (Casos 5 e 6).
- (ii) Os indicadores de flutuação de pressão têm comportamentos semelhantes em ambos os cenários, com valores médios próximos de **98%** (Figuras 24b e 26b). Estes comportamentos são idênticos aos obtidos para as válvulas com carga a jusante constante, apresentando um justificação em tudo semelhante.
- (iii) Os indicadores de velocidade mostram que este sistema tem um funcionamento idêntico ao obtido pela rede sem válvulas (Caso 4), uma vez que os valores médios de desempenho são cerca de **28%** (Figuras 24c e 26 c) e de **68%** (Figuras 24d e 26d).
- (iv) Por se controlarem as pressões elevadas, com a introdução de válvulas redutoras de pressão que apenas não equilibram as flutuações da torre de pressão e da câmara de perda de carga, este sistema de distribuição apresenta os melhores resultados deste estudo, obtendo volumes de perdas de água menores que **21%** do volume total distribuído (Figuras 24e e 26e).
- (v) Ocorrem algumas melhorias quando se considera o cenário com o Troço 39 fechado, mas não são suficientes para compensar a perda de fiabilidade e de flexibilidade do sistema. Com estes resultados verifica-se que esta válvula tem o melhor funcionamento de entre os três tipos de válvulas redutoras de pressão analisadas, no entanto, é também a válvula com maior custo devido aos equipamentos de automação e controlo.

6. CONCLUSÕES

Como conclusões referem-se algumas alterações à abordagem convencional que permitem

melhorar os desempenhos hidráulicos, sem nunca esquecer a fiabilidade e o custo do sistema. Apresentam-se os gráficos síntese, com a comparação dos custos totais do sistema, em que se incluem os custos associados à água que é perdida através de fugas (Figura 27) e dos desempenhos associados às velocidades (Figuras 28 e 29), pressões (Figura 30) e perdas de água (Figura 31) das várias soluções alternativas analisadas.

Com a análise efectuada e com base nos custos dos materiais recolhidos em Dias (2004), verificou-se que a utilização de materiais plásticos do tipo PVC ou PEAD, relativamente ao FFD, reduz consideravelmente os custos (comparar Caso 1, 2 e 3 na Figura 27), para cerca de 20% no caso do PVC, tendo desempenhos hidráulicos semelhantes, ou melhores, que os obtidos para o FFD.

Para além da utilização de materiais plásticos, ao adoptar um factor de ponta de dimensionamento demasiado elevado face à ponta observada na hora de maior consumo do ano horizonte de projecto, as velocidades que ocorrem nas condutas são muito baixas, originando índices de desempenho de velocidades também muito baixos (comparar desempenhos dos Casos 0 a 3 com 4 a 10 nas Figuras 28 e 29). O facto de existirem velocidades muito baixas pode levantar problemas de estagnação e de sedimentação e, consequentemente, problemas de qualidade da água. Para estimar os caudais de ponta horários de dimensionamento para um sistema de distribuição de água novo, recomenda-se o estudo da evolução populacional na zona e dos seus hábitos de consumo, ou que se utilizem, como referência, curvas de consumo reais de populações semelhantes, por forma a poder dimensioná-lo para os melhores desempenhos hidráulicos.

Foram analisados três tipos de válvulas redutoras de pressão (i.e., válvula com carga hidráulica a jusante constante, válvula com perda de carga constante e válvula com perda de carga variável em função do tempo) em dois cenários possíveis de configuração do sistema de distribuição (i.e., com o Troço 39 aberto e fechado recorrendo a uma válvula de seccionamento), tendo-se concluído o seguinte:

A introdução de válvulas redutoras de pressão proporciona muitas melhorias relativamente aos desempenhos em termos de pressões e de perdas de água (comparar Casos 0 a 4 com 5 a 10 nas Figura 30 e 31), não introduzindo quaisquer melhorias em termos de velocidades (comparar Caso 4 com 5 a 10 nas Figuras 28 e 29).

A utilização de válvulas redutoras de pressão com perda de carga variável conduz aos melhores desempenhos hidráulicos, uma vez que reduz as perdas de água para valores de 20.7% do volume total distribuído (em ambos os cenários, i.e., Caso 9 e 10), enquanto que a utilização de válvulas redutoras de pressão com carga a jusante constante apenas consegue atingir esses valores com uma redução de fiabilidade (i.e., com o Troço 39 fechado – Caso 6). No entanto, quando o Troço 39 se encontra aberto (Caso 5) o sistema com as válvulas redutoras de pressão com carga a jusante constante apresenta perdas de água de 20.9% do volume total distribuído. Dado que a VRP com carga a jusante constante tem custos menores do que a válvula de perda de carga variável e a diferença de comportamento é pequena, aconselha-se uma análise económico-financeira por forma a orientar a escolha da melhor alternativa. Relativamente à válvula redutora de pressão com perda de carga constante pode afirmar-se que conduz ao pior desempenho do sistema de entre as três válvulas analisadas, porque apresenta perdas de água acima de 21.5% do volume total distribuído.

Os resultados obtidos para estes casos de estudo e face aos custos obtidos dos fabricantes aquando do levantamento das componentes do sistema, mostraram que o sistema de distribuição de água deve ser constituído por condutas plásticas do tipo PVC (ou PEAD) dimensionadas com um caudal de ponta horário da ordem de 1.75 do caudal médio por forma a obter bons desempenhos de velocidades e, se necessário, introduzir válvulas redutoras de pressão para melhorar o desempenho em termos de pressões e, consequentemente, reduzir as perdas físicas de água. Em todos os casos, devem recorrer-se a programas de simulação hidráulica (e.g., EPANET) por forma a comparar diversos cenários alternativos, avaliar a melhor solução e prever eventuais problemas futuros.

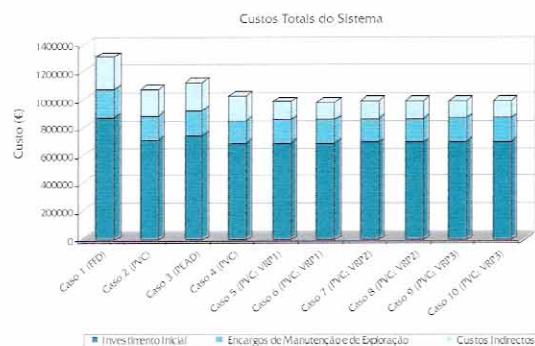


Figura 27. Custos totais nos diversos cenários alternativos.

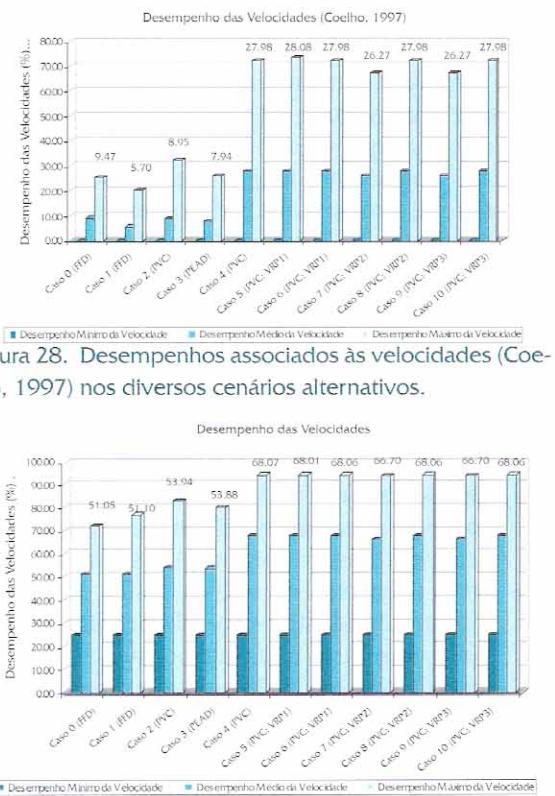


Figura 28. Desempenhos associados às velocidades (Coelho, 1997) nos diversos cenários alternativos.



Figura 29. Desempenhos associados às velocidades nos diversos cenários alternativos.

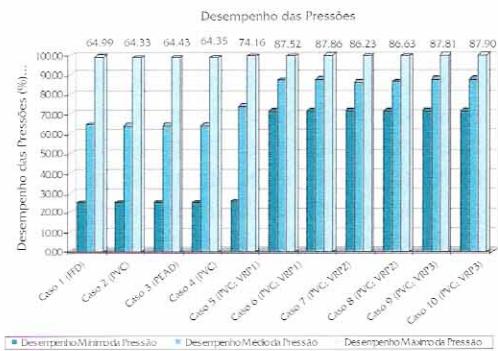


Figura 30. Desempenhos associados às pressões nos diversos cenários alternativos.



Figura 31. Desempenhos associados às perdas de água nos diversos cenários alternativos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alegre, H. (1992). *Instrumentos de Apoio à Gestão Técnica de Sistemas de Distribuição de Água*. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Alegre, H. e Almeida, M. (1995). *Avaliação de Níveis de Qualidade de Serviço*. Série Gestão de Sistemas de Saneamento Básico, Vol. 12, Lisboa: LNEC.
- Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J. M., e Parera, R. (2000). *Manual de Boa Prática da IWA – Versão Portuguesa intitulada: Indicadores de Desempenho para Serviços de Abastecimento de Água*. Lisboa: LNEC.
- Almeida, M., Baptista, J. M., Vieira, P., Silva, A., e Ribeiro, R. (2001). *O Uso Eficiente da Água em Portugal no Sector Urbano: Que Medidas e que Estratégias de Implementação? Uma Gestão para o Séc. XXI*. In Encontro Nacional das Entidades Gestoras, Lisboa: APDA.
- Alonso, J.M., Fernando, A., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P. A., Vidal, A. M., Martínez, F., Vercher, J., e Ulanicki, B. (2000). *Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization*. In Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, July/August.
- Araujo, L. S., Coelho, S. T., e Ramos, H. (2004). *Estimativa de Fugas e Consumos nas Redes de Distribuição de Água em Função da Pressão*. In XI Silubesa, Brasil 29 a 2 Abril.
- Araujo, L. S., Murinello, E., Ramos, H., e Coelho, S. T. (2004). *Avaliação do Desempenho de Sistemas em Pressão Integrados numa Política de Gestão Sustentável de Recursos Hídricos: Caso de Estudo*. In 7º Congresso da Água, Lisboa 8 a 12 Março.
- Baptista, J. M. (1998). *Como Melhorar a Qualidade em Sistemas de Abastecimento de Água*. In 4º Congresso da Água, Lisboa 23 a 27 Março.
- Coelho, S. T. (1997). *Performance in Water Distribution – A System Approach*. England: Research Studies Press, Ltd..
- Coelho, S. T. e Alegre, H. (1997). *Indicadores de Desempenho de Sistemas de Saneamento Básico*. Projecto financiado pela Direcção-Geral do Ambiente, Relatório final, Lisboa: LNEC.
- Covas, D. e Ramos, H. (1998). *A utilização de Válvulas Redutoras de Pressão no Controlo e Redução de Fugas em Sistemas de Distribuição de Água*. In 8º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Barcelos 27 a 30 Outubro.
- D.G.R.N. (1991). *Manual de Saneamento Básico MSBII – Abastecimento de Água e Esgoto*, Lisboa. Vol. 2.
- Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto.
- Dias, N. (2004). *Diagnóstico de Sistemas de Abastecimento de Água para Diferentes Condições de Operacionalidade e Segurança*. Trabalho de Final de Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade de Técnica de Lisboa, Lisboa.
- Faria, A. L. e Alegre, H. (1995). *Paving the Way to Excellence in Water Supply Systems: a National Framework for Levels-of-service Assessment based on Consumer Satisfaction*. In The Maarten Schalekamp Award – 1995, AQUA, Vol. 45, n.º 1, IWSA, London, U.K., February 1996.
- Lei de Bases do Ambiente n.º 11/87 de 7 de Abril.
- Matos, R., Bicudo, J. R., Alegre, H. (1993). *Indicadores Técnicos e Sócio-económicos no Domínio do Saneamento Básico*. Estudo preparatório para a definição de projectos de ambiente elegíveis no contexto do Fundo de Coesão – Estudo efectuado para a Comissão das Comunidades Europeias, relatório 107/93, Lisboa: LNEC. Vol. 2.
- Matos, R., Baptista, J. M., Sousa, J., Barreiros, A., e Laginha, P. (1998). *Apoio ao Processo de Garantia da Qualidade de Sistemas Multimunicipais de Abastecimento de Água*. In 8º Encontro Nacional de Saneamento Básico, Barcelos 27 a 30 Outubro.
- PNUEA (2001). *Programa Nacional para Uso Eficiente da Água*. Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2.0 Users Manual*. Water Supply and Water Resources Division, National Risk Management Research Laboratory, Cincinnati.
- WRC (1994). *Water Industry: Managing Leakage (Report A to F)*. Engineering and Operations Committee, U.K..