

## LOCALIZAÇÃO E REGULAÇÃO ÓTIMAS DE VÁLVULAS REDUTORAS DE PRESSÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Joaquim SOUSA<sup>1,5</sup>; João MURANHO<sup>2,5</sup>; Alfeu Sá MARQUES<sup>3,5</sup>; Ricardo Gomes<sup>4,5</sup>

### RESUMO

Nos últimos anos tem-se observado uma crescente preocupação por parte das entidades gestoras (EG) com o controlo das perdas de água em redes de distribuição de água (RDA). Provavelmente a maior parcela das perdas de água deve-se a fugas não reportadas, sendo apenas identificadas através da implementação de estratégias de controlo ativo de perdas (CAP). Porém, este tipo de estratégia implica a existência de equipamentos específicos e recursos humanos especializados, que, infelizmente, não estão ao alcance de todas as entidades gestoras.

A gestão da pressão (GP) surge neste contexto como uma possível alternativa (ou complemento) ao CAP. Nesta comunicação apresenta-se uma ferramenta informática desenvolvida para apoiar o desenvolvimento de projetos de GP. A ferramenta tem por base um modelo de simulação da RDA, em que as fugas são modeladas como dependentes da pressão, e um modelo de otimização cujo objetivo é maximizar o benefício da implementação da GP (diferença entre benefícios e custos), do que resulta a identificação das melhores localizações para instalar válvulas redutoras de pressão (VRP) e as respetivas pressões à saída.

A aplicação desta metodologia é demonstrada através de um exemplo hipotético que serve para ilustrar a facilidade de utilização e as suas potencialidades.

**Palavras-chave:** redes de distribuição de água, perdas de água, gestão da pressão, otimização.

---

1 - Prof. Adjunto no Departamento de Engenharia Civil, ISEC do IPC, [jjoseng@isec.pt](mailto:jjoseng@isec.pt)

2 - Prof. Auxiliar no Departamento de Informática, UBI, [jmuranho@ubi.pt](mailto:jmuranho@ubi.pt)

3 - Prof. Auxiliar no Departamento de Engenharia Civil, FCT da UC, [jasm@dec.uc.pt](mailto:jasm@dec.uc.pt)

4 - Prof. Adjunto no Departamento de Engenharia Civil, ESTG do IPL, [ricardo.gomes@ipleiria.pt](mailto:ricardo.gomes@ipleiria.pt)

5 - MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, FCT da Universidade de Coimbra

## 1. INTRODUÇÃO

Segundo o relatório da União Europeia de 2014 "*Mapping Smart Cities in the European Union*", atualmente mais de 50% da população mundial vive em áreas urbanas sendo expectável que este número continue a aumentar até 60% em 2030 e 70% em 2050. Esta tendência de crescimento faz aumentar a necessidade de implementar o desenvolvimento sustentável do espaço urbano, garantindo a qualidade de vida das pessoas e preservando os recursos do planeta. Por esse motivo, a gestão sustentável dos recursos hídricos nunca foi tão importante como é hoje.

Nas últimas décadas a complexidade dos sistemas de abastecimento de água (SAA) tem aumentado significativamente, pelo que, em muitos casos, os métodos tradicionais já não são capazes de garantir os elevados níveis de desempenho exigidos. A complexidade da gestão dos SAA está, fundamentalmente, associada ao aumento da população urbana, que, por sua vez, tem impacto na extensão e topologia das RDA e no aumento do consumo de água. Em algumas regiões do mundo, devido à escassez de recursos hídricos, para garantir a qualidade e a satisfação da procura em áreas urbanas é necessário transportar a água ao longo de vários quilómetros. Atualmente, os principais desafios para as EG estão relacionados com a redução de custos de energia, gestão das perdas de água, gestão patrimonial de infraestruturas e garantia da segurança da água. Para atingir estes objetivos é necessário garantir que as RDA estão em boas condições, operar e manter os equipamentos em condições adequadas (caudalímetros, válvulas e estações elevatórias), implementar o CAP e promover ações que incentivem ao uso eficiente da água. Além disso, atendendo a que o comportamento dos SAA varia ao longo do tempo (devido à degradação das infraestruturas e alterações dos consumos), as boas práticas recomendam a implementação de controlo em tempo real (ou quase) a fim de implementar as necessárias adaptações para atingir elevados níveis de desempenhos.

Esta conjuntura levou a que, nos últimos anos, se tenha observado uma crescente preocupação por parte das EG com o controlo das perdas de água em RDA, pois estas produzem fortes impactos negativos a vários níveis, nomeadamente: financeiro, técnico, social e ambiental. Provavelmente a maior parcela das perdas de água deve-se a fugas não reportadas que ocorrem nas condutas e em ramais, sendo apenas identificadas através da implementação de estratégias de CAP, podendo incluir a monitorização de caudais noturnos, a realização de fechos progressivos de válvulas e a inspeção acústica. Porém, este tipo de estratégia implica a existência de equipamentos específicos e recursos humanos especializados, que, infelizmente, não estão ao alcance de todas as entidades gestoras. A GP surge neste contexto como uma possível alternativa (ou complemento) ao CAP, pois pode ser bastante eficaz, produz resultados imediatos, não implica a afetação de recursos humanos especializados e requer investimentos relativamente baixos.

O caudal que sai através de uma fuga depende da pressão da água no interior da conduta e das características dessa fuga, as quais, por sua vez, podem, igualmente, depender da pressão, ou seja, a pressão pode ter dois efeitos cumulativos no caudal da fuga. As RDA (ou partes das mesmas) onde se disponibilize pressão acima da estritamente necessária são boas candidatas à implementação de projetos de GP, introduzindo VRP de modo a reduzi-la para valores próximos do mínimo desejável. Existem vários tipos de VRP em função da forma como a pressão à saída é modulada, sendo os mais comuns a pressão fixa, a pressão modulada por tempo e a pressão modulada por caudal (esta última implica também a instalação de um caudalímetro). Dependendo das condições locais, em geral as VRP de pressão fixa são as menos eficazes (mas mais simples e económicas) e as VRP de pressão modulada por caudal, embora menos usadas, são as mais eficazes (mas são mais complexas e implicam maior investimento).

Nesta comunicação apresenta-se uma ferramenta informática desenvolvida para apoiar o desenvolvimento de projetos de GP em RDA. A ferramenta tem por base um modelo de simulação

da RDA em estudo de modo a conseguir-se estimar o comportamento da mesma antes e após a implementação da GP. As fugas são modeladas como dependentes da pressão através de um modelo de simulação controlado pela pressão, implementado no software WaterNetGen (uma extensão do mundialmente conhecido EPANET), que pode ser obtido gratuitamente no seguinte endereço: <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>. De forma simples e amigável, o utilizador apenas necessita de fornecer a duração da vida útil do projeto, o custo unitário da água que se perde, uma lista dos diâmetros e custos das VRP a considerar no estudo, bem como as possíveis localizações na RDA onde as instalar, e uma taxa de juro para atualização de custos. Por trás da interface gráfica, a ferramenta desenvolvida dispõe de um modelo de otimização cujo objetivo é maximizar o benefício da implementação da GP (diferença entre a redução de custos produzida pela redução das perdas de água e o custo das VRP a instalar). O resultado da resolução deste modelo de otimização é a identificação das melhores localizações para instalar as VRP e as respetivas pressões à saída, garantindo que a solução apresentada cumpre as habituais restrições hidráulicas de pressão mínima a garantir em cada nó.

A aplicação desta metodologia é demonstrada através de um exemplo hipotético que serve para ilustrar a facilidade de utilização e as suas potencialidades.

## 2. CONTROLO DE PERDAS DE ÁGUA E GESTÃO DA PRESSÃO

Nas últimas décadas desenvolveram-se muitas estratégias e métodos para a redução das perdas de água. As estratégias de redução de perdas de água iniciam-se com a realização de uma auditoria, em geral seguindo o modelo de balanço hídrico proposto pela IWA - *International Water Association* (LAMBERT e HIRNER (2000)), com o objetivo de avaliar a dimensão do problema. Depois, há que definir objetivos claros e metas a atingir em termos de redução das perdas de água. A avaliação das perdas de água pode ser realizada de duas formas distintas: medição de volumes (entrados e faturados) em zonas de medição e controlo (ZMC) – estimativa das perdas de água (aparentes e reais), ou monitorização do caudal mínimo noturno – estimativa das perdas reais. A *IWA Water Loss Task Force* identificou quatro medidas principais para reduzir as perdas reais (THORNTON *et al.* (2008)): 1) gestão da pressão; 2) controlo ativo de perdas; 3) rapidez e qualidade das reparações; e 4) gestão patrimonial de infraestruturas.

As perdas reais podem dever-se a: 1) fugas e roturas visíveis (geralmente correspondem a caudais elevados, curta duração e volumes moderados); 2) fugas e roturas não visíveis mas identificáveis com equipamentos acústicos (correspondem a caudais médios, duração e volumes dependentes da política de CAP implementada); e 3) fugas não visíveis e não identificáveis com equipamentos acústicos (são habitualmente causadas por deficiências nas tubagens ou acessórios, correspondem a caudais baixos, de longa duração e volumes elevados). A existência de perdas de água em RDA está relacionada (fundamentalmente) com três fatores (GOMES (2011)): 1) pressão de serviço acima do mínimo exigido; 2) disponibilidade de recursos (água, recursos financeiros e recursos humanos); e 3) a frequência de ocorrência de novas roturas. Por outro lado, a frequência de ocorrência de novas roturas está relacionada com vários fatores, como a idade das infraestruturas, o planeamento e a execução das infraestruturas, as características do solo envolvente, a existência de vibrações provocadas pelo tráfego ou do próprio solo e a existência de um sistema de monitorização integrada.

Atendendo a que as perdas de água têm impactos negativos consideráveis (económicos, técnicos, sociais e ambientais), as EG procuram fazer tudo o que esteja ao seu alcance para as reduzir. As fugas e roturas não visíveis (identificáveis ou não) representam uma parte muito importante das perdas de água e a GP surge aqui como uma solução eficaz, de fácil e rápida implementação, e com custos reduzidos. Os benefícios da GP podem ser estimados usando o método FAVAD – *Fixed and Variable Area Discharges*, segundo a eq. (1) – relação pressão/caudal da fuga. A redução das perdas

de água produzida pela GP depende do material das tubagens e pode ser calculada pela eq. (2) (WRc 1994; May 1994):

$$Q \text{ varia com } P^{N1} \rightarrow Q = \beta \times P^{N1} \quad (1)$$

$$Q \text{ varia com } P^{N1} \rightarrow \frac{Q_1}{Q_0} = \left( \frac{P_1}{P_0} \right)^{N1} \quad (2)$$

em que:

Q - caudal da fuga

$\beta$  - coeficiente relacionado com a forma e a área do orifício da fuga

P - pressão de serviço

$Q_0$  e  $Q_1$  - caudais da fuga antes e após a implementação da GP, respetivamente

$P_0$  e  $P_1$  - pressões de serviço antes e após a implementação da GP, respetivamente

O expoente da pressão ( $N1$ ) costuma assumir valores entre 0.5 para orifícios de área fixa e 2.5 para orifícios de área variável (GOMES *et al.* (2013)) e pode ser estimado pela eq. (3).

$$N1 \text{ varia com } Q \text{ e } P \rightarrow N1 = \frac{\log(Q_1/Q_0)}{\log(P_1/P_0)} \quad (3)$$

A GP pode ser implementada com a instalação de VRP com vários tipos de controlo de pressão à saída: 1) fixa; 2) modulado por tempo; 3) modulada por caudal e 4) modulada por pressão em ponto crítico. Para uma VRP de pressão fixa à saída há apenas uma condição de operação (a pressão a jusante da VRP é sempre a mesma). Uma VRP modulada por tempo pode ter várias condições de operação (por exemplo, uma mais baixa durante o período noturno e outra mais elevada no restante tempo). As VRP moduladas por caudal e por pressão são mais eficazes, pois estão constantemente a tentar ajustar as condições de operação para atingir pressões próximas da mínima no ponto crítico. No entanto, os projetos de GP devem ser precedidos de estudos especializados para identificar a localização ideal e as configurações das VRP a instalar, bem como de análises custo benefício para avaliar a sua viabilidade económica.

Os benefícios para as EG (e consumidores) que resultam da redução das perdas de água são evidentes e é certamente um dos assuntos mais discutidos atualmente na literatura da especialidade. As primeiras metodologias propostas para estimar a redução das perdas de água resultantes da implementação de GP incluíam uma equação adicional para caracterizar as perdas de água nos modelos matemáticos que descrevem o comportamento hidráulico das RDA (GERMANOPOULOS (1985); GERMANOPOULOS e JOWITT (1989)). Outros investigadores consideraram a pressão no nó crítico e a pressão média na RDA para estimar os benefícios da GP (MCKENZIE e LANGENHOVEN (2001)), ou estudaram as componentes das perdas de água utilizando o conceito de balanço hídrico da IWA e análise do caudal mínimo noturno (ALMANDOZ *et al.* (2005); TAVARES *et al.* (2009); GOMES *et al.* (2011)).

Em grandes RDA o controlo das perdas de água pode tornar-se excessivamente complexo, sendo nesses casos recomendável a implementação de zonas de medição e controlo (ZMC), e vários estudos recentes propõem o seu uso com este objetivo (FERRARI *et al.* (2014); DI NARDO *et al.* (2014); ALVISI e FRANCHINI (2014); Hajebi *et al.* (2014); GOMES *et al.* (2015)). Recorrendo a modelos de simulação controlada pela pressão, outros estudos incluem a análise de custo benefício para avaliar a viabilidade económica da GP usando métodos de otimização para obter o dimensionamento ótimo de ZMC, os reforços eventualmente necessários para a RDA, a localização ideal das estações de monitorização de caudal (pontos de entrada das ZMC) e a localização ideal e as configurações de VRP (GOMES *et al.* (2012) e (2013)), ou aumentar o desempenho de RDA através da operação ótima de VRP, estações elevatórias e reservatórios (SOUSA *et al.* (2015)).

### 3. METODOLOGIA

Considerando a importância da GP para reduzir as perdas de água, e uma vez que não é fácil identificar as melhores localizações para as VRP, este trabalho apresenta uma metodologia para suporte aos projetos de GP, identificando os locais ideais e as configurações ótimas das VRP a instalar para reduzir as perdas de água em RDA, maximizando o VAL (Valor Atualizado Líquido) do projeto de GP. Esta metodologia foi incorporada no software WaterNetGen, uma extensão do EPANET (MURANHO *et al.* (2012) e (2016)). A avaliação dos caudais das fugas é executada pelo módulo de simulação controlada pela pressão do WaterNetGen e os locais ideais e as configurações ótimas das VRP são identificados através da resolução de um modelo de otimização resolvido por um algoritmo de *Simulated Annealing*.

#### 3.1. Gestão da pressão

Uma vez que a RDA está a ser operada em boas condições de pressão, os consumos de água são modelados como independentes da pressão, mas as perdas de água são modeladas como dependentes da pressão. Atendendo a que as perdas de água ocorrem com mais frequência em condutas e ramais de ligação, com base na pressão média, a estimativa para o caudal de perdas de água em cada conduta é dada pela eq. (4):

$$Q_{\text{perdas},w} = C_w \times L_w \times P_w^{N1} \quad (4)$$

em que:

- $Q_{\text{perdas},w}$  – caudal de perdas de água da conduta  $w$
- $C_w$  - coeficiente que depende das características físicas da conduta  $w$
- $L_w$  - comprimento da conduta  $w$
- $C_w$  - coeficiente que depende das características físicas da conduta  $w$
- $P_w^{N1}$  – pressão média na conduta  $w$
- $N1$  – expoente da relação pressão/caudal da fuga da conduta  $w$

#### 3.2 Função objetivo

A função objetivo VAL(X) maximiza o VAL do projeto de GP, ou seja, o valor atualizado líquido das diferenças entre os benefícios económicos (decorrentes da redução das perdas de água) e os custos de implementação do projeto de GP (aquisição e instalação das VRP), ao longo do período de vida útil do equipamento, sendo calculada através das eq. (5) a (7):

$$\text{Maximizar VAL}(X) = -C(X) + B(X) \times \frac{(1+j)^{na} - 1}{j \times (1+j)^{na}} \quad (5)$$

$$C(X) = \sum_{m=1}^{NVRP} [C_{VRP,m}(DVRP_m)] + \sum_{v=1}^{Nviol} [viol_v \times \delta_v] \quad (6)$$

$$B(X) = [\Delta V_{\text{perdas}} \times C_{\text{água}}] \times 365 \quad (7)$$

em que:

- VAL(X) - função objetivo ou VAL do projeto de GP
- X - solução do algoritmo de Simulated Annealing
- C(X) - custo de implementação do projeto de GP
- B(X) - benefícios anuais (€)
- j - taxa de juro anual para atualização dos benefícios anuais ao ano inicial
- na - número de anos de vida útil do projeto de GP
- NVRP - número de VRP a instalar
- $C_{VRP,m}(DVRP_m)$  - custo unitário da VRP em função do seu diâmetro

DPRV<sub>m</sub> - diâmetro da VRP  
 NV<sub>viol</sub> - número de violações de restrições de pressão mínima  
 viol<sub>v</sub> - violação da restrição de pressão mínima v  
 δv - custo unitário da violação da restrição de pressão mínima v  
 ΔV<sub>perdas</sub> - diferença entre os volumes de perdas de água antes e após a implementação da GP  
 C<sub>água</sub> - custo unitário da água perdida

### 3.3 Simulated Annealing

O *Simulated Annealing* é um método probabilístico proposto inicialmente por Kirkpatrick *et al.* (1983) para encontrar o mínimo global de uma função objetivo que pode possuir vários mínimos locais, tendo sido inspirado no processo físico de recozimento. À temperatura inicial ( $T_0$ ), o algoritmo começa por gerar uma solução inicial ( $X_0$ ), que no presente caso corresponde a atribuir uma pressão à saída de cada VRP a otimizar. Nas seguintes temperaturas a função objetivo é minimizada para obter o máximo de benefícios resultantes da GP para o horizonte de projeto definido. O número de soluções candidatas ( $L_k$ ) geradas a cada temperatura ( $T_k$ ) varia de acordo com a percentagem de soluções aceites na temperatura anterior ( $Pa_{k-1}$ ). Cada nova solução candidata é gerada a partir da solução atual, aplicando a seguinte sequência: 1) selecionar aleatoriamente uma das VRP a otimizar; e 2) ajustar a pressão à saída dessa VRP, podendo esta aleatoriamente subir ou descer um determinado valor (no presente caso,  $\pm\Delta HVRP = 1$  m). Para cada solução, executa-se uma simulação controlada pela pressão para prever o comportamento hidráulico de rede sob as novas condições de regulação das VRP, usando-se de seguida a equação (5) para avaliar o VAL dessa solução. A nova solução é aceite ou não, de acordo com o critério de Metropolis. Se é aceite, esta solução torna-se a nova solução corrente e será usada para produzir a próxima solução candidata. Se não, utiliza-se a solução corrente atual. O algoritmo termina quando se atingir o critério de paragem, ou seja, para duas temperaturas sucessivas, o número de soluções aceites permanece inferior a 5% e não houve melhoria (Quadro 1).

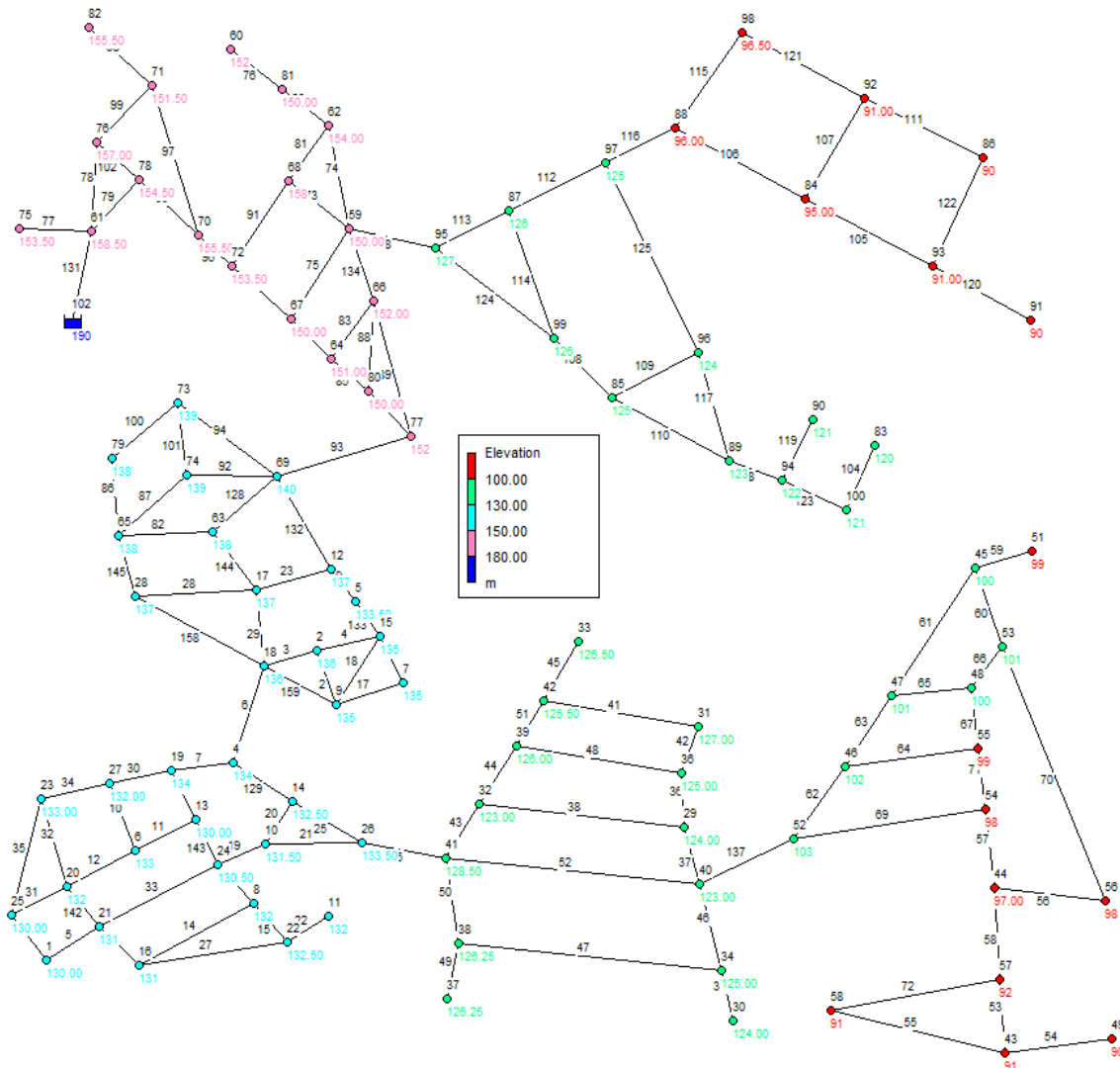
**Quadro 1** – Esquema de arrefecimento para o algoritmo de *Simulated Annealing*

Solução inicial	$X_0 = \{P_1, P_2, \dots, P_{NVRP}\}$ =VRP ativa; onde NVRP é o nº de VRP		
Temperatura inicial	$T_0 = -\left(\frac{0.10 \times VAL(X_0)}{\ln(Pa_0)}\right)$ ; onde $Pa_0 = 80\%$		
Número de transições a cada temperatura	se $Pa_k > 70\%$	então $T_{k+1} = 0.50 \times T_k$	e $L_{k+1} = 10 \times NVRP$
	se $50\% < Pa_k \leq 70\%$	então $T_{k+1} = 0.60 \times T_k$	e $L_{k+1} = 20 \times NVRP$
	se $35\% < Pa_k \leq 50\%$	então $T_{k+1} = 0.70 \times T_k$	e $L_{k+1} = 30 \times NVRP$
	se $20\% < Pa_k \leq 35\%$	então $T_{k+1} = 0.80 \times T_k$	e $L_{k+1} = 40 \times NVRP$
	se $Pa_k \leq 20\%$	então $T_{k+1} = 0.90 \times T_k$	e $L_{k+1} = 50 \times NVRP$
Critério de paragem	$Pa_k < 5\%$ (em duas temperaturas sucessivas sem melhoria)		

## 4. ESTUDO DE CASO

Para avaliar o desempenho da metodologia proposta, apresenta-se um estudo de caso de uma RDA, no qual se pretende identificar a localização ideal e as pressões de regulação ótimas para as VRP de modo a reduzir as perdas de água. Este estudo de caso representa uma RDA abastecida graviticamente, servindo 30,000 habitantes com uma captação de 150 litros/habitante/dia. Esta

RDA contém 137 condutas e 97 nós de junção, sendo abastecida por um único reservatório, e apresenta cotas topográficas com valores entre 90 e 190m (Figura 1).



**Figura 2** – Rede de distribuição de água do estudo de caso (cotas topográficas)

Os consumos variam ao longo do dia segundo o padrão apresentado na Figura 2, no qual o caudal de ponta instantâneo ocorre entre as 20 e as 21 horas (fator de ponta = 1,76). Atendendo a que a RDA tem de abastecer edifícios com três pisos acima do solo, a pressão mínima exigida é de 22.45 m c.a..

Devido ao relevo da zona, esta RDA contém 3 VRP para evitar que as pressões excedam os 600 kPa (Figura 3). Porém, da forma como está a ser atualmente gerida a pressão, esta RDA apresenta pressões bem acima do mínimo exigido (a Figura 4 apresenta as folgas de pressão à hora de maior consumo – 20h).

O caudal médio diário atual é de 4,983 m<sup>3</sup>/dia, sendo 4,500 m<sup>3</sup>/dia de consumos e 483 m<sup>3</sup>/dia de fugas de água (9.7%, um valor bastante baixo). Considerando que o custo de produção de água é igual a 0.50€/m<sup>3</sup>, as fugas de água representam um custo diário de 241.50€, ou seja, 88,148€/ano.

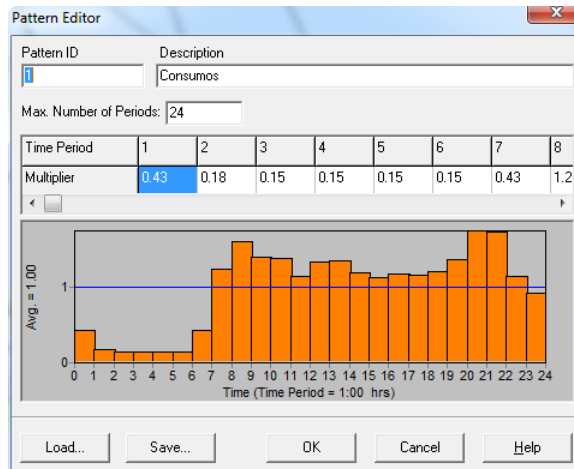


Figura 2 – Padrão de consumos

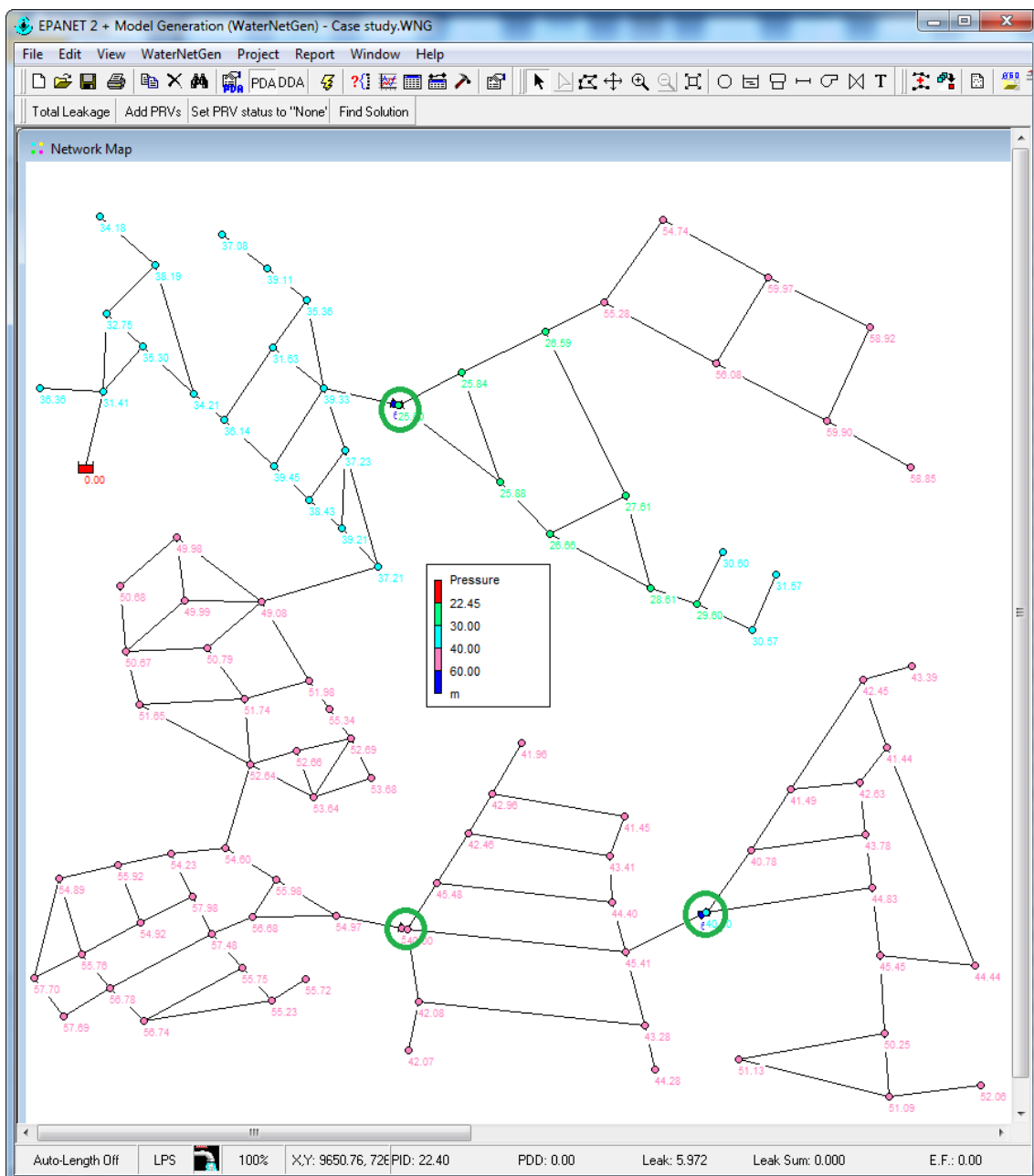
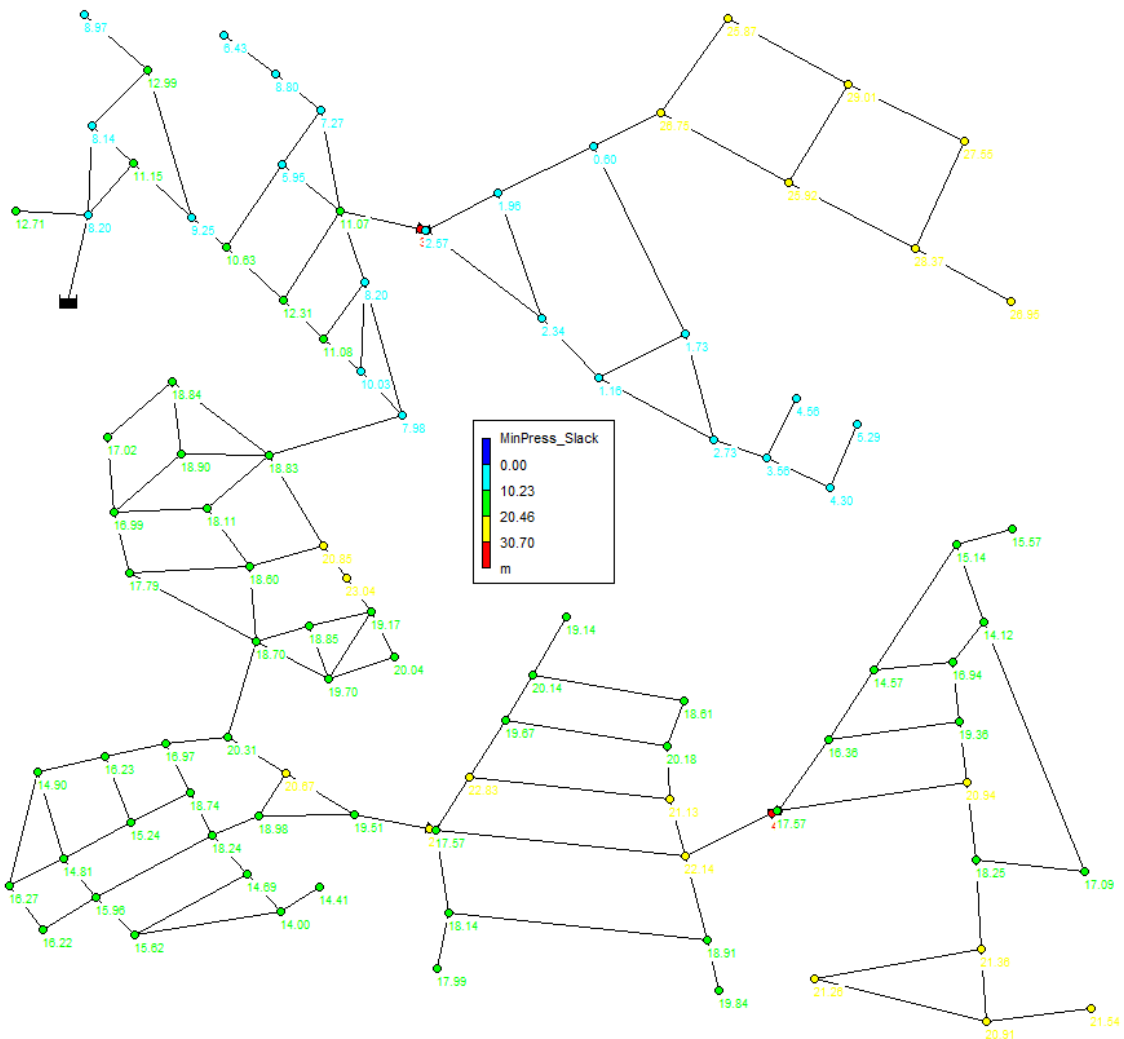


Figura 3 – Pressões às 0h na situação atual (3 VRP)



**Figura 4 – Folgas de pressão às 20h na situação atual (3 VRP)**

Atendendo às folgas de pressão existentes e ao custo da água que se perde, entendeu-se desenvolver um estudo para gerir melhor a pressão de modo a reduzir as perdas de água. A solução proposta consiste em introduzir novas VRP para criar zonas de GP (ZGP), bem como reajustar as pressões de controlo das VRP existentes, caso seja necessário.

Para além de identificar os melhores locais e pressões de regulação para as VRP de modo a minimizar as perdas de água, um projeto destes deve ser acompanhado de um estudo de viabilidade económica (análise de custo/benefício). No presente caso, tudo isso vai ser realizado usando a metodologia descrita no capítulo 3 e implementada no software WaterNetGen para essa finalidade (Figura 7). O presente estudo assume 10 possíveis VRP (3 existentes e 7 novas), localizadas em pontos estratégicos definidos pelo utilizador (Figuras 5 e 6). O problema de otimização em que se baseia a metodologia é resolvido usando o algoritmo de *Simulated Annealing*. Os benefícios são estimados para um horizonte de 10 anos, considerando uma taxa de juro anual de 5%. Os consumos de água foram assumidos como independentes da pressão (a pressão está acima do mínimo exigido) e as fugas como dependentes da pressão com  $C_w = 0.000003$  e  $N1 = 1.0$ .

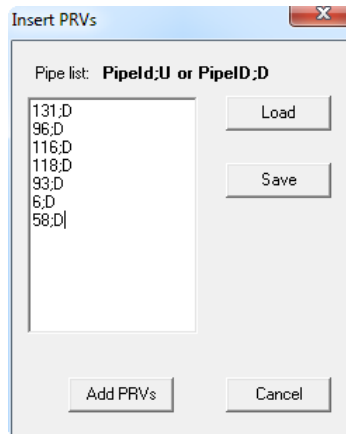


Figura 5 – Definição das localizações das VRP novas

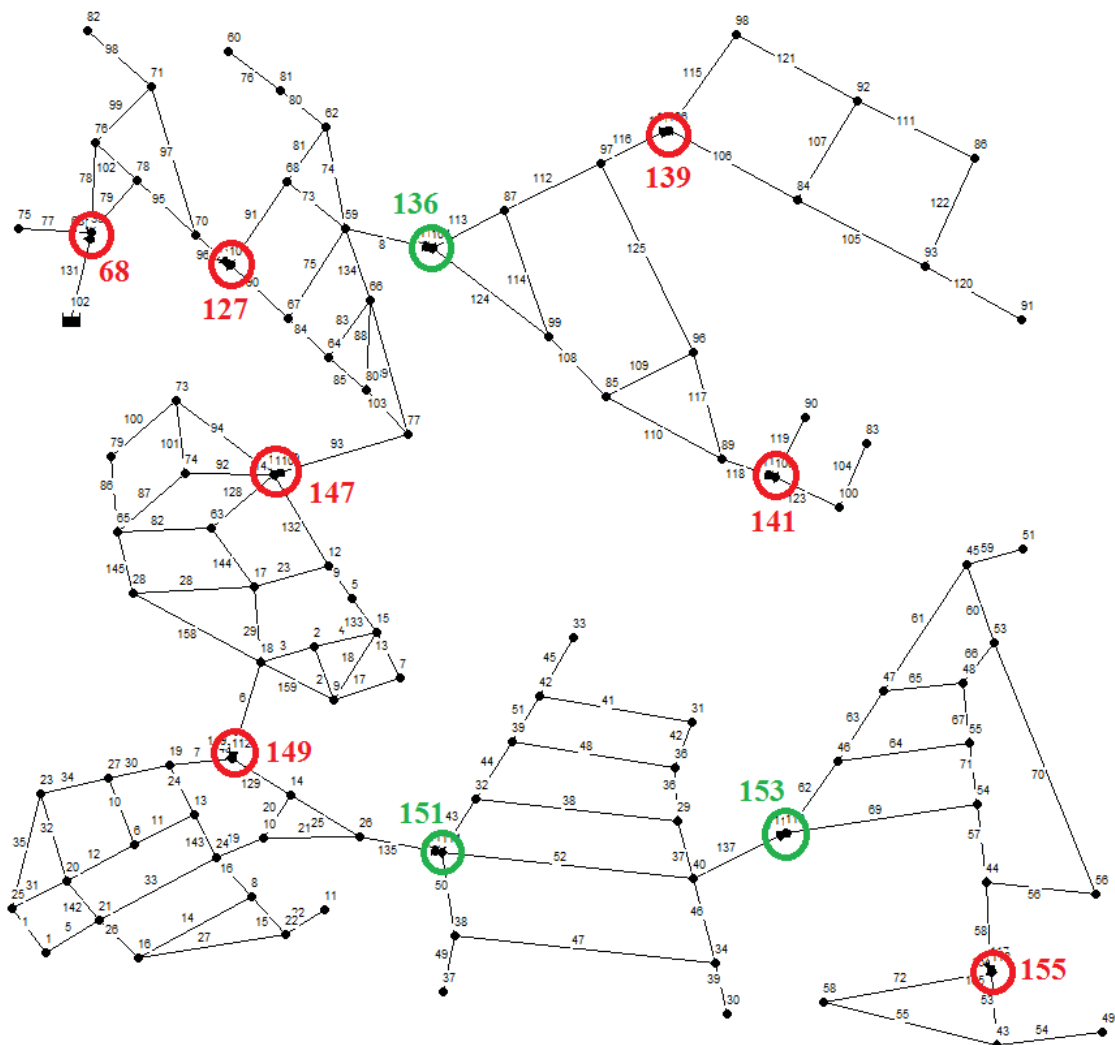
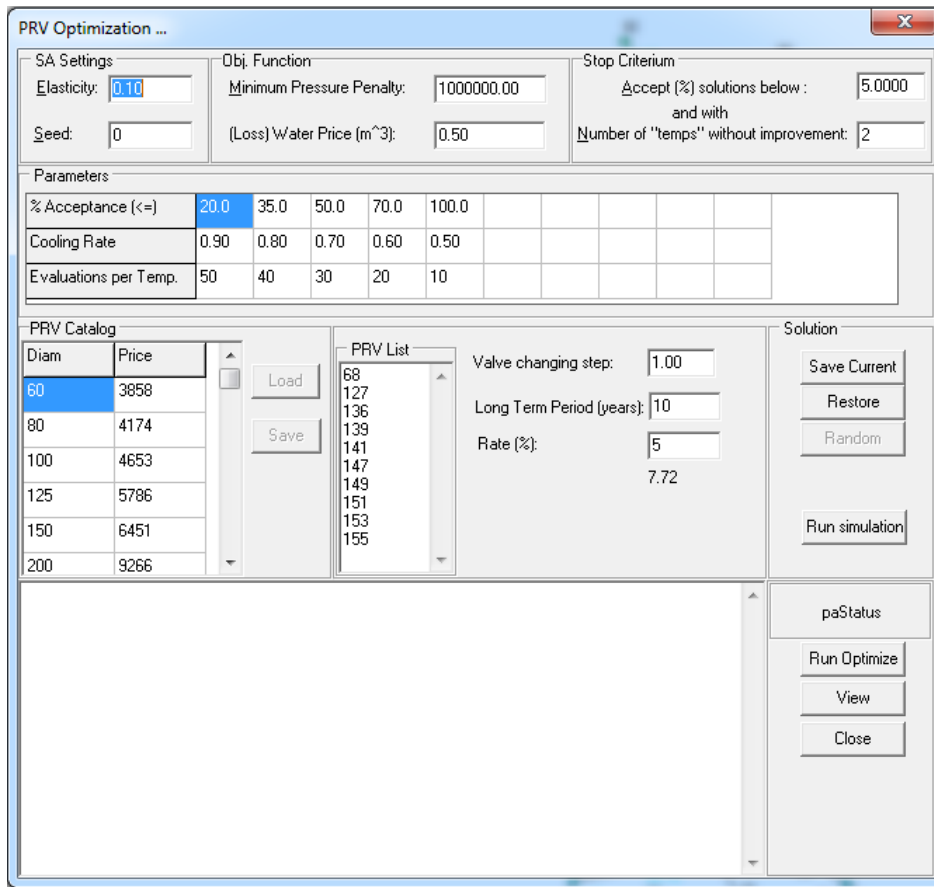


Figura 6 – Localizações das VRP novas (circulos vermelhos) e existentes (circulos verdes)



**Figura 7** – Informações necessárias à formulação do problema de otimização

A solução do problema de otimização (Figura 8) indica que todas as VRP propostas são benéficas para a redução das perdas de água (Status = Not Open). A introdução das novas VRP e o ajuste das pressões de controlo das VRP existentes poderão proporcionar uma redução das perdas de água de 482.99 m<sup>3</sup>/dia (9.7%) para 316.45 m<sup>3</sup>/dia (6.6%), o que se traduz numa poupança diária de 83.27€, ou seja, 30,394€/ano.

#### Situação atual - 3 VRP

Valve ID	Setting	Fixed Status	Status
68	40	None	Not Open
127	40	None	Not Open
136	25	None	Not Open

-----  
 Leaks [m<sup>3</sup>/day]: 482.99  
 PRVs Cost: 19353.00  
 Sum Min. Press. Violations [m]: 0.00

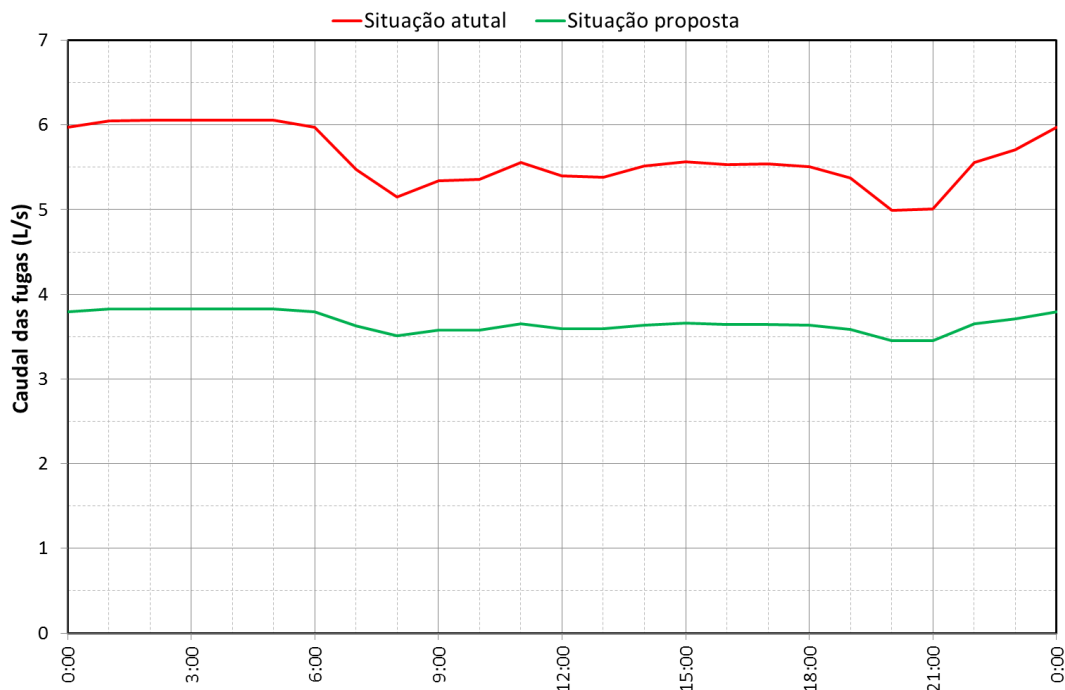
#### Situação proposta - 10 VRP

Valve ID	Setting	Fixed Status	Status
68	26	None	Not Open
127	28	None	Not Open
136	25	None	Not Open
139	24	None	Not Open
141	23	None	Not Open
147	28	None	Not Open
149	29	None	Not Open
151	23	None	Not Open
153	26	None	Not Open
155	23	None	Not Open

-----  
 Leaks [m<sup>3</sup>/day]: 316.45  
 PRVs Cost: 100233.00  
 Sum Min. Press. Violations [m]: 0.00

**Figura 8** – Situação atual e situação proposta (resultados do problema de otimização)

O investimento necessário para este projeto refere-se à instalação das novas VRP, que se estima em 80,880€ (100,233€-19,353€). Atendendo ao benefício anual estimado (30,394€), prevê-se um período de aproximadamente 32 meses para recuperar o investimento.



**Figura 9** – Rede de distribuição, localização de VRP e pressões (antes e após a GP)

Com a implementação desta solução de GP as pressões na rede reduzem consideravelmente, aproximando-se do valor da pressão mínima exigida, 22.45 m c.a. (Figura 10), assim como também reduzem as flutuações de pressão, o que favorece os utilizadores do serviço. Além disso, o VAL deste projeto de GP apresentou um valor de 153,811€ para um horizonte de 10 anos, o que confirma a sua viabilidade económica.

Convém salientar o facto de este exemplo ter sido construído com custos próximos dos reais e corresponder a uma RDA que já apresentava um nível de perdas de água bastante baixo (9.7%). Em RDA com níveis de perdas de água superiores é expectável que se consigam benefícios igualmente superiores, o que conduzirá a períodos de recuperação do investimento inferiores e a VAL superiores.

Atente-se ainda que a implementação da GP produz outros benefícios, como por exemplo: 1) menores flutuações de pressão correspondem a melhores níveis de serviço e reduzem a possibilidade de ocorrência de processos de fadiga nas componentes das infraestruturas; 2) a redução da pressão está associada à redução da ocorrência de novas fugas e roturas; 3) a redução das perdas de água (Figura 9) liberta capacidade das infraestruturas para fazer face a aumentos de consumo, etc.

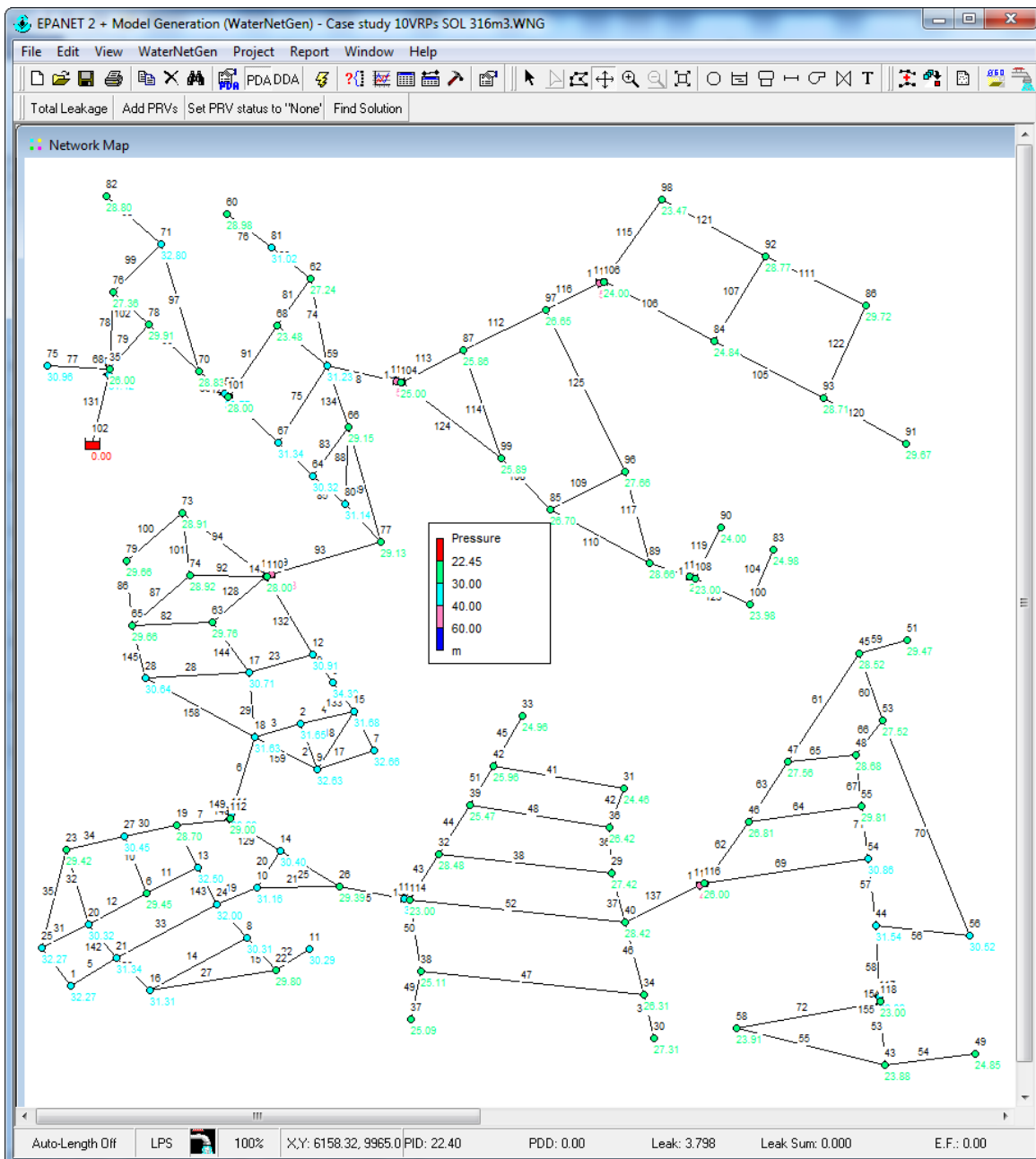


Figura 10 – Pressões às 0h na situação proposta (10 VRP)

## 5. CONCLUSÕES

As fugas não visíveis (identificáveis ou não) representam, em geral, uma parte importante das perdas de água em RDA e a GP constitui uma solução rápida e económica para a reduzir. Os resultados obtidos com um estudo de caso demonstraram que a metodologia proposta, implementada no software WaterNetGen, é capaz de alcançar os objetivos pretendidos, sendo uma ferramenta importante para apoiar a implementação de projetos de GP, localizando e definindo as pressões ótimas de regulação das VRP de modo a minimizar as folgas de pressão (pressão acima do mínimo exigido) e, conseqüentemente, as perdas de água. Os benefícios potenciais serão tanto maiores quanto maiores forem as folgas de pressão e o número de possíveis ZGP na RDA em análise.

Para o estudo de caso proposto, a implementação da GP com as VRP mais simples (de pressão fixa à saída) seria bastante benéfica, embora se saiba que este tipo de VRP não tira o máximo proveito

possível durante os períodos de consumos baixos (geralmente à noite). Trabalhos futuros incluirão a inclusão de VRP com outros sistemas de controlo da pressão (modulada por tempo, modulado por caudal e modulada por pressão no ponto crítico), o que permitirá alcançar benefícios ainda maiores com os projetos de GP.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) atribuído ao MARE, através do projeto estratégico com a referência UID/MAR/04292/2013.

## BIBLIOGRAFIA

ALMANDOZ, J.; CABRERA, E.; ARREGUI, F.; CABRERA, E., Jr.; COBACHO, R. – “Leakage assessment through water distribution network simulation”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 131(6), doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496, 2005, pp. 458- 466.

ALVISI, S.; FRANCHINI, M. – “A procedure for the design of district metered areas in water distribution systems”, *Procedia Engineering (CCWI 2013)*, 70, doi:10.1016/j.proeng.2014.02.006, 2014, 41-50.

Di NARDO, A.; Di NATALE M.; SANTONASTASO, G. F.; TZATCHKOV, V.; ALCOYER YAMANAKA, V. H. – “Divide and conquer partitioning techniques for smart water networks”, *Procedia Engineering (WDSA 2014)*, 89, doi:10.1016/j.proeng.2014.11.247, 2014, 1176-1183.

FERRARI, G.; SAVIC, D.; BECCIU, G. – “Graph-theoretic approach and sound engineering principles for design of district metered areas”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 140(12), doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000424, 2014, 04014036.

GERMANOPOULOS, G. – “A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models”, *Civil Engineering Systems*, 2, doi: 10.1080/02630258508970401, 1985, 171-179.

GERMANOPOULOS, G.; JOWITT, P. W. – “Leakage reduction by excessive pressure minimization in a water supply network”, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 87 (2), doi: 10.1680/iicep.1989.2003, 1989, 195-214.

GOMES, R. - *Modelação matemática como ferramenta de gestão e exploração de sistemas de distribuição de água*, Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra, <https://estudogeral.sib.uc.pt/handle/10316/17988>, 2011.

GOMES, R.; SOUSA, J.; SÁ MARQUES, A. – “The influence of pressure/leakage relationships from existing leaks in the benefits yielded by pressure management”, *Water Utility Journal*, Issue 5, ISSN: 1792-748X, 2013, 25-32.

GOMES, R.; SÁ MARQUES, A.; SOUSA, J. – “Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems”, *Urban Water Journal*, 8(2), doi: 10.1080/1573062X.2010.542820, 2011, 65–77.

GOMES, R.; SÁ MARQUES, A.; SOUSA, J. – “Identification of the optimal entry points at District Metered Areas and implementation of pressure management”, *Urban Water Journal*, 9(6), doi: 10.1080/1573062X.2012.682589, 2012, 365-384.

GOMES, R.; SÁ MARQUES, A.; SOUSA, J. – “District metered areas design under different decision makers’ options: cost analysis”, *Water Resources Management*, 27(13), doi:10.1007/s11269-013-0424-y, 2013, 4527-4543.

- GOMES, R.; SOUSA, J.; MURANHO, J.; SÁ MARQUES, A. – “Different design criteria for district metered areas in water distribution networks”, *Procedia Engineering* (CCWI 2015), 119, doi:10.1016/j.proeng.2015.08.981, 2015, 1221–1230.
- HAJEBI, S.; TEMATE, S.; BARRETT, S.; CLARKE, A.; CLARKE, S. – “Water distribution network sectorisation using structural Graph partitioning and multi-objective optimization”, *Procedia Engineering* (WDSA 2014), 89, doi:10.1016/j.proeng.2014.11.238, 2014, 1144-1151.
- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D.; VECCHI, M. P. – “Optimization by simulated annealing”, *Science* 220(4598), 1983, 671-680.
- LAMBERT, A.; HIRNER, W. – “Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures”, *The Blue Pages*, International Water Association (IWA), 2000.
- MAY, J. - *Pressure dependent leakage*, World Water and Environmental Engineering, 1994.
- MCKENZIE, R.; LANGENHOVEN, S. - *PRESMAC User guide*, South Africa Water Research Commission, WRC Report TT 152/01, 2001.
- MURANHO, J.; FERREIRA, A.; SOUSA, J.; GOMES, A.; SÁ MARQUES, A. – “WaterNetGen – an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing”, *Water Science & Technology: Water Supply*, IWA Publishing, 12(1), doi: 10.2166/ws.2011.121, 2012, 117-123.
- MURANHO, J.; FERREIRA, A.; SOUSA, J.; GOMES, A.; SÁ MARQUES, A. - *WaterNetGen*, <http://www.dec.uc.pt/~WaterNetGen/>, 2016.
- SOUSA, J.; MURANHO, J.; SÁ MARQUES, A.; GOMES, R. – “Optimal management of water distribution networks with simulated annealing: The C-Town problem”, *J. Water Resour. Plann. Manage.*, 142(5), doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000604, 2015, C4015010.
- TABESH, M.; ASADIYANI, A. H.; BURROWS, R. – “An integrated model to evaluate losses in water distribution systems”, *Water Resources Management*, 23, doi:10.1007/s11269-008-9284-2, 2009, 477-492.
- THORNTON, J.; STURM, R.; KUNKEL, G. - *Water loss control*, McGraw-Hill Companies, 2008.
- WRc - *Managing leakage reports A-J*, WRc plc, Water Services Association, Water Companies Association, Swindon (United Kingdom), 1994.