



Lúisa Margarida Pontes Neves Lourenço Ribeiro

MODELAÇÃO MATEMÁTICA COMO APOIO À LOCALIZAÇÃO APROXIMADA DE FUGAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente,
orientada por Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e Professor Doutor Joaquim José de Oliveira Sousa
e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Junho, 2016



UNIVERSIDADE DE COIMBRA



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas em redes de distribuição de água

Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, ramo de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente,
orientada por Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques
e Professor Doutor Joaquim José de Oliveira Sousa
e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da
Universidade de Coimbra

Luísa Margarida Pontes Neves Lourenço Ribeiro

Junho/2016

Agradecimentos

Começo por agradecer aos meus orientadores científicos a oportunidade de melhorar e complementar os meus conhecimentos neste tema tão atual, interessante e vasto.

Ao Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques agradeço a disponibilidade, pelos importantes incentivos, rigorosos ensinamentos, pertinentes sugestões e empenho. A sua capacidade científica foi de extrema importância para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Doutor Joaquim José de Oliveira Sousa agradeço a sugestão do desenvolvimento de um trabalho de doutoramento. Agradeço ainda a confiança, a disponibilidade, os minuciosos ensinamentos, o empenho e as diligências em todas as atividades que permitiram a realização desta investigação.

Agradeço ao ISEC o apoio disponibilizado nas mais variadas formas, neste período de dedicação às atividades inerentes ao desenvolvimento desta investigação. Agradeço a todos, e em especial aos meus colegas mais próximos, do DEC, a amizade, encorajamento e companheirismo.

Agradeço ao DEC da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra e em particular ao Laboratório de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente Civil, seus docentes, funcionários e colegas o acolhimento e todo o apoio disponibilizado. Agradeço ao antigo IMAR - Instituto do Mar e atual MARE - Centro de Ciências do Mar e do Ambiente, todo o apoio disponibilizado como centro de investigação. Agradeço também à ACIV - Associação para o Desenvolvimento da Engenharia todos os meios disponibilizados como centro de transferência de tecnologia.

Agradeço a todos os meus Amigos o companheirismo, a solidariedade, o tempo despendido, o discernimento e a camaradagem, incentivando-me a prosseguir com o trabalho, especialmente nos momentos mais difíceis.

Agradeço à minha família em geral, e em particular à minha mãe, ao meu pai (*in memoriam*) e irmã, todo o entusiasmo e o apoio dado para o desenvolvimento deste trabalho.

Às minhas filhas, Rita e Marta, agradeço, do fundo do coração, todo o amor, o carinho, o alento, a esperança e a compreensão que me deram para prosseguir a investigar.

A todos, Muito obrigada!

Resumo

Modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas em redes de distribuição de água

A água doce necessita de uma gestão racional visto ser um recurso escasso e essencial ao desenvolvimento económico e social. Para o consumo humano, a água doce necessita de um conjunto de operações complexas de transporte, tratamento e distribuição. Este conjunto de operações tem custos elevados e decorrem nos sistemas e nas redes de distribuição.

Devido ao funcionamento intrínseco das redes de distribuição haverá sempre água desperdiçada. Mesmo assim, o uso eficiente da água recomenda o controlo do desperdício, nomeadamente através da redução de fugas e perdas. Atualmente na análise do balanço hídrico anual nacional, quase 40% do volume de água fornecida às redes de distribuição de água é água não faturada. Este valor é muito elevado, mesmo sabendo que a existência de fugas não reportadas nas redes de distribuição é um problema intemporal.

Na literatura existem várias abordagens para o controlo ativo de perdas, procurando reduzir a ineficiência da rede e garantir níveis economicamente viáveis. Ao nível das redes de distribuição as abordagens enfatizam o controlo da pressão, a gestão da infraestrutura, a celeridade na reparação e a localização exata ou aproximada de fugas não reportadas.

Para contribuir para a redução das perdas reais melhorando a aplicação do controlo ativo de perdas, nomeadamente beneficiando o desempenho das técnicas de localização exata de fugas, este trabalho apresenta duas novas ferramentas de apoio à localização aproximada de fugas nas condutas das redes de distribuição de água.

A primeira metodologia proposta é uma ferramenta computacional baseada no algoritmo *TrustRank* e num modelo matemático de simulação do comportamento hidráulico das redes de distribuição de água. Esta metodologia foi desenvolvida para ajudar à seleção do posicionamento ótimo de transdutores de pressão na rede. A metodologia providencia uma boa avaliação da pressão existente na totalidade da rede

de distribuição de água com a seleção de pontos representativos da pressão existente. Esta informação recolhida é relevante para a segunda metodologia proposta.

A segunda metodologia computacional foi desenvolvida como uma ferramenta para ajudar a localizar fugas de água não reportadas e estimar o respetivo caudal. A nova metodologia computacional resulta da transferência de informação de um modelo matemático de simulação do comportamento hidráulico das redes de distribuição de água para um modelo de otimização. O modelo de simulação analisa o comportamento hidráulico da rede sob cenários hipotéticos de fugas de água em regime quase permanente. O modelo de otimização minimiza as diferenças entre os valores de pressão observados e os valores de pressão estimados, e as variáveis de decisão são as localizações e caudais das fugas não reportadas. A localização das condutas com fugas de água resulta da simulação de cenários hipotéticos de fugas. O modelo de otimização compara a pressão estimada para o cenário hipotético de fugas e as pressões observadas, e recorre a um algoritmo de recozimento simulado para pesquisar o espaço solução. A solução final do algoritmo de recozimento simulado permite estimar o caudal aproximado e a localização aproximada das condutas com fugas de água não reportadas na rede. Esta localização aproximada das condutas com fugas de água poderá ajudar no controlo ativo de perdas pois recomenda a utilização e aplicação das técnicas de localização exata a uma zona da rede.

Para finalizar, os desempenhos das duas aplicações computacionais são testados. Vários estudos de caso são apresentados e analisados, incluindo um estudo de caso com uma rede real de distribuição de água em funcionamento. Diferentes hipóteses são introduzidas e os resultados obtidos são discutidos.

Palavras-chave: redes de distribuição de água; localização de fugas, modelação hidráulica, modelação matemática.

Abstract

Mathematical models to aid leak location in water distribution networks

Fresh water aims a sustainable management as it is a scarce resource and vital to the economic and social development. To have the quality standards imposed for human consumption, fresh water needs complex processing operations, transport and distribution. All operations have high costs and are done in the public supply distribution systems and water distribution networks.

Due to its intrinsic work, water distribution networks will always have non revenue water. Still, the efficient use of water recommends a waste control, namely by reducing real losses and leaks. Nowadays in Portugal the annual water balance shows that almost 40% of the system input volume to the distribution network is non revenue water. This percentage is too high, even assuming that leaks in water distribution networks are a timeless problem.

In the literature there are several approaches to an active leakage control, seeking to reduce inefficiency and to achieve the economic leak level. To water distribution networks, these approaches emphasize the pressure management, the infrastructure asset management, speed repairs and the leak detection and location.

To contribute to the reduction of real losses by improving the active leakage control, namely by benefiting the performance of leak detection techniques, this work presents two new approaches as computational tools to support the location of leaky pipes in water distribution networks.

The first proposed methodology is a computational tool based on TrustRank algorithm and on the hydraulic simulation model. This methodology was developed to help finding the optimal placement of pressure transducers in the context of leak location. The methodology can provide a good coverage of the pressure in the entire water distribution network with the selection of hotspots to install pressure transducers. The collected information is relevant to the second proposed methodology.

The second computational methodology was developed as a tool to help locating

unreported leaks and estimating its flow. The new computational methodology results from transferring information from a hydraulic simulation model to an optimization model. The hydraulic simulation model performs steady state analysis to estimate the water distribution network behaviour. The optimization model minimizes the difference between measured and estimated pressures, and its decision variables are the locations and flows from unreported leaks. The leaky pipe location is achieved by simulating hypothetical leakage scenarios. The optimization model compares the pressures estimated with the hypothetical leakage scenarios and the pressure observed, and runs a simulated annealing algorithm to search the solution space. The final solution of the simulated annealing algorithm estimates the approximate quantity and location of unreported leaky pipes. The approximate location of leaky pipes can aid the active leak control activities, as it recommends the use of leak detection techniques to an area, a small set of pipes belonging to the network.

Finally, performances of both methodologies are evaluated. Several case studies are presented and studied, including a real water distribution network. Different hypothesis are introduced and the results are discussed.

Keywords: water distribution networks; leak location; hydraulic models, mathematical models

Índice do Texto

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iv
Índice do Texto	vi
Índice de Figuras	xii
Índice de Quadros	xv
Simbologia.....	xviii
Acrónimos	xxv
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do trabalho.....	1
1.2 Motivação do trabalho	4
1.3 Hipóteses do trabalho	5
1.4 Objetivos do trabalho	6
1.5 Contribuições decorrentes do trabalho	7
1.6 Organização do documento	8
1.7 Referências bibliográficas	10
2 Síntese de conhecimentos sobre perdas em SAA e fugas em RDA....	13
2.1 Enquadramento.....	13
2.2 Complexidade do problema.....	14
2.3 Avaliação nacional do problema	16
2.4 Revisão bibliográfica da metodologia para controlo ativo de perdas de água numa RDA	22
2.4.1 Metodologia para quantificação das perdas de água numa RDA.....	22
2.4.1.1 Monitorização do caudal mínimo noturno.....	22
2.4.1.2 Balanço hídrico.....	24
2.4.2 Perdas reais correntes numa RDA	29

2.4.2.1 Causas das perdas reais numa RDA	29
2.4.2.2 Tipos de perdas reais numa RDA	31
2.4.2.3 Níveis de CAP das perdas reais numa RDA.....	33
2.5 Abordagens para o CAP numa RDA	37
2.5.1 Distribuição das perdas reais na rede de distribuição.....	39
2.5.1.1 Dimensão da rede vs abordagem para o controlo de perdas.....	39
2.5.2 Zona de Medição e Controlo (ZMC).....	40
2.5.3 Gestão da pressão	41
2.5.4 Técnicas de localização aproximada de fugas de água.....	43
2.5.4.1 Localização aproximada convencional.....	44
2.5.4.2 Localização aproximada não convencional baseada na monitorização do caudal.....	45
2.5.4.3 Localização aproximada não convencional baseada no caudal e na pressão	46
2.5.5 Técnicas de localização exata de fugas	49
2.5.5.1 Técnicas de localização exata de fugas convencional	50
2.5.5.1.1 Inspeção visual	51
2.5.5.1.1.1 Visualização.....	51
2.5.5.1.1.2 CCTV	51
2.5.5.1.2 Injeção de traçadores	52
2.5.5.1.3 Localização exata por radiação.....	53
2.5.5.1.3.1 Termografia de infravermelhos	53
2.5.5.1.3.2 Fluxo magnético	53
2.5.5.1.3.3 Varrimento por laser.....	54
2.5.5.1.3.4 Radar de penetração no solo ou georadar.....	54
2.5.5.1.4 Localização exata acústica.....	55
2.5.5.1.4.1 Auscultação	55
2.5.5.1.4.2 Geofone (Mecânico e Eletrónico).....	57
2.5.5.1.4.3 Correlador de ruído.....	58
2.5.5.1.4.4 Sistemas <i>Sahara</i> e <i>SmartBall</i>	59
2.5.5.2 Técnicas de localização exata de fugas não convencional	61
2.5.5.2.1 Simulação em regime transitório do comportamento hidráulico.....	61

2.6 Referências bibliográficas	64
3 Bases da modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas em Redes de Distribuição de Água... 81	
3.1 Enquadramento	81
3.2 Modelo de otimização	82
3.2.1 Função objetivo	84
3.2.2 Restrições do modelo de otimização	89
3.2.2.1 Leis físicas para a simulação estática da RDA	90
3.2.2.2 Lei de resistência ao escoamento.....	91
3.2.2.3 Lei da energia aplicada nas malhas	93
3.2.2.4 Lei da conservação da massa.....	94
3.2.3 Modelação matemática de fugas.....	95
3.2.3.1 Modelação da fuga como dependente do consumo	96
3.2.3.2 Modelação da fuga como dependente da pressão.....	97
3.2.3.3 Modelação da fuga como dependente de características da conduta e da pressão	100
3.2.3.4 Modelação da fuga como independente de condições nas condutas	102
3.2.3.5 Alteração da pressão versus alteração na estimativa do caudal da fuga.....	104
3.3 Critérios de tolerância entre valores estimados pelos modelos matemáticos de simulação hidráulica e valores observados	106
3.4 Monitorização da RDA.....	107
3.4.1 Fases na monitorização de RDA	110
3.4.2 Sistemas de Informação Geográfica (SIG).....	111
3.4.3 Sistemas de telegestão	113
3.4.3.1 Medidor de nível da superfície livre.....	116
3.4.3.2 Instrumentos de medição de caudal.....	117
3.4.3.3 Instrumentos de medição de pressão	121
3.5 Definição da rede de monitorização	122
3.5.1 Monitorização do caudal	122
3.5.2 Monitorização da pressão	123
3.5.3 Tipos de RDA e evolução da cota piezométrica.....	124

3.5.4 Rede de monitorização da pressão.....	126
3.5.5 Revisão das principais metodologias utilizadas na definição da rede de monitorização numa RDA.....	127
3.6 Referências bibliográficas	132
4 Metodologias Propostas para a Localização Aproximada de Fugas em Redes de Distribuição de Água.....	147
4.1 Enquadramento.....	147
4.2 Metodologia proposta para a definição da rede de monitorização das pressões	148
4.3 Conceitos básicos da teoria de grafos.....	149
4.4 Algoritmo TrustRank.....	150
4.4.1 Avaliação de Trust.....	152
4.4.2 Funções Oracle e Trust	152
4.4.3 Trust ideal.....	152
4.4.4 Decaimento de Trust.....	153
4.4.5 Ordenação e limite de Trust.....	154
4.4.6 Evolução da Métrica.....	155
4.4.7 Determinação de Trust em cada página.....	155
4.5 Aplicação do algoritmo TrustRank ao problema da localização de transdutores de pressão em RDA.....	155
4.5.1 Função Oracle e Trust.....	156
4.5.2 Propagação de Trust	157
4.5.3 Decaimento de Trust por decomposição	157
4.5.4 Determinação de Trust em cada nó da RDA	158
4.6 Metodologia proposta para a localização aproximada de fugas de água numa RDA.....	158
4.6.1 Função objetivo	159
4.6.2 Variáveis de decisão do modelo	161
4.6.3 Restrições do modelo de otimização	161
4.6.4 Modelação de fugas nas restrições do modelo	162
4.7 Recozimento Simulado.....	162
4.7.1 Interpretação física do fenómeno do recozimento.....	166

4.7.2 Analogia entre o fenómeno de recozimento e os problemas de otimização.....	168
4.7.3 Construção de algoritmos de recozimento simulado.....	168
4.7.4 Modelação numérica do fenómeno físico do recozimento simulado.....	172
4.7.4.1 Mecanismo de transição entre soluções.....	172
4.7.4.2 Função de arrefecimento da temperatura.....	173
4.7.4.3 Cadeia de Markov.....	173
4.7.5 Algoritmo de otimização proposto.....	174
4.7.5.1 Solução inicial.....	174
4.7.5.2 Temperatura inicial.....	174
4.7.5.3 Mecanismos de transição entre soluções.....	175
4.7.5.4 Função de arrefecimento.....	175
4.7.5.5 Número de iterações a cada temperatura.....	176
4.7.5.6 Critério de paragem.....	177
4.8 Referências bibliográficas.....	177

5 Análise crítica do desempenho das aplicações computacionais desenvolvidas..... 181

5.1 Enquadramento.....	181
5.2 Aplicação computacional para quantificar e localizar as fugas de água.....	182
5.2.1 Estudo de caso 1.....	183
5.2.1.1 Hipótese 1.1.....	183
5.2.1.2 Hipótese 1.2.....	187
5.2.1.3 Hipótese 1.3.....	189
5.2.2 Estudo de caso 2.....	191
5.2.2.1 Hipótese 2.1.....	191
5.2.2.2 Hipótese 2.2.....	193
5.2.2.3 Hipótese 2.3.....	194
5.2.2.4 Hipótese 2.4.....	196
5.2.2.5 Hipótese 2.5.....	197
5.2.2.6 Hipótese 2.6.....	198
5.2.3 Interpretação dos resultados.....	199

5.3 Aplicação computacional para a localização dos transdutores de pressão nos nós mais sensíveis	201
5.3.1.1 Hipótese 2.7	201
5.3.1.2 Hipótese 2.8	204
5.3.1.3 Hipótese 2.9	208
5.4 Aplicação computacional para a localização dos transdutores de pressão com o algoritmo TrustRank	210
5.4.1 Hipótese 2.10	210
5.4.1 Hipótese 2.11	213
5.5 Aplicação da aplicação computacional a uma RDA com uma rede de monitorização definida com a teoria dos grafos	214
5.5.1 Estudo de caso 3	214
5.5.1.1 Hipótese 3.1	215
5.5.1.2 Hipótese 3.2	216
5.6 Interpretação de resultados para a seleção da rede de monitorização	218
5.7 Aplicação a um caso real	218
5.7.1 Estudo de caso 4	219
5.7.1.1 Cenário 4.1	220
5.7.1.2 Cenário 4.2	221
5.7.1.3 Cenário 4.3	222
5.7.2 Interpretação dos resultados do estudo de caso 4	222
5.8 Referências bibliográficas	223
6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	225
Anexos	234
Anexo – Estudo de caso 1	235
Anexo – Estudo de caso 2	237
Anexo – Estudo de caso 3	243
Anexo – Estudo de caso 4	250

Índice de Figuras

Figura 2.1	Questões estratégicas para problemas de perdas reais de água. Adaptado de Farley e Trow (2003).....	21
Figura 2.2	Componentes e pontos de monitorização para análise do balanço hídrico....	24
Figura 2.3	Tipos de discontinuidades mais comuns nas condutas. Adaptado de Misiunas (2005) e de Rizzo (2010).....	31
Figura 2.4	Tipo de perda real corrente em SAA.....	32
Figura 2.5	Duração e caudais dos diferentes tipos de perdas reais. Adaptado de Lambert (1994).	32
Figura 2.6	Decomposição da perda real corrente e modos de intervenção.	33
Figura 2.7	Classificação de perdas reais correntes de água. Adaptado de Covas (2008).	34
Figura 2.8	Decomposição da perda aparente corrente e modo de intervenção.	35
Figura 2.9	Determinação do nível económico das perdas reais de água (Alegre et al. 2005).....	37
Figura 2.10	Exemplo de imagem obtida com CCTV (PureTechnologies, 2010).....	52
Figura 2.11	Exemplo de equipamento com campos móveis de fluxo magnético (www.puretechltd.com).....	53
Figura 2.12	Auscultação da RDA com haste de escuta mecânica (Pilcher et al. 2007)..	56
Figura 2.13	Auscultação da RDA com haste de escuta eletrónica (www.subsurfaceleak.com/ld8_operate_pg.html).....	57
Figura 2.14	Exemplo de utilização do geofone (PureTechnologies 2010).	57
Figura 2.15	Exemplo de utilização de correlador de ruído (Farley et al. 2008).....	59
Figura 2.16	Exemplo de hidrofone montado num marco de incêndio (Hunaidi 2012)...	59
Figura 2.17	Exemplo de utilização do sistema Sahara (Fonte: http://chinawaterrisk.org/opinions/more-than-pipe-dreams-non-revenue-water/).....	60
Figura 2.18	Detalhe da extremidade do cabo do equipamento Sahara(www.puretechltd.com).....	60
Figura 2.19	Detalhe da SmartBall (PureTechnologies 2010) e exemplo da informação recolhida para a localização exata com SmartBall (PureTechnologies 2009).....	61
Figura 3.1	Relação entre a pressão e o caudal através de orifícios para diferentes materiais das condutas. Adaptado de Lambert (2000)	98

Figura 3.2 Relação entre o caudal e a cota piezométrica numa conduta.....	105
Figura 3.3 Princípio geral de um transdutor de pressão relativa com membrana (Henriques et al. 2006).....	117
Figura 3.4 Localização típica de medidores de caudal em sistemas de abastecimento de água (*) (Henriques et al. 2006).....	118
Figura 4.1 Decaimento de Trust e avaliação da fiabilidade das diferentes páginas	154
Figura 4.2 Representação esquemática da metodologia proposta.	156
Figura 4.3 Esquema simplificado do funcionamento da ferramenta proposta para a localização aproximada de fugas de água numa RDA.	159
Figura 5.1 Rede de distribuição de água analisada no estudo de caso 1	183
Figura 5.2 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal 1,0 L/s.....	184
Figura 5.3 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga 0,50 L/s.....	185
Figura 5.4 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga 0,25 L/s.....	185
Figura 5.5 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,10 L/s.....	186
Figura 5.6 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,05 L/s.....	186
Figura 5.7 Resultados da localização de fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado admitindo o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 1,0 L/s ou 0,5 L/s.....	187
Figura 5.8 Resultados da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,25 L/s.	188
Figura 5.9 Resultado da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,10 L/s.	188
Figura 5.10 Resultado da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,05 L/s.	189
Figura 5.11 Resultado da localização das fugas com um modelo de simulação em que o coeficiente de Hazen-Williams está sobreavaliado em 10%	190
Figura 5.12 Resultado da localização das fugas com um modelo de simulação em que o coeficiente de Hazen-Williams está subavaliado em 10%	190
Figura 5.13 Planta da RDA do segundo estudo de caso gerada com Waternetgen (Muranho et al. 2012) com a hipótese de fuga 2.1.....	192

Figura 5.14 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.2.	194
Figura 5.15 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.3.	195
Figura 5.16 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.4.	196
Figura 5.17 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.5.	197
Figura 5.18 Planta da RDA e soluções finais para o posicionamento das fugas na Hipótese 2.5 no cenário 2.....	198
Figura 5.19 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.6.	199
Figura 5.20 Rede de monitorização das hipóteses 2.7, 2.8 e 2.9.....	202
Figura 5.21 Síntese das condutas com fugas nas hipóteses entre 2.2 a 2.6.	202
Figura 5.22 Localização dos marcos de incêndio ativados e localização dos transdutores de pressão	204
Figura 5.23 RDA com a identificação da localização dos transdutores de pressão e da localização da operação de manutenção.....	208
Figura 5. 24 Distribuição espacial dos transdutores de pressão obtida com a aplicação do algoritmo TrustRank.	211
Figura 5.25 Rede de distribuição de água do Estudo de caso 3 e respetiva rede de monitorização.	215
Figura 5.26 Evolução do caudal no aglomerado e no principal consumidor para o estudo de caso 4.....	219
Figura 5.27 Evolução da pressão nos transdutores de pressão para o estudo de caso 4.220	
Figura 5.28 Identificação da conduta com fuga na abertura da BI 33.....	221
Figura 5.29 Identificação de conduta com fuga na abertura da BI 32.....	221
Figura 5.30 Condutas identificadas durante a abertura da BI 29.....	222
Figura A.1 Representação da RDA do estudo de caso 1.	235
Figura A.2 Representação da RDA do estudo de caso 2.....	237
Figura A.3 Representação da RDA do estudo de caso 3.....	243
Figura A.4 Representação da RDA do estudo de caso 4.	250

Índice de Quadros

Quadro 2.1 Caracterização dos sistemas em alta. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios ERSAR (2015).	16
Quadro 2.2 Caracterização dos sistemas em baixa. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios ERSAR(2015).....	17
Quadro 2.3 Volumes de água nos sistemas em alta e em baixa em milhões de m ³ /ano. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios de ERSAR (2015).	18
Quadro 2.4 Evolução do indicador água não faturada e perdas reais de água em Portugal 2011-2014. Adaptado de dados provisórios ERSAR (2015).	19
Quadro 2.5 Componentes do caudal utilizado durante o período noturno (m ³ /h).	23
Quadro 2.6 Componentes do balanço hídrico (m ³ /período de referência). Adaptado de ERSAR (2013c).....	27
Quadro 2.7 Alternativas para a localização aproximada de fugas de água em RDA.	44
Quadro 2.8 Breve síntese de técnicas alternativas para a localização exata de fugas em RDA.	50
Quadro 3.1 Valores recomendados para o expoente N1 Adaptado de Lambert (2000)..	99
Quadro 3.2 Desagregação dos fatores causadores de fugas. Adaptado de Islam (2012).	103
Quadro 3.3 Critérios de tolerância admissíveis e máximos para considerar uma RDA calibrada (Walski 1992).	106
Quadro 3.4 Faseamento usual para colocação de dispositivos de monitorização	111
Quadro 4.1 Algoritmo proposto para implementação do TrustRank	158
Quadro 4.2 Analogia entre processo físico e o problema de otimização. Adaptado de Michalewicz e Fogel (2000).....	168
Quadro 4.3 Síntese de decisões específicas para a implementação do recozimento simulado	169

Quadro 4.4 Algoritmo proposto para a implementação do recozimento simulado.	170
Quadro 4.5 Proposta para seleção da solução inicial.....	174
Quadro 5.1 Resultados com cinquenta conjuntos de números aleatórios e diferentes funções objetivo.	192
Quadro 5.2 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.2.	194
Quadro 5.3 Resultados finais com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.2.....	194
Quadro 5.4 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.3.	195
Quadro 5.5 Resultados finais com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.3.....	195
Quadro 5.6 Discriminação das fugas nas condutas da RDA de acordo com o cenário analisado – Hipótese 2.4.....	196
Quadro 5.7 Resultados finais corretos com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.4.....	196
Quadro 5.8 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.5.	197
Quadro 5.9 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.5.....	198
Quadro 5.10 Condutas e respetivos caudais de fuga na hipótese 2.6.	199
Quadro 5.11 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.6.....	199
Quadro 5.12 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.7 (Cen. 1 representa o cenário 1; Cen. 2 representa o cenário 2).203	
Quadro 5.13 Localização aproximada de fugas com a execução de testes de incendio com 15 L/s, para dois cenários (Cen.1 – cenário 1 com fuga de 15 L/s e Cen. 2 – cenário 2 com fuga de 1,5 L/s). Resultados obtidos com cinquenta testes com diferentes conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.8. ..	205
Quadro 5. 14 Resultados obtidos na hipótese 2.9 (Cen.1 – cenário 1 com fuga de 15 L/s e Cen. 2 – cenário 2 com fuga de 1,5 L/s). Resultados obtidos com cinquenta testes com diferentes conjuntos de números aleatórios.	209
Quadro 5. 15 Síntese das dez situações de solicitação analisadas, na coluna identificam-se as condutas pelo número e o respetivo caudal – Hipótese 2.10.....	210

Quadro 5. 16 Nós selecionados para a localização dos transdutores de pressão.....	211
Quadro 5. 17 Número de condutas fiáveis identificadas na solução - Hipótese 2.10 (cenário 1/cenário 2).....	212
Quadro 5. 18 Número total de condutas identificadas numa solução - Hipótese 2.10 (cenário 1/cenário 2).....	212
Quadro 5. 19 Número de condutas fiáveis identificadas na solução - Hipótese 2.11 (cenário 1/cenário 2).....	213
Quadro 5. 20 Número total de condutas identificadas numa solução - Hipótese 2.11 (cenário 1/cenário 2).....	214
Quadro 5.21 Nós selecionados para a colocação dos transdutores de pressão.....	215
Quadro 5. 22 Resultados obtidos para diferentes caudais de fuga em 20 condutas - Hipótese 3.1.....	216
Quadro 5.23 Número de soluções que identificaram a conduta com fuga, uma conduta adjacente ou uma conduta ao lado - Hipótese 3.2 (os parêntesis representam o número de falsas condutas com fugas identificadas na solução final).	217
Quadro A.1 Características dos nós: cota topográfica, consumo, caudal de fuga e pressão observada. Estudo de caso 1.....	235
Quadro A.2 Características das condutas: diâmetros, os comprimentos e os coeficientes de Hazen-Williams. Estudo de caso 1.....	236
Quadro A.3 Características dos nós: cota topográfica, consumo e pressão observada. Estudo de caso 2.....	237
Quadro A.4 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro, coeficiente de Hazen-Williams e fuga. Estudo de caso 2.....	240
Quadro A.5 Características dos nós: cota topográfica e consumo. Estudo de caso 3. ..	243
Quadro A.6 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro e coeficiente de Hazen-Williams. Estudo de caso 3.....	246
Quadro A.7 Caracterização dos nós e cota topográficas. Estudo de caso 4.	251
Quadro A.8 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro e coeficiente de Hazen-William. Estudo de caso 4.	252

Simbologia

a_i	Elemento i do conjunto solução;
A	Conjunto solução;
A_0	Área inicial do orifício i ;
A_i	Área equivalente do orifício i ;
A	Matriz de adjacência;
A_i	Área equivalente do orifício i ;
c_1	Constante característica da rede, função do material e idade das condutas;
c	Constante de proporcionalidade entre o caudal da fuga e uma exponencial com a base pressão;
C_i	Coeficiente de vazão do orifício i ; Solicitação no nó i ;
$C_{H.W.}$	Coeficiente de <i>Hazen-Williams</i> ;
D_j	Diâmetro interior da conduta no trecho j ;
$D_{i,j}$	Diâmetro interior no trecho entre o nó i e o nó j ;
E_{ba}	Energia fornecida ao sistema pela estação elevatória ou grupo sobrepessor pertencente à malha;
E_i	Valor de energia no estado i ;

E_{opt}	Valor de energia do conjunto de soluções ótimas locais;
F	Função objetivo;
F	Função genérica;
	Função de arrefecimento;
f_c	Função de proporcionalidade entre o caudal de fuga e o consumo;
f_d	Função distribuidora do caudal de fuga na conduta para os seus nós;
f_j	Fator de resistência ou de <i>Darcy-Weisbach</i> da conduta no troço j ;
G	Grafo;
G	Função genérica;
	Função de definição do número de avaliações a executar na temperatura;
g	Aceleração da gravidade terrestre;
$H_{pm,t}$	Coefficiente para conversão da diferença entre as cotas piezométricas num valor adimensional;
I_A	Função característica de qualquer conjunto solução A ;
K	Contador global de temperatura;
$k_{c,w}$	Rugosidade absoluta equivalente da parede interior da conduta;
K	Coefficiente de perda de carga localizada;
K_B	Constante de <i>Avogadro</i> ;
$K_{G.M.S.}$	Coefficiente de <i>Gauckler - Manning - Strickler</i> ;
K_{ij}	Coefficiente de perda de carga modificado para a lei de

	resistência;
K_{sc}	Coefficiente de <i>Scimemi</i> ;
K_b	Constante de <i>Boltzmann</i> ;
L_j	Comprimento do troço <i>j</i> ;
L_{ij}	Comprimento do troço entre o nó <i>i</i> e o nó <i>j</i> ;
L_0	Número de avaliações a executar na temperatura inicial;
L_k	Número mínimo de avaliações a executar na temperatura ordem <i>k</i> ;
m	Declive da relação entre a área inicial do orifício e a pressão;
NI	Expoente da pressão para cálculo do caudal de fuga;
NB	Número de estações elevatórias ou grupos sobressores na malha;
NCO	Número de cenários de consumo observados;
NF	Número de nós de cota piezométrica fixa na rede de distribuição de água;
NMF	Número de malhas fictícias;
NMN	Número de malhas elementares naturais;
NN	Número de nós de junção na rede de distribuição de água;
NNC	Número de nós com consumo na rede de distribuição de água;
NPO	Número de nós monitorizados;
NPO_t	Número de nós monitorizados no instante <i>t</i> ;
NQO_t	Número de condutas monitorizadas no instante <i>t</i> ;
NT	Número de troços da rede de distribuição de água;
NTM	Número de troços na malha;

nt_i	Número de troços confluentes para o nó i
O	Função Oracle;
Pa	Probabilidade de aceitação da solução;
Pa_0	Percentagem de aceitação de soluções inicial;
Pa_k	Percentagem de aceitação de soluções na temperatura ordem k ;
Pa_{corr}	Probabilidade de aceitação de soluções de acordo com a distribuição de <i>Boltzmann</i> ;
Pa_{ref}	Probabilidade de referência para a aceitação de soluções;
$p_{i,t}^{Observado}$	Pressão observada no nó ou orifício i no instante t ;
P_i	Pressão no nó ou orifício i ;
\bar{P}_j	Pressão média no troço j ;
$p_j^{jusante}$	Pressão no nó de jusante do troço j ;
$p_j^{montante}$	Pressão no nó de montante do troço j ;
Q_j	Caudal escoado através do troço j ;
$Q_{i,t}^{Estimado}$	Caudal estimado para a conduta i no instante t ;
$Q_{i,t}^{Observado}$	Caudal observado na conduta i no instante t ;
$Q_{pm,t}$	Coefficiente específico para conversão da diferença entre os caudais num valor adimensional;
QC_i	Caudal de consumo no nó i ;
QE_i	Caudal externo ao nó i ;
QF_i	Caudal de fuga no nó i ou no troço i ;
R	Transmissão de <i>Trust</i> de cada aresta;

Re	Número de <i>Reynolds</i> ;
S	Espaço solução;
S^*	Conjunto de soluções ótimas locais;
T	Função <i>Trust</i> de cada vértice;
Tr	Matriz de transição;
T_0	Temperatura inicial;
T_k	Temperatura na ordem k ;
t	Contador local de avaliações em cada ordem de temperatura;
t	Temperatura corrente;
U	Inversa da matriz de transição;
U_j	Velocidade do escoamento no troço j ;
V	Vizinhança da solução;
V	Conjunto de vértices;
X_0	Solução inicial;
X_{cand}	Solução candidata;
X_{corr}	Solução corrente;
X_i	Variável estocástica no estado corrente de energia;
X_{opt}	Solução ótima local / Melhor solução encontrada;
w	Função constante, linear, quadrática ou logarítmica;
	Grau de saída do vértice;
w_i	Fator de ponderação normalizado do caudal observado;
w_j	Fator de ponderação normalizado da perda de carga observada desde o reservatório até ao nó j ;

ω_j^P	Peso atribuído às observações da pressão no instante j ;
ω_j^Q	Peso atribuído às observações do caudal no instante j ;
Γ	Matriz de incidência da rede de distribuição de água;
Ψ_i	Vetor de incidência da rede de distribuição de água no nó i ;
θ_{ij}	Taxa de fuga de água entre o nó i e o nó j ;
v_i	Vértice i ;
ε	Conjunto de arestas;
$\frac{P^{Observado}}{\gamma_j}$	Altura piezométrica observada no nó j ;
$\frac{P^{Observado}}{\gamma_{j,t}}$	Altura piezométrica observada no nó j no instante t ;
$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Estimada}$	Cota piezométrica estimada para o nó j ;
$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Observada}$	Cota piezométrica observada no nó j ;
$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Estimada}$	Cota piezométrica estimada para o nó j no instante t ;
$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Observada}$	Cota piezométrica observada no nó j no instante t ;
Δf	Varição da avaliação com a função objetivo entre duas soluções;

$\Delta H_j^{continua}$	Perda de carga contínua no troço j ;
$\Delta H_j^{localizada}$	Perda de carga localizada ou singular no troço j ;
$\Delta H_j^{observado}$	Perda de carga observada desde o reservatório até ao nó j ;
ΔH_m	Perda de carga total no troço m pertencente à malha;
ΔZ_m	Diferença de energia entre dois reservatórios envolvidos na malha fictícia m ;
ν	Viscosidade cinemática do líquido;
α	Expoente do diâmetro na fórmula de <i>Scimemi</i> ; Factor de arrefecimento;
β	Expoente da perda de carga unitária na fórmula de <i>Scimemi</i> ; Expoente da pressão para modelação da fuga de água; Factor do número de soluções em cada temperatura;
ζ	Grau de entrada do vértice;
χ	Conjunto aleatório de páginas;
σ_i	Desvio padrão ou desvio da medição para a leitura no nó i ; Desvio padrão da variável i ;
ε_H	Erro máximo da simulação da cota piezométrica;
δ_H	Erro na avaliação da cota piezométrica;
δ_Q	Erro na avaliação do caudal.

Acrónimos

AA08	Indicador água não faturada;
AA13	Indicador perdas reais de água;
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line;</i>
AMR	<i>Automatic meter Reading;</i>
BABE	<i>Burst and background estimates;</i>
BI	Boca de incêndio;
CAP	Controlo ativo de perdas;
CCTV	<i>Closed-circuit television;</i>
CMN	Caudal mínimo noturno;
EG	Entidade Gestora;
EPANET	Programa de modelação do comportamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água desenvolvido pela <i>Environmental Protection Agency</i> (www.epa.gov);
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos;
FFD	Ferro fundido dúctil;
GPR	Geo-radar (<i>Ground-penetrating radar</i>);
GPS	<i>Global positioning system;</i>
HMI	Interface homem máquina;

IWA	<i>International Water Association;</i>
MFL	<i>Magnetic flux leakage;</i>
NEP	Nível económico de perdas;
NEPa	Nível económico de perdas aparentes;
NEPr	Nível económico de perdas reais;
PVC	Policloreto de vinilo;
PEAD	Polietileno de alta densidade;
RDA	Rede de distribuição de água;
SAA	Sistema de abastecimento de água;
SCADA	<i>Supervisory control and data acquisition;</i>
SF6	Hexafluoreto de enxofre;
SI	Sistema de informação;
SIG	Sistema de informação geográfica;
SVM	<i>Support vector machines;</i>
VRP	Válvula redutora de pressão;
ZMC	Zona de medição e controlo;
ZPC	Zona de pressão controlada.

1 Introdução

1.1 Enquadramento do trabalho

À nascença, cerca de 70% do peso do corpo humano é constituído por água. Durante toda a vida, a necessidade básica de ingerir diariamente cerca de 2 litros de água potável mantém-se e, com o envelhecimento, a percentagem de água no corpo diminui. O artigo 3º da Declaração Universal dos Direitos do Homem, ao consagrar o direito à vida, consagra, por consequência direta, como direito elementar, o acesso à água potável.

Nas próximas décadas, o aumento da população mundial continuará com um crescimento exponencial. As economias tenderão a crescer e a promover migrações para os centros urbanos. Ambos os fatores alteram os estilos de vida das populações o que afeta diretamente as necessidades hídricas e o padrão de consumo mundial da água.

Em regiões com severo stress hídrico residirá 40% da população mundial, de acordo com a projeção mundial para 2050 (UNESCO 2014), e prevê-se, em simultâneo, um aumento de 130% no consumo doméstico global.

As alterações climáticas, por exemplo as ondas de calor e secas atualmente sentidas, terão tendência a agravar as disponibilidades de água, podendo também reduzir a capacidade de depuração das águas no meio ambiente e sobrecarregar em cerca de 20% os aquíferos sobre explorados.

A combinação destas previsões faz antever que, em 2050, a água será um recurso mais escasso a nível mundial do que é hoje. A escassez de água será mais problemática, mais aglomerados terão dificuldade na distribuição, por um lado, por falta do recurso e, por outro, por aumento da procura. A antevisão da gravidade do problema é sentida na atualidade em alguns aglomerados, como é exemplo a cidade de São Paulo (DN 2015).

Desde o final do século XIX, nas principais cidades europeias, em Lisboa desde 1856 (Ramos 2011) e no Porto desde 1864 (Gavant 1864), a rede de distribuição de água (RDA) ao domicílio tem aumentado a sua extensão. Devido ao envelhecimento das RDA, estas carecem de reabilitação para satisfazer novos objetivos e critérios: novas necessidades locais de água distribuída, novos patamares de qualidade do serviço prestado, a sua sustentabilidade e novas exigências regulamentares e de construção.

O abastecimento público de água é um serviço público estruturante para o desenvolvimento de cada aglomerado, garante do bem-estar geral da população, da saúde pública, das atividades económicas e do meio ambiente (Rogers 2014). O desenvolvimento sustentável do aglomerado depende da contribuição de cada uma das suas infraestruturas, incluindo da RDA. Devido às características intrínsecas das RDA, o desenvolvimento sustentável das mesmas corresponde ao funcionamento sustentável de cada uma individualmente, ou seja, ao bom funcionamento de cada rede em cada local.

Em cada local, a Entidade Gestora (EG) depara-se com problemas e recursos muito individuais e característicos. Para garantir a sustentabilidade da EG, o recurso estratégico “água” deverá ser sujeito a um escrutínio garante de elevada eficiência no seu uso. Nesta ótica, a água, como recurso estruturante, deverá ser objeto de uma gestão de qualidade e ambiental, de um planeamento e de racionalidade no seu uso, sendo garante destes objetivos as infraestruturas e as tecnologias de suporte à sua distribuição.

Frequentemente, a água na natureza não reúne as condições de potabilidade. Os utilizadores têm direito a um serviço e a água com qualidade. A prestação do serviço que confere à água condições de potabilidade está geograficamente limitada e tem um elevado valor socioeconómico. A limitação geográfica da atuação de cada RDA confere características de monopólio natural ao sistema, logo, sem concorrência nem incentivos promotores do aumento da sua eficiência (Andrade *et al.* 2012).

A avaliação económico-financeira da EG confere a valoração do serviço prestado para a população (Leitão *et al.* 2013). Os utilizadores, por sua vez, têm limitações económicas para proceder ao pagamento do serviço prestado (Tralhão 2011).

A gestão operacional, fruto do património de infraestruturas de abastecimento, garante o cumprimento das exigências de quantidade e qualidade do serviço de distribuição de

água (Alegre *et al.* 2012). Nos países desenvolvidos os aglomerados urbanos têm sistemas muito complexos de distribuição domiciliária de água. Estes sistemas são essenciais para a prestação do serviço de distribuição de água e da sustentabilidade desse mesmo serviço.

De entre os vários constituintes do sistema de abastecimento de água (SAA), a RDA assume um papel preponderante. A RDA é constituída por condutas maioritariamente enterradas, longas, e diversos acessórios e órgãos. A história sobre a construção de qualquer RDA acompanha a expansão do aglomerado no tempo e no espaço. O custo de construção e de manutenção é muito elevado, e está associado a planos de investimento muito longos, devido à expectativa de elevada durabilidade dos materiais. O objetivo da RDA é transportar, sob pressão, com velocidade, com qualidade, a quantidade de água necessária ao aglomerado.

A operacionalidade da RDA é fundamental para a EG. Nesta operacionalidade incluem-se todos os problemas inerentes à existência de água necessária para suprir as necessidades da população e indústria, ao funcionamento da rede com desperdício mínimo associado ao escoamento de um líquido sob pressão envolto por um material sólido e à “venda a retalho” da água.

Cada RDA apresenta um problema individual de desperdício e de falta de água. Resolvendo cada problema localmente, o problema global do desperdício de água é mitigado e o problema de falta de água poderá ser parcialmente resolvido.

Para superar o isolamento natural entre EG é frequente utilizar *benchmarking* (Marques 2011). A diferença entre os volumes da água entrada no sistema e do consumo autorizado (Lambert 2002), ou seja as perdas de água na RDA, afeta, direta ou indiretamente, todos os indicadores de desempenho, com exceção dos indicadores de recursos humanos.

Em língua portuguesa, a primeira publicação com a definição dos indicadores de desempenho para RDA foi apresentada por Alegre *et al.* (2004). Estes indicadores ajudaram à definição de prioridades e à estruturação do setor de acordo com o plano estratégico estabelecido no PEAASAR II (MAOTDR 2007). De acordo com os dados apresentados no PENSAAR 2014-2020 (CNA 2014a) verifica-se que a eficiência no abastecimento de água carece de muita atenção e, particularizando, uma das suas facetas

será a redução e o controlo das perdas de água. A abordagem para o controlo de perdas de água na RDA tem sido amplamente estudada (Alegre *et al.* 2005) e é uma via para a melhoria da eficiência.

1.2 Motivação do trabalho

Nas últimas décadas o aumento da extensão das infraestruturas permitiu a prestação do serviço de abastecimento de água à esmagadora maioria da população, concretizando o plano estratégico de universalidade, continuidade e qualidade do serviço definido pelo PEAASAR II (MAOTDR 2007). A preservação deste ativo é um objetivo legítimo que inclui a maximização do período de vida útil da infraestrutura existente, a otimização da sua capacidade de utilização, a melhoria da qualidade do serviço prestado, a defesa dos utilizadores e a vigilância dos custos de exploração para uma sustentabilidade económico-financeira.

A maximização da eficiência e a otimização dos recursos disponíveis são, por consequência, o único meio de recuperação integral e sustentável dos custos que permitem a acessibilidade, a universalidade e disponibilidade deste serviço a toda a população (CNA 2014b). Em 2014, os rendimentos e ganhos totais cobriam 81% dos gastos totais (ERSAR 2015).

A maximização da eficiência decorre de 4 tipos de intervenções, complementares entre si e que convergem para o mesmo objetivo estratégico. As intervenções visam:

- corrigir as ineficiências de gestão decorrentes do monopólio natural e promover a utilização da capacidade instalada;
- melhorar e consolidar as boas práticas de gestão patrimonial de infraestruturas e dos recursos com uma gestão eficiente de ativos e promovendo a reabilitação;
- potenciar a valorização dos subprodutos e aumentar a adesão ao serviço;
- implementar abordagens inovadoras (CNA 2014b).

Na fase de diagnóstico dos SAA, a redução das perdas de água, uma parcela da água não faturada, objetivo operacional 3.2 do relatório PENSAAR 2020 - Uma nova estratégia para o setor de abastecimento de água e saneamento de águas residuais (CNA

2014a), foi identificada com elevado potencial de melhoria. Os níveis de perdas atuais são muito altos, penalizando o meio ambiente, comprovando o uso não eficiente dos recursos hídricos e fomentando ineficiências económicas.

Como será detalhado no capítulo 2, num SAA o maior potencial de ganho de eficiência associado a perdas de água encontra-se na RDA, onde as intervenções produzirão um maior ganho de eficiência em benefício da EG, apesar de mais complexas e mais abrangentes.

A literatura da especialidade internacional relata intervenções para controlo ativo de perdas (CAP), tipificando-as e apresentando os benefícios e limitações de cada uma.

As propostas para o CAP necessitam de uma intervenção na rede e passam pela definição de zonas de medição e controlo (ZMC), pela gestão das pressões nas RDA e pela rápida localização de fugas e correspondente reparação.

Apesar dos vários estudos a nível internacional, o desenvolvimento de ferramentas computacionais para a localização aproximada de fugas é uma necessidade no setor, não contestando a relevância dos outros tipos de intervenção, mas complementando-os. Face às necessidades das EG e para auxiliar a localização e quantificação aproximada de fugas nas RDA, na presente tese são propostas duas ferramentas computacionais complementares, visando a localização aproximada das fugas de água em RDA ou ZMC.

1.3 Hipóteses do trabalho

As hipóteses desta tese são:

A modelação matemática para a simulação do comportamento hidráulico da RDA é fiável. O modelo de simulação hidráulica do comportamento da RDA está devidamente calibrado e garante uma fiabilidade de resultados compatíveis com o objetivo do trabalho.

A presença de fugas de água numa RDA tem consequência observáveis, nomeadamente observa-se um acréscimo, injustificado pelo consumo, no caudal saído dos reservatórios, a pressão é mensurável e apresenta um valor diferente do esperado.

A densidade de transdutores de pressão e os medidores de caudal instalados na RDA são compatíveis com os objetivos pretendidos.

1.4 Objetivos do trabalho

Os principais objetivos desta tese são:

- Analisar sumariamente o estado da arte da localização exata de fugas em adutoras;
- Analisar o estado da arte da localização aproximada de fugas em RDA;
- Elaborar um modelo matemático de apoio à localização aproximada de fugas de água numa qualquer RDA, estimando os respetivos caudais. Este modelo deverá conter uma descrição detalhada da RDA;
- Resolver com o recurso a heurísticas modernas (algoritmo do recozimento simulado) o modelo matemático elaborado para apoiar a localização aproximada de fugas, através da resolução de um problema de otimização que relacione pressões observadas e simuladas;
- Elaborar uma aplicação computacional para definir uma rede de monitorização das pressões adequada ao modelo anterior, ou seja, contribuir para a seleção dos nós onde as observações das pressões são capazes de garantir adequado rigor aos resultados finais obtidos com o modelo matemático de localização aproximada;
- Elaborar testes de aferição de resultados;
- Realizar aplicações em contexto real.

Na globalidade pretende-se o desenvolvimento de uma metodologia de custo reduzido, expedita, não condicionante do normal funcionamento da rede, capaz de contribuir para a identificação das zonas da rede onde há maior probabilidade de encontrar fugas de água com as técnicas de localização exata. Por exclusão, esta mesma metodologia deverá indiciar as zonas da rede onde há menor probabilidade de encontrar fugas.

Potencialmente, ao reduzir os tempos de identificação e posterior intervenção, esta metodologia poderá contribuir para melhorar a robustez financeira ou para melhorar a sustentabilidade do direito da população à água potável.

1.5 Contribuições decorrentes do trabalho

A originalidade do trabalho é a metodologia para a localização aproximada de fugas em RDA, fundamentada na observação do caudal mínimo noturno, na observação da pressão e na metodologia para selecionar a rede de monitorização da pressão.

Estas contribuições estão documentadas nas seguintes publicações:

Ribeiro L., Sousa J., Sá Marques A. (2012). "Desenvolvimento de uma aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: 11º Congresso da Água. Porto, 6 a 8 de Fevereiro.

Ribeiro L., Muranho J., Sousa J., Sá Marques A. (2012). "Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: SEREA - XI Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro L., Muranho J., Sousa J., Sá Marques A. (2012). "Identificação de fugas através de modelação matemática de redes de distribuição de água". Em: 15º ENaSB - Encontro Engenharia Sanitária e Ambiente "Reorganização para a Sustentabilidade do Set das Águas e Resíduos. Évora, 10 a 12 de Outubro: APESB.

Ribeiro L., Sousa J., Sá Marques A. (2012). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". *Water Util J.* 4:3–12.

Ribeiro L., Sousa J., Sá Marques A. (2013). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". Em: 8th International Conference Eur Water Resour Assoc. Porto, 26 a 29 de Junho.

Ribeiro L., Sousa, J., Sá Marques A., Simões NE. (2015). "Locating leaks with TrustRank algorithm support. *Water*. 7:1378–1401". doi:10.3390/w7041378

Sousa J., **Ribeiro L.**, Muranho J., Sá Marques A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". Em: 13th Comput Control Water Ind Conf CCWI 2015. Leicester, Reino Unido, 2 a 4 Setembro.

Sousa J., **Ribeiro L.**, Muranho J., Sá Marques A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". *Procedia Eng.* 119:63–71. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.854

1.6 Organização do documento

Este documento está dividido em seis capítulos e anexos. Na última seção de cada capítulo estão as suas referências bibliográficas. O plano de escrita aplica o modelo dos textos acadêmicos para as ciências de base tecnológica ou experimental. A primeira parte do texto expõe o problema e os métodos passíveis de serem utilizados e, posteriormente, expõe os resultados, as análises e as conclusões, incluindo propostas para a continuação do trabalho.

Capítulo 1 – Introdução.

No presente capítulo é apresentado o tema geral da tese. Começa-se por fazer um enquadramento muito geral do direito à água, da previsão de escassez da água potável, da necessidade de valoração dos serviços de distribuição de água, da sustentabilidade das EG e das várias alternativas para melhorar a eficiência das RDA.

Após descrever o contributo específico do presente documento, o mapeamento do documento é destacado.

Capítulo 2 – Síntese de conhecimentos sobre perdas em SAA e fugas em RDA.

Neste capítulo faz-se uma análise crítica do problema, expondo a sua complexidade, bem como o atual estado de arte. Após a exposição da situação nacional, as questões estruturantes da metodologia para controlo ativo de perdas de água são apresentadas. Os fundamentos da auditoria são estruturados e a monitorização necessária hierarquizada. O capítulo finaliza com a descrição das abordagens propostas pela literatura da especialidade para o controlo de perdas e fugas.

Capítulo 3 – Bases da modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas de água em redes de distribuição.

O capítulo três apresenta as noções gerais da localização aproximada não convencional de fugas baseada na observação do caudal, da pressão e na descrição física do comportamento hidráulico da RDA. Este capítulo está dividido em duas grandes seções, uma referente às redes e a outra referente à monitorização.

Primeiro o capítulo aborda a complexidade do funcionamento da RDA e os múltiplos objetivos que a mesma pode ter exigem uma boa definição do problema e das variáveis

a monitorizar. Depois referem-se critérios que têm sido considerados admissíveis para considerar um modelo representativo da realidade. Antes de finalizar, a evolução das redes de monitorização é descrita, tanto no seu faseamento como nos sistemas que a sustentam. Para finalizar, a complexidade da definição da rede de monitorização da RDA é analisada.

Capítulo 4 – Metodologia proposta para a localização aproximada de fugas em redes de distribuição de água.

As várias ideias encerradas no problema em estudo forçam à divisão deste capítulo em duas partes muito distintas. Na primeira parte apresenta-se a metodologia proposta para definir a rede de monitorização dos equipamentos de medição da pressão. Na segunda parte descreve-se a metodologia proposta para a localização aproximada de fugas de água em RDA com base na observação de pressões.

Capítulo 5 – Análise crítica do desempenho das aplicações computacionais desenvolvidas.

Os vários estudos de caso realizados no âmbito da presente tese encontram-se organizados temporalmente. O primeiro conjunto de estudos de caso resulta dos trabalhos desenvolvidos para aprimorar a aplicação computacional para quantificar e localizar fugas de água em RDA. O segundo conjunto de estudos de caso analisa a influência da rede de monitorização na obtenção de resultados válidos. O último estudo de caso apresenta uma aplicação da metodologia em contexto real.

Capítulo 6 – Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Neste capítulo relembram-se as ideias principais do documento: a importância do tema escolhido, o contributo específico da presente tese para o conhecimento, a forma e a validação deste contributo. Nele são expostas as principais inovações, conclusões e as publicações relevantes associadas ao desenvolvimento deste trabalho.

O capítulo finaliza com recomendações para trabalhos futuros nesta área de investigação.

Anexos.

Apresentação dos dados anexos à presente tese de doutoramento.

1.7 Referências bibliográficas

Alegre, H., Coelho, S., Almeida, C., Vieira, P. (2005). "Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição". IRAR, IA L, editor. Lisboa: LNEC IRAR INAG.

Alegre, H., Coelho, S., Leitão, J. (2012). "Gestão patrimonial de infraestruturas em sistemas urbanos de água". Em: Jornadas Eng para a Soc Investig e inovação- Cid e Desenvolv LNEC. Lisboa - 18 a 20 Junho 2012; p. 1–8.

Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J., Parena, R. (2004). "Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água". Série Guia. IWA, editor. Lisboa: LNEC IRAR.

Andrade, I., Mesquita, A., Santos, C., Aleixo, C., Rosário, L., Igreja, M., Ribeiro, P. (2012). "Relação das entidades gestoras com os utilizadores dos serviços de águas e resíduos". ERSAR, editor. Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

CNA. (2014a.) "PENSAAR 2020 Uma estratégia ao serviço da população: serviços de qualidade a um preço sustentável Volume 1, Versão preliminar". Lisboa, Conselho Nacional da Água.

CNA. (2014b). "PENSAAR 2020 Uma estratégia ao serviço da população: serviços de qualidade a um preço sustentável Volume 3, Versão preliminar". Lisboa, Conselho Nacional da Água.

DN 5/2/2015. (2015). "São Paulo prepara-se para viver 5 dias por semana sem água".

ERSAR. (2015). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2015 Volume 1 Caraterização do setor de águas e resíduos, Dados provisórios". Lisboa. Entidade reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

Gavant, E. (1864). "Estudo sobre o abastecimento d'água da cidade do Porto". Porto: Typ.

Lambert, A. (2002). "International report: Water losses management and techniques".

Water Sci Technol Water Supply. 2:1–20.

Leitão, A., Rocha, A., Guimarães, A., Folque, A., Amaro, A., Romão, D., Oliveira, D., Baptista, J., Pires, J., Miranda, J., Almeida, J., Kirkby, M., Godinho, R., Medeiros, R., Guerreiro, S. (2013). "Direito da água". Série Curs. Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

MAOTDR. (2007). "Plano estratégico de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais - PEAASAR II 2007-2013". Lisboa. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional.

Marques, R. (2011). "A regulação dos serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais - uma perspectiva internacional". Lisboa. Entidade reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), Centro de Sistemas Urbanos e Regionais (CESUR).

Ramos, P. (2011). "O projecto de Louis-Charles Mary para distribuição de água na cidade de Lisboa , 1856". Lisboa: EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: SEREA - XI Semin Ibero-Americano sobre Sist Abast e Dren. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Identificação de fugas através de modelação matemática de redes de distribuição de água". Em: 15º ENaSB - Encontro Eng Sanitária e Ambient "Reorganização para a Sustentabilidade do Set das Águas e Resíduos. Évora, 10 a 12 de Outubro: APESB.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A., Simões, N.E. (2015). "Locating leaks with TrustRank algorithm support". Water. 7:1378–1401.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Desenvolvimento de uma aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: 11º Congr da Água. Porto, 6 a 8 de Fevereiro.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". Water Util J. 4:3–12.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2013). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". Em: 8th Int Conf Eur Water Resour Assoc. Porto, 26 a 29 de Junho.

Rogers, D. (2014). "Leaking water networks : an economic and environmental disaster". *Procedia Eng.* 70:1421–1429.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". Em: 13th Comput Control Water Ind Conf CCWI 2015. 2 a 4 Setembro, Leicester, Reino Unido.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". *Procedia Eng.* 119:63–71.

Tralhão, S. (2011). "Consumos e encargos: percepção vs realidade - O caso dos utilizadores domésticos de água". Faculdade de Economia da Universidade de Coimbra.

UNESCO. (2014). "The united nations world water development report 2014: water and energy". Ki-moon, B., Bokova, I., Jarraud, M., Miletto, M., Connor, R. U., editor. Paris, França: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

2 Síntese de conhecimentos sobre perdas em SAA e fugas em RDA

2.1 Enquadramento

Este capítulo contextualiza o problema das perdas de água nos SAA e das fugas de água em RDA. Para o efeito, apresenta-se uma avaliação nacional da qualidade dos serviços de água prestados às populações, e uma visão global sobre o modo de funcionamento do SAA e da RDA, com os indicadores mais elucidativos para o problema.

A caracterização do problema das perdas de água requer uma avaliação focada na quantificação e posicionamento. A quantificação do problema necessita da definição dos diferentes circuitos e usos da água, expresso nas diferentes parcelas constituintes do caudal mínimo noturno (CMN, ver secção 2.4.1.1) ou do balanço hídrico (secção 2.4.1.2) e a análise individual do funcionamento de cada rede de distribuição dos SAA, identificando a relevância do problema (volumes, tipos e distribuição) e os locais onde ocorre com maior frequência e importância.

Seguidamente, o trabalho de cada EG consiste na definição de objetivos, na seleção de estratégias e táticas para cumprimento dos mesmos e na monitorização das consequências das estratégias implementadas no funcionamento das RDA, enfatizando a nova caracterização das perdas e fugas de água. A definição de objetivos não será abordada neste texto, as estratégias e táticas serão descritas na secção 2.5 deste capítulo, e a monitorização da RDA será abordada no capítulo 3.

Com o objetivo de reduzir o desperdício na RDA, o capítulo descreve as diferentes abordagens para controlar o comportamento da rede: a criação de ZMC, a gestão da

pressão na rede, assim como uma análise crítica sobre as técnicas para a localização aproximada e localização exata de fugas de água.

2.2 Complexidade do problema

Praticamente toda a população Portuguesa dispõe de abastecimento público de água potável com controlo da qualidade da água, um dos indicadores associados ao bem-estar e à qualidade de vida das populações. Em 2011, beneficiando do cofinanciamento por fundos comunitário, a cobertura do serviço de abastecimento atingiu os 95%, com 99% nas zonas urbanas e 90% nas zonas rurais (ERSAR 2013a).

Face à ampla cobertura nacional de abastecimento domiciliário, verifica-se que 98,20% da água disponibilizada podia ser considerada segura desde o ano de 2012, uma avaliação extremamente positiva quanto à qualidade do serviço prestado de acordo com a entidade reguladora dos serviços de água e resíduos (ERSAR). Este facto decorre de uma regulação legislativa promotora da melhoria da eficiência do serviço prestado pelas EG, não obstante uma crescente limitação económica tanto para manter a acessibilidade dos utilizadores aos serviços de águas como para a manutenção do padrão de qualidade atual (ERSAR 2013b) ou superá-lo.

Hábitos antigos e as limitações económicas dos utilizadores podem justificar a diferença de aproximadamente 16% entre o atendimento potencial e o atendimento efetivo (ERSAR 2013a). Esta diferença tem implicações na saúde pública das populações, na sustentabilidade económica das EG e na sustentabilidade ambiental do ecossistema.

A indústria da água é constituída por duas etapas, uma associada à produção da água, incluindo o transporte e armazenamento, seguida pela etapa de distribuição da água. Em paralelo com estas etapas, existem EG dedicadas exclusivamente à produção da água e que prestam serviço a outras EG –sistemas em alta–, outras EG dedicadas exclusivamente à distribuição –sistemas em baixa– e outras EG têm meios para a autossustentação operacional, ou seja, podem executar as duas etapas – verticalização dos sistemas. A etapa de produção (sistemas em alta) inclui a captação, o tratamento, o transporte para pontos de armazenamento (reservatórios) e a venda grossista de água. A EG com o sistema em baixa é responsável pela etapa de distribuição, pelo que adquire a

água aos sistemas em alta. A verticalização do sistema ocorre se a EG dispõe de meios para a prestação de todos os serviços desde as captações e estações de tratamento até à venda a retalho com a rede de distribuição domiciliária. A etapa de distribuição consiste em disponibilizar a água armazenada nos reservatórios a outras entidades. Estas entidades são denominados consumidores registados, ou clientes ou ainda utilizadores de água, e no aglomerado correspondem aos alojamentos familiares, às indústrias, ao comércio e aos serviços. Este conjunto de entidades e localizações apresenta necessidades díspares, carecendo da existência da RDA para o retalho da água.

A RDA é um conjunto de componentes (condutas, acessórios e órgãos) que ligam os reservatórios aos consumidores finais após a captação, tratamento e adução da água (Sá Marques e Sousa 2011). Cada RDA identifica um monopólio natural e resulta de investimentos muito avultados.

Na indústria da água a titularidade das EG (DL194/ 2009) pode ser privada, estatal ou municipal e organizada com diferentes modelos de gestão (prestação direta do serviço, delegação do serviço ou concessão do serviço), por forma a garantir um serviço adequado e compatível com a extensão da rede e as condições económicas e financeiras mais aconselháveis. Atualmente a maioria das EG dedicadas à distribuição da água tem gestão direta em serviços municipais (ERSAR 2015). A tendência é a verticalização do serviço, mas mais de metade dos SAA asseguram o abastecimento a populações inferiores a 10 mil habitantes (ERSAR 2014a). A gestão de sistemas com reduzida população dificulta a existência de escala para assegurar os níveis adequados de qualidade de serviço e economias de exploração, tanto em questões técnicas como económicas.

Assim, em grande parte dos municípios verifica-se que os tarifários dos serviços de águas são insuficientes para a recuperação dos custos associados à provisão dos mesmos, o que desregula o equilíbrio económico e financeiro da EG (Martins 2007; Poças-Martins 2013).

Em oposição, os principais aglomerados, com maior densidade populacional, e as EG em alta apresentam desempenhos capazes de garantir a sua sustentabilidade económica.

2.3 Avaliação nacional do problema

A eficiência mede até que ponto os recursos disponíveis são utilizados de modo otimizado para a produção do serviço. A eficácia mede até que ponto os objetivos de gestão (definidos específica e realisticamente) foram cumpridos.

No território nacional, o setor de abastecimento de água detém quase cento e cinco mil km de condutas. O sistema em alta tem aumentado a sua capacidade, como é visível no Quadro 2.1. Ele é constituído por cerca de nove mil km de condutas, quinhentas estações elevatórias e mil e quatrocentos reservatórios, dados provisórios de ERSAR (2015).

Quadro 2.1 Caracterização dos sistemas em alta. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios ERSAR (2015).

	Ano		
	2012	2013	2014
Captações superficiais	116	119	114
Captações subterrâneas	740	761	777
ETA	97	101	152
Outras instalações de tratamento	238	232	246
Extensão de condutas	8347 km	8634 km	9027 km
Estações elevatórias	482	535	503
Reservatórios	1272	1314	1378

Os sistemas em baixa efetuam a distribuição a 95% dos alojamentos, facto que promove a utilização da água. As EG afetas a esta atividade reportam cerca de noventa e cinco mil km de condutas, a funcionar com o apoio de numerosas estações elevatórias e reservatórios. No Quadro 2.2 constata-se o progressivo aumento do número de instalações, órgãos e extensão da rede, o que está diretamente associado ao aumento da

capacidade de prestar o serviço de distribuição às populações, à promoção da melhoria da qualidade do serviço prestado, à atualização cadastral e a um forte investimento.

Quadro 2.2 Caracterização dos sistemas em baixa. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios ERSAR(2015).

	Ano		
	2012	2013	2014
Captações superficiais	183	158	149
Captações subterrâneas	4995	5067	4990
ETA	132	96	106
Outras instalações de tratamento	3105	2976	3050
Extensão de condutas	91327 km	92579 km	95055 km
Estações elevatórias	1890	1855	1831
Reservatórios	7119	7192	7197

Entre 2011 e 2015 a indústria da água apresenta dados globais nacionais muito díspares sobre o serviço prestado. Os valores dos gastos e dos rendimentos são dependentes das condições locais das EG, da eficiência do funcionamento e dos volumes de água movimentados nas RDA. Na última publicação da ERSAR, o conjunto de EG em alta apresentava 314 milhões de €/ano de rendimento total decorrentes de gastos totais de 260 milhões de €/ano. Em simultâneo, o conjunto de EG em baixa apresentava 797 milhões de €/ano de rendimento total decorrentes de gastos totais de 753 milhões de €/ano. Parte dos gastos das EG em baixa são despesas com água que é perdida na rede, que, se uma parte fosse recuperada, permitiria o investimento ou a aplicação noutras atividades como, por exemplo, na reparação ou na reabilitação, incluindo a renovação, a substituição e o reforço da RDA.

Nos últimos anos, no nosso país, verifica-se a diminuição no valor absoluto dos volumes de água captada, tratada, exportada ou autorizada para consumo, nos sistemas em alta e em baixa, Quadro 2.3.

Quadro 2.3 Volumes de água nos sistemas em alta e em baixa em milhões de m³/ano. Adaptado de ERSAR (2013a), ERSAR (2014a) e dados provisórios de ERSAR (2015).

	Ano		
	2012	2013	2014
Sistemas em alta			
Água captada	583	564	543
Água faturada	582	567	544
Água tratada exportada	581	565	543
Sistemas em baixa			
Água captada	270	254	239
Água faturada	607	582	548
Consumo autorizado	616	612	576

Estes valores absolutos necessitam de ser convertidos em indicadores de desempenho da qualidade do serviço do sistema de abastecimento de água. Um dos indicadores da sustentabilidade económica da gestão do serviço é a água não faturada, que é representado por AA08. Este indicador é definido como a percentagem de água entrada no sistema que não é faturada. Um dos indicadores da eficiência na utilização de recursos ambientais é as perdas reais de água, representado por AA13. Este indicador, nos sistemas em baixa, é definido como o volume de perdas reais por ramal. O mesmo indicador nas restantes situações é definido como o volume de perdas reais por unidade de comprimento de conduta (ERSAR 2013c). Este conjunto de indicadores contribui para a avaliação de objetivos pré-definidos de forma isenta e independente, Quadro 2.4.

Os sistemas em alta têm apresentado uma tendência para o melhoramento progressivo do seu desempenho. Este facto é visualizado na tendência para a diminuição tanto do indicador água não faturada como do indicador perdas reais.

Em igual período de tempo, os sistemas em baixa não têm apresentado igual tendência. Estes sistemas apresentam o indicador água não faturada com mais de 30,0% da água entrada (AA08b) e o indicador associado às perdas reais de água (AA13b) tem melhorado nos sistemas em baixa com um ritmo inferior aos melhoramentos verificados

no sistema em alta, Quadro 2.4. Esta evolução demonstra a necessidade de desenvolver mais trabalho em campo com a participação das entidades responsáveis.

Quadro 2.4 Evolução do indicador água não faturada e perdas reais de água em Portugal 2011-2014. Adaptado de dados provisórios ERSAR (2015).

		Ano		
		2012	2013	2014
Em alta	Nº de EG com resposta/ Nº total de EG	15/15	15/15	15/15
	AA08a) (%)	4,5	4,7	4,7
	Nº de EG com resposta/Nº total de EG	15/15	15/15	15/15
	AA13a) (m ³ /(km.dia))	6,9	5,8	6,1
Em baixa	Nº de EG com resposta/ Nº total de EG	253/261	249/260	252/260
	AA08b) (%)	30,7	30,9	30,0
	Densidade de ramais inferior a 20/km de rede			
	Nº de EG com resposta/ Nº total de EG	13/19	11/15	16/19
	AA13b) (m ³ /(km.dia))	1,2	1,8	1,6
	Densidade de ramais igual ou superior a 20/km de rede			
	Nº de EG com resposta/ Nº total de EG	207/242	189/245	209/241
	AA13b) (l/(ramal.dia))	141	139	124

A descrição nacional do comportamento global de todos os sistemas em baixa não evidencia informação relevante. Alguns sistemas em baixa têm descrições de funcionamento com indicadores próximos dos valores apresentados nos sistemas em alta, por exemplo a EPAL, em Lisboa, apresenta um nível de água não faturada de 8,7% (ERSAR 2014b). Enquanto outros sistemas em baixa têm desempenhos muito piores do que a média nacional. Tendencialmente, os sistemas em baixa mais pequenos tendem a ter piores indicadores de desempenho pelo que necessitam de maior atenção.

Cada metro cúbico de água comercializado está associado a um custo de produção, resultante da captação, transporte, bombeamento, tratamento, desperdícios no sistema, entre outros custos. Assim um elevado desperdício, quantificado pelo volume de água

perdida, representa uma perda proporcional de recursos financeiros devido ao aumento de custos, às perdas energéticas, ao desperdício de recursos naturais, de produtos adicionados para o tratamento da água, do aumento do stress hídrico, de ineficiências do sistema, um aumento de emissões de carbono (maior pegada de carbono) e compromete a sustentabilidade tanto financeira como ambiental do sistema.

Um objetivo do Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água, Implementação 2012-2020 (PNUEA) é o funcionamento de sistemas com perdas reais de água próximas ou inferiores a 20% em 2020 (A.P.A 2012).

Dependendo da titularidade da propriedade e do tipo de gestão, o custo da prestação do serviço de abastecimento, ou seja a valoração do serviço de abastecimento pode ser suportado pelos subsídios atribuído pelo governo ou tutela e pela política tarifária aplicada aos utilizadores, pelo que a falta de eficiência e de eficácia poderá ser parcialmente transferida para os utilizadores através do aumento das tarifas praticadas (Marques 2011).

As perdas de água ocorrem em todos os processos de produção, armazenamento e transporte dos SAA. Uma parcela é real e outra parcela é aparente (mais detalhes na seção 2.4.1.2). A perda aparente de água corresponde a usos não autorizados e a erros e imprecisões de medição. A parcela de perda real de água engloba as perdas reais nos reservatórios, nas estações de tratamento, no sistema adutor, nas condutas da RDA e nos ramais da rede de distribuição predial até ao contador do cliente.

As perdas reais de água são problemas diários em todos os SAA (Farley e Trow 2003). O volume de água associado às perdas reais de água é dependente das características e do funcionamento das redes, da política de gestão das perdas e da operacionalidade da reparação. Em cada local da rede, o volume da água perdida varia em função do caudal saído, em função da área que permite a saída de água, em função da pressão no local, da frequência e dos caudais das novas fugas e das novas roturas, da proporção de comunicações de novas fugas, da rapidez na deteção, da rapidez na localização de novas fugas, da rapidez da reparação, função da duração do episódio, da prontidão para reparar as fugas e do nível assumido como adequado para não atuar (perdas de base) (Farley e Trow 2003).

Neste sentido, a identificação dos problemas associados às perdas decorre de um correto diagnóstico. A estratégia para mitigar os problemas das perdas reais deverá ser idealizada para responder às questões da Figura 2.1 e cada resposta resulta da execução de tarefas específicas. O objetivo da intervenção pode condicionar temporalmente o funcionamento da RDA, como respostas a curto, a médio ou a longo prazo (Carpentier e Cohen 1993).

As tarefas específicas da Figura 2.1 podem ser enquadradas ou numa análise *top-down* ou numa análise *bottom-up*. Numa análise *top-down*, a medição de macro valores e a definição do balanço hídrico identificam e caracterizam as deficiências na rede. Numa análise *bottom-up* a análise e a monitorização do CMN identificam os problemas numa zona (Farley *et al.* 2008).

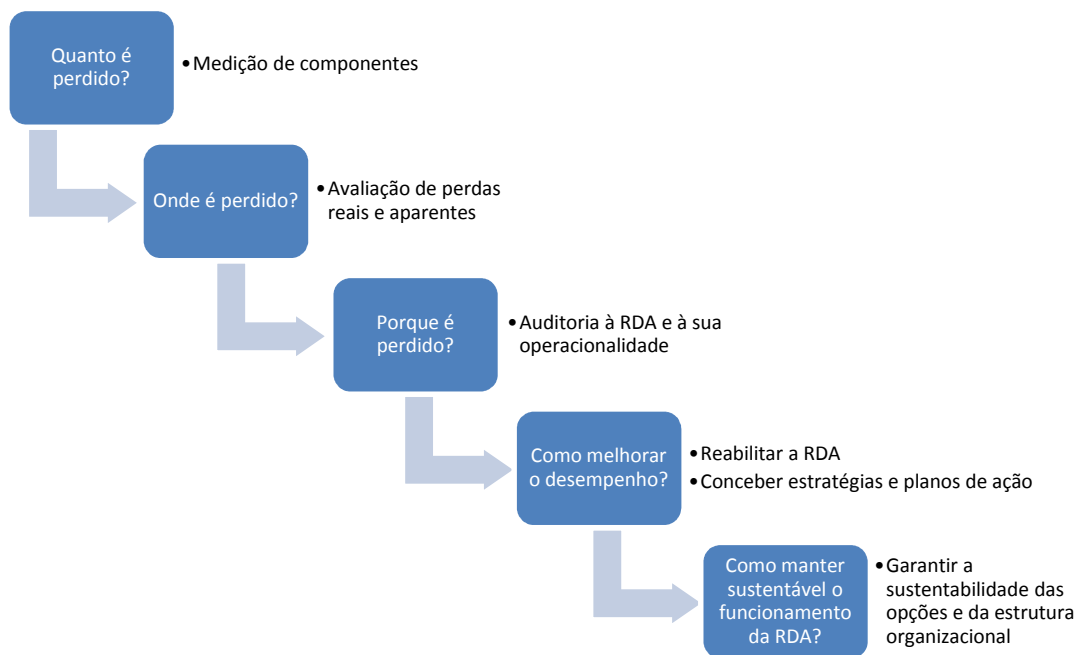


Figura 2.1 Questões estratégicas para problemas de perdas reais de água. Adaptado de Farley e Trow (2003).

Efetuada o diagnóstico dos problemas das perdas reais, a implementação de soluções obriga a uma intervenção prática, condicionada por limitações técnicas e pela estratégia definida para a EG.

2.4 Revisão bibliográfica da metodologia para controlo ativo de perdas de água numa RDA

Nas próximas secções será feita uma revisão bibliográfica da metodologia para a avaliação das perdas de água e das estratégias alternativas para o controlo do problema. Estas ações de CAP de água, inserem-se na procura da melhoria de eficiência global (Ridley 1980), estão limitadas a um período de tempo e deverão ser periodicamente atualizadas.

2.4.1 Metodologia para quantificação das perdas de água numa RDA

A metodologia para avaliação das perdas de água é universal e aplicável a qualquer RDA. Em virtude do diagnóstico das deficiências, cada RDA necessita de uma estratégia individual para o seu CAP. Esta estratégia é idealizada com o resultado do processo de decisão para os problemas identificados e com as exigências da EG.

Por ser a metodologia mais simples e célere, a monitorização do CMN será a primeira a ser apresentada, seguida do balanço hídrico da RDA.

2.4.1.1 Monitorização do caudal mínimo noturno

Caso seja inexistente informação relevante ou seja necessário confirmar os caudais das perdas reais, poderá efetuar-se uma avaliação das perdas reais de água baseada na monitorização do CMN.

Numa ZMC, com monitorização contínua durante o período noturno, observação dos CMN, obtém-se uma estimativa bastante rigorosa das perdas reais. O caudal noturno é a soma do consumo noturno após o contador com as perdas de água noturnas. Como usualmente o consumo noturno é reduzido, a cota piezométrica aproxima-se do seu valor máximo e a pressão terá um valor próximo do máximo, logo qualquer orifício tenderá a libertar um caudal de fuga próximo do valor máximo (por aplicação direta da equação de Torricelli).

Da desagregação dos caudais noturnos monitorizados nas diferentes parcelas obtém-se um diagnóstico rápido das perdas de água noturnas, o que possibilita determinar a fração das perdas detetáveis naquela ZMC, quer já tenham sido reportadas ou não.

Esta auditoria ao CMN apresenta a vantagem de decompor o volume de água num menor número de parcelas, logo necessita de menor volume de informação, Quadro 2.5.

O consumo noturno após o contador é monitorizado com os contadores que acumulam todos os volumes faturados aos utilizadores. A metodologia para estimar o consumo noturno pode admitir um consumo noturno constante para cada tipo de utilizador ou pode admitir que o consumo noturno é proporcional ao consumo médio diurno (Renaud *et al.* 2012).

A parcela associada às perdas noturnas de base representa as fugas não detetáveis em ramais e condutas. Esta parcela apresenta uma elevada sensibilidade à pressão do escoamento e necessita de ser estimada pelo gestor da rede.

Quadro 2.5 Componentes do caudal utilizado durante o período noturno (m³/h)

Água entrada no sistema durante o período noturno	Consumo noturno após o contador	Consumo noturno faturado	Consumo noturno regular faturado	Consumo noturno
			Consumo noturno exceptional	
	Perdas faturadas aos utilizadores		Dentro do imóvel	Perdas físicas de água noturnas
			Fora do imóvel	
	Perdas de água noturnas	Perdas noturnas de base	Fugas não detetáveis em ramais e condutas	
		Perdas noturnas detetáveis	Fugas reportadas e não reparadas	
			Fugas não reportadas	

Há vantagens na aplicação da monitorização noturna de caudais em ZMC de pequena dimensão porque potencialmente será mais rigorosa a estimativa do consumo noturno, e o calibre do contador será adequado ao registo de caudais reduzidos.

A aparente desvantagem de aumentar o número total de ZMC é benéfica, porque permite distinguir e recolher mais detalhes sobre quais as zonas menos e mais problemáticas (caudal e localização aproximada). A monitorização do CMN tem aplicabilidade limitada em RDA com intermitência de abastecimento ou com vários reservatórios particulares que recebem os seus volumes de água no referido período.

2.4.1.2 Balanço hídrico

Para uma análise *top-down* em sistemas em baixa é necessária a avaliação dos vários componentes do balanço hídrico e a definição de alguns conceitos básicos sobre o funcionamento do próprio sistema num período de referência (habitualmente um ano).

Em Portugal, a auditoria aos usos da água numa RDA ou ZMC está muito divulgada e permite estimar as quantidades de água utilizadas para cada fim sem detalhar o seu posicionamento. A auditoria exige a compreensão dos diferentes conceitos e componentes do balanço hídrico. Os resultados permitem uma análise estruturada e facilitam a definição de estratégias de atuação, Figura 2.2 e Quadro 2.6.

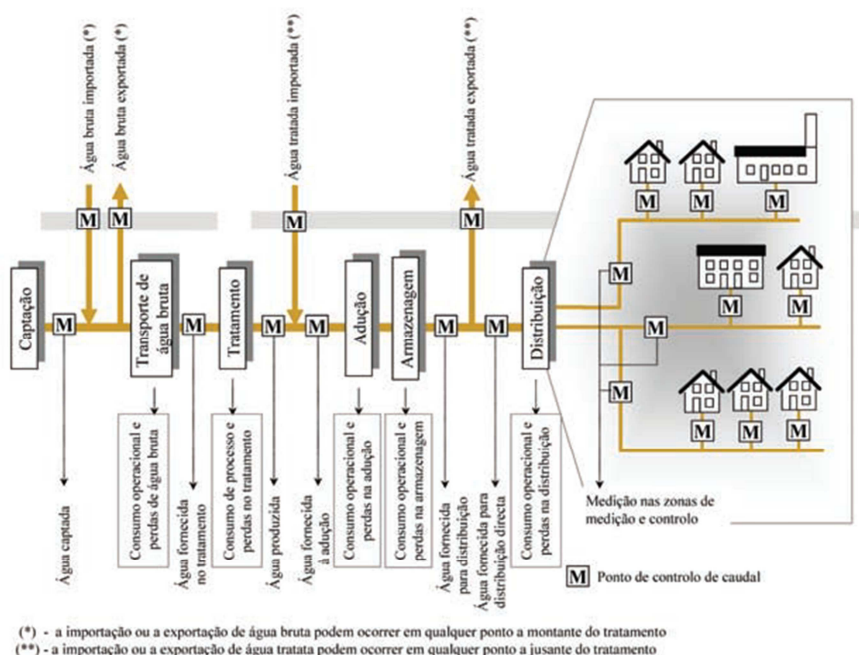


Figura 2.2 Componentes e pontos de monitorização para análise do balanço hídrico (Alegre et al. 2004)

Os conceitos do balanço hídrico têm uma definição concisa e rigorosa a nível internacional (Lambert et al. 1999; Lambert e Hirner 2000; Alegre et al. 2004; ERSAR 2013c). Para facilitar a análise de desempenho e a comparação entre EG, os valores

absolutos obtidos são trabalhados anualmente. Com os valores absolutos constrói-se um conjunto de indicadores elucidativos do desempenho de cada área do sistema.

No âmbito da temática das perdas de água numa RDA o balanço hídrico é o Quadro de referência para a avaliação inicial da RDA, para a definição de estratégias e para a avaliação dos resultados das táticas implementadas na rede, com novo balanço hídrico.

A terminologia fundamental para o cálculo do balanço hídrico está definida em Alegre *et al.* (2004) e complementada pelo "Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores - 2ª geração do sistema de avaliação" (ERSAR 2013c) com um período de referência de base anual. Segue-se a sua transcrição.

"Água captada: volume de água obtido a partir de captações de água bruta para entrada em instalações de tratamento de água (ou diretamente em sistemas de adução e de distribuição), durante o período de referência.

Água bruta, importada ou exportada: volume de água bruta transferido de e para outros sistemas de adução e distribuição (as transferências podem ocorrer em qualquer ponto entre a captação e a estação de tratamento), durante o período de referência.

Água fornecida ao tratamento: volume de água bruta que aflui às instalações de tratamento, durante o período de referência.

Água produzida: volume de água tratada que é fornecida às condutas de adução ou diretamente ao sistema de distribuição, durante o período de referência.

Água tratada, importada ou exportada: volume de água tratada transferido de e para o sistema (as transferências podem ocorrer em qualquer ponto a jusante do tratamento), durante o período de referência¹.

Água fornecida à adução: volume de água tratada que aflui ao sistema de adução, durante o período de referência.

Água fornecida para distribuição: volume de água tratada que aflui ao sistema de distribuição, durante o período de referência.

¹ Caso exista, o volume de água sem tratamento prévio que é captado e distribuído aos consumidores (apenas com desinfecção) também deve ser contabilizado como "água tratada" no contexto do balanço hídrico.

Água fornecida para distribuição direta: diferença entre a água fornecida para distribuição e a água tratada exportada (sempre que não seja possível separar a adução da distribuição, a água fornecida para distribuição direta corresponde à diferença entre a água fornecida à adução e a água tratada exportada).

Água entrada no sistema: volume de água introduzido no SAA, durante o período de referência².

Consumo autorizado: volume de água, medido ou não medido, fornecido a consumidores registados, à própria EG e a outros que estejam implícita ou explicitamente autorizados a fazê-lo para usos domésticos, comerciais e industriais, durante o período de referência. Inclui a água exportada.³

Perdas de água: diferença entre a água entrada no sistema e o consumo autorizado. As perdas de água podem ser consideradas para todo o sistema, ou calculadas em relação a subsistemas como sejam a rede de água não tratada, o sistema de adução ou o de distribuição. Em cada caso as componentes do cálculo são consideradas em conformidade com a situação. As perdas de água dividem-se em perdas reais e perdas aparentes.

Perdas reais: perdas físicas de água do sistema em pressão, até ao contador do cliente, durante o período de referência. O volume de perdas através de todos os tipos de fissuras, roturas e extravasamentos depende da frequência, do caudal e da duração média de cada fuga⁴.

Perdas aparentes: contabiliza todos os tipos de erros e imprecisões associadas às medições da água produzida e da água consumida, e ainda o consumo não-autorizado (por furto ou uso ilícito)⁵.

² Se o balanço hídrico se referir a uma parte do sistema global, a água entrada no sistema deve corresponder a essa parte do sistema.

³ O consumo autorizado pode incluir combate a incêndios, lavagem de condutas e coletores de esgoto, lavagem de ruas, rega de espaços verdes municipais, alimentação de fontes e fontanários, proteção contra congelação, fornecimento de água para obras, etc.. Este consumo pode ser faturado ou não faturado, medido ou não medido, de acordo com a prática local. O consumo autorizado inclui as fugas de água e o desperdício, por parte de clientes registados, que não são medidos.

⁴ Apesar das perdas físicas localizadas a jusante do contador do cliente se encontrarem excluídas do cálculo das perdas reais, são muitas vezes significativas (em particular quando não há contagens) e merecedoras de atenção no contexto dos objetivos da gestão dos consumos.

⁵ Os registos por defeito dos medidores de água produzida, bem como registos por excesso em contadores de clientes, levam a uma subavaliação das perdas reais. Os registos por excesso dos medidores de água

Água não faturada: diferença entre a água entrada no sistema e o consumo autorizado faturado. A água não faturada inclui não só as perdas reais e aparentes, mas também o consumo autorizado não faturado."

Para efetuar o balanço hídrico é necessário começar por conhecer o volume anual de água entrada no sistema, que será dividido em consumo autorizado e perdas de água.

Quadro 2.6 Componentes do balanço hídrico (m³/período de referência). Adaptado de ERSAR (2013c)⁶.

Água entrada no sistema	Consumo autorizado	Consumo autorizado faturado	Consumo faturado medido (incluindo água exportada)	Água faturada
			Consumo faturado não medido	
		Consumo autorizado não faturado	Consumo não faturado medido	Água não faturada (perdas comerciais)
			Consumo não faturado não medido	
	Perdas de água	Perdas aparentes	Uso não autorizado	
			Perdas de água por erros de medição	
		Perdas reais	Fugas e extravasamentos nos reservatórios de adução e/ou distribuição	
			Fugas nos ramais de ligação (a montante do ponto de medição)	
Fugas nas condutas de adução e/ou distribuição				
Perdas reais nas condutas de água bruta e no tratamento (quando aplicável)				

O consumo autorizado pode ser faturado ou não faturado. O consumo autorizado faturado tem como componentes o consumo faturado medido e o consumo faturado não medido. O consumo autorizado não faturado tem como componentes o consumo não faturado medido e o consumo não faturado não medido, Quadro 2.6.

Todas as componentes do balanço hídrico podem ter erros na sua determinação. Geralmente, na desagregação do volume da água entrada no sistema em dez parcelas constata-se que os consumos medidos são os dados mais fidedignos quer sejam

produzida, bem como registos por defeito em contadores de clientes levam a uma sobreavaliação das perdas reais.

⁶ Os consumos de água por clientes registados que a pagam indiretamente através de impostos locais ou nacionais é considerado como consumo autorizado faturado para efeitos do cálculo do balanço hídrico.

faturados como os não faturados. A avaliação das restantes oito parcelas é muito difícil e exige uma intervenção muito cuidadosa do gestor da rede.

Hoje existem recomendações e boas práticas para ajudar a determinar algumas destas parcelas do balanço hídrico. Quanto maior rigor e confiança forem introduzidos na determinação dos valores de cada parcela, menor indeterminação ocorrerá nas restantes. A avaliação do consumo autorizado não faturado pode ser melhorada com a instalação de contadores nas zonas associadas, isto é nos jardins públicos, ou com procedimentos operacionais de registo de usos públicos: da limpeza de ruas ou uso dos bombeiros.

A avaliação das perdas aparentes pode ser melhorada com o aumento das ações de fiscalização sobre as ligações ilícitas e contadores com fraude mecânica (Malheiro *et al.* 2011), sobre o uso fraudulento de bocas de incêndio (BI) e de rega, com a substituição de contadores e medidores (DL194/ 2009), com a seleção de contadores adequados aos consumos de cada local, com amostragens do desempenho do parque de contadores para os diferentes caudais (Arregui 1998; Cruz *et al.* 1998; Sousa 2011), com a promoção da autoleitura dos contadores, da telemetria e da telecontagem, em toda a RDA, incluindo nas áreas com edificações clandestinas.

As perdas reais são determinadas no balanço hídrico através da diferença entre o volume de perdas de água e o volume das perdas aparentes. O erro na determinação de qualquer componente anterior será transferido para o volume das perdas reais. O volume das perdas reais é o acumular de diferentes perdas reais individuais inerentes ao funcionamento do próprio sistema. Como a análise é anual, o volume das perdas reais não indicia onde ocorrem, nem as respetivas causas e as possíveis durações e/ou processos de formação. O isolamento das diferentes perdas reais individuais é muito relevante para a correta identificação do problema, a investigação das causas associadas ao problema, a limitação expectável de cada solução alternativa, a seleção de soluções adequadas e a observação dos resultados esperados.

Considerações sobre as particularidades das perdas reais de água (tipos, mecanismos de formação, níveis e distribuição) serão explanadas na secção seguinte.

Alguns trabalhos sobre perdas reais de água (Tabesh e Yekta 2005; Almandoz *et al.* 2005; Tabesh *et al.* 2009) integram a informação obtida com o balanço hídrico com a informação obtida com a monitorização do caudal noturno.

2.4.2 Perdas reais correntes numa RDA

Numa RDA, as perdas reais correntes são a soma das fugas e extravasamentos nos reservatórios de adução e de distribuição com as fugas nas condutas de adução e de distribuição e nos ramais de ligação.

Nas RDA estas perdas físicas têm uma causa, podem ser tipificadas e a EG tem um papel fundamental na medida em que a existência de perdas reais depende do plano implementado para o CAP.

2.4.2.1 Causas das perdas reais numa RDA

As perdas reais de água ocorrem sempre que o material envolvente da água apresenta uma descontinuidade, ou seja um orifício. A formação do orifício de saída de água pode estar associada a um processo lento ou súbito e é um processo fortemente condicionado pelas características de resistência mecânica do material da conduta, dos acessórios e do solo. Ambos processos podem gerar orifícios invisíveis ao olho humano, fendas ou fissuras transversais ou longitudinais ou roturas.

Assim o aparecimento de um orifício, folga ou rotura numa conduta e ou ramal domiciliário pode ser justificado por:

- a técnica de construção da conduta ou do ramal domiciliário;
- a deficiente execução e instalação da RDA ou ramal;
- a técnica de assentamento da conduta em vala;
- o estado de conservação e o plano de manutenção da conduta/ramal e/ou componentes, juntas e acessórios;
- o material constituinte das condutas ou ramais e respetiva dinâmica de envelhecimento;
- o limite de resistência do material da conduta à pressão interna e/ou externa produzindo fratura por fadiga do material;
- defeitos do material das condutas ou dos acessórios;
- fenómenos de corrosão ou oxidação na face interna ou na face externa da conduta;

- qualidade da soldadura e ligação entre diferentes materiais;
- frequência de roturas;
- pressão média de serviço elevada e suas variações, como as variações diárias;
- manobras de acessórios e equipamento elevatório provocando fenómenos similares ao choque hidráulico ou sismos;
- densidade e comprimento dos ramais;
- comprimento total das condutas;
- excesso de sobrecarga rolante ou fixa;
- tipo, condições e movimento do solo;
- assentamento ou escavação do solo;
- existência de afloramentos rochosos ou raízes de vegetação;
- variação térmica (temperaturas negativas);
- ações acidentais de terceiros (escavações, explosões, sismos); e
- percentagem de tempo com a rede pressurizada no caso de abastecimento intermitente.

Nas condutas a forma da descontinuidade, Figura 2.3, costuma apresentar-se como:

- (a) Circunferencial como resultado da aplicação de forças de flexão ou esforços tangenciais (movimentos do solo, contrações térmicas ou ações de terceiros);
- (b) Longitudinais como resultado de inúmeros tipos de carregamentos como pressão interna, pressão externa do solo ou sobrecargas;
- (c) Fissura da campânula, nas juntas a utilização de diferentes elementos como selantes, cada um com diferentes coeficientes de expansão térmica, produz tensões tangenciais que resultam na fissura da campânula;
- (d) Pontos de corrosão. Nas condutas metálicas estes pontos de corrosão reduzem a espessura e a resistência mecânica das suas paredes;
- (e) Quando a pressão interna excede a capacidade resistente das paredes das condutas, surgem orifícios;

- (f) Espiral como resultado de esforços de torção que surgem nos aumentos súbitos de pressão ou na combinação de esforços tangenciais e a pressão interna;
- (g) Quebra da campânula, nos grandes diâmetros a simples compressão pode provocar fissuras longitudinais que se propagam ao longo de toda a conduta e resultam na quebra da campânula.

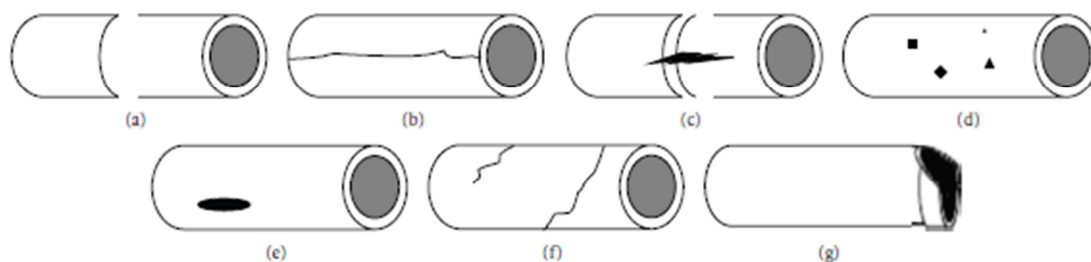


Figura 2.3 Tipos de descontinuidades mais comuns nas condutas. Adaptado de Misiunas (2005) e de Rizzo (2010).

2.4.2.2 Tipos de perdas reais numa RDA

Estas perdas reais correntes podem ser categorizadas em quatro tipos: operacionais, de base, por fugas e roturas reportadas e por fugas e roturas passíveis de identificação, Figura 2.4.

As **perdas reais operacionais** são caracterizadas por fugas e desperdícios associados à manutenção de reservatórios, e outros órgãos (estações elevatórias, estações de tratamento, ou outras).

De acordo com a metodologia BABE (*Burst And Background Estimates*), as fugas nas condutas adutoras, de distribuição, ramais e acessórios distinguem-se em três tipos de perdas reais, em concordância com os seguintes fatores: frequência típica de ocorrência, caudal de água perdido e duração da ocorrência da perda de água (Lambert 1994; Laven e Lambert; Lambert e Morrison 1996; Pilcher *et al.* 2007).

Perdas por fugas e roturas reportadas, caracterizadas por caudais elevados, com curta duração e volumes moderados de perdas de água. Usualmente perturbam a utilização da rede e os utilizadores reportam prontamente a sua presença. O volume de perdas depende da prontidão na reparação.

Perdas por fugas e roturas passíveis de identificação através do CAP, são dependentes da política de CAP das EG. Assim terão a sua duração e volume de perdas

associados à periodicidade do CAP, uma vez que o caudal da perda de água é equilibrado e não produz consequências notórias à utilização da RDA.

Perdas de base, tipicamente com caudais muito reduzidos, com longa duração e por consequência associadas a grandes volumes de perdas de água. Este tipo de perdas ocorrem através de juntas e de pequenos orifícios e/ou fugas, são indetetáveis com os equipamentos de localização exata corrente, logo não podem ser evitáveis.

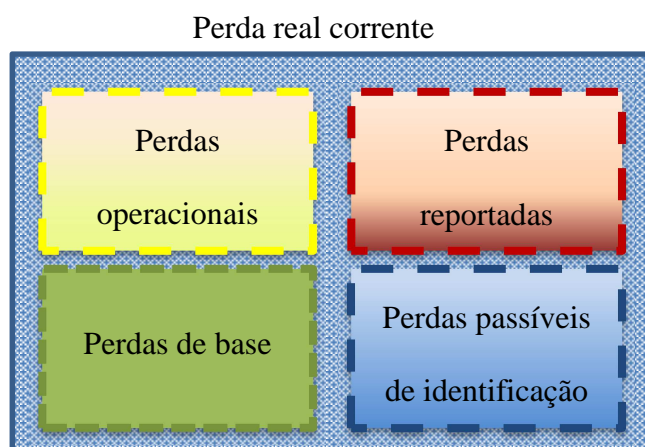


Figura 2.4 Tipo de perda real corrente em SAA

Deste modo, para condutas adutoras, de distribuição, ramais e acessórios, poderá ser representado o volume de água desperdiçado com cada um dos tipos de fugas e roturas da metodologia BABE, através da área dos diferentes retângulos, Figura 2.5.

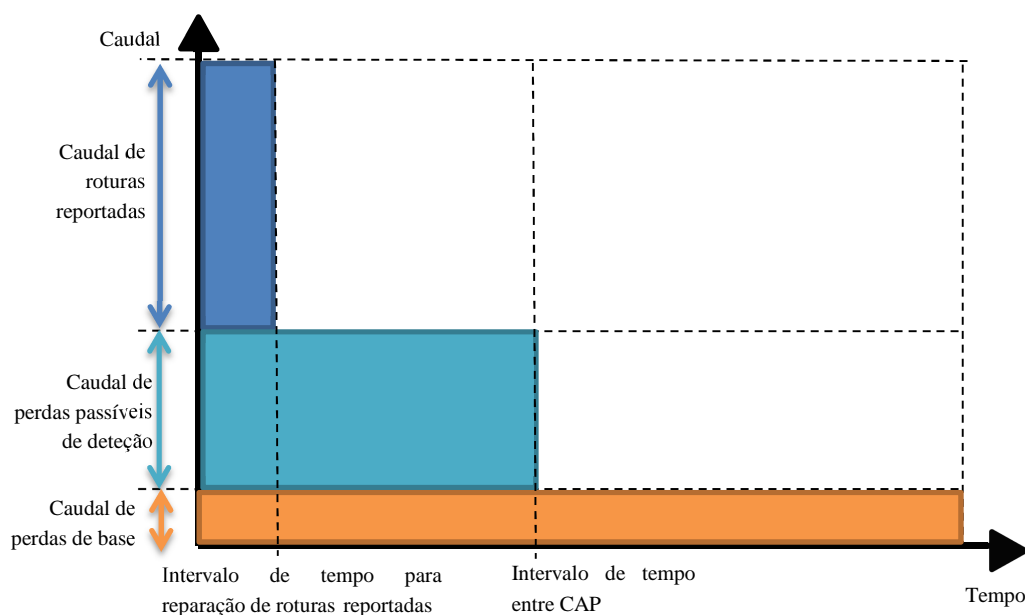


Figura 2.5 Duração e caudais dos diferentes tipos de perdas reais. Adaptado de Lambert (1994).

Do exposto compreende-se que as perdas de base existirão sempre nas RDA. As perdas operacionais também têm um carácter permanente, mas a introdução de boas práticas poderá reduzir o seu volume. Assim sendo, a diferença entre as perdas reais correntes e as perdas reais inevitáveis permite estimar as perdas por fugas e roturas reportadas e as passíveis de identificação através do CAP. Esta estimativa é denominada por perdas reais potencialmente recuperáveis de água e são aquelas que podem ser verdadeiramente reduzidas através de uma atuação mais célere e eficaz.

Esta atuação pode ser materializada através da celeridade na reparação e do modo como é executada, através da gestão da pressão ou pela implementação de CAP, Figura 2.6.

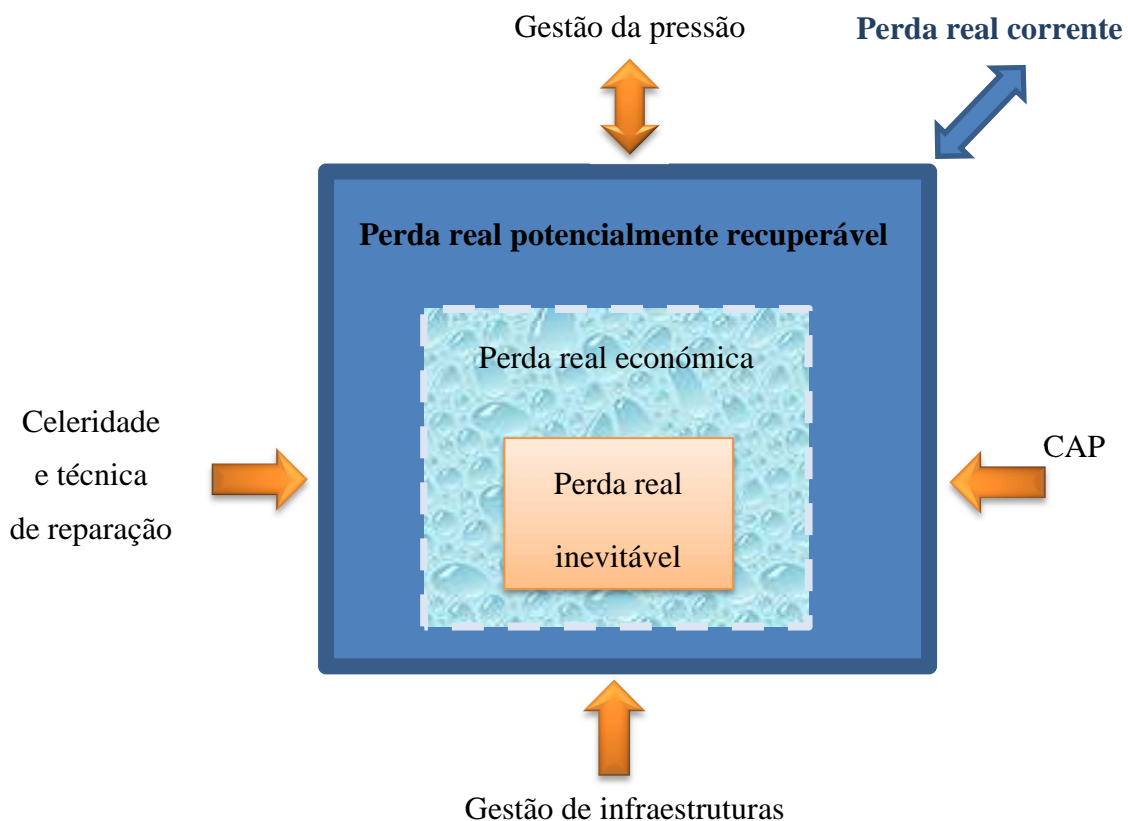


Figura 2.6 Decomposição da perda real corrente e modos de intervenção.

2.4.2.3 Níveis de CAP das perdas reais numa RDA

Para cada EG, o volume das perdas reais de água é a consequência direta da política definida no âmbito das operações de manutenção e do CAP. Em paralelismo com o volume das perdas reais envolvidas, distinguem-se os seguintes níveis de CAP: o nível

passivo de perdas, o nível implementado de CAP e respetivo nível económico e o nível base de perdas reais de água, Figura 2.7.

Nível passivo de perdas: nível de perdas máximo espelhando o funcionamento da RDA quando apenas são reparadas as fugas e roturas reportadas ou visíveis. Deste modo, o controlo de perdas é quase nulo e a EG não investe no CAP (Pinto 2011).

Nível base de perdas: nível de perdas obtido após a reparação de todas as perdas por fugas e roturas passíveis de identificação (detetáveis) na RDA, o que pressupõe um exaustivo controlo das perdas e um elevado investimento no CAP.

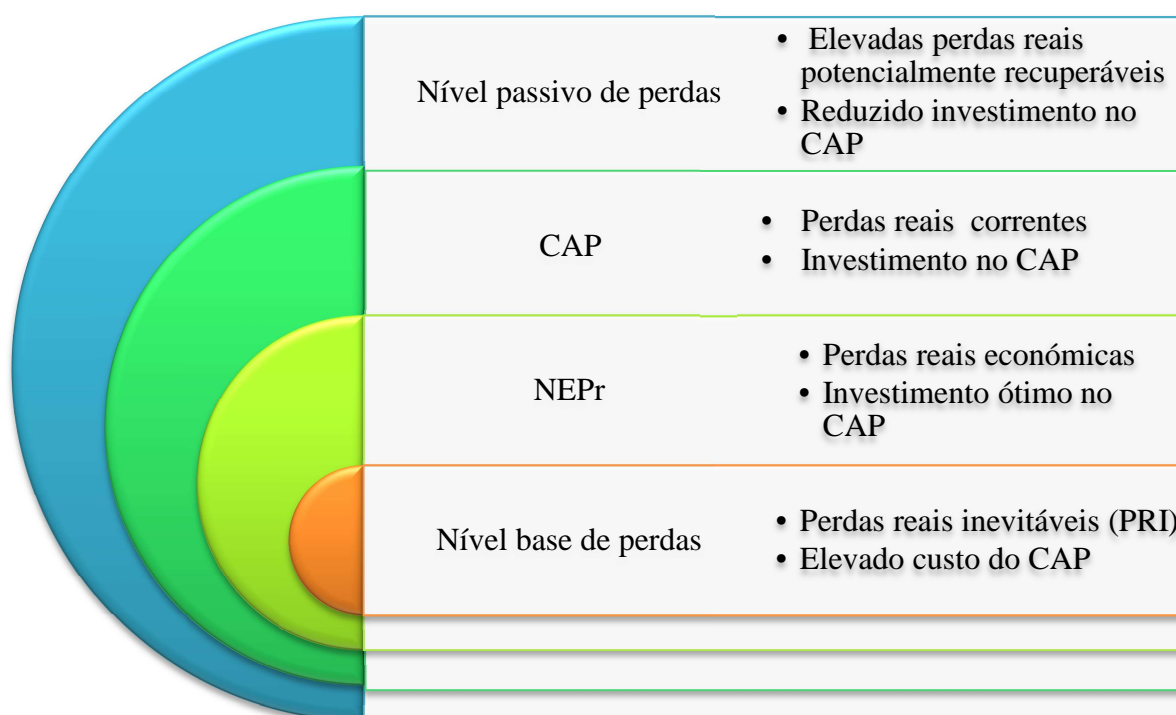


Figura 2.7 Classificação de perdas reais correntes de água. Adaptado de Covas (2008).

Nível económico de perdas (NEP): corresponde ao nível de perdas reais de água otimizado, para cada RDA e em cada período de tempo. A EG analisa o investimento necessário nas medidas de redução de perdas e o retorno oferecido pelas mesmas medidas. A solução implementada é a melhor combinação entre o custo marginal do CAP e o custo marginal da água perdida (Covas 2008). No cálculo do NEP compara-se o investimento necessário a efetuar com as medidas de redução de perdas reais escolhidas e o retorno económico proporcionado pelas mesmas. O NEP é o conceito

mais relevante dos três conceitos, pois avalia a rentabilidade económica da intensificação de meios de produção preconizados no CAP para a redução das fugas. O NEP decorre da simultaneidade do nível económico de perdas reais (NEPr), Figura 2.6, e nível económico de perdas aparentes (NEPa), Figura 2.8 (Alegre *et al.* 2005).

O processo de alcançar o NEP requer ainda a manutenção do resultado considerado tecnicamente viável e economicamente aceitável, garantindo as vantagens financeiras da melhor relação custo-benefício.

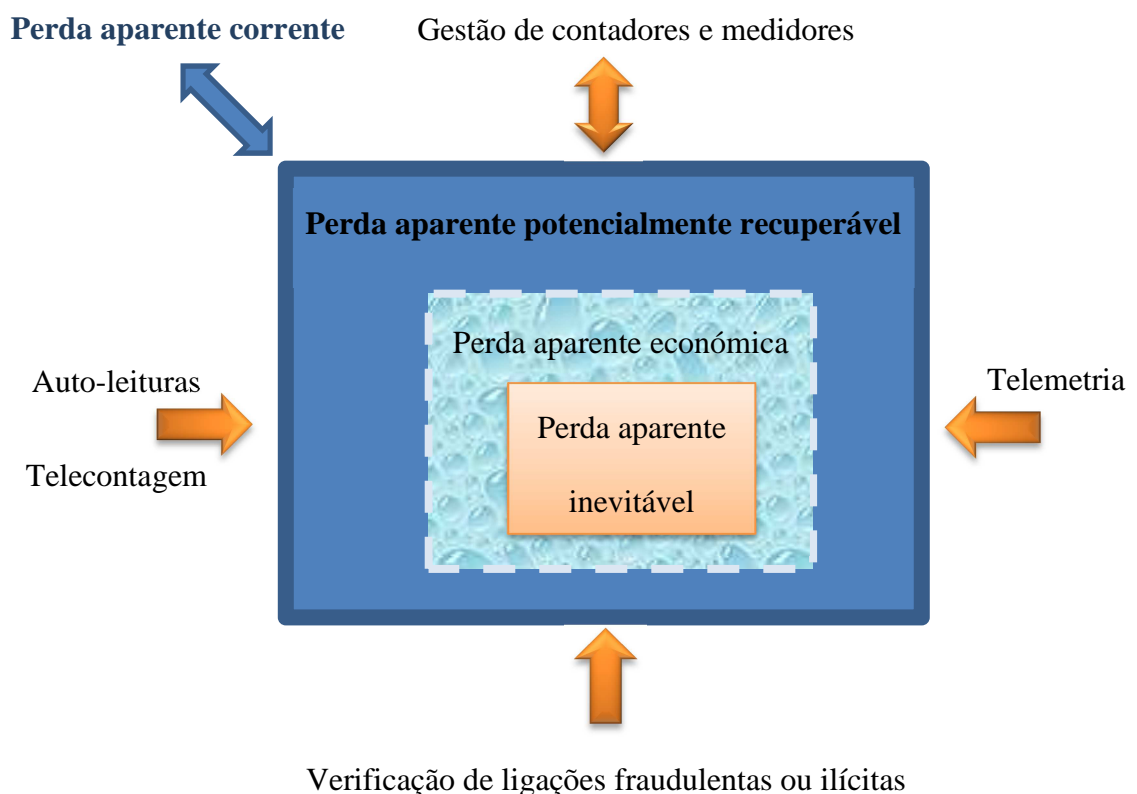


Figura 2.8 Decomposição da perda aparente corrente e modo de intervenção.

A manutenção do NEP advém da implementação de programas de monitorização adequados, da definição de estratégias e do desenvolvimento de planos para o CAP, numa visão a curto e a longo prazo (Pearson e Trow 2005). Os planos para o CAP podem necessitar da gestão da evolução diária da pressão, ou da renovação das infraestruturas a médio e longo prazo (devendo esta opção ser bem equacionada), mas também há inúmeras vantagens na sensibilização dos utilizadores para o CAP.

Para a avaliação do NEP é necessário determinar com exatidão o NEPr e o NEPa. A determinação do NEPa necessita de uma avaliação dos custos das atividades promotoras de redução dos erros de medição (telemetria, colaboração na telecontagem e gestão de contadores) e da colaboração dos utilizadores no CAP (auto leitura dos consumos e redução de furto ou usos ilícitos), Figura 2.8.

Por sua vez, a avaliação do NEPr resulta da compilação dos seguintes dados:

- Custo da mão de obra;
- Custo da água;
- Topografia, tipo de solo e condições do terreno;
- Pressão de serviço média;
- Extensão, material, idade e estado de conservação das condutas;
- Número de ligações e comprimento médio de ramais
- Tipologia das roturas;
- Padrão do serviço prestado, percentagem de tempo em que o sistema está pressurizado;
- Operacionalidade e manutenção;
- Monitorização e controlo do próprio sistema;
- Métodos utilizados para controlo de fugas.

Por consequência, o NEPr (Figura 2.9) varia de rede para rede, varia no tempo, pode ser determinado a curto, médio ou longo prazo, pode ser afetado por sazonalidade na frequência de roturas, depende do custo da água, depende das técnicas de localização exata e reparação de fugas utilizadas e é afetado por alterações de operação da rede (Alegre *et al.* 2005; Pinto 2011).

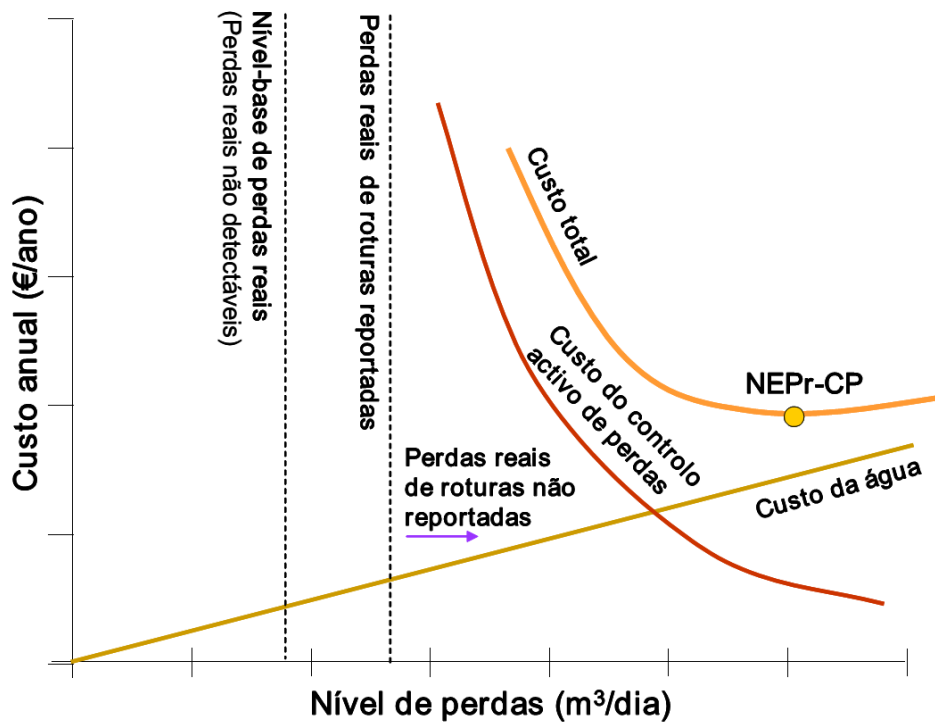


Figura 2.9 Determinação do nível económico das perdas reais de água (Alegre *et al.* 2005).

Resultados experimentais em sistemas bem construídos, operados e mantidos proporcionaram a elaboração da seguinte expressão empírica, para estimar as perdas reais mínimas (Lambert e Hirner 2000):

$$\text{Perdas reais mínimas (l/(ramal dia))} = \frac{\bar{P}}{10} \left(18 \frac{L_m}{N_c} + 0.8 + 0.025L_p \right) \quad 2.1$$

onde:

\bar{P} representa a pressão média de operação (kPa);

L_m representa o comprimento de condutas na RDA (km);

N_c representa o número de ramais na RDA;

L_p representa o comprimento médio dos ramais, medido entre a borda da estrada e o ponto de medição de caudal (m).

2.5 Abordagens para o CAP numa RDA

Depois de diagnosticar e quantificar adequadamente as perdas é possível intervir e proceder ao controlo das mesmas. O controlo de perdas dispõe de abordagens que são

atualmente utilizadas, de outras que se encontram em desenvolvimento e é uma área com potencial para a introdução de metodologias e tecnologias emergentes. As diferentes abordagens distinguem-se quanto à sua sensibilidade, exatidão, fiabilidade, limitações intrínsecas, exigência de dados e a sua aplicabilidade em contexto real. Desde as primeiras abordagens, constata-se a inexistência de uma resposta simples e única para o problema quer do ponto de vista de execução como do ponto de vista económico (Rouse 1983). Logo, perante cada RDA, é necessário comparar as diferentes abordagens passíveis de aplicar (em termos financeiros e de recursos) com os benefícios previstos e introduzidos por cada uma delas (Ridley 1980; Farley 2001).

A falta de análise, estudo e de informação sobre cada RDA tem conduzido à escolha de estratégias, táticas ou operações desalinhas dos objetivos pretendidos, com a implementação de técnicas de controlo de perdas desadequadas para o problema existente na RDA em estudo, ao desenvolvimento de esforços incorretos e à não adoção de medidas positivas para o CAP que seriam convenientes a curto e a longo prazo.

Na preparação de um programa de controlo de perdas reais de água é necessário dispor da mais atualizada representação da topologia da RDA e superar as lacunas de dados do sistema ou as faltas de elementos operacionais. Em planta, a disposição das condutas pode ser ramificada, emalhada ou mista. Estas características, dados e as condições de funcionamento das RDA são fulcrais na seleção da abordagem a aplicar na zonas da rede de distribuição a controlar.

Ainda na fase de preparação de um programa de CAP é necessária uma avaliação fidedigna das perdas reais proveniente de uma auditoria isolada ou não.

Tradicionalmente há quatro métodos para reduzir as perdas reais, a que correspondem fases distintas de abordagem do CAP em sistemas de abastecimento. O panorama geral das abordagens disponíveis está sintetizado em Puust *et al.* (2010). Começa-se por delimitar a ou as ZMC sobre as quais será efetuada uma auditoria (*leakage assessment methods*): balanço hídrico e balanço energético. Em função da divisão da RDA e do resultado da auditoria em cada zona obtêm-se detalhes sobre cada nível de perda real de água. Face ao nível de perdas e aos objetivos estabelecidos pela EG para o controlo das perdas reais, a estratégia poderá promover a gestão da pressão (*leakage control methods*) – secção 2.5.3 –, ou procurar localizar genericamente os locais com fugas

(*leakage detection methods*) – secção 2.5.4 –, para posteriormente detetar cada posição exata de fuga – secção 2.5.5 – e intervir.

2.5.1 Distribuição das perdas reais na rede de distribuição

As perdas reais podem ocorrer em qualquer local da RDA, como por exemplo nos reservatórios, nas condutas de distribuição e nos ramais de ligação. Nos reservatórios a falta de estanquidade das células, os extravasamentos e as descargas de emergência são as causas mais comuns; nas condutas e nos ramais qualquer folga entre elementos ou orifício justifica as perdas reais.

De acordo com a experiência brasileira na cidade de Campinas (DTA-A2 2004), entre 70% e 90% das fugas ocorrem nos ramais prediais, e as restantes ao longo da rede materializadas por fissuras longitudinais, orifícios, roturas transversais, juntas, nos hidrantes ou nas uniões (com as causas já descritas em 2.4.2.1.). O trabalho de Pinto (2011), na cidade de Valongo, confirma a maioria de fugas e roturas nos ramais de ligação.

2.5.1.1 Dimensão da rede vs abordagem para o controlo de perdas

A dimensão da rede a analisar permite estabelecer uma primeira orientação sobre a estratégia para o controlo de perdas. A disponibilidade de informação, a topologia, a extensão da rede e o número e tipo de consumidores também poderá condicionar a abordagem, a avaliação da tática associada à estratégia escolhida e os resultados finais.

Em virtude dos pontos anteriores, a pesquisa na rede será efetuada com uma técnica de localização aproximada ou localização exata de fugas. Esta última opção é usual em aglomerados pequenos, com deficiente cadastro e sem um sistema de monitorização adequado. Neste contexto, devido à falta de informação, ocorrerá um desperdício de tempo e de recursos com a pesquisa de fugas em condutas em bom estado, o que produzirá uma ineficiente aplicação de qualquer técnica para a localização exata. O eventual desperdício de tempo e recursos poderá ser mitigado se a técnica escolhida disponibilizar informação para utilização futura.

Caso exista alguma informação organizada, a pesquisa de fugas pode ser baseada em características genéricas da RDA, como por exemplo em zonas com elevada taxa de roturas, elevada taxa de reparação de ramais prediais, sujeitas a pressões elevadas, em condutas muito envelhecidas, na qualidade do material da conduta ou do solo, nos ramais prediais em ferro galvanizado ou de PVC com mais de 10 anos.

Identificados os setores com maiores perdas de água, todo o tempo e recursos são mobilizados para estas zonas libertando a intervenção de pesquisar sobre condutas com melhores condições de funcionamento (PMSS 2007). A monitorização do setor deverá ser mantida antes e após a intervenção para confirmar as melhorias na rede por comparação de vários indicadores de desempenho.

Em alternativa, e caso exista informação suficiente, a pesquisa de fugas na RDA pode ser suportada pela informação proveniente do processo de calibração do modelo de simulação hidráulico (Rossman 2000; Sousa 2006; Giustolisi *et al.* 2012). Não obstante o regime do modelo de simulação ser estático ou variável (Cabrera *et al.* 1995) permitirá identificar os setores com maiores perdas de água.

O processo de calibração de um modelo computacional de simulação hidráulica de uma RDA consiste na determinação dos parâmetros representativos das características físicas do sistema. O objetivo primordial da calibração é a obtenção de um modelo rigoroso e representativo do comportamento da RDA. Os modelos de calibração dividem-se em três grupos: procedimentos iterativos, modelos explícitos e modelos implícitos ou algoritmos de otimização. Os primeiros modelos de calibração tinham modelos com igual número de incógnitas e observações (Shamir e Howard 1966; Walski 1983; Ormsbee e Wood 1985; Bhave 1988). Hoje há um conjunto alargado de outros modelos de calibração, utilizando na maioria dos casos algoritmos de otimização (Savic e Walters 1995; Righetto 2001; Wu *et al.* 2002; Walski *et al.* 2008; Nicolini e Patriarca 2011; Alves *et al.* 2014).

2.5.2 Zona de Medição e Controlo (ZMC)

Numa primeira fase, a divisão da RDA em setores de menor dimensão, com preferencialmente um único ponto de abastecimento por setor, permite calcular o balanço hídrico, com os respetivos volumes parcelares num período de referência, ou a

monitorização do CMN. Assim a criação de ZMC surge como a melhor abordagem numa primeira fase para compreender, analisar e isolar o problema das fugas (Morrison *et al.* 2007; Fantozzi *et al.* 2009; Gomes *et al.* 2013; Gomes *et al.* 2015). O caudal na entrada e na saída de cada ZMC é registado. Em cada ZMC, recolhe-se informação suficiente, para a avaliação do balanço hídrico ou do CMN e, para estimar o caudal das perdas reais de modo muito detalhado sem preocupações quanto ao seu posicionamento. Por comparação do caudal das perdas reais, obtido com as várias auditorias às várias ZMC, pode-se hierarquizar a urgência de atuação, isto é, identificar as ZMC com problemas de maior gravidade, maior volume de perdas reais ou com maior retorno potencial.

Para a delimitação de uma ZMC existem vários critérios e modelos (Farley e Trow 2003; Morrison *et al.* 2007; Pilcher *et al.* 2007; Di Nardo e Di Natale 2011; Gomes *et al.* 2011). Este problema está fora do âmbito desta tese. Mesmo assim convém assinalar que em contexto real a definição de cada ZMC é um desafio e costuma ser construída progressivamente através de subdivisões da rede. A recomendação da sua dimensão é geralmente condicionada por fatores práticos, hidráulicos e económicos.

Numa primeira intervenção, a RDA é dividida e cada ZMC pode ser classificada como uma ZMC de grande dimensão (10 000 a 50 000 ramais), ou como ZMC de dimensão média entre 1000 a 3000 ramais (Farley 2001; Farley *et al.* 2008). Para a localização aproximada de fugas, a dimensão máxima recomendada para a ZMC tem como limite superior cerca de 5 000 ramais ou 10 km de extensão de rede em zonas com baixa densidade de ramais. A experiência de campo relata dificuldades na localização de perdas reduzidas em ZMC com mais do que 5 000 ramais. Posteriormente, a área poderá ser dividida em ZMC de pequena dimensão (500 a 1 000 ramais), e para áreas com elevada taxa de roturas ou com a infraestrutura muito degradada é vantajoso o sub-zonamento, ou seja a criação de ZMC com menos de 500 ramais.

2.5.3 Gestão da pressão

Da experiência internacional, a gestão da pressão está frequentemente associada à setorização da RDA em zonas com pressão controlada (ZPC). As delimitações das primeiras ZPC resultaram da experiência dos técnicos e tiveram uma base empírica.

Cada uso da água requer um valor mínimo de pressão a salvaguardar. Uma vez garantido o valor mínimo da pressão em toda a ZPC, o excedente de pressão de água poderá ser reduzido (Fantozzi *et al.* 2009; Gomes *et al.* 2011). Se cada setor tiver características topográficas e exigências de pressão mínima semelhantes, poderá ser mais fácil reduzir ou condicionar o valor da pressão nos pontos de abastecimento do setor sem prejudicar o seu regular funcionamento.

Por um lado, a presença de fugas de água provoca a redução da pressão na RDA. Por outro lado, a consequência direta da redução da pressão na rede é a redução das perdas reais (Yazbeck Jr. *et al.* 2005), a redução do número de novas fugas, a redução do caudal de água utilizado nos vários usos dependentes da pressão, a redução dos custos de reparação, menor número de intervenções e menor período de inatividade da rede devido às reparações (Thornton e Lambert 2005). Deste modo ocorre um controlo indireto das perdas reais de água em toda a ZPC (McKenzie e Bhagwan 1994; Araujo *et al.* 2006) e, em simultâneo, uma redução dos consumos de água e uma redução nos ganhos e proveitos. As perdas aparentes também são reduzidas, por um lado porque, nos contadores, a maior estabilidade da pressão permite reduzir erros associados às medições causadas pela pressão, e por outro lado, porque as ligações fraudulentas e os consumos não autorizados usufruem de redução na respetiva parcela dependente da pressão (Thornton e Lambert 2005).

Para implementar a gestão da pressão numa zona é necessário ou o controlo do sistema elevatório a montante da ZPC, ou a construção/regulação de um reservatório de passagem ou a introdução de elementos na rede do tipo válvula redutora de pressão (VRP). A instalação de uma VRP (Ratcliffe 1986) tem como objetivo limitar a pressão máxima na seção de saída. Para qualquer tipo de VRP é necessário a programação do seu funcionamento (Savic e Walters 1994). O controlo efetuado pela VRP pode ser de quatro tipos: pressão fixa na seção de saída, pressão modulada por tempo (depende das horas do dia), pressão modulada por caudal ou pressão modulada por pressão no ponto crítico (Ulanicki *et al.* 2008; Nicolini *et al.* 2011). A desadequação do funcionamento da VRP poderá criar circunstâncias de não satisfação da procura dos consumidores ou das suas expectativas e de dificultar a satisfação de situações incomuns como são exemplo os incêndios.

O custo da inclusão da VRP numa ZMC é relativamente elevado, sobretudo na fase de instalação quando há necessidade de capital para o investimento inicial. Assim a utilização desta tática na gestão da pressão só será vantajosa se a sua atuação tiver um horizonte temporal de médio a longo prazo, sem nunca resolver o problema das zonas problemáticas mas reduzindo a taxa de ocorrência de roturas. Além disto, devido à redução da parcela do consumo dependente da pressão, a EG observa uma redução no volume de água vendida durante o período de funcionamento da VRP.

Mais recentemente, a indústria tem apresentado novos modelos e a literatura da especialidade tem publicado diversos trabalhos sobre este tema que está excluído da presente tese (Morrison *et al.* 2007; Fantozzi *et al.* 2009; Gomes *et al.* 2010; Gomes 2011; Di Nardo e Di Natale 2011).

Convém notar que há modelos de simulação para a gestão da pressão, isto é a definição de setores na RDA, a regulação do funcionamento da VRP e a análise custo-benefício da instalação de VRP (Araujo *et al.* 2006; Giustolisi *et al.* 2008; Nazif *et al.* 2009; Tabesh *et al.* 2009; Gomes *et al.* 2011; Gomes *et al.* 2013; Gomes *et al.* 2015).

2.5.4 Técnicas de localização aproximada de fugas de água

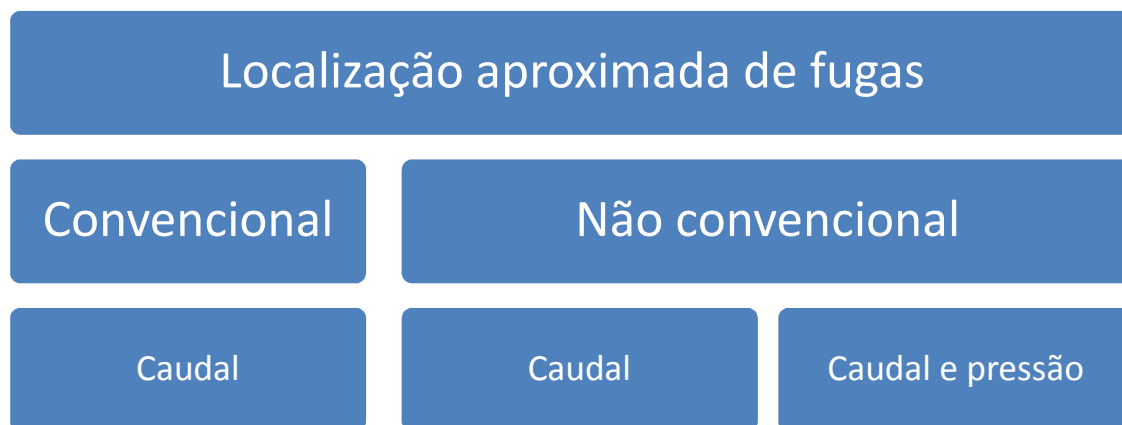
As perdas reais identificadas nos reservatórios ou órgãos da RDA estão fora do âmbito da presente tese. Geralmente, as causas estão associadas a deficiências nas estruturas ou equipamentos (descargas de superfície) ou a procedimentos desadequados (perdas operacionais). No sistema adutor, as perdas de água detetadas tanto podem ser investigadas para uma localização aproximada, tal como é usual proceder nos oleodutos de gás e petróleo, como podem ser utilizadas as técnicas de localização exata.

Numa perspetiva de curto prazo, a alternativa à gestão da pressão da água na RDA é a localização das fugas. Nesta seção procura-se dar ênfase às técnicas de localização aproximada das fugas não reportadas. Estas técnicas podem contribuir ativamente para a localização das fugas não visíveis pois ao circunscrever a ocorrência das fugas de água a uma zona o mais confinada possível, aperfeiçoam a identificação das zonas com maior probabilidade de terem fugas.

Idealmente estas técnicas devem ter baixo custo, devem posicionar a fuga numa área rapidamente, sem o detalhe próprio da localização exata da fuga (Li *et al.* 2015). A circunscrição deverá ser a mais detalhada possível para por um lado ter uma adequada quantificação do caudal perdido através da fuga para aquela zona e, por outro reduzir a duração do trabalho desenvolvido com a aplicação das técnicas de localização exata. Em simultâneo, estas técnicas permitem complementar e melhorar a eficiência na aplicação das técnicas de localização exata de fugas.

A confirmação da presença de fuga por meios alternativos é importante pois reduz a probabilidade da fuga não ser localizada pela equipa de localização exata por desadequação do esforço desenvolvido, ou por seleção desadequada do equipamento ou da técnica para a intervenção. A localização aproximada de fugas pode ser feita de modo convencional ou não convencional, com recurso a dados observados na RDA. Os dados observados são o caudal e por vezes a pressão, Quadro 2.7.

Quadro 2.7 Alternativas para a localização aproximada de fugas de água em RDA.



2.5.4.1 Localização aproximada convencional

A criação de ZMC é, por si só, uma técnica genérica e convencional para a localização aproximada de fugas. Cada ZMC é uma parte da rede, logo a aplicação do balanço hídrico permite hierarquizar as ZMC com maior necessidade de intervenção.

Na literatura anglo-saxónica, a redução do campo de intervenção é preferencialmente executada com outra técnica de localização aproximada convencional, por *step testing*, ou seja, pelo fecho sucessivo de secções da rede em cada ZMC no período noturno. Para o efeito a zona em análise só pode ser abastecida por um único ponto.

A vantagem da execução desta técnica durante o período noturno está associada ao menor consumo, ao menor caudal escoado, à observação da cota piezométrica com valor próximo do seu máximo, à observação do caudal de fuga também com o valor próximo do seu máximo antes da intervenção e à constatação quase imediata das intervenções no caudal da fuga (Farley e Trow 2003). O fecho das secções é iniciado na secção mais afastada e progride no sentido do medidor de caudal (fixo ou amovível) colocado na única secção de entrada da ZMC. Durante todo o teste monitoriza-se a evolução do caudal noturno identificando quando cada uma das secções da rede é fechada. Se entre duas secções adjacentes e sucessivas, após o fecho da secção mais a montante for observada uma redução importante de caudal no medidor, deduz-se que esta redução de valor corresponda ao caudal da fuga e que o seu posicionamento ocorre no espaço limitado pelas duas secções. A reabertura da última válvula manobrada acompanhada com a monitorização do caudal confirma a hipótese.

Este procedimento é muito moroso e executado com equipas noturnas. Todos os utilizadores ficam privados de água durante o *step testing* e os utilizadores nas zonas onde o teste inicia sentirão a falta de água durante mais tempo, apesar do usual reduzido consumo noturno.

A simplicidade, o rigor dos resultados e a rapidez na confirmação de suspeitas de fugas tornou este procedimento muito popular no Reino Unido.

2.5.4.2 Localização aproximada não convencional baseada na monitorização do caudal

A localização aproximada não convencional baseada na monitorização dos caudais é bastante interessante. Ela exige pelo menos um caudalímetro fixo a montante de cada ZMC em estudo e confina a fuga a jusante de cada caudalímetro. As diferentes abordagens utilizam exclusivamente o historial dos registos dos caudais para prever os consumos e os fatores que afetam o seu padrão diário e semanal. Sempre que ocorram alterações nos valores dos caudais previstos face aos valores dos caudais observado são gerados alertas para ativação das equipas de intervenção no combate às novas fugas.

Do exposto, conclui-se que estas abordagens têm uma fase de “aprendizagem”, durante a qual são gravados os caudais, ou seja, não só os consumos mas também as fugas

existentes. Estas abordagens só identificarão fugas posteriores à fase de “aprendizagem”, com uma localização aproximada igual a toda a zona a jusante do medidor de caudal, bem como estas abordagens gerarão alertas face a eventos excepcionais como por exemplo incêndios, dias de festa, entre outros.

A identificação da presença de fugas foi assegurada por uma análise estatística Bayesiana no trabalho de Poulakis *et al.* (2003). Com a evolução temporal do caudal e para ZMC com menos de 1000 habitações foi proposta uma outra metodologia baseada na análise estatística por Buchberger e Nadimpalli (2004).

Mais recentemente, as curvas típicas de consumo e outros fatores que as condicionam, são utilizados para prever os consumos vindouros com uma base horária ou de 15 minutos. Em qualquer instante, a medição do caudal numa secção específica, habitualmente à entrada da ZMC, permite comparar o valor previsto com o valor observado e gerar alertas caso o desvio exceda o limite previsto (Bakker *et al.* 2012). O método de cálculo utilizado para previsão de comportamento e consumos foi a identificação direta de padrões nos registos de consumo (Bakker *et al.* 2003).

2.5.4.3 Localização aproximada não convencional baseada no caudal e na pressão

Num líquido incompressível, as características associadas aos fenómenos transitórios diminuem rapidamente, restabelecendo-se um novo regime permanente (Mukherjee e Narasimhan 1996). Este facto sustenta o estudo de fugas, em regime permanente. O consumo dos utilizadores é sempre uma variável estocástica.

A localização aproximada não convencional baseada em observações do caudal e da pressão (convertida em cota piezométrica) pode ser executada exclusivamente com as observações ou recorrendo à simulação estática do comportamento da RDA num determinado instante. Para a concretização da localização aproximada não convencional é suficiente a medição da pressão para conversão em cota piezométrica em pontos estratégicos e a medição nesse mesmo instante de caudais nas secções de entrada e os consumos dos utilizadores da RDA ou ZMC.

A localização aproximada não convencional pode utilizar exclusivamente as observações efetuadas e poderá denominar-se *Data Based*. Esta abordagem foi utilizada

para a calibração de parâmetros das condutas e dos consumos em vários trabalhos (Reddy *et al.* 1996). Em pontos selecionados a recolha de observações permite deduzir o comportamento do escoamento na rede. Logo, por comparação entre observações, por exemplo antes e depois da ocorrência de uma fuga, é possível deduzir o comportamento do escoamento de água na rede e, fundamentada nesta dedução, propor a localização aproximada probabilística da mesma (Rougier 2005). A aplicação de redes neuronais artificiais a este problema foi desenvolvida e aplicada a um caso real (Mounce *et al.* 2003; Mounce e Machell 2006). Nesta linha de inferência da informação e metodologias de aprendizagem foi proposta uma nova metodologia por Xu *et al.* (2007). Integrados nas redes neuronais existem os mapas auto-organizados que também tiveram sucesso quando aplicados ao problema de localização aproximada de fugas de água em RDA (Aksela *et al.* 2009).

Com base num sistema de telemedição foi proposta a localização aproximada das fugas com análises *cluster* aos dados e o reconhecimento de padrões difusos (Xia e Guo-jin 2010). Na mesma altura foi proposta a localização aproximada das fugas não reportadas com base na observação da pressão na rede, na utilização de um modelo de simulação do comportamento hidráulico da rede e na aplicação da análise das componentes principais no diagnóstico de falhas de RDA com sucesso (Gertler *et al.* 2010).

Palau *et al.* 2011, com a informação recolhida num sistema de telemedição, sobre o caudal e com a respetiva organização em *cluster*, demonstraram ser detetável a alteração do comportamento devido à existência de fugas. Para o efeito estabeleceram um modelo que estratificava o caudal diário em dias de semana úteis ou não, e em diferentes intervalos horários, evitando deste modo a utilização de modelos de simulação. Utilizando a análise das componentes principais, eles apresentaram um estudo de caso, que com probabilidade de ocorrência a variar entre os 30% e os 95% em função da hora e dia, identificava caudais de fuga da ordem de grandeza igual a 5% do caudal médio.

A análise de dados recolhidos com *support vector machines* (SVM) foi inicialmente proposta por Mashford *et al.* 2012. No Irão, dois exemplos de RDA com fugas foram sujeitas a uma metodologia híbrida entre algoritmos genéticos e modelos *neuro fuzzy* com sucesso (Jalalkamali e Eftekhari 2012).

Com uma nova aplicação que congrega técnicas de reconhecimento de padrões e redes neuronais de associação binária foi desenvolvida uma nova metodologia de localização aproximada de fugas (Mounce *et al.* 2014). Neste mesmo ano, foi proposta uma metodologia com múltiplas camadas com um sistema Bayesiano e controlo estatístico do processo (Romano *et al.* 2014).

Outra abordagem ao problema recorre à simulação estática do comportamento hidráulico da rede com a presença das fugas para identificar as zonas e correspondentes caudais, ou seja o modelo matemático é denominado *Physics Based* e é regido pelas leis da física. Com o recurso a este tipo de modelo matemático há possibilidade de localizar todas as fugas existentes, tanto as recentes como as antigas. A representação das fugas no modelo matemático pode estar associada ou aos nós da rede (podendo a fuga ocorrer em qualquer das condutas ligadas ao nó) ou às condutas da rede (podendo a fuga ocorrer em qualquer ponto da conduta, incluindo nos seus nós de extremidade). Para a construção do modelo matemático é necessário o cadastro da RDA.

A primeira proposta publicada para calcular a localização de fugas na RDA foi apresentada como um problema inverso. A resolução de problemas inversos levanta uma série de dificuldades que serão detalhadas no capítulo 3. A apresentação original (Pudar e Liggett 1992) modelava o comportamento hidráulico da rede admitindo os consumos e as fugas nos nós. Existindo alguns nós com medição da pressão e caudal, a incógnita do problema era a área dos orifícios que estando sujeitos a uma pressão libertavam os caudais das fugas, tal como na equação de Torricelli.

A equação de Torricelli não é a expressão mais adequada para representar o caudal saído por um orifício na parede de uma conduta da RDA (Lambert 2000). Detalhes para a correta representação da relação entre o caudal da fuga e o orifício devido ao efeito da pressão podem ser encontrados no próximo capítulo (3.2.3) e na literatura (Greyvenstein e Van Zyl 2007; Cassa *et al.* 2010; Paola e Giugni 2012).

Os modelos de simulação estática têm a vantagem de reproduzir fisicamente o comportamento da RDA. No passado recente, o EPANET (Rossman 2000) tem sido muito utilizado para simular o comportamento hidráulico.

Na linha de investigação associada aos modelos de simulação estática, depois do primeiro trabalho apresentado (Pudar e Liggett 1992), seguiu-se a apresentação de

várias metodologias resolvidas com algoritmos genéticos (Wu e Sage 2006; Wu 2008). Estas metodologias evoluíram em complexidade e capacidade de análise, inicialmente com modelos de simulação hidráulica orientados pelas solicitações para posteriormente utilizarem modelos de simulação hidráulica com as solicitações orientadas pela pressão tal como apresentado no trabalho de Wu *et al.* 2010. No trabalho de Sage *et al.* 2011 demonstrou-se as vantagens de comparar os valores observados com os valores estimados com os modelos de simulação hidráulica com as solicitações orientadas pela pressão disponível, quando há acréscimos significativos de caudal, de que são exemplo os caudais de combate a incêndio, para proceder à localização aproximada de fugas não reportadas e à localização de válvulas de secionamento fechadas. Outros autores (Nasirian *et al.* 2013) melhoraram a rapidez da execução do modelo com os algoritmos genéticos ao reduzirem progressivamente o espaço solução e as soluções possíveis do problema. Mais recentemente Adachi *et al.* (2014) e Adachi *et al.* (2015) propõem a resolução do modelo de otimização com o método Nelder-Mead.

Posteriormente Ribeiro *et al.* 2012; Ribeiro *et al.* 2012; Ribeiro *et al.* 2015 e Sousa *et al.* 2015 resolveram o problema da modelação do comportamento da RDA com a localização aproximada das fugas com sucesso recorrendo ao recozimento simulado e a um modelo de simulação hidráulica não comercial (Sousa 2006).

2.5.5 Técnicas de localização exata de fugas

A localização exata da anomalia, nomeadamente da fuga, permite dar a resposta mais apropriada ao problema. O objetivo das técnicas de localização exata de fugas é posicionar o ponto de descontinuidade do material da conduta associado à saída do fluido. Após a identificação aproximada do local da fuga, deverá decidir-se se é vantajoso monitorizar a fuga e gerir o seu comportamento ou se há necessidade de intervir no local onde se encontra. Caso seja premente intervir poderá proceder-se à reabilitação da conduta ou à reparação da mesma. Qualquer erro na localização exata da fuga desmotiva a equipa e valida o cariz iterativo da atividade, em que os resultados dos esforços efetuados resultam de tentativas e erros.

Geralmente, as técnicas de localização exata das fugas são muito caras, muito morosas e há vantagem em aplicá-las a zonas restritas (Li *et al.* 2015). Nas próximas secções, as

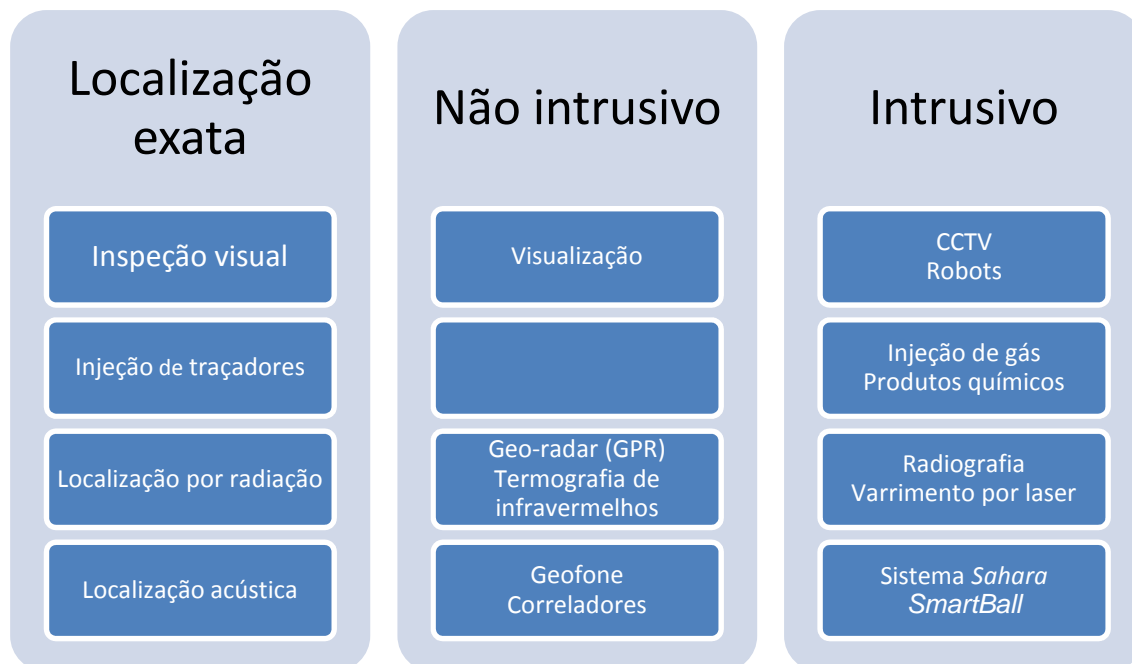
principais técnicas de localização exata serão descritas de modo sucinto. As técnicas de localização exata de fugas podem ser convencionais ou não convencionais. Ambas carecem de execução em campo sobre a RDA e algumas possibilitam a recolha de informações para a caracterização das RDA. Há técnicas exclusivamente executadas *in situ*, outras carecem de trabalhos complementares ou preparatórios em gabinete.

Frequentemente, a presença de uma fuga numa conduta gera vibrações, ruído e alteração do equilíbrio hidráulico e das cotas piezométricas ou pressões previstas.

2.5.5.1 Técnicas de localização exata de fugas convencional

As técnicas de localização exata de fugas denominadas por convencionais são as mais antigas. Elas englobam a inspeção visual, a injeção de traçadores, a análise da radiação ou da acústica e podem ser intrusivas ou não. Algumas das técnicas de localização exata de fugas possibilitam, além da localização das fugas, a recolha de outros dados ou informações da rede, como por exemplo proceder à inspeção da face interna das condutas, à avaliação do estado de conservação das condutas, à georreferenciação das condutas e à georreferenciação das outras infraestruturas enterradas no subsolo. No Quadro 2.8 estão identificadas as técnicas de localização exata mais comuns.

Quadro 2.8 Breve síntese de técnicas alternativas para a localização exata de fugas em RDA.



Para proceder à avaliação física das condições de funcionamento das condutas é por vezes necessário algum acessório tipo robot. Este, uma vez introduzido no interior das

condutas, permite a recolha direta de informação. Os robots costumam ser comercializados e suportar equipamento associado a uma técnica com um conjunto de características pré-definidas. Cada robot no mercado dispõe de diferentes sensores e equipamentos para a inspeção visual, ou a inspeção por radiação, ou outra, sendo alguns modelos totalmente autónomos. Os robots deslocam-se no interior das condutas montados em *pigs*, de rodas, em passadeiras rolantes, *wall press*, por andamento, *inch worm* ou por *screw*.

2.5.5.1.1 Inspeção visual

A inspeção visual é ideal para a localização exata de fugas. A inspeção visual pode ser no interior da conduta e necessitar da intrusão de equipamentos na conduta, ou exterior da conduta com a observação das propriedades das paredes da conduta ou do solo envolvente. Em contraponto com a visualização humana, uma técnica que existe desde sempre e muito rudimentar, as técnicas utilizando câmaras são muito sofisticadas, dependentes da tecnologia e recentes.

2.5.5.1.1.1 Visualização

A observação das consequências da presença de fugas é uma técnica não intrusiva, muito rudimentar e antiga, com resultados influenciados pelas características do solo.

A observação das características do solo à superfície pode denunciar a presença de uma fuga devido ao surgimento de água à superfície incompatível com os níveis freáticos do solo envolvente, ou devido ao aparecimento de vegetação excessiva ou a um elevado teor de humidade no solo sem justificação. A água da fuga tende a ascender acima da camada que reveste o solo só quando a água no interior da conduta está sujeita a pressão compatível ou o solo é pouco permeável.

2.5.5.1.1.2 CCTV

A inspeção visual direta ou a inspeção com câmara de vídeo CCTV (*Closed-Circuit Television*) é uma técnica intrusiva para verificar todas as alterações, defeitos e deformações existentes e visíveis no interior da RDA, em condutas de qualquer material (Figura 2.10). Os equipamentos mais modernos estão instalados em robots e dispõem de duas câmaras para a obtenção de uma imagem frontal e outra a 360°. A técnica exige mão de obra muito especializada, equipamento para a iluminação interna da conduta, a

movimentação da câmara no interior da conduta, dimensões mínimas para a entrada, saída e manobra da câmara. As filmagens são gravadas e analisadas em gabinete e existem vários modelos comercializados.



Figura 2.10 Exemplo de imagem obtida com CCTV (PureTechnologies, 2010).

Esta é uma das poucas técnicas que permite a confirmação da situação factual da RDA, como por exemplo a identificação de incrustamentos, abrasões, a confirmação do diâmetro interno ou a existência de ligações ilícitas. A análise das imagens exige atenção devido à possibilidade de existência de sombras nas mesmas.

2.5.5.1.2 Injeção de traçadores

A localização de fugas nas condutas ganha precisão e rigor com a injeção de traçadores (agentes químicos sob a forma de gases ou líquidos) na massa líquida. A injeção de gases está mais vulgarizada e requer detetores de gás no pavimento sobre a conduta. Entre todos os possíveis gases não tóxicos, insolúveis na água e mais leves que o ar, os mais usuais são o hélio, o hidrogénio industrial ou o hexafluoreto de enxofre SF₆, gás transparente, inodoro, não inflamável e quimicamente estável (Pilcher 2003; Puust 2007). A vantagem da injeção de gás é a sua capacidade de detetar pequenas fugas em condutas de qualquer material, de qualquer diâmetro e a sua elevada precisão na definição do local da fuga (Farley e Hamilton 2008). As principais desvantagens prendem-se com a morosidade porque cada conduta exige uma análise isolada, o seu elevado custo, a dificuldade de detetar fugas na face inferior da conduta (Li *et al.* 2015).

2.5.5.1.3 Localização exata por radiação

2.5.5.1.3.1 Termografia de infravermelhos

A termografia com radiação de infravermelhos ou sensores térmicos é um método alternativo baseado na visão artificial. Neste caso, a técnica consiste em filmar a superfície com uma câmara de infravermelhos. Destas filmagens resultam imagens térmicas que realçam a diferença de temperatura no meio envolvente. Quanto maior for a diferença de temperatura entre elementos melhor será a imagem térmica. Este método é aplicável a qualquer conduta, independentemente do diâmetro ou material, mas é afetado por diversos fatores (Li *et al.* 2015). Em condições ideais a técnica é muito sensível e fiável, como por exemplo em condutas expostas ou em ramais domiciliários. A técnica permite inspecionar áreas grandes com viaturas especializadas ou mesmo com sobrevoo mas este modo de transporte tem um custo elevado (Viana 2014).

2.5.5.1.3.2 Fluxo magnético

Para condutas metálicas e com o equipamento instalado em robots móveis, é possível utilizar a técnica fluxo magnético (*Magnetic Flux Leakage - MFL*) para análise do desempenho das paredes das condutas (Mukhopadhyay e Srivastava 2000). Esta técnica, que está pouco divulgada em Portugal, identifica os fenómenos de corrosão e a face da conduta onde ocorrem (Hao *et al.* 2012). Com a aplicação desta técnica a condutas metálicas é possível avaliar a evolução natural das respetivas paredes após a instalação. Começa por distinguir a face de parede onde há uma ocorrência, que complementa com os indícios de fenómenos de corrosão ou do surgimento de fendas ou fissuras. Com o tempo estas fendas ou fissuras tendem a aumentar e a não manter o líquido no interior da conduta parcialmente ou totalmente. Da experiência da aplicação desta técnica a redes de gás conclui-se que garante a localização de anomalias com precisão de 0,1% da distância medida (Mandal 2013). Na Figura 2.11 apresenta-se um equipamento para aplicação desta técnica.



Figura 2.11 Exemplo de equipamento com campos móveis de fluxo magnético (www.puretechltd.com).

2.5.5.1.3.3 Varrimento por laser

Recentemente divulgado em Portugal, o varrimento por laser (*laser scan*) permite cadastrar, georreferenciar, inspecionar, verificar o estado de conservação e identificar patologias com alta precisão (3D). O mapeamento tridimensional das paredes interiores da conduta existente é executado com grande precisão, sem iluminação, por introdução do equipamento no interior da conduta e carece que a conduta esteja sem água (Liu e Kleiner 2013). O varrimento por laser baseia-se no princípio da transmissão da luz laser (Hao *et al.* 2012). A informação recolhida é processada no exterior para compensar os potenciais erros existentes na fase de varrimento. Alguns equipamentos comercializados complementam o varrimento laser com outras técnicas.

2.5.5.1.3.4 Radar de penetração no solo ou georadar

Outra alternativa para a localização exata das fugas de água com uma técnica não intrusiva é a utilização do radar de penetração no solo (GPR) ou georadar com rádio detecção (MSSC 1992). O equipamento emite ondas eletromagnéticas que penetram no solo. As propriedades dielétricas dos materiais presentes e constituintes do solo (condições do solo e do material da conduta) condicionam a reflexão das ondas magnéticas, que voltam à superfície e as antenas recetoras do equipamento recolhem-nas (Hunaidi e Giamou 1998). As constantes dielétricas da água, dos principais minerais presentes no solo e do ar têm valores tabelados. A recolha e tratamento das ondas refletidas permitem a identificação das construções enterradas no solo (Filipe e Morgado 2011), das estruturas dos edifícios, dos elementos constituintes do solo ou das zonas do solo com maior teor de humidade (Paixão *et al.* 2006; Azevedo *et al.* 2012) ou cavidades, que poderão indiciar a presença de fugas. A frequência da onda emitida e a resolução da imagem produzida dependem das características do solo e do número e capacidade das antenas recetoras, sendo vantajosa a utilização de sistemas de multisensor. Hoje, esta dispendiosa técnica poderá ser realizada manualmente ou em veículos com velocidades até 15 km/h e tem vantagens sobre os métodos acústicos ao possibilitar a utilização em qualquer material e permitir a identificação de outras infraestruturas existentes no solo até cerca de 2,0 m de profundidade, o posicionamento das condutas com a correspondente georreferenciação, a extrapolação do material das condutas, o diâmetro interno e externo e a caracterização do tipo de solo.

2.5.5.1.4 Localização exata acústica

O escoamento de um fluido no interior de uma conduta em regime laminar processa-se silenciosamente. Nalguns casos, em regime turbulento é audível a passagem da água por alguns acessórios, por válvulas semi-abertas, nos ramais com consumo, por ocorrerem fenómenos de choque hidráulico, cavitação, velocidade de escoamento elevada ou pressão elevada.

A presença de ruídos na RDA pode ser indiciadora da existência de fugas de água. Assim, as primeiras técnicas de localização exata foram baseadas na auscultação da RDA, numa cópia do funcionamento do estetoscópio.

O desenvolvimento tecnológico permitiu a construção do geofone e do correlador de ruído nos finais do século passado e, mais recentemente, a construção dos sistemas *Sahara* e *SmartBall*. As duas primeiras técnicas são comercializadas e muito comuns na indústria, enquanto as duas últimas técnicas são muito sofisticadas e caras.

As últimas versões destas técnicas correntes procedem ao tratamento das observações acústicas utilizando amplificadores, filtros de frequências ou modelos matemáticos com o objetivo de isolar o ruído produzido pelas fugas dos restantes ruídos. Genericamente, as técnicas acústicas podem detetar fugas em condutas metálicas até cerca de 1 km, mas em condutas de material plástico a distância máxima é cerca de 100 m (Almeida 2013).

2.5.5.1.4.1 Auscultação

As técnicas convencionais de localização exata de fugas de água mais antigas são não intrusivas e funcionam através da monitorização do ruído, ou seja, através da auscultação manual da rede (Figura 2.12).

As hastes de escuta mecânicas ou *listening stick* são ferramentas para a localização exata do aumento do ruído produzido pelas fugas de água. As hastes são encostadas na parede exterior das condutas, ou em acessórios acessíveis, e tiveram sucesso em redes de distribuição metálicas, um material bom transmissor do ruído. A gama de frequências com a haste de escuta situa-se entre 200 Hz e 1,5 kHz com uma faixa ideal entre 600 Hz e 800 Hz. A audição humana está limitada a uma gama de frequências entre 20 Hz e 20 kHz (PMSS 2007).

Assim, poderá identificar-se indevidamente a presença de fugas na passagem por válvulas semiabertas, nos ramais domiciliários com consumo, nas instalações elétricas, ou em zonas com ruído semelhante produzido pelo tráfego ou outro ruído. Na auscultação manual da RDA o diâmetro, o tipo de material da conduta, o tipo e as condições do solo, a profundidade da fuga, a distância do ponto de auscultação à fuga, a experiência e a capacidade auditiva do operador também influenciam muito os resultados da intervenção.

De um modo geral, as vantagens das técnicas baseadas na auscultação da rede são a sua simplicidade, uma taxa de sucesso moderada em condutas metálicas, o relativo baixo custo operacional e a não interrupção do abastecimento aos consumidores. As principais desvantagens prendem-se com alguma dificuldade em aplicar a técnica a condutas não metálicas, na falta de precisão para definir a posição com maior intensidade de ruído e esta posição nem sempre coincidir com a posição da fuga. A auscultação é ainda influenciada pelo ruído de fundo ou provocado por acessórios, bem como é muito dependente do operador, sobretudo na sua velocidade de deslocação, na sua capacidade auditiva e na sua concentração (Figura 2.13). Estas desvantagens promoveram a substituição do uso desta técnica por outras, desde a década de 80 do século passado.



Figura 2.12 Auscultação da RDA com haste de escuta mecânica (Pilcher *et al.* 2007).



Figura 2.13 Auscultação da RDA com haste de escuta eletrônica (www.subsurfaceleak.com/ld8_operate_pg.html).

2.5.5.1.4.2 Geofone (Mecânico e Eletrônico)

O geofone mecânico utiliza o princípio do estetoscópio e geofone eletrônico resulta da introdução de alguns desenvolvimentos tecnológicos. Este último tem sensor ou transdutor, ligado a um amplificador, e filtro de frequências e auscultadores que isolam o ruído ambiente, o que garante o bom funcionamento numa gama entre os 100 Hz e os 2,7 kHz. Para o funcionamento ideal, a RDA deverá dispor de uma pressão de pelo menos 15 mc.a.. A velocidade de localização corresponde à velocidade do movimento do operador e permite a identificação do local da fuga. Na Figura 2.14 apresenta-se um exemplo de utilização do geofone.



Figura 2.14 Exemplo de utilização do geofone (PureTechnologies 2010).

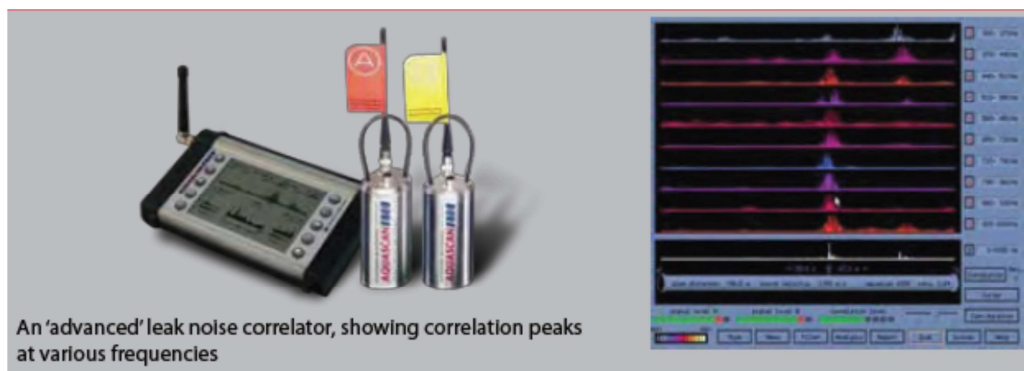
O geofone eletrônico possibilita a análise digital do ruído, o que permite suprir o ruído ambiente e efetuar memorização dos níveis de ruído. As características técnicas gerais de alguns modelos divulgam frequências de resposta entre 1 Hz e 5 kHz.

2.5.5.1.4.3 Correlador de ruído

O correlador de ruído é um sistema mais complexo, com frequências de resposta entre 1Hz a 300 Hz e os 5 kHz (dependendo do modelo), o que lhe permite detetar fugas em condutas metálicas, em betão e em PVC (PMSS 2007). A técnica utiliza a velocidade de propagação do som produzido pela fuga (Farley *et al.* 2008). A propagação do som efetua-se através de dois meios. O som propaga-se através das paredes da conduta, podendo ser detetado com acelerómetros, bem como através da água, podendo ser detetado com hidrofones.

Em cada extremidade da conduta é instalado um sensor de contacto (microfone ou sensor de som) para escutar o ruído (Figura 2.15). A distância entre os dois equipamentos e a velocidade de propagação do som captado permitem determinar a distância da fuga a cada um dos sensores. A velocidade de propagação do som nas paredes das condutas introduz alguma incerteza à técnica, pois o material da conduta e o seu diâmetro podem atenuar a sua propagação, bem como o tipo de solo e nível freático no subsolo (Hunaidi *et al.* 2004). Conduas de material plástico, com diâmetros grandes, em solo argiloso e submersas no lençol freático, constituem condições que não permitem a localização exata da fuga. A inclusão de um terceiro sensor permitirá a medição direta da velocidade de propagação do som.

Hunaidi e Chu (1999) desenvolveram um trabalho inovador no campo da caracterização dos ruídos produzidos em condutas plásticas. Esta metodologia foi aplicada em campo, identificando as suas maiores vantagens e fragilidades (Hunaidi *et al.* 2004). Beck *et al.* (2005) analisam as possibilidades do processamento do ruído. Mais recentemente, Brennan *et al.* (2008), no âmbito de trabalhos experimentais, propõem melhorias na aplicação da técnica. Hanson *et al.* (2007) identificam vantagens na utilização do *cepstrum* (operação matemática que consiste em extrair a Transformada de *Fourier* do espectro do sinal na forma logarítmica), em detrimento da correlação, na análise do ruído.



An 'advanced' leak noise correlator, showing correlation peaks at various frequencies

Figura 2.15 Exemplo de utilização de correlador de ruído (Farley et al. 2008).



Figura 2.16 Exemplo de hidrofone montado num marco de incêndio (Hunaidi 2012).

Chyuan (2007) apresentou uma análise crítica dos resultados obtidos em campo com um modelo de correlador. Atualmente, continuam a ser propostas novas análises ao ruído, como por exemplo o trabalho de Almeida (2013).

2.5.5.1.4.4 Sistemas *Sahara* e *SmartBall*

Mais recentemente foram desenvolvidos equipamentos intrusivos que incluem sensores acústicos. Os sistemas *Sahara* e *SmartBall*, exemplos deste tipo de equipamentos, são introduzidos no interior das condutas para registarem o ruído no interior da massa líquida. Estas ferramentas são lançadas numa secção e arrastadas pela corrente, sendo irrelevante o material da conduta, o tipo de solo e, em certa medida, o diâmetro da conduta.

O sistema *Sahara* carece de um acesso ao interior da conduta com diâmetro mínimo de 50 mm (Mergelas e Henrich 2005), trabalha na gama entre 1 Hz e 170 kHz, necessita de velocidades de escoamento superiores a 0,30 m/s e emite um sinal eletromagnético que permite localizar o equipamento à superfície (Figura 2.17). Este sinal permite o registo

do percurso efetuado se o operador transportar equipamento GPS (*Global Positioning System*). O cruzamento dos dados permite o posicionamento do orifício da fuga e uma estimativa para o caudal da fuga através do ruído produzido (Mergelas e Henrich 2005; Chyuan 2007). O hidrofone (sensor de som em contacto direto com a água) está na extremidade do cabo de ligação, o qual permite parar o movimento e efetuar a confirmação da localização da fuga (Figura 2.18). Alguns modelos dispõem de câmaras CCTV para complementar a informação, nomeadamente quanto à corrosão interna, condições do escoamento e defeitos dos acessórios (PureTechnologies 2010).

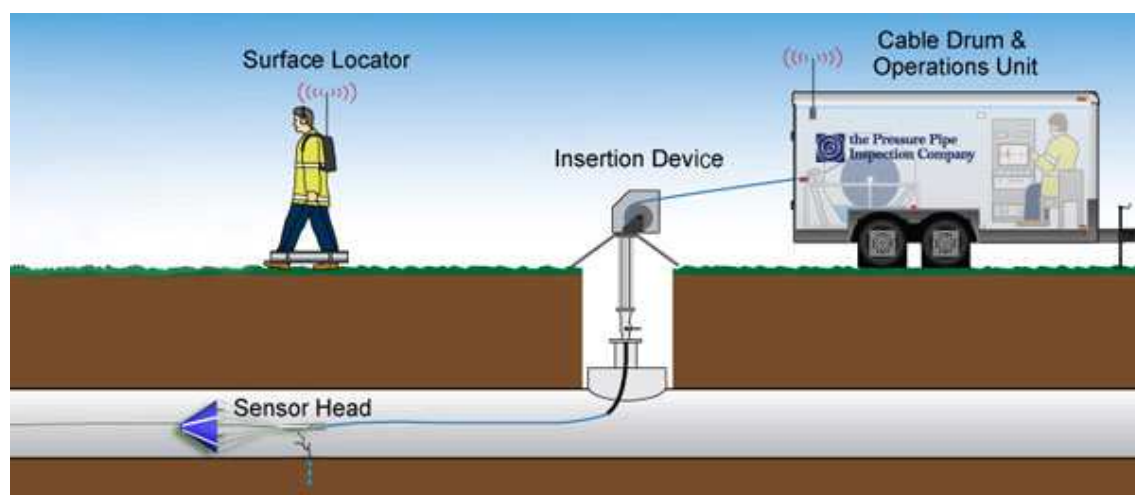


Figura 2.17 Exemplo de utilização do sistema *Sahara* (Fonte: <http://chinawaterrisk.org/opinions/more-than-pipe-dreams-non-revenue-water/>).

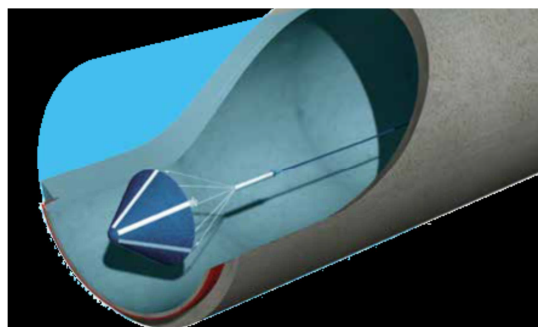


Figura 2.18 Detalhe da extremidade do cabo do equipamento *Sahara*(www.puretechld.com).

O sistema *SmartBall* exige acesso ao interior da conduta (diâmetro de 0,102 m ou 0,152 m) e velocidades de escoamento compreendidas entre 0,244 m/s e 0,457 m/s. A grande limitação da utilização deste equipamento é a existência de pontos para acesso ao interior da conduta, o preço de aquisição e de operação do mesmo. Os modelos mais recentes do sistema *SmartBall* permitem que a bola viaje livremente na RDA durante 12

horas. A informação recolhida pode ser visualizada em gráficos com o registo da intensidade sonora, o instante do registo e respetiva posição na RDA, tal como está apresentado na Figura 2.19. Algumas versões comercializadas incluem sensores acústicos, acelerómetros, magnetómetros e sensores de temperatura (Liu e Kleiner 2013).

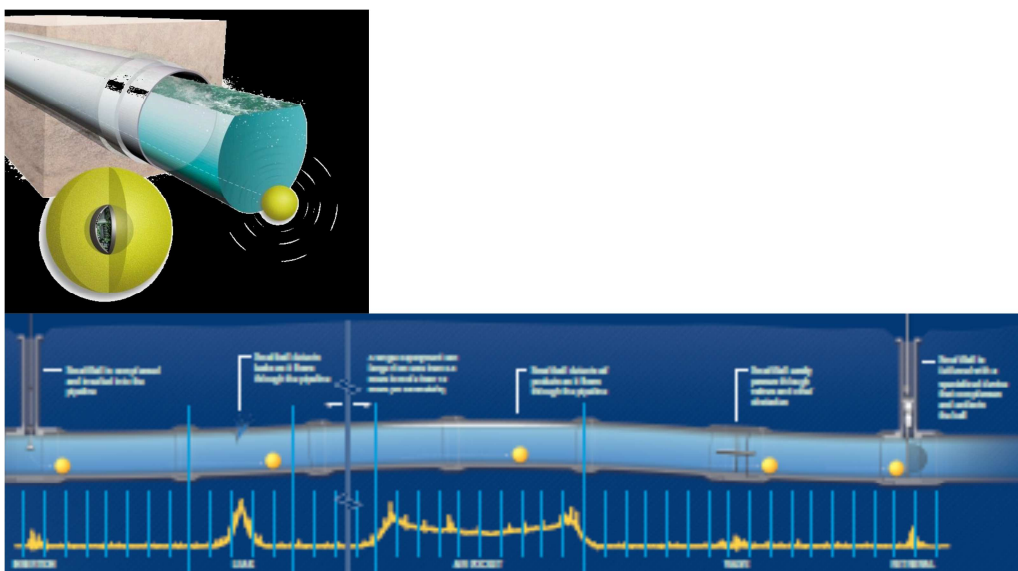


Figura 2.19 Detalhe da *SmartBall* (PureTechnologies 2010) e exemplo da informação recolhida para a localização exata com *SmartBall* (PureTechnologies 2009).

2.5.5.2 Técnicas de localização exata de fugas não convencional

2.5.5.2.1 Simulação em regime transitório do comportamento hidráulico

A simulação do comportamento hidráulico em regime transitório pode contribuir para a localização exata de fugas. Para o efeito, os modelos inerciais rígidos ou os modelos inerciais elásticos podem ser utilizados para simular a presença de fugas de modo não convencional. O regime transitório ou variável tem a vantagem de gerar muitas observações num intervalo pequeno de tempo. Contudo esta metodologia só tem apresentado resultados razoáveis quando aplicada em adutoras e necessita de muitos parâmetros difíceis de determinar para representar a compressibilidade do fluido e o comportamento elástico da conduta. Outra desvantagem do método é o comportamento hidráulico ser representado por um sistema de equações diferenciais parciais do tipo hiperbólico de difícil resolução devido à elevada complexidade matemática.

Para este fim é necessária a instalação de transdutores de pressão numa conduta e de uma válvula propagadora de ondas caso não existam válvulas. O manobrar da válvula e a observação da evolução da pressão no tempo, permite identificar a presença e o posicionamento de um orifício e respetivo caudal de fuga. De igual modo, numa conduta com transdutores de pressão permanentes e com monitorização de pressão, o aparecimento súbito de roturas é registado nas observações de pressão e estes valores possibilitam o seu posicionamento (Colombo, Lee e Karney, 2009). Em ambos os casos procede-se à monitorização de fenómenos efémeros e rápidos, com o valor da pressão a oscilar várias vezes entre valores extremos em intervalos de tempo muito inferiores ao segundo (Boulos *et al.* 2005; Pothof e Karney, 2013). Este tipo de monitorização exige elevada capacidade de registo e elevada precisão nos valores observados.

Ligget e Chen (1994) na continuidade do seu trabalho (Pudar e Liggett, 1992) propõem determinar a posição das fugas, e o caudal associado, com base na evolução da pressão quando ocorrem fenómenos transitórios. Esta hipótese contorna algumas das dificuldades associadas ao estudo do escoamento permanente e permite testar a hipótese em laboratório, tendo originado uma nova linha de investigação.

As variações do caudal e da pressão em curtos intervalos de tempo permitem bons resultados de identificação dos parâmetros desconhecidos, com equipamentos simples, isto é, a calibração de diferentes coeficientes de fricção e a localização exata da fuga. A principal desvantagem está associada à elevada complexidade matemática do modelo de simulação. Este tipo de análise pode ser aplicada a redes de distribuição de gás (Wan *et al.* 2012), a emissários (Brunone 1999) ou outras condutas, e permite utilizar diferentes tipos de transdutores de pressão como por exemplo transdutores de pressão convencional e piezocerâmico (Taghvaei *et al.* 2007).

Um dos primeiros trabalhos apresentados (Brunone 1999) originou melhoramentos importantes na análise da evolução da amplitude da onda gerada (Ferrante e Brunone 2003a) e (Ferrante e Brunone, 2003b) e na respetiva aplicação em laboratório (Tang *et al.* 2000) e em contexto real (Brunone e Ferrante, 2004).

A primeira análise do sinal foi efetuada com a transformada da série de Fourier. Além dos trabalhos mencionados, a aplicação da transformada rápida de Fourier permitiu melhorar resultados (Lay-Ekuakille *et al.* 2009), tendo sido aplicada a redes de

distribuição de gás (Wan *et al.* 2012). Os resultados dos registos em dois tipos de transdutores de pressão, convencional e piezocerâmico, foram comparados (Taghvaei *et al.* 2007), tal como foi estudado o efeito do retardamento da receção de sinal no processo (Taghvaei *et al.* 2006; Hanson *et al.* 2007). Para a obtenção de espectros satisfatórios com algoritmos de transformada rápida de Fourier é necessário garantir algumas relações entre a velocidade de propagação acústica do meio, a duração dos pulsos da onda, a velocidade, o tempo de propagação e o reconhecimento da frequência (Henriques *et al.* 2006). A superação destas limitações na metodologia de localização exata de fugas foi possível com a utilização de metodologia de Padè (Dando *et al.* 2000; Main *et al.* 2000; Guo *et al.* 2001), em alternativa à utilização da transformada rápida de Fourier (Lay-Ekuakille *et al.* 2013).

O recurso a técnicas de algoritmos genéticos, em alternativa ao método de Levenberg-Marquardt (Liggett e Chen 1994), para localizar fugas em condutas e calibrar o fator de atrito ou a rugosidade interior das condutas, foi introduzido por Vítkovský *et al.* (2000). Os algoritmos genéticos, apesar de não garantirem a obtenção das soluções ótimas globais, permitem a obtenção de múltiplas boas soluções. A seleção do intervalo de tempo e dos pontos para monitorização da pressão durante o fenómeno promotor do regime variável foi determinante para o sucesso de aplicação da técnica (Vítkovský *et al.* 2003) e os erros e desvios na precisão da medição da pressão também foram analisados (Vítkovský *et al.* 2006). Do trabalho desenvolvido resultou a aplicação em laboratório da metodologia que é capaz de identificar fugas únicas ou múltiplas (Vítkovský *et al.* 2007).

Para a resolução do modelo matemático de localização de fugas e de calibração da rugosidade interior das paredes das condutas foi proposta uma modificação do método Levenberg-Marquardt com os algoritmos genéticos (Kapelán *et al.* 2003). Posteriormente, foi proposta a incorporação de informação existente e fidedigna para limitar os valores possíveis para o fator de atrito ou a rugosidade interior das condutas e contribuir para resultados finais melhores (Kapelán *et al.* 2004).

Em laboratório, Covas *et al.* (2004) observaram o comportamento de condutas em polietileno com fugas para posteriormente detalhar e modelar o comportamento viscoelástico das suas paredes e a sua contribuição para os escoamentos transitórios

(Covas *et al.* 2005). Mais tarde, as observações medidas em laboratório por Covas e Ramos (2010) foram comparadas com os valores expectáveis, obtidos com um simulador de escoamentos transitórios, tal como foi proposto por Nash e Karney, (1999). Ambos os trabalhos registaram o efeito da presença de erros introduzidos pelo modelo de simulação ou introduzidos pela falta de precisão das leituras. Cova e Ramos (2010) realçaram a importância do rigor no conhecimento do sistema em estudo, bem como a importância da manobra efetuada na válvula ser temporalmente controlada. A aplicação a redes reais foi introduzida por Misiunas *et al.* (2005, 2007). Nestas aplicações mais reais ficaram demonstradas as limitações envolvidas no processo, isto é, a necessidade de discriminação de todos os acessórios, o perigo das sobrepressões geradas, mas também a possibilidade de avaliar o nível de deterioração das condutas através das condições internas de escoamento, expressas como parâmetro do modelo de simulação (Misiunas *et al.* 2007; Misiunas 2008).

Numa tentativa de simplificar a análise foi proposto combinar o Método das Características com o simulador hidráulico gratuito EPANET (Soares e Reis 2005) e a procura de soluções com o método Levenberg-Marquardt e o método Nelder-Mead (Soares 2007).

Outros melhoramentos na análise da amplitude e frequência do escoamento transitório foram propostos (Mpesha *et al.* 2001). Na sequência destes trabalhos foi melhorada a análise do diagrama de frequência (Lee *et al.* 2005a, Lee *et al.* 2005b, Lee *et al.* 2008). Toda esta investigação permitiu que muito trabalho de laboratório tivesse sido desenvolvido neste âmbito (Al-Khomairi 2008). Mais detalhes, sobre a evolução da investigação da localização exata de fugas por análise do transiente inverso, podem ser encontradas no trabalho de Colombo (Colombo *et al.* 2009).

2.6 Referências bibliográficas

A.P.A. (2012). "Programa nacional para o uso eficiente da água - Implementação 2012 - 2020 (versão em consulta pública)". Lisboa: Ministério da Agricultura, do Mar e do Ordenamento do Território.

Adachi, S., Takahashi, S., Kurisu, H., Tadokoro, H. (2014). "Estimating area leakage in water networks based on hydraulic model and asset information". *Procedia Eng.*

89:278–285.

Adachi, S., Takahashi, S., Zhang, X., Umeki, M., Tadokoro, H. (2015). "Estimation of Area Leakage in Water Distribution Networks: A Real Case Study". *Procedia Eng.* 119:4–12.

Aksela, K., Aksela, M., Vahala, R. (2009). "Leakage detection in a real distribution network using a SOM". *Urban Water J.* 6:279–289.

Alegre, H., Coelho, S., Almeida, C., Vieira, P. (2005). "Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição". IRAR, IA L, editor. Lisboa: LNEC IRAR INAG.

Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J., Parena, R. (2004). "Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água". *Série Guia.* IWA, editor. Lisboa: LNEC IRAR.

Al-Khomairi, A. (2008). "Leak detection in long pipelines using the least squares method". *J Hydraul Res.* 46:392–401.

Almandoz, J., Cabrera, E., Arregui, F., Cobacho, R. (2005). "Leakage Assessment through Water Distribution Network Simulation". *J Water Resour Plan Manag.* 131:458–466.

Almeida, F. (2013). "Improved acoustic methods for leak detection in buried plastic water distribution pipes". PhD Thesis University of Southampton.

Alves, Z., Muranho, J., Albuquerque, T., Ferreira, A. (2014). "Water distribution network 's modeling and calibration . A case study based on scarce inventory data". *Procedia Eng.* 70:31–40.

Araujo, L., Ramos, H., Coelho, S. (2006). "Pressure control for leakage minimisation in water distribution systems management". *Water Resour Manag.* 20:133–149.

Arregui, F. (1998). "Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores". *Ing del Agua.* 5:55–66.

Azevedo, J., Oliveira, J., Pereira, B., Fernandes, F., Mota, T. (2012). "Determinação da taxa de humidade superficial de um solo granítico usando o valor da amplitude do sinal do GPR". Em: *Para desenvolver a terra - Memórias e notícias geociências no espaço*

lusófono. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Bakker, M., Schagen, K., Timmer, J. (2003). "Flow control by prediction of water demand". *J Water Supply Res Technol.* 52:417–424.

Bakker, M., Vreeburg, J., Van der Roer, M., Sperber, V. (2012). "Detecting pipe bursts by monitoring water demand". Em: *Proc Water Loss Eur 2012. Ferrara Italy May 23-25 2012.*

Beck, S., Curren, M., Sims, N., Stanway, R. (2005). "Pipeline network features and leak detection by cross- correlation analysis of reflected waves". *J Hydraul Eng.* 131:715–723.

Bhave., P. (1988). "Calibrating water distribution network models". *J Environ Eng.* 114:120–136.

Boulos, P., Karney, B., Wood, D., Lingireddy, S. (2005). "Hydraulic Transient Guidelines". *J Am Water Resour Assoc.* 97:111–124.

Brennan, M., Joseph, P., Muggleton, J., Gao, Y. (2008). "Some Recent Research Results on the use of Acoustic Methods to Detect Water Leaks in Buried Plastic water Pipes". University of Southampton.1–7.

Brunone, B., Ferrante, M. (2004). "Pressure waves as a tool for leak detection in closed conduits". *Urban Water J.* 1:145–155.

Brunone, B. (1999). "Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes". *J Water Resour Plan Manag.* 125:302–306.

Buchberger, S., Nadimpalli, G. (2004). "Leak estimation in water distribution systems by statistical analysis of flow readings". *J Water Resour Plan Manag.* 130:321–329.

Cabrera, E., Garcia-Serra, J., Iglesias P. (1995). "Modeling water distribution networks from steady flow to water hammer". Em: *Improv Effic Reliab water Distrib Syst.*

Carpentier, P., Cohen, G. (1993). "Applied mathematics in water supply network management". *Automatica.* 29:1215–1250.

Cassa, M., Van Zyl, J., Laubscher, R. (2010). "A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes". *Urban Water J.* 7:109–120.

Chyuan, H. (2007). "Leak detection and localisation in water distribution network by

- acoustic method". Bachelor of Engineering (Civil) Universiti Teknologi Malaysia.
- Colombo, A., Lee, P., Karney, B. (2009). "A selective literature review of transient-based leak detection methods". *J Hydro-environment Res.* 2:212–227.
- Covas, D., Ramos, H., Graham, N., Maksimović, Č. (2004). "Application of hydraulic transients for leak detection in water supply systems". *Water Sci Technol Water Supply.* 4:365–374.
- Covas, D., Ramos, H. (2010). "Case Studies of Leak Detection and Location in Water Pipe Systems by Inverse Transient Analysis". *J Water Resour Plan Manag.* 136:248–257.
- Covas, D., Stoianov, I., Mano, J., Ramos, H., Graham, N., Maksimovic, C. (2005). "The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients . Part II — model development , calibration and verification". *J Hydraul Res.* 43:56–70.
- Covas, D. (2008). "Gestão avançada de sistemas de abastecimento de água Parte III : Controlo de perdas de água". *Gestão e tecnologias de águas e resíduos.*
- Cruz, F., Garcia-Serra, J., Patiño, G., Martinez-Solano, J. (1998). "Metodología para la evaluación del error de medición de un parque de contadores". *Ing del Agua.* 5:55–66.
- Dando, P., Main, J., Taylor, H, Belkic, D. (2000). "Three novel high-resolution nonlinear methods for fast signal processing". *J Chem Phys.* 113:6542–6556.
- DL194/2009. (2009). "Decreto-Lei nº 194/2009 de 20 de Agosto". *Diário da República* 1ª série.:5418–5435.
- DTA-A2. (2004). "DTA A2 - Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água". Programa nacional de combate ao desperdício de água (PNCDA), Brasil Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.
- ERSAR. (2013a). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2012 Volume 1 Caracterização geral do setor". Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).
- ERSAR. (2013b). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2013 Volume 4 Controlo da qualidade da água para consumo humano". Lisboa. Entidade reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

ERSAR. (2013c). "Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores - 2ª geração do sistema de avaliação". Série Guia. Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

ERSAR. (2014a). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2013 Volume 1 Caracterização geral do setor". Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

ERSAR. (2014b). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2013 Volume 3 Avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores". Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

ERSAR. (2015). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2015 Volume 1 Caracterização do setor de águas e resíduos (dados provisórios)". Lisboa. Entidade reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

Fantozzi, M., Calza, F., Lambert, A. (2009). "Experience and results achieved in introducing District Metered Areas (DMA) and Pressure Management Areas (PMA) at Enia utility (Italy)". Em: IWA Int Spec Conf "Water Loss 2009. Cape Town.

Farley, M., Hamilton, S. (2008). "Non-intrusive leak detection in large diameter, low-pressure non-metallic pipes : are we close to finding the perfect solution?" Em: IWA Congr. Vienna, Austria; p. 1–9.

Farley, M., Trow, S. (2003). "Losses in water distribution networks and control - A practitioner's guide to assessment, monitoring and control". Cornwall, UK: IWA.

Farley, M., Wyeth, G. Ghazabi, Z., Istandar A., Singh S. (2008). "The manager's non-revenue water handbook - A guide to understanding water losses". Dijk N, Raksakulthai V, Kirkwood E, editores. Ranhill Utilities Berhad and USAID.

Farley, M. (2001). "Leakage management and control - A best practice training manual". Geneva, Switzerland: World Health Organization.

Ferrante, M., Brunone, B. (2003a). "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 1. Harmonic analysis". *Adv Water Resour.* 26:95–105.

Ferrante, M., Brunone, B. (2003b). "Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests. 2. Wavelet analysis". *Adv Water Resour.* 26:107–116.

Filipe, S., Morgado, P. (2011). "A aplicação do GPR como metodologia de registo e salvaguarda patrimonial : casos práticos da sua aplicação na Universidade de Coimbra". Em: CIAUD-FAUTL, editor. III Int Semin 31 Janeiro Conserv Restor Rehabil Surv Methodol. Lisboa.

Gertler, J., Romera, J., Puig, V., Quevedo, J. (2010). "Leak detection and isolation in water distribution networks using principal component analysis and structured residuals". Em: 2010 Conf Control Fault-Tolerant Syst. Nice, France: IEEE; p. 191–196.

Giustolisi, O., Laucelli, D., Berardi, L., Savić, D. (2012). "A computationally efficient modeling method for large size water network analysis". J Hydraul Eng. 138:313–326.

Giustolisi, O., Savic, D., Kapelan, Z. (2008). "Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks". J Hydraul Eng. 134:626–635.

Gomes, R., Sá Marques, A., Sousa, J. (2011). "Estimation of the benefits yielded by pressure management in water distribution systems". Urban Water J. 8:65–77.

Gomes, R., Sá Marques, A., Sousa, J. (2013). "District metered areas design under different decision makers' options: cost analysis". Water Resour Manag. 27:4527–4543.

Gomes, R., Sá Marques, A., Sousa, J. (2010). "Estimativa dos custos / benefícios relacionados com a concepção de zonas de medição e controlo em sistemas de distribuição de água". Em: 14^o ENASB/SILUBESA. 26 a 29 de Outubro, Porto: APESB; p. 1–16.

Gomes, R., Sousa, J., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Different design criteria for district metered areas in water distribution networks". Procedia Eng. 119:1221–1230.

Gomes, R. (2011). "Modelação matemática como ferramenta de gestão e exploração de sistemas de distribuição de água". Tese de Doutoramento, Universidade de Coimbra.

Greyvenstein, B., Van Zyl, J. (2007). "An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes". J Water Supply: Res Technol - AQUA. 56:117–124.

Guo, W., Li, W., Huang, Y. (2001). "Computation of resonant frequencies and quality factors of cavities by FDTD technique and Padé". IEEE Microw Wirel components

Lett. 11:223–225.

Hanson, D., Randall, B., Brown, G., Emslie, R. (2007). "Locating leaks in underground water pipes using the complex cepstrum". Em: 5th Australas Congr Appl Mech. Brisbane, Australia.

Hao, T., Rogers, C., Metje, N., Chapman, D., Muggleton, J., Foo, K., Wang, P., Pennock, S., Atkins, P., Swingler, S., Parker, J., Costello, S., Burrow, M., Anspach, J., Armitage, R., Cohn, A., Goddard, K., Lewin, P., Orlando, G., Redfern, M., Royal, A., Saul, A. (2012). "Condition assessment of the buried utility service infrastructure". Tunn Undergr Sp Technol. 28:331–344.

Henriques, J., Palma, J., Ribeiro, Á. (2006). "Guia técnico 9 - Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas". Série Guia. Lisboa. Série GUIAS TÉCNICOS: LNEC IRAR.

Hunaidi, O., Chu, W. (1999). "Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes". Appl Acoust. 58:235–254.

Hunaidi, O., Giamou, P. (1998). "Ground-penetrating radar for detection of leaks in buried plastic water distribution pipes". Em: 7th Int Conf Ground-Penetrating Radar. Lawrence, Kansas, USA, 27-30 Maio; p. 27–30.

Hunaidi, O., Wang, A., Bracken, M., Gambino T., Fricke C. (2004). "Acoustic methods for locating leaks in municipal water pipe networks". Em: Int Conf Water Demand Manag. Mar Morto, Jordania, 30 Maio- 3 Junho; p. 1–14.

Hunaidi, O. (2012). "Acoustic leak detection survey strategies for water distribution pipes". NRC Constr Technol Updat. 79:1–5.

Jalalkamali, A, Eftekhari, M. (2012). "Estimating water losses in water distribution networks using a hybrid of GA and neuro-fuzzy models". World Appl Sci J. 18:528–537.

Kapelan, Z., Savic, D., Walters, G. (2004). "Incorporation of prior information on parameters in inverse transient analysis for leak detection and roughness calibration". Urban Water J. 1:129–143.

Kapelan, Z., Savic D., Walters, G. (2003). "A hybrid inverse transient model for leakage

- detection and roughness calibration in pipe networks". *J Hydraul Res.* 41:481–492.
- Lambert, A., Hirner, W. (2000). "Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures". *Int Water Assoc.* October:1–13.
- Lambert, A., Morrison, J. (1996). "Recent developments in application of «bursts and background estimates» concepts for leakage management". *J CIWEN.* 10:100–104.
- Lambert, A. (1994). "Accounting for losses: The bursts and background concept". *Water Environ J.* 8:205–214.
- Lambert, A. (2000). "What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?" Em: *Proc IWA Conf Syst Approach to Leakage Control Water Distrib Syst Manag.* Brno, Czech Republic; p. 1–8.
- Lambert, A., Brown, T., Takizawa, M., Weimer, D. (1999). "A review of performance indicators for real losses from water supply systems". *J water supply Res Technol - AQUA.* 48:227–237.
- Laven, K., Lambert, A. (2012) "What do we know about real losses on transmission mains?". *IWA Water Loss*
- Lay-Ekuakille, A., Griffio, G., Vergallo, P. (2013). "Robust algorithm based on decimated Padè approximant technique for processing sensor data in leak detection in waterworks". *IET Sci Meas Technol.* 7:256–264.
- Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G., Trotta, A. (2009). "Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application". *Meas J Int Meas Confed.* 42:358–367.
- Lee, P., Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2005). "Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks". *J Hydraul Eng.* 131:596–604.
- Lee, P., Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2005). "Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study". *J Sound Vib.* 284:1051–1073.
- Lee, P., Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2008). "Discrete blockage detection in pipelines using the frequency response diagram: numerical study". *J Hydraul Eng.* 134:658–663.

Li, R., Huang, H., Xin, K., Tao, T. (2015). "A review of methods for burst/leakage detection and location in water distribution systems". *Water Sci Technol Water Supply*. 15:429–441.

Liggett, J., Chen, L. (1994). "Inverse transient analysis in pipe networks". *J Hydraul Eng*. 120:934–955.

Liu, Z., Kleiner, Y. (2013). "State of the art review of inspection technologies for condition assessment of water pipes. Measurement". 46:1–15.

Main, J., Dando, P., Belkic, D., Taylor, H. (2000). "Decimation and harmonic inversion of periodic orbit signals". *J Phys A Math Gen*. 33:1247–1263.

Malheiro, R., Poças-Martins, J., Lacerda, F. (2011). "Controlo de perdas aparentes em sistemas de abastecimento com utilização de telecontagem". Em: 6as Jornadas Hidráulica, Recur Hídricos e Ambient. FEUP.

Mandal, P. (2013). "Gas leak detection in pipelines & repairing system of Titas Gas". *J Appl Eng*. 1:6–17.

Marques, R. (2011). "A regulação dos serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais - uma perspectiva internacional". Lisboa. Entidade reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), Centro de Sistemas Urbanos e Regionais (CESUR).

Martins, M. (2007). "Regulação económica no sector das águas - promoção da concorrência e sustentabilidade tarifária". Dissertação de Mestrado, FEUC - Universidade de Coimbra.

Mashford, J., Silva, D., Burn, S., Marney, D. (2012). "Leak detection in simulated water pipe networks using svm". *Appl Artif Intell*. 26:429–444.

McKenzie, R., Bhagwan, J. (1994). "Introduction to WRC Tools to Manage Non-Revenue Water". *Leakage Management*. 1–12.

Mergelas, B., Henrich, G. (2005). "Leak locating method for pre-commissioned transmission pipelines : North American case studies". Em: *Leakage 2005*. p. 1–7.

Misiunas, D., Lambert, M., Simpson, A., Olsson, G. (2005). "Burst detection and location in water distribution networks". *Water Sci Technol Water Supply*. 5:71–80.

Misiunas, D., Lambert, M., Simpson, A., Olsson, G. (2007). "Assessing water mains condition using hydraulic transients". *Proc ICE - Water Manag.* 160:89–94.

Misiunas, D. (2005). "Failure monitoring and asset condition assessment in water supply systems". PhD Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University.

Misiunas, D. (2008). "Failure monitoring and asset condition assessment in water supply systems". Em: 7th Int Conf Environ Eng. Vilnius, Lituania; p. 648–655.

Morrison, J., Tooms, S., Rogers, D. (2007). "District metered areas - guidance notes. Version 1". UK: International Water Association (IWA).

Mounce, S., Machell, J. (2006). "Burst detection using hydraulic data from water distribution systems with artificial neural networks". *Urban Water J.* 3:21–31.

Mounce, S., Khan, A., Wood, A., Day, A., Widdop, P., Machell, J. (2003). "Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system". *Inf Fusion.* 4:217–229.

Mounce, S., Mounce, R., Jackson, T., Austin, J., Boxall, J. (2014). "Pattern matching and associative artificial neural networks for water distribution system time series data analysis". *J Hydroinformatics.* 3:617–632.

Mpesha, W., Gassman, S., Chaudhry, M. (2001). "Leak detection in pipes by frequency response method". *J Hydraul Eng.* 127:134–147.

MSSC. 1992. "Ground penetrating radar". J.A.Pilon, editor. Ottawa, Canada: Minister of Supply and Services Canada.

Mukherjee, J., Narasimhan, S. (1996). "Leak detection in networks of pipelines by the generalized likelihood ratio method". *Ind Eng Chem Res.* 35:1886–1893.

Mukhopadhyay, S., Srivastava G. (2000). "Characterisation of metal loss defects from magnetic flux leakage signals with discrete wavelet transform". *NDT&E Int.* 33:57–65.

Di Nardo, A., Di Natale, M. (2011). "A heuristic design support methodology based on graph theory for district metering of water supply networks". *Eng Optim.* 43:193–211.

Nash, G., Karney, B. (1999). "Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems". *J Hydraul Eng.* 125:761–764.

Nasirian, A., Maghrebi, M., Yazdani, S. (2013). "Leakage Detection in Water Distribution Network Based on a New Heuristic Genetic Algorithm Model". *J Water Resour Prot.* 05:294–303.

Nazif, S., Karamouz, M., Tabesh, M., Moridi, A. (2009). "Pressure Management Model for Urban Water Distribution Networks". *Water Resour Manag.* 24:437–458.

Nicolini, M., Giacomello, C., Deb, K. (2011). "Calibration and optimal leakage management for a real water distribution network". *J Water Resour Plan Manag.* 137:134–143.

Nicolini, M., Patriarca, A. (2011). "Model calibration and system simulation from real time monitoring of water distribution networks". Em: *3rd Int Conf Comput Res Dev. Ieee*; p. 51–55.

Ormsbee, L., Wood, D. (1985). "Explicit pipe network calibration". *J Water Resour Plan Manag.* 112:166–182.

Paixão, M., Prado, R., Diogo, L. (2006). "Análise do emprego do GPR para estimar o teor de umidade do solo a partir de um estudo na cidade de São Paulo". *Rev Bras Geofísica.* 24:189–198.

Palau, C., Arregui, F., Carlos, M. (2011). "Burst detection in water networks using principal component analysis". *J Water Resour Plan Manag.* 138:47–55.

Paola, F., Giugni, M. (2012). "Leakages and pressure relation: an experimental research". *Drink Water Eng Sci.* 5:59–65.

Pearson, D., Trow, S. (2005). "Calculating the economic levels of leakage". Em: *Leakage 2005 Conf Proc.* p. 1–16.

Pilcher, R., Hamilton, S., Chapman, H., Field, D., Ristovski, B., Stapely, S. (2007). "Leak location and repair guidance notes". IWA Water Loss Task Force.

Pilcher, R. (2003). "Leak detection practices and techniques: a practical approach". *Water21.* 5.6:44–45.

Pinto, P. (2011). "Contribuições teóricas e experimentais para controlo de perdas de água em redes de distribuição O caso do Concelho de Valongo". *Dissertação em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica, Universidade do Porto.*

PMSS. (2007). "Pesquisa e combate a vazamentos não visíveis - Volume 3". Guias práticos - Técnicas de operação em sistemas de abastecimento de água: Programa de modernização do setor saneamento (PMSS), Brasil Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.

Poças-Martins, J. (2013). "Os custos da água e a sua recuperação através das tarifas". Em: VIII Congr Ibérico sobre Planeam e Gestão da Água. p. 153–161.

Pothof, I., Karney, B. (2013). "Guidelines for transient analysis in water transmission and distribution systems". Em: Ostfeld DA, editor. Water Supply Syst Anal - Sel Top. p. 1–21.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D., Papadimitriou, C. (2003). "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework". Probabilistic Eng Mech. 18:315–327.

Pudar, R., Liggett, J. (1992). "Leaks in pipe networks". J Hydraul Eng. 118:1031–1046.

PureTechnologies. (2009). "SmartBall - Autonomous In-line Leak Detection and Condition Assessment".

PureTechnologies. (2010). "Pipeline technology roadshow SmartBall and Sahara complementary tools".

Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D., Koppel, T. (2010). "A review of methods for leakage management in pipe networks". Urban Water J. 7:25–45.

Puust, R. (2007). "Probabilistic leak detection in pipe networks using the SCEM-UA algorithm". Tese de Doutorado, Tallinn University of Technology.

Ratcliffe, B. (1986). "The performance and selection of pressure reducing valves - Part 1". Swindon, UK.

Reddy, P., Sridharan, K., Rao, P. (1996). "WLS method for parameter estimation in water distribution network". J Water Resour Plan Manag. 122:157–164.

Renaud, E., Khedhaouiria, D., Clauzier, M., Nafi, A., Wittner, C., Werey, C. (2012). "Réduction des fuites dans les réseaux d' alimentation en eau potable Systèmes d' indicateurs et méthodologies pour la définition, la conduite et l' évaluation des politiques de lutte contre les fuites dans les réseaux d' eau potable Fiches pratiques".

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: SEREA - XI Seminário Ibero-Americano sobre Sist Abast e Dren. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A., Simões, NE. (2015). "Locating leaks with TrustRank algorithm support". *Water*. 7:1378–1401.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". *Water Util J*. 4:3–12.

Ridley, W. (1980). "Leakage control policy and practice". Technical. London, UK: Department of the Environment National Water Council.

Righetto, A. (2001). "Calibração de modelo hidráulico de rede de distribuição de água". *Rev Bras Recur Hídricos*. 6:33–44.

Rizzo, P. (2010). "Water and wastewater pipe nondestructive evaluation and health monitoring : a review". *Adv Civ Eng*. 2010:1–13.

Romano, M., Kapelan, Z., Savic, D. (2014). "Automated detection of pipe bursts and other events". *J Water Resour Plan Manag*. 140:457–467.

Rossman, L. (2000). "Epanet 2 users manual". Agency USEP, editor. Cincinnati, OH.

Rougier, J. (2005). "Probabilistic leak detection in pipelines using the mass imbalance approach". *J Hydraul Res*. 43:556–566.

Rouse, M. (1983). "Dealing with leakage". Em: *Public Water Supply Leakage Wastage Control*. Singapore, 12 a 17 Dezembro.

Sá Marques, A., Sousa, J. (2011). "Hidráulica Urbana - sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais. 3ª Edição". Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.

Sage, P., Croxton, N., Wu, Z. (2011). "Recent developments in leak hotspots in leak detection using network model optimisation". Em: *Urban Water Manag Challenges Oppor CCWI 2011*. Exeter, UK; p. 509–514.

Savic, D, Walters, G. (1995). "Genetic algorithm techniques for calibrating network

models". Report N^o95/12.

Savic, D., Walters, G. (1994). "An evolution program for pressure regulation in water distribution networks". Exeter, UK.

Shamir, U., Howard, C. 1966. "Engineering Analysis of Water-Distribution Systems".

Soares, A., Reis, L. (2005). "Modelo híbrido MOC-EPANET de sistemas de distribuição de água – PARTE 2: simulações numéricas". *Pesqui e Tecnol Minerva*. 5:287–295.

Soares, A. (2007). "Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório". Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Sousa, A. (2011). "Avaliação de erros de sub-contagem em contadores de água domésticos". Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". *Procedia Eng*. 119:63–71.

Sousa, J. (2006). "Decision Aid Models for the Design and the Operation of Water Supply Systems". PhD Thesis, Coimbra University.

Tabesh, M., Yekta, H. (2005). "A software tool for non-revenue water calculations in urban water systems in conjunction with hydraulic and GIS models". *Proc IWA Spec Conf Leakage 2005*. 1–11.

Tabesh, M., Yekta, A., Burrows, R. (2009). "An integrated model to evaluate losses in water distribution systems". *Water Resour Manag*. 23:477–492.

Taghvaei, M., Beck, S., Staszewski, W. (2006). "Leak detection in pipelines using cepstrum analysis". *Meas Sci Technol* 17:367–372.

Taghvaei, M., Beck, S., Staszewski, W. (2007). "Leak detection in pipeline networks using low-profile piezoceramic transducers". *Struct. Control Health Monit*. 14:1063–1082.

Tang, K., Brunone, B., Karney, B., Rossetti, A. (2000). "Role and Characterization of

Leaks under Transient Conditions". Build Partnerships. 1–10.

Thornton, J., Lambert, A. (2005). "Progress in practical prediction of pressure : leakage, pressure : burst frequency and pressure : consumption relationships". Em: Leakage 2005, Spec Conf Proc. 12-14 September, Halifax (Canada). IWA; p. 1–10.

Ulanicki, B., Abdelmeguid, H., Bounds, P., Patel, R. (2008). "Pressure control in district metering areas with boundary and internal pressure reducing valves". Em: 10th Int Water Distrib Syst Anal Conf WDSA. The Kruger National Park, South Africa; p. 17–20.

Viana, R. (2014). "Inspeção e reparação de sistemas de tubagens: desenvolvimento de dispositivos acessíveis". Universidade do Minho Departamento de Engenharia Mecânica.

Vítkovský, J., Simpson, A., Lambert, M. (2000). "Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms". J Water Resour Plan Manag. 126:262–265.

Vítkovský, J., Stephens, M., Bergant, A., Simpson, A., Lambert, M. (2006). "Numerical error in weighting function-based unsteady friction models for pipe transients". J Hydraul Eng. 132:709–721.

Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2007). "Experimental observation and analysis of inverse transients for pipeline leak detection". J Water Resour Plan Manag. 133:519–530.

Vítkovský, J., Liggett, J., Simpson, A., Lambert, M. (2003). "Optimal measurement site locations for inverse transient analysis in pipe networks". J Water Resour Plan Manag. 129:480–492.

Walski, T., DeFrank, N., Voglino, T., Wood, R., Whitman, B. (2008). "Determining the accuracy of automated calibration of pipe network models". Water Distrib Syst Anal Symp 2006.:1–18.

Walski, T. (1983). "Technique for calibrating network models". J Water Resour Plan Manag. 109:360–371.

Wan, J., Yu, Y., Wu, Y., Feng, R., Yu, N. (2012). "Hierarchical leak detection and localization method in natural gas pipeline monitoring sensor networks". Sensors

(Basel). 12:189–214.

Wu, Z., Sage, P., Turtle, D. (2010). "Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system". *J Water Resour Plan Manag.* 136:116–128.

Wu, Z., Sage, P. (2006). "Water loss detection via genetic algorithm optimization-based model calibration". Em: *ASCE 8th Annu Int Symposium Water Distrib Syst Anal.* Ohio, Agosto 27-30; p. 1–11.

Wu, Z., Walski, T., Mankowski, R. (2002). "Calibrating water distribution model via genetic algorithms". *Proc AWWA*:1–10.

Wu, Z. (2008). "Innovative optimization model for water distribution leakage detection". *Bentley Methods Solut Cent.*:1–8.

Xia, L., Guo-jin, L. (2010). "Leak detection of municipal water supply network based on the cluster-analysis and fuzzy pattern recognition". Em: *Int Conf E-Product E-Service E-Entertainment.* IEEE; p. 7–9.

Xu, D-L., Liu, J., Yang, J., Liu, G., Wang, J., Jenkinson, I., Ren, J. (2007). "Inference and learning methodology of belief-rule-based expert system for pipeline leak detection". *Expert Syst Appl.* 32:103–113.

Yazbeck, Jr. V., Souza, R., Polizer, M., Steffen, J. (2005). "Minimização de perdas físicas em redes de distribuição de água com a utilização de algoritmos genéticos". Em: *23º Congr Bras Eng Sanitária e Ambient.* 18 a 23 Setembro Campo Grande/MS Brasil: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; p. 1–18.

3 Bases da modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas em Redes de Distribuição de Água

3.1 Enquadramento

A localização aproximada não convencional baseada na observação do caudal e da pressão, que recorre à simulação estática do comportamento hidráulico da rede com a presença das fugas, será descrita no presente capítulo. O modelo matemático, denominado *Physics based*, necessita da descrição física da RDA e da recolha de observações em pontos de amostragem. Com o objetivo de descrever o mencionado modelo matemático, o capítulo será dividido em duas grandes partes autónomas.

A primeira parte define o problema a otimizar. Para tal, descreve os principais modelos de otimização na literatura incluindo a definição geral das equações representativas do comportamento hidráulico da RDA e as alternativas para a modelação matemática das fugas e processos de integração no modelo de otimização.

Na literatura há valores considerados admissíveis para aceitar que o modelo matemático representa o sistema real através da comparação entre valores estimados e valores observados na rede. A observação destes valores ocorre nos nós de monitorização.

A segunda parte descreve os conceitos fundamentais para a monitorização das RDA neste âmbito. Deste modo, a segunda parte começa por descrever onde armazenar a

informação proveniente da monitorização da RDA. Depois apresenta-se os instrumentos mais comuns para monitorizar as variáveis de estado relevantes para o problema. Para finalizar apresentam-se critérios para escolher onde recolher a informação e apresenta-se para o efeito algumas metodologias da bibliografia.

3.2 Modelo de otimização

Na literatura da especialidade, a modelação matemática do comportamento hidráulico de uma RDA é apresentada como um problema direto, isto é, caracterizada a geometria e topologia da RDA (condições de fronteira, válvulas ativas, comprimento das condutas, diâmetros, rugosidades), sabendo as solicitações nos nós (a causa), existe um conjunto de equações (modelo matemático de simulação) que permite estimar as respetivas cotas piezométricas nos nós¹ da rede (o efeito). Cada cota piezométrica é a soma da cota topográfica com a pressão naquele nó. Este problema direto é determinado, por se dispor de igual número de incógnitas e de equações independentes (Lansey 2000; Ormsbee e Lingireddy 2000; Izquierdo *et al.* 2004).

O problema da localização aproximada de fugas em RDA com técnicas não convencionais é um problema inverso. Em alguns nós da RDA, os efeitos do processo são conhecidos (a pressão é observável) e assume-se que a cota topográfica é conhecida, pelo que a cota piezométrica é conhecida através da soma das duas grandezas. A RDA está caracterizada com uma topologia, geometria e consumo. As solicitações em cada nó são as incógnitas do problema, e decorrem da acumulação dos consumos com as fugas existentes.

O valor da totalidade dos consumos do aglomerado apresenta elevada variabilidade durante as 24 horas de um dia. Simultaneamente, o consumo é uma variável estocástica devido à impossibilidade de identificar cada consumo isoladamente. Porém, o consumo apresenta menor variabilidade no período noturno, observando-se aí o seu valor mínimo, o que indicia consumos individuais e nos nós mínimos e conseqüentemente mais estáveis.

¹ Despreza-se a altura cinética porque tem um valor muito reduzido quando comparado com a soma da cota topográfica e a altura piezométrica.

Existindo um medidor de caudal à saída de reservatório ou na entrada da ZMC, em cada momento o caudal total fornecido está registado. Visto também estar registado o volume acumulado dos consumos nos contadores domésticos, é possível determinar o caudal consumido no intervalo de tempo em estudo. A diferença entre estes valores (fornecidos e consumidos) identifica o valor total das perdas.

A totalidade das fugas existentes numa RDA tem uma distribuição espacial desconhecida, isto é, o número de frações, respetivo valor parcelar e posicionamento é desconhecido.

Esta tese procura dar uma resposta para a constatação de valores de pressão observados. Neste sentido, procura estimar, aproximadamente, quanto é perdido, e onde se encontram as fugas na RDA. A resolução deste problema corresponde à resolução de um problema inverso. Mas será que a solução existe e será uma solução única?

Um problema inverso diz-se determinado, ou seja apresenta uma solução única, se as equações disponíveis são independentes e o número de equações for igual ao número de incógnitas do problema. Nestas condições o problema é bem condicionado (Pudar e Liggett 1992; Luvizotto Jr. 1998).

O problema inverso é um problema mal condicionado quando não há garantia da unicidade da solução, podendo apresentar soluções múltiplas para o mesmo problema, ou soluções continuamente dependentes das condições iniciais e de contorno. Na generalidade dos problemas, a indeterminação do problema inverso é causada ou por ser subdeterminado (possui menos equações que incógnitas) ou por ser sobredeterminado (possui mais equações que incógnitas, mas algumas incógnitas são indeterminadas).

Os métodos numéricos para a resolução de problemas inversos são ou métodos inversos puros ou métodos de otimização.

Na sua apresentação geral, os problemas de otimização são compostos por uma função objetivo, as variáveis do problema, as restrições e o espaço de solução (Floudas 1995). Quando os problemas de otimização são aplicados à resolução de problemas inversos, a função objetivo avalia a relação entre os valores estimados com o modelo de simulação e os valores observados. Neste contexto, a procura de solução do problema inverso é transferida para a procura da solução que minimiza a função objetivo, calculada com valores observados e com estimativas obtidas com o modelo de simulação.

Nesta seção descreve-se o problema inverso para a localização aproximada das fugas na RDA com a utilização de um problema de otimização. Para o efeito descrevem-se funções objetivo utilizadas em diferentes trabalhos, as variáveis do problema, as restrições e o espaço de solução. O problema de otimização é complexo e não linear. Por ser geralmente desconhecido o número de incógnitas do problema (número de fugas), o problema é mal condicionado por desconhecimento da relação entre o número de equações e o número de incógnitas.

3.2.1 Função objetivo

Os problemas de otimização são problemas de maximização ou de minimização de funções num domínio, obedecendo a um conjunto de restrições. Os problemas de otimização no âmbito das RDA são complexos, multimodais, com variáveis discretas (Lin *et al.* 2007) e/ou contínuas. A definição do problema de otimização auxilia a abordagem científica e é muito útil na tomada de decisão técnica (Coelho e Andrade-Campos 2014).

Na presente tese, o problema de otimização para a localização aproximada de fugas é apresentado como um problema de minimização da função objetivo. Neste problema, o resultado teórico associado às soluções ótimas da função objetivo é zero. Não obstante o resultado ser conhecido, vários investigadores apresentam diferentes expressões para o cálculo da função objetivo. Na bibliografia da especialidade, estas funções objetivo são elaboradas tanto com a variável de estado cota piezométrica como com o caudal.

O primeiro modelo de otimização no âmbito da localização aproximada de fugas em RDA (Pudar e Liggett 1992) propunha a utilização da função objetivo elaborada exclusivamente com cotas piezométricas:

$$\text{Min } F = \sum_{j=1}^{NPO} \left(\frac{\left(\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_j^{\text{Observado}} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_j^{\text{Estimado}} \right)^2}{\sigma_j} \right) \quad 3.1$$

onde:

$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Observado}$ representa a cota piezométrica observada no nó j ;

$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Estimado}$ representa a cota piezométrica estimada para o nó j ;

σ_j representa o desvio padrão ou desvio da medição para a leitura no nó j ;

NPO representa o número de nós monitorizados.

O trabalho de Vítkovský *et al.* (2000) utiliza a equação 3.2 para calibrar a rugosidade das paredes das condutas e localizar as fugas na RDA:

$$Max F = - \sum_{j=1}^{NPO} \left| \left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_j^{Observado} \right| \quad 3.2$$

onde as variáveis apresentadas tomam o mesmo significado que na expressão 3.1.

Para o efeito, monitoriza um fenómeno de transiente provocado pela variação no caudal saído por um dos nós. Na expressão da função objetivo procura-se maximizar um número negativo e há utilização exclusiva de cotas piezométricas. O método para a resolução do modelo de otimização não foi o método de Levenberg-Marquardt (Liggett e Chen 1994) mas os algoritmos genéticos. Ambos os métodos de resolução não garantem a convergência para a solução ótima global, mas os algoritmos genéticos obtêm soluções que são independentes da solução inicial do problema.

O trabalho de Soares (2003) introduz as seguintes duas funções objetivo, associando as cotas piezométricas e o caudal no modelo de otimização para a localização aproximada de fugas, na análise em regime variável:

Min F , tal que :

$$F = \sum_{t=1}^{NCO} \left\{ \sum_{j=1}^{NPO_t} \omega_j^P \frac{\left(\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Observado} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{NPO_t} \frac{P_{i,t}^{Observado}}{NPO_t} \right)^2} + \sum_{j=1}^{NQO_t} \omega_j^Q \frac{\left((Q)_{j,t}^{Estimado} - (Q)_{j,t}^{Observado} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{NQO_t} \frac{(Q)_{i,t}^{Observado}}{NQO_t} \right)^2} \right\} \quad 3.3$$

onde:

NCO representa o número de cenários de consumo observados;

NPO_t representa o número de nós monitorizados no instante t ;

NQO_t representa o número de condutas monitorizadas no instante t ;

ω_j^P representa o peso atribuído às observações da pressão no instante j ;

ω_j^Q representa o peso atribuído às observações do caudal no instante j ;

$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Observado}$ representa a cota piezométrica observada no nó j no instante t ;

$\left(z + \frac{P}{\gamma}\right)_{j,t}^{Estimado}$ representa a cota piezométrica estimada para o nó j no instante t ;

$P_{i,t}^{Observado}$ representa a pressão observada no nó i no instante t ;

$Q_{i,t}^{Observado}$ representa o caudal observado na conduta i no instante t ;

$Q_{i,t}^{Estimado}$ representa o caudal estimado na conduta i no instante t .

Com as variáveis anteriormente apresentadas, a outra função objetivo utilizada é:

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^{NCO} \left\{ \sum_{j=1}^{NPO_t} \left(\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Observado} \right)^2 + \sum_{j=1}^{NQO_t} \left((Q)_{j,t}^{Estimado} - (Q)_{j,t}^{Observado} \right)^2 \right\} \quad 3.4$$

Na continuação da sua investigação, na simulação dinâmica do comportamento hidráulico em regime variável, Soares (2007) atualiza a expressão de cálculo e propõe uma expressão dependente exclusivamente da cota piezométrica, com as variáveis anteriormente apresentadas:

$$Min \quad F = \sum_{t=1}^{NCO} \left\{ \frac{\sum_{j=1}^{NPO_t} \left(\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Observado} \right)^2}{\left(\sum_{i=1}^{NPO_t} \frac{\left(\frac{P^{Observado}}{\gamma_{i,t}} \right)}{NPO_t} \right)^2} \right\} \quad 3.5$$

onde:

$\frac{P^{Observado}}{\gamma_{i,t}}$ representa a altura piezométrica observada no nó i no instante t .

Wu e Walski (2005) e posteriormente Wu (2009) reconheceram a importância da definição da função objetivo no decorrer da resolução do modelo de otimização, tanto para a calibração da rugosidade das paredes internas das condutas como para a localização aproximada de fugas de modo não convencional. Ambos reconheceram a necessidade de flexibilizar o modelo para representar os diferentes cenários operacionais sob várias solicitações. A proposta apresentada para dinamizar a pesquisa de soluções introduz três funções objetivo, todas elas com medição de cotas piezométricas e caudais. Este conjunto de funções objetivo (equações 3.6, 3.7 e 3.8) obriga à seleção de condutas para monitorizar o caudal, de nós para monitorizar a cota piezométrica e requer coeficientes de ponderação para equilibrar o contributo das parcelas referentes à cota piezométrica e ao caudal. A primeira alternativa para a definição da função objetivo utiliza a expressão 3.6 e efetua a ponderação da minimização da soma dos quadrados das diferenças relativas entre valores estimados e valores observados:

$$Min \quad F = \sum_{t=1}^{NCO} \frac{\sum_{j=1}^{NPO_t} w_j \left(\frac{\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Observado}}{H_{pm,t}} \right)^2 + \sum_{i=1}^{NQO_t} w_i \left(\frac{Q_{i,t}^{Estimado} - Q_{i,t}^{Observado}}{Q_{pm,t}} \right)^2}{NPO_t + NQO_t} \quad 3.6$$

onde:

$H_{pm,t}$ representa um coeficiente específico definido pelo utilizador para conversão da diferença entre as cotas piezométricas num valor adimensional;

$Q_{pm,t}$ representa um coeficiente específico definido pelo utilizador para conversão da diferença entre os caudais num valor adimensional;

$w_j = w \left(\frac{\Delta H_j^{Observado}}{\sum \Delta H_j^{Observado}} \right)$ representa um fator de ponderação normalizado da perda de carga observada desde o reservatório até ao nó j , $\Delta H_j^{Observado}$;

$w_i = w \left(\frac{Q_i^{Observado}}{\sum Q_i^{Observado}} \right)$ representa um fator de ponderação normalizado do caudal observado;

$w()$ representa uma função constante, linear, quadrática ou logarítmica.

Com recurso às variáveis anteriormente apresentadas, a segunda alternativa para a definição da função objetivo (3.7) expressa a ponderação da minimização da soma dos valores absolutos das diferenças relativas:

$$\text{Min } F = \sum_{t=1}^{NCO} \frac{\sum_{j=1}^{NPO_t} w_j \left| \frac{\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Observado}}{H_{pm,t}} \right| + \sum_{i=1}^{NQO_t} w_i \left| \frac{Q_{i,t}^{Estimado} - Q_{i,t}^{Observado}}{Q_{pm,t}} \right|}{NPO_t + NQO_t} \quad 3.7$$

Ainda com as mesmas variáveis, a terceira expressão dá relevância à minimização do máximo valor absoluto das diferenças relativas (3.8):

$$\text{Min } F = \arg_{t,i,j} \max \left\{ \left| \frac{\left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Estimado} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_{j,t}^{Observado}}{H_{pm,t}} \right|, \left| \frac{Q_{i,t}^{Estimado} - Q_{i,t}^{Observado}}{Q_{pm,t}} \right| \right\} \quad 3.8$$

onde as variáveis continuam a ter as designações já mencionadas.

O trabalho de Ribeiro *et al.* (2012) analisa a qualidade das soluções obtidas com diferentes funções objetivo, bem como o tempo de cálculo necessário à sua obtenção. Deste trabalho, os autores concluíram que se obtém uma boa combinação entre a qualidade dos resultados obtidos e o esforço computacional com a função objetivo

representada na expressão 3.9, que se assemelha à função objetivo proposta por Savic e Walters (1995) e por Vítkovský *et al.* (2000):

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^{NPO} \left| \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_i^{\text{Estimado}} - \left(z + \frac{P}{\gamma} \right)_i^{\text{Observado}} \right| \quad 3.9$$

3.2.2 Restrições do modelo de otimização

No presente modelo de otimização, as restrições do modelo de otimização são as equações utilizadas para estimar o comportamento hidráulico da RDA recorrendo à simulação estática. O processo em análise (escoamento sob pressão na RDA) denomina-se sistema. Designa-se modelo do sistema o conjunto de equações matemáticas que traduzem as características, as leis físicas e a respetiva resolução usando um método numérico. A simulação hidráulica utiliza um computador para estimar o comportamento da RDA em regime permanente perante uma solicitação específica. O resultado do modelo de simulação hidráulica descreve o comportamento da RDA. Neste sentido, os modelos de simulação do comportamento hidráulico das RDA são ferramentas versáteis e robustas para auxiliar a análise do seu funcionamento sob diferentes condições. A fácil manipulação é uma grande vantagem, o que viabiliza a alteração do nível de complexidade ou do nível de simplificação da RDA. O modelo matemático é autónomo do funcionamento do sistema real e as soluções apresentadas são dependentes do detalhe na definição do mesmo.

Para os efeitos supramencionados, a rede é desagregada em troços e nós. Um troço da RDA é um conjunto de elementos que liga dois pontos, com manutenção das características de material, geometria e caudal ao longo de todo o seu comprimento. Um troço representa uma conduta, um acessório ou um conjunto dos mesmos. A constância do troço permite caracterizar o seu comportamento global com uma equação constitutiva (Sousa 2003; Sá Marques e Sousa 2011).

O nó pode ser de fronteira ou de junção. O nó de fronteira tem cota piezométrica fixa. O nó de junção resulta da união de pelo menos dois troços ou da entrada ou saída de caudal.

Nas RDA é frequente a constituição de anéis fechados (malhas), isto é, vários troços estão associados de modo a formar circuitos fechados, tornando-se indistinto o início e o fim. O número de malhas elementares naturais pode ser determinado através da teoria dos grafos com a expressão:

$$NMN = NT - NN - (NF - 1)$$

3. 10

Onde:

NMN representa o número de malhas elementares naturais;

NT representa o número de troços da RDA;

NN representa o número de nós de junção na RDA;

NF representa o número de nós de cota piezométrica fixa na RDA.

3.2.2.1 Leis físicas para a simulação estática da RDA

Como já mencionado, o modelo matemático de simulação estática organiza um conjunto de equações matemáticas que traduzem o comportamento hidráulico da RDA. Esta formulação matemática do problema será resolvida com um método numérico adequado. O modelo estático representa um instante particular de tempo ou intervalo de tempo durante o qual os parâmetros permanecem constantes.

A vantagem da utilização da simulação estática do comportamento hidráulico da RDA em regime permanente é estimar rapidamente os valores das variáveis de estado, facto que facilita o seu uso para o dimensionamento e análise do comportamento da RDA. As variáveis de estado (cotas piezométricas nos nós e caudais nos troços) mudam devido à alteração dos eventos (mudanças nas solicitações) que ocorrem na RDA. Para efetuar a simulação assumem-se as solicitações concentradas nos nós (Walski 1983; Mays 1999; Sousa 2006; Giustolisi *et al.* 2012).

Num escoamento permanente, as restrições hidráulicas representam a aplicação das leis fundamentais da física aos escoamentos sob pressão de um líquido incompressível.

Na presente tese, a formulação matemática para o cálculo do equilíbrio hidráulico baseia-se nas equações dos nós e as incógnitas do modelo são as cotas piezométricas nos nós de junção da RDA. Na formulação seleccionada, o sistema de equações a

resolver é constituído pela aplicação da lei da continuidade nos nós de junção, o que expressa a conservação da massa nos referidos nós. Para a resolução do sistema de equações dos nós é utilizado o método de Newton-Raphson com controlo de passo (Sousa 2006).

3.2.2.2 Lei de resistência ao escoamento

Para a representação matemática do comportamento dos escoamentos sob pressão num troço é imprescindível conhecer como é dissipada a energia e estimar o seu valor, a perda de carga associada ao escoamento em regime uniforme ou em regime variado.

No escoamento em regime uniforme, a perda de carga é proporcional ao atrito desenvolvido nas paredes interiores das condutas e às características do líquido, sendo designada por perda de carga contínua ou de percurso. À temperatura ambiente, o coeficiente de viscosidade cinemática da água é muito reduzido, por consequência os escoamentos sob pressão em RDA e redes de adução efetuam-se maioritariamente com regime turbulento.

Para escoamentos turbulentos, as leis de resistência mais divulgadas são: Darcy-Weisbach, Gauckler-Manning-Strickler, Hazen-Williams e Scimemi.

A fórmula de Darcy-Weisbach (1845), considerada a fórmula racional para o cálculo da perda de carga contínua ou de percurso, é aplicável a qualquer regime de escoamento. Contudo, a sua aplicação em regime turbulento obriga a recorrer a um processo iterativo para estimar o fator de resistência que, por sua vez, depende do número de Reynolds e da rugosidade relativa das paredes da conduta:

$$\Delta H_j^{continua} = \frac{8 f_j L_j}{g \pi^2 D_j^5} Q_j^2 \quad 3.11$$

onde as variáveis apresentadas tomam o seguinte significado:

$\Delta H_j^{continua}$ representa a perda de carga contínua no troço j (m c.a.);

f_j representa o fator de resistência² ou de *Darcy-Weisbach* da conduta no troço j ;

L_j representa o comprimento do troço j (m);

Q_j representa o caudal escoado através do troço j (m³/s);

g representa a aceleração da gravidade terrestre (9,8 m²/s);

D_j representa o diâmetro interior da conduta no troço j (m).

Para evitar este processo iterativo é possível utilizar expressões aproximadas e explícitas.

Ou expressões empíricas para o cálculo da perda de carga contínua com coeficientes dependentes das características do material da conduta, como por exemplo a fórmula de Gauckler-Manning-Strickler (1867, 1891, 1929):

$$\Delta H_j^{continua} = \frac{10.293 L_j}{K_{G.M.S.}^2 D_j^{5.333}} Q_j^2 \quad 3.12$$

Ou em alternativa, a fórmula de Hazen-Williams (1902):

$$\Delta H_j^{continua} = \frac{10.674 L_j}{D_j^{4.87}} \left(\frac{Q_j}{C_{H.W.}} \right)^{1.852} \quad 3.13$$

onde as variáveis previamente apresentadas mantêm os significados e as novas variáveis apresentadas tomam os seguintes significados:

$K_{G.M.S.}$ representa o coeficiente de Gauckler - Manning - Strickler (m^{1/3}/s);

$C_{H.W.}$ representa o coeficiente de Hazen-Williams.

Ou ainda, a fórmula empírica de Scimeni (1955), na qual as variáveis K_{sc} , α e β são coeficientes que dependem da rugosidade do material da conduta:

$$\Delta H_j^{continua} = L_t \left(\frac{Q_j}{K_{sc} D_j^\alpha} \right)^{1.0/\beta} \quad 3.14$$

² Em regime turbulento, com o número de Reynolds (Re) e a rugosidade absoluta equivalente da parede interior da conduta ($k_{c,w}$), o fator de resistência é calculado com a fórmula de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{f_{n+1}}} = -2 \text{Log} \left[\frac{k_{c,w}}{3,7D} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f_n}} \right].$$

Apesar das diferentes expressões de cálculo para estimar a parcela das perdas de carga contínuas disponíveis na literatura da especialidade, nos estudos de caso apresentados no capítulo 5 só será utilizada a fórmula de Hazen-Williams.

O escoamento em regime variado ocorre sempre que há variações súbitas de velocidade e as linhas de corrente deixam de ser retilíneas. Esta ocorrência resulta de uma adaptação ao meio envolvente, resultado da presença de acessórios, da alteração da direção do escoamento ou dispositivos para controlo do mesmo, e está associada a turbulência acentuada e conseqüente aumento de dissipação de energia. Perante a diversidade de ocorrências possíveis, cada parcela referente a perda de carga localizada pode ser estimada em função da altura cinética, do número de Reynolds e da geometria, com a expressão:

$$\Delta H_j^{localizada} = K \frac{U_j^2}{2g} \quad 3.15$$

onde as variáveis apresentadas tomam os seguintes significados:

$\Delta H_j^{localizada}$ representa a perda de carga localizada ou singular no troço j (m c.a.);

K representa o coeficiente de perda de carga localizada;

U_j representa a velocidade do escoamento no troço j (m/s);

g representa a aceleração da gravidade terrestre (9,8 m/s²);

3.2.2.3 Lei da energia aplicada nas malhas

A formulação matemática do equilíbrio hidráulico baseado nas equações dos nós não utiliza explicitamente a lei da energia aplicada nas malhas. Mesmo assim, verifica-se a conservação de energia para cada malha natural da RDA:

$$\sum_{m=1}^{NTM} \Delta H_m - \sum_{a=1}^{NB} E_{ba} = 0 \quad \forall k \in NMN \quad 3.16$$

onde:

ΔH_m representa a perda de carga total no troço m pertencente à malha;

E_{ba} representa a energia fornecida ao sistema pela estação elevatória ou grupo sobrepessor pertencente à malha;

NTM representa o número de troços na malha;

NB representa o número de estações elevatórias ou grupos sobrepessores na malha;

NMN representa o número de malhas elementares naturais.

A RDA só funciona se existir pelo menos um reservatório. Por cada reservatório além deste, existe uma malha fictícia que liga pares de reservatórios e cujo equilíbrio hidráulico garante que:

$$\sum_{m=1}^{NMF} \Delta H_m - \sum_{a=1}^{NB} E_{ba} = -\Delta Z_m \quad \forall k \in NMF \quad 3.17$$

onde:

ΔZ_m representa a diferença de energia entre os dois reservatórios envolvidos na malha fictícia m , medida no sentido positivo da malha;

NMF representa o número de malhas fictícias.

3.2.2.4 Lei da conservação da massa

O volume de qualquer massa reduz-se quando ocorre um aumento de pressão. À temperatura ambiente, o coeficiente de compressibilidade da água é muito reduzido e o seu inverso, o módulo de elasticidade volumétrica, é muito grande³. Ambas as propriedades variam muito pouco com a variação de temperatura. A hipótese de a água ser incompressível em escoamentos permanentes advém do reduzido valor e da estabilidade do coeficiente de compressibilidade. Nestas condições, e para qualquer nó da rede, a aplicação da lei da conservação da massa é equivalente à aplicação da equação da continuidade, isto é, a soma algébrica dos caudais afluentes e efluentes é nula:

³ Para que um litro de água reduza 1 cm³ é necessário um aumento de pressão de 1960 kPa (Quintela 1981).

$$\sum_{j=1}^{NT} \Gamma Q_j = QE_i \quad \forall j \in NT \quad \wedge \quad \forall i \in NN \quad 3.18$$

onde:

Γ representa a matriz de incidência da RDA;

Q_j representa o caudal escoado através do troço j (m^3/s);

QE_i representa o caudal externo ao nó i (m^3/s);

NT representa o número de troços da RDA;

NN representa o número de nós de junção da RDA.

3.2.3 Modelação matemática de fugas

As perdas de base estão associadas a caudais reduzidos dispersos pela rede, por conseguinte, serão dificilmente reparadas devido ao reduzido custo da sua existência e elevado custo para o seu controlo, logo com reduzida potencialidade de gerar um retorno económico atrativo (Ulanicki *et al.* 2000). Por sua vez, as fugas não reportadas estão associadas a caudais mais expressivos, portanto com maior potencial para gerar um retorno económico.

O caudal da fuga não reportada que sai através do orifício pode ser representado como independente ou pode depender de alguma característica do nó ou da conduta. Por exemplo, o caudal da fuga pode ser associado ao consumo efetuado num elemento da rede, à pressão existente (no elemento ou na zona), às características do troço ou de forma independente.

Os modelos matemáticos de simulação do comportamento hidráulico da RDA com incorporação de fuga diferem no elemento da rede onde a fuga ocorre. Para toda a rede a fuga ocorre nos nós ou ocorre nas condutas. A afetação dos caudais das fugas aos nós é simples e tem utilização imediata. A afetação dos caudais das fugas às condutas é mais complexa, pois, devido às limitações do modelo de simulação, o caudal saído através de fugas existente ao longo da conduta necessita de um mecanismo de transferência para os nós extremos da mesma.

Em cada nó, a simulação do comportamento hidráulico da RDA com incorporação de fugas admite que a solicitação acumula uma parcela referente ao consumo com outra parcela referente ao caudal de fuga. Este acumular de caudais nos nós possibilita executar programas comerciais, programas do domínio público (como por exemplo o EPANET) (Goulet e Smith 2013; A. Candelieri *et al.* 2014; Morosini *et al.* 2014; Steffelbauer *et al.* 2014) ou modelos de simulação próprios (Ribeiro *et al.* 2015; Sousa *et al.* 2015)

3.2.3.1 Modelação da fuga como dependente do consumo

A associação dos caudais das fugas aos consumos é o critério mais simples de utilizar para análises do comportamento hidráulico orientadas pelo consumo. Na fase de dimensionamento, esta abordagem é comum para integrar a futura presença de fugas no funcionamento natural da rede. Como os consumos previstos estão concentrados nos nós, os vários caudais das fugas são calculados para todos os nós de modo imediato. A expressão geral para estimar o caudal da fuga em cada nó pode ser expressa por:

$$QF_i = f_c(QC_i) \quad \forall i \in NNC \quad 3.19$$

onde:

QF_i representa o caudal de fuga no nó i (m^3/s);

f_c representa uma função de proporcionalidade do caudal de fuga com o caudal de consumo;

QC_i representa o caudal de consumo no nó i (m^3/s);

NNC representa o número de nós com consumo na RDA.

Da aplicação deste critério resultam soluções que tanto podem ser consideradas realistas como não. Por um lado, se há mais consumo é provável que existam mais ramais. Logo, com maior probabilidade ocorrerão causas para a formação de orifícios. Em simultâneo, é provável que a parcela das perdas aparentes associadas à submedição dos contadores seja maior devido ao maior número de contadores ou à medição de maior caudal (Tabesh e Yekta 2005).

Por outro lado, a solução é potencialmente irrealistas na medida em que só nós com consumo apresentam fugas, os nós com consumo reduzido estão sempre associados a caudais de fuga reduzidos, e ainda dois nós que apresentem igual consumo têm estimativas iguais para os seus caudais de fugas apesar de poderem estar sujeitos a pressões muito diferentes (Giustolisi *et al.* 2008).

3.2.3.2 Modelação da fuga como dependente da pressão

A associação do comportamento das fugas ao comportamento da saída de um jacto nos escoamentos sob pressão através de um orifício é intuitiva, pois vulgarmente constata-se, em orifícios de igual dimensão, a saída de um caudal maior através do orifício sujeito a maior pressão. Esta abordagem para a modelação da fuga permite a atribuição do caudal das fugas tanto aos nós como às condutas.

Assim, a equação de Torricelli, equação 3.20, constitui a base desta abordagem. Este modo de modelação da fuga é versátil permitindo a disseminação das fugas pelas condutas bem como pelos nós da RDA, pelo que foi utilizado nos primeiros estudos (Pudar e Liggett 1992; Liggett e Chen 1994; Brunone 1999; Colombo e Karney 2002):

$$QF_i = C_i A_i \sqrt{2gP_i} \quad \forall i \in NN \quad 3.20$$

onde:

C_i representa o coeficiente de vazão do orifício i ;

A_i representa a área equivalente do orifício i (m^2);

P_i representa a pressão no orifício i (m c.a.).

No primeiro trabalho de Pudar, Liggett, (1992) foi sugerida a atribuição das fugas a nós isolados e com a equação de Torricelli foi estimada a área equivalente do orifício. Esta mesma abordagem permite simular no programa EPANET a ocorrência de fugas através do funcionamento de emissores ((Rossman 2000; Giustolisi *et al.* 2007; Silva *et al.* 2011; Mashford *et al.* 2012).

A versatilidade desta equação permite representar o comportamento do caudal de uma fuga numa conduta plástica (Vítkovský *et al.* 2000; Lee *et al.* 2005a; Lee *et al.* 2005b), com diferentes formas de orifícios (Meniconi *et al.* 2013). Ainda hoje, esta vantagem

promove atualizações para a estimativa do coeficiente de vazão, tal como apresentado no trabalho proposto por Franchini e Lanza (2014).

Contudo, as observações de campo contrariaram a hipótese original expressa pela equação de Torricelli, constatando-se uma relação aproximadamente linear entre o caudal da fuga e a pressão existente. Em campo, Lambert (2000) verificou a existência de outros fatores que condicionavam a relação entre os caudais das fugas e as pressões (Figura 3.1).

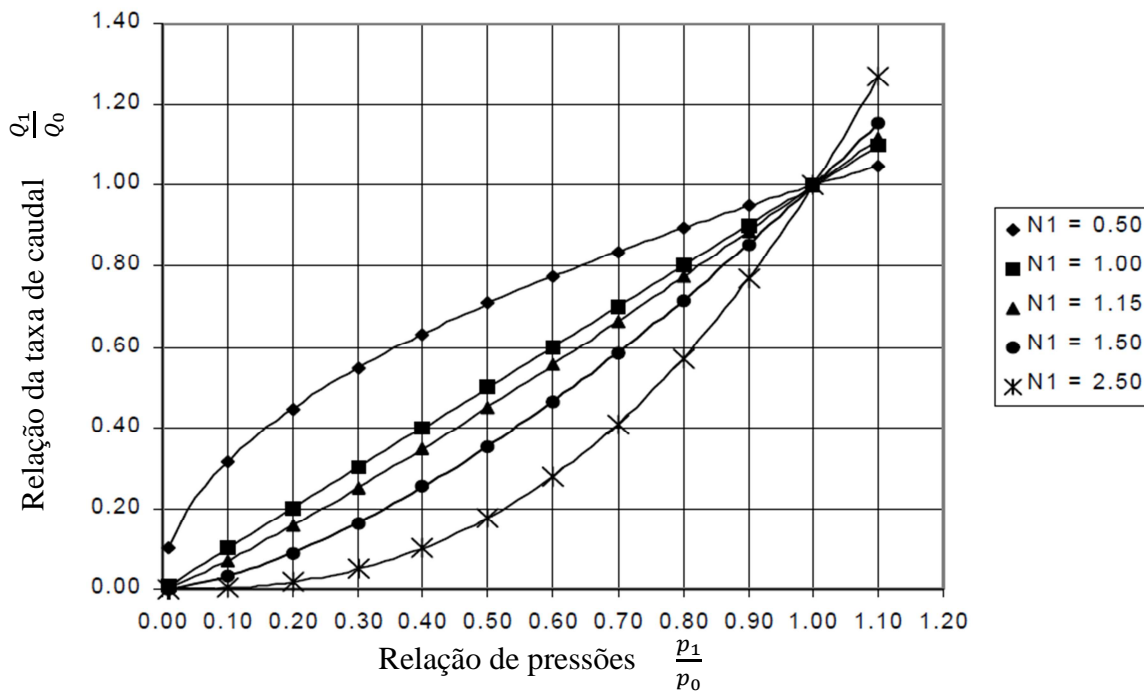


Figura 3.1 Relação entre a pressão e o caudal através de orifícios para diferentes materiais das condutas. Adaptado de Lambert (2000)

A representação matemática desta relação corresponde a uma função exponencial com expoente $N1$ a variar entre 0,5 e 2,79 e valor médio 1,15 (Lambert 2000; Farley e Trow 2003). O Quadro 3.1 apresenta o valor a atribuir a $N1$, que varia entre 0,5 e 2,5 de acordo com a aplicação na modelação:

$$QF_i = cP_i^{N1} \quad \forall i \in NN \wedge 0,5 < N1 < 2,79 \quad 3.21$$

onde:

NI representa o expoente para o cálculo do caudal de fuga;

c representa uma constante de proporcionalidade entre o caudal de fuga e uma exponencial com a base pressão.

Quadro 3.1 Valores recomendados para o expoente NI Adaptado de Lambert (2000)

NI	Aplicação na modelação
0,5	Fugas significativas, fugas em orifícios de área fixa, fugas detetáveis em condutas de materiais metálicos (ex. ferro fundido, FFD, aço)
1,0	Abordagem simplificada, caso de múltiplos ou desconhecimento do material ou desconhecimento do nível de perdas reais
1,15	Pequenas fugas indetetáveis. Fugas sensíveis à variação da pressão, independentemente do tipo de material
1,5	Fugas significativas, detetáveis, em condutas de material plástico ou flexível (ex. PVC, PEAD), fugas em orifícios de área variável devido à variação da pressão
2,5	Fugas significativas, detetáveis, em condutas de material plástico ou flexível, com roturas longitudinais, onde a variação da pressão altera significativamente a área do orifício.

Vários autores confirmaram a veracidade da expressão em estudos independentes e concluíram que o material constituinte da conduta controlava a evolução da forma do orifício e a forma final que este assumirá, bem como o tipo e o comportamento do solo envolvente da conduta e as solicitações influenciam os caudais das fugas de água (Greyvenstein e Van Zyl 2007).

Em trabalhos mais atuais a relação entre o caudal perdido por uma descontinuidade nas paredes de uma conduta e a pressão a que está sujeita evoluem de acordo com a seguinte lei proposta por Cassa *et al.* (2010):

$$QF_i = C_i \sqrt{2g} (A_0 P_i^{0,5} + m P_i^{1,5}) \quad \forall i \in NN \quad 3.22$$

onde:

A_0 representa a área inicial do orifício;

m representa o declive da relação entre a área do orifício e a pressão;

C_i representa o coeficiente de vazão do orifício i .

Na equação 3.22, a variável m é nula para as condutas metálicas, e assume valores positivos para as condutas de material plástico, tipo PVC ou PEAD. Cassa e Zyl (2006) apresentam alguns detalhes da evolução da configuração do orifício numa conduta de PVC com 110 mm de diâmetro externo e da classe 0,6 MPa.

3.2.3.3 Modelação da fuga como dependente de características da conduta e da pressão

A associação do comportamento das fugas às características das condutas pressupõe que as fugas ocorrem de modo homogéneo ao longo das condutas, e por consequência o comprimento de cada conduta e a pressão média são elementos necessários para estimar o caudal associado às fugas. Com estes fundamentos, Germanopoulos (1985) propõe estimar o caudal de fuga do seguinte modo:

$$QF_j = c_1 L_j \bar{P}_j^{1.18} \quad \forall j \in NT \quad 3.23$$

onde:

QF_j representa o caudal de fuga no troço j (m^3/s);

c_1 representa a constante característica da rede, função do material e idade das condutas;

L_j representa o comprimento do troço j (m);

$\bar{P}_j = \frac{P_j^{montante} + P_j^{jusante}}{2}$ representa a pressão média (mc.a.) no troço j ;

$P_j^{montante}$ representa a pressão de montante do troço j (mc.a.);

$P_j^{jusante}$ representa a pressão de jusante do troço j (mc.a.);

NT representa o número de troços da RDA.

Este procedimento para modelar o caudal das fugas foi utilizado em modelos de decisão para dividir a rede em ZMC, regular as válvulas reductoras de pressão nas ZPC e condicionar o caudal de fuga em cada zona (Lambert 1994).

Há um trabalho de referência (Giustolisi *et al.* 2008) que apenas visa melhorar a análise do comportamento hidráulico da RDA. Este trabalho recorre a esta expressão para determinar o caudal de fuga em cada conduta, e simultaneamente os consumos efetuados em cada nó obedecem à função definida por Wagner *et al.* (1988), ou seja, as componentes das solicitações estão limitadas pela pressão existente em cada nó.

Numa zona piloto da cidade de Ghazvin (Teerão), recorreu-se a esta mesma expressão para criar um modelo da RDA considerando as perdas reais e aparentes integradas no EPANET e com recolha de dados no SIG (Motiee *et al.* 2007).

Contudo, o perímetro da conduta também pode contribuir para o caudal de fuga como expressão das fissuras existentes ao longo das juntas entre tubagens adjacentes. Com esta interpretação para o volume de fugas, o caudal pode ser determinado em função das características: pressão, diâmetro, comprimento e coeficiente de cada troço (Tucciarelli *et al.* 1999). O caudal de fuga atribuído a cada nó i é calculado por:

$$QF_i = P_i^\beta \sum_{j=1}^{\Psi_i} \frac{\pi}{2} D_{i,j} \theta_{i,j} L_{i,j} \quad \forall i, j \in NN \quad 3.24$$

onde:

QF_i representa o caudal de fuga no nó i (m^3/s);

P_i representa a pressão no nó i (m c.a.);

β representa o expoente da pressão para modelação da fuga de água;

$D_{i,j}$ representa o diâmetro do troço entre o nó i e o nó j (m);

$\theta_{i,j}$ representa a taxa da fuga de água entre o nó i e o nó j ;

$L_{i,j}$ representa o comprimento do troço entre o nó i e o nó j (m);

Ψ_i representa o vetor de incidência no nó i .

Os novos desenvolvimentos tecnológicos, nomeadamente os sistemas de informação (SI), têm possibilitado um aumento do volume e um aumento do detalhe da informação armazenada. A análise desta informação possibilita a sua desagregação em diferentes níveis de acordo com as características das condutas da RDA, das condições a que estão

sujeitas e à associação com a probabilidade de ocorrência de processos de degradação que culminam com a ocorrência de fugas.

Determinar a probabilidade de ocorrência de fugas numa conduta devido ao processo de degradação em função da zona onde está instalada é muito rudimentar e passível de erro. Um aperfeiçoamento será determinar a mesma probabilidade com a inclusão de outras características como, por exemplo, as condições do meio envolvente da conduta, os movimentos dos solo, as características do solo, os carregamentos, a temperatura, a pressão, a caracterização física da conduta, a idade da mesma, o processo de envelhecimento do material da conduta, a corrosão, a qualidade da mão-de-obra na instalação e durante a manutenção e aos métodos de controlo de fugas implementados (Farley 2001; Rajani e Kleiner 2001; Islam 2012; Yoo *et al.* 2014). Algumas metodologias consideram apenas uma das características mencionadas, outras incluem mais características

Um exemplo de uma metodologia para a análise da evolução do processo de degradação das condutas pode ser encontrado em Islam (2012). Esta metodologia exige muita informação, tal como pode ser constatado no Quadro 3.2.

Nem sempre é possível dispor de informação adequada para este tipo de análise e, se existir, são necessárias técnicas específicas para o tratamento de grande volume de informação. A metodologia é muito adequada para a gestão patrimonial executada com o apoio de SI, em particular para os processos de decisão táticos de reabilitação ou substituição das condutas da RDA.

3.2.3.4 Modelação da fuga como independente de condições nas condutas

Numa RDA, a ocorrência de uma anomalia pode não ter justificação, isto é, o gestor da rede poderá desconhecer a causa que produziu a anomalia ou não dispor de qualquer informação que lhe permitisse prever a ocorrência. No caso presente, como acontece frequentemente, a anomalia não tem uma justificação conhecida.

Esta situação pode ser representada como a ocorrência de fugas de modo independente às condições das condutas e, tal como nas representações anteriores, pode optar-se por

atribuir o caudal da fuga aos nós ou às condutas. Numa primeira abordagem é mais expedito associar as fugas aos nós, decisão que facilita a modelação matemática do problema. Mas, é mais credível admitir a ocorrência das fugas nos troços porque são elementos estruturalmente mais longos, com maior probabilidade de sofrerem uma perturbação e porque ao longo dos quais existem ligações para ramais domiciliários.

Quadro 3.2 Desagregação dos fatores causadores de fugas. Adaptado de Islam (2012).

1º Nível	2º Nível	3º Nível
Externalidades	Efeito do tráfego	Carga
		Caudal de tráfego
	Condições do solo	Espessura da cobertura
		Tipo de solo
		Variação da temperatura
		Variação do nível freático
Pressão	Altura piezométrica do sistema	
	Perdas de carga	
Físicas	Atributos da conduta	Material
		Diâmetro
	Medição de ligações	Número de contadores
		Número de ligações domiciliárias
		Número de juntas
	Consumos	Domésticos
	Industriais	
		Comerciais
Envelhecimento	Idade das condutas	
	Idade do equipamento de monitorização	
Mão de obra	Mão de obra no equipamento de manutenção	
	Colocação em vala	Colocação de condutas
		Enchimento da vala
		Compactação

Caso as fugas da rede só ocorram nos nós, a modelação matemática é imediata. Caso as mesmas fugas da rede ocorram numa conduta, estas serão repartidas pelos nós extremos da conduta:

$$QF_i = \sum_{\forall j \in NT} \Gamma f_d(QF_j) \quad \forall i \in NN \quad \wedge \quad \forall j \in NT \quad 3.25$$

onde:

QF_i representa o caudal de fuga no nó i (m^3/s);

QF_j representa o caudal de fuga na conduta j (m^3/s);

Γ representa a matriz de incidência da RDA;

f_d representa a função distribuidora do caudal de fuga na conduta j para seus nós.

Após seleção do procedimento mais adequado para representar as fugas, as principais decisões necessárias ao estabelecimento do modelo matemático de simulação estático do comportamento hidráulico da RDA estão abordadas.

3.2.3.5 Alteração da pressão versus alteração na estimativa do caudal da fuga

De acordo com o trabalho de Luvizotto (1998), devido ao caudal Q escoado entre dois nós adjacentes, a alteração da cota piezométrica entre eles pode ser representado por uma equação representativa da lei de resistência ao escoamento:

$$\Delta H = \left(z + \frac{p}{\gamma}\right)_0 - \left(z + \frac{p}{\gamma}\right) = aQ^2 + bQ \quad 3.26$$

Com os parâmetros a e b números reais positivos.

Numa análise da Figura 3.2 observa-se que para cada variação de cota piezométrica está associado um determinado caudal. Seja a linha azul o valor de referência. Contudo, nas medições podem ocorrer erros e em vez de se observar o valor na linha a azul, observa-se um acréscimo na variação da cota piezométrica (ΔH^+), linha verde. Esta alteração na leitura da cota piezométrica para um valor maior produzirá um erro na estimativa do caudal (ΔQ^+), para um valor superior ao valor real.

Pelo contrário, a subavaliação na medição da variação da cota piezométrica conduz a uma redução da mesma, linha laranja. Caso a cota piezométrica observada seja inferior ao valor real (ΔH^-) produzirá um erro na estimativa do caudal de fuga (ΔQ^-) subavaliando o mesmo.

Para o mesmo desvio nos dois tipos de erro observa-se um desvio mais acentuado na subavaliação da variação da cota piezométrica comparativamente com o desvio introduzido na determinação do caudal devido à sobreavaliação da variação da cota piezométrica. Não obstante, o ideal será a inexistência de erros na observação da

pressão.

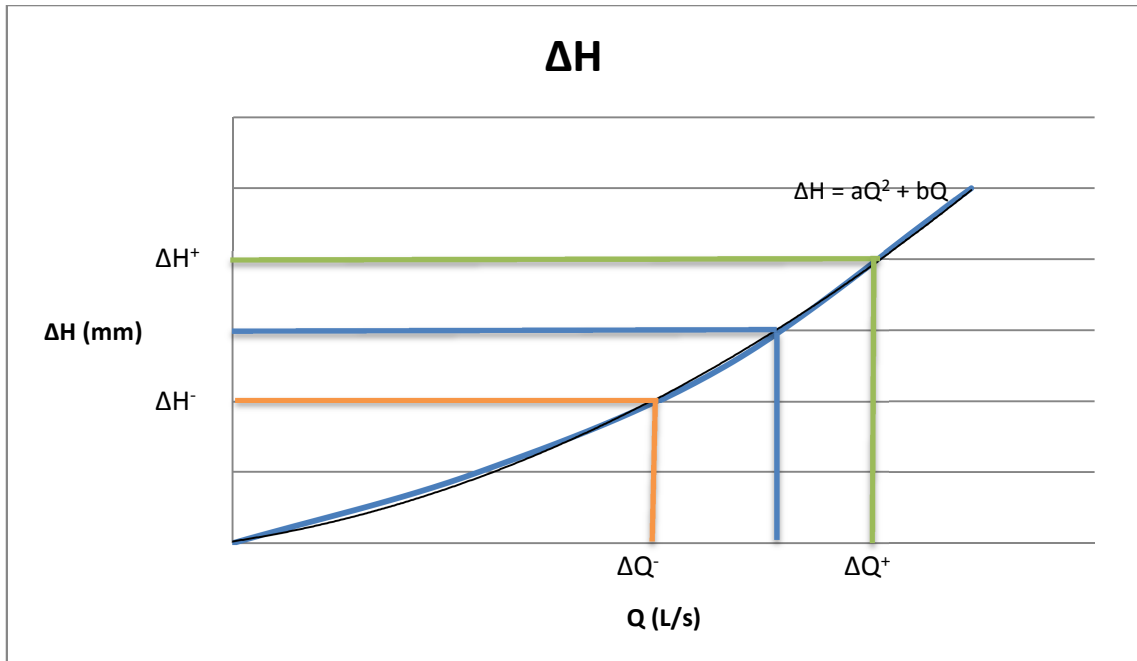


Figura 3.2 Relação entre o caudal e a cota piezométrica numa conduta

Uma expansão da leitura com erro $\Delta H'$ aos dois primeiros termos da série Taylor será:

$$\Delta H' = \Delta H + \frac{\partial \Delta H}{\partial Q} \Delta Q \quad 3.27$$

Ou seja, se δ_Q representar o erro na avaliação do caudal de fuga e δ_H representar o erro na avaliação da cota piezométrica, será:

$$\Delta H' - \Delta H = \frac{\partial \Delta H}{\partial Q} \Delta Q \rightarrow \delta_H = \delta_Q \frac{\partial \Delta H}{\partial Q} = \delta_Q (2aQ + b) \quad 3.28$$

Esta equação demonstra que o erro introduzido na avaliação do caudal é sempre menos penalizador dos desvios na estimativa da variação da cota piezométrica do que o contrário, pois os parâmetros a e b são números reais positivos. Esta mesma expressão indica que, em termos relativos, para cada nó, os maiores erros na estimativa de caudais de fugas ocorrem para caudais de fuga mais pequenos; bem como, grandes caudais de fuga tendem a minimizar os erros na avaliação das cotas piezométricas.

$$\delta_Q = \frac{\delta_H}{2aQ+b} \begin{cases} \lim_{Q \rightarrow 0} \delta_Q = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\delta_H}{2aQ+b} = \frac{\delta_H}{b} \\ \lim_{Q \rightarrow \infty} \delta_Q = \lim_{Q \rightarrow \infty} \frac{\delta_H}{2aQ+b} = 0 \end{cases} \quad 3.29$$

3.3 Critérios de tolerância entre valores estimados pelos modelos matemáticos de simulação hidráulica e valores observados

A utilização de modelos matemáticos de simulação hidráulica como uma ferramenta capaz de representar de modo fidedigno o comportamento das RDA só é exequível com a adequada calibração das solicitações e dos parâmetros das condutas, Walski, (1983, 2000). Este modelo matemático será útil se apresentar soluções com qualidade, isto é, se os resultados obtidos corresponderem aos valores observados em contexto real (Cesario 1995). No Quadro 3.3 estão alguns dos primeiros critérios de tolerância utilizados para validar como admissível uma calibração de uma qualquer RDA. Estes critérios de tolerância estipulam os desvios em valor absoluto considerados admissíveis entre os valores previstos pelo modelo matemático e os valores observados na RDA. Contudo, para alguns fins será recomendável a utilização do desvio em percentagem do valor das variáveis (Cesario 1995; Xia e Guo-jin 2010) .

Quadro 3.3 Critérios de tolerância admissíveis e máximos para considerar uma RDA calibrada (Walski 1992).

Tolerância	Previsto-Observado Admissível	Previsto-Observado Máximo
Pressão (com conjunto adequado de valores)	1,5 m	5,0 m
Pressão (com conjunto deficiente de valores)	3,1 m	10 m
Máxima perda de carga 3,0 m	1,5 m	
Máxima perda de carga > 12,0 m	6,0 m	

A melhoria do desempenho do modelo matemático na simulação hidráulica de uma rede poderá exigir a sua reformulação para minorar as desadequações existentes, nomeadamente nas incorreções associadas às simplificações introduzidas no modelo matemático, à caracterização das condutas (diâmetros, comprimentos, materiais), aos acessórios ativos (localização de válvulas e caracterização da sua atuação), aos consumos existentes e às observações das cotas piezométricas ou de caudais (Walski *et al.* 1990). A previsão da pressão e do caudal tem sido fundamental para o dimensionamento, análise, operacionalidade e manutenção de RDA (Ormsbee 2006).

No seu trabalho, Waski (1984) recomendava a monitorização, logo, a verificação dos critérios de tolerância, nos nós de maior consumo, nos nós na periferia da rede ou ainda a elaboração de diferentes testes, incluindo alguns testes com caudais de incêndio.

Também com a preocupação de calibrar adequadamente a rugosidade, Ferreri *et al.* (1994) sugerem a seleção dos nós com maior sensibilidade, recomendação apoiada por Pudar e Liggett (1992) para a localização aproximada de fugas de água. Nesta corrente, Schaetzen e Walters (2000) recomendam a monitorização dos nós que maximizam a função de sensibilidade e ignoram os nós de extremidade das condutas ramificadas.

Kapelan (2000) apresenta diferentes métodos de cálculo dos coeficientes da matriz de sensibilidade. Por sua vez, em trabalhos referentes à modelação de escoamentos variáveis, à monitorização da qualidade da água e à deteção de contaminantes maliciosos, Kapelan *et al.*, (2003, 2004), Panguluri *et al.*, (2005) e de Krause *et al.*, (2009) relatam que o aumento do número de transdutores instalados e correspondente introdução de dados nos modelos, pode não melhorar proporcionalmente a qualidade das soluções obtidas. Ou seja, como o problema é mal condicionado, o aumento do número de observações é inversamente proporcional ao benefício obtido nos resultados, uma vez que as observações podem não ser independentes entre si, ou podem não corresponder aos valores reais mas a valores com incerteza decorrentes dos equipamentos de medição.

A tolerância admitida nos modelos matemáticos de simulação do comportamento hidráulico poderá ser estendida a um potencial nível de erro e de incerteza na definição de todas as grandezas necessárias (Walski 2000; Mamo e Juran 2014). Algumas abordagens para a monitorização integram a falta de rigor das observações na rede na modelação.

3.4 Monitorização da RDA

Esta segunda parte do capítulo tem como foco a monitorização da RDA. A contabilização e caracterização da água é estruturante para planejar, gerir, auditar, analisar e garantir a segurança do funcionamento da RDA. Por este motivo, a instalação de instrumentos de medição é uma etapa crucial para a monitorização do comportamento da rede, que é consequência dos usos dos consumidores, e para a

identificação de problemas atuais e futuros (Ediriweera e Marshall 2010).

O objetivo da rede de monitorização pode ser muito díspar. Poderá ser a observação de variáveis caracterizadoras da qualidade da água, da identificação de situações limite ou de variáveis hidráulicas, entre outras características. No presente trabalho pretende-se a monitorização exclusiva da pressão e do caudal pois são as variáveis que possibilitam a localização aproximada das fugas. Deste modo todas as restantes redes de monitorização estão excluídas de análise neste trabalho.

Cada vez mais verifica-se a tendência dos desenvolvimentos tecnológicos possibilitarem uma aplicação generalizada de equipamentos para a monitorização da pressão e do caudal (Bargiela e Hainsworth 1989). A informação recolhida permite a calibração e a simulação do funcionamento da rede (Modisette 2009; Machell *et al.* 2010), permite a determinação de consumos (Vassiljev *et al.* 2015), permite quantificar caudais (Koppel e Vassiljev 2013), permite melhorar o controlo operacional da rede (Powell 1992; Cembrano *et al.* 2011), geri-la (Bicik *et al.* 2013), permite avaliar a sua segurança (Di Nardo *et al.* 2015) ou analisar a qualidade da água (Storey *et al.* 2010).

As EG reconhecem os benefícios obtidos com a monitorização da rede (Romano 2012). Como tal, a articulação entre o objetivo da monitorização, instrumentos instalados, grandezas medidas e registadas e duração dos registos é fundamental. O processo de tomada de decisão, de quais são os equipamentos mais adequados, quantos e onde os colocar, está associado à definição da rede de monitorização e condiciona o desempenho da mesma. No âmbito da localização aproximada de fugas em RDA, os instrumentos de monitorização registam as variáveis dependentes pressão e caudal.

Usualmente, a construção de uma rede de monitorização de uma RDA é gradual. Nos primórdios da construção das RDA os sistemas praticamente não tinham equipamento para quantificar caudais; mesmo assim, por imperativos funcionais, alguns órgãos poderiam ter instrumentos de monitorização. Hoje, devido aos condicionamentos económicos, regulamentares, sociais e ambientais, as redes necessitam de um elevado número de equipamentos para aferir o seu comportamento. Por exemplo, no Reino Unido, com uma forte tradição de divisão da RDA em ZMC e em ZPC, cada ZPC dispõe no mínimo de um transdutor de pressão, um medidor de caudal na seção de

entrada da ZPC e, eventualmente, vários contadores dispersos pelos ramais domiciliários. Estes equipamentos permitem demonstrar e controlar a operacionalidade da zona, o estado das válvulas internas e determinar a pressão média (Morrison *et al.* 2007).

Nos países com valoração do serviço de distribuição de água, a identificação de cada utilizador e a quantificação do volume de água utilizado é uma prática corrente. Nos domicílios, a monitorização dos volumes consumidos foi amplamente implementada e é utilizada para a atribuição de um preço ao serviço (Aragão 2011), gerando proveitos para a EG. Esta mesma entidade apura o custo associado ao serviço e apura os resultados financeiros da prestação do serviço (ERSAR 2012).

A variável de estado caudal pode ser observada nos reservatórios e nós de fronteira. Nos reservatórios, nos nós abastecedores e nas secções de entrada das ZMC e ZPC, o caudal é monitorizado com valores totais. Periodicamente, nos ramais de ligação aos imóveis com consumos, o volume utilizado é observado, possibilitando a determinação das solicitações dos consumidores (consumos dos utilizadores).

Por definição os ramais de ligação estabelecem a continuidade entre a conduta e a rede predial, encontrando-se distribuídos ao longo das condutas. Como tal, os consumos dos utilizadores estão também distribuídos ao longo das condutas. Para simplificação da realidade, assume-se nos modelos matemáticos de simulação hidráulica que os consumos ocorrem nos nós de extremidade das condutas. Assim, os diferentes consumos distribuídos ao longo das condutas são convertidos em consumos nos nós e são considerados como parâmetros dos nós (Berardi *et al.* 2010; Cheng e He 2011; Kanakoudis e Gonelas 2014).

Contudo a variável de estado cota piezométrica é calculável num número reduzido de pontos onde estão instalados equipamentos de medição de pressão. Para cada nó da RDA, a pressão pode ser medida, o que, com a determinação da cota topográfica, possibilita a determinação da cota piezométrica, e o resultado deverá ser superior a um valor mínimo previsto ocorrer quando o consumo for máximo no ano horizonte de projeto. O nível da superfície livre da água nos reservatórios poderá ser determinado com regularidade. Nas secções de entrada das ZPC, o valor da cota piezométrica é

condicionado com o objetivo do controlo de pressão existente.

3.4.1 Fases na monitorização de RDA

A monitorização corresponde a supervisionar o funcionamento de uma RDA, isto é, a vigiar, acompanhar e avaliar o seu desempenho. Esta tarefa pode ser pontual (num dia a uma dada hora) ou de modo contínuo num período preestabelecido.

Estas observações podem permitir detetar um qualquer problema existente, por exemplo a existência de fugas, perdas e roturas, contaminações; ou podem alertar para a necessidade de uma intervenção preventiva ou corretiva para garantir o cumprimento dos critérios técnicos, por exemplo velocidade, dimensionamento desadequado, carência de acessórios, níveis anómalos nos reservatórios ou na qualidade da água (Carpentier e Cohen 1993).

Assim, os grandes benefícios na monitorização das RDA estão associados à verificação do desempenho do sistema: à rápida consciencialização dos problemas e melhor planeamento da atividade de reparação, na redução dos custos diretos, em ganhos de eficiência operacional e no aumento da concordância entre objetivos operacionais.

A monitorização tem subjacente uma zona sobre a qual se dispõe da sua caracterização física em papel ou armazenada num SI. Da monitorização (com instrumentos de medição de níveis nos reservatórios, caudais e pressão) resultarão dados, que ou serão armazenados no local (num *data logger*) ou serão transferidos através de sistemas de comunicação. Estes dados poderão permitir alguns cálculos e inferir o comportamento da RDA nos pontos sem monitorização.

É usual as EG procedem à colocação dos dispositivos de monitorização de modo faseado e organizado em quatro níveis diferentes de monitorização (Medeiros *et al.* 2007), ver Quadro 3.4. Para o estabelecimento destes níveis de monitorização há um conjunto de elementos a instalar na RDA, além de que, para a progressão entre níveis, poderá ser necessário complementar o sistema com *hardware* e *software* dedicado.

Os níveis mais sofisticados, níveis 3 e 4, pressupõem a disponibilidade de um sistema de informação geográfica (SIG), associado a um sistema de telegestão ou SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*). Os primeiros níveis (níveis 1 e 2)

pressupõem a instalação de medidores de nível nos reservatórios, medidores de caudal, contadores e transdutores de pressão.

Quadro 3.4 Faseamento usual para colocação de dispositivos de monitorização

Nível 1	Telemetria no sistema de adução e transporte
Nível 2	Telemetria à saída de reservatórios e entrada de ZMC
Nível 3	Telemetria dos grandes consumidores e contadores totalizadores em edifícios
Nível 4	Telemetria dos consumidores individuais

Nas próximas duas secções serão abordados de modo simplificado os SIG e a telegestão.

3.4.2 Sistemas de Informação Geográfica (SIG)

É difícil o acesso e a visualização de algumas partes da RDA. Por obrigação legislativa, Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais (RGSPDADAR DRnº23/ 1995), as RDA encontram-se enterradas na via pública com uma profundidade mínima de assentamento de 0,80 m, medida entre a geratriz exterior superior da conduta e o nível do pavimento. Estão também afastadas pelo menos 0,80 m dos limites das propriedades e articuladas com as restantes infraestruturas.

De acordo com a informação disponibilizada pelas EG em baixa, 20% das mesmas não dispõem de cadastro e mais 15% das mesmas não têm o cadastro com as atualizações do ano precedente (ERSAR 2013). O Decreto-Lei nº 194/2009 de 20 de agosto (DL194/2009) obriga as EG com mais de 30 mil habitantes a promover e manter um sistema de garantia de qualidade do serviço prestado aos utilizadores e um sistema de gestão patrimonial de infraestruturas, além do sistema de gestão de segurança, um sistema de gestão ambiental e um sistema de gestão da segurança e saúde no trabalho. A médio prazo é provável o aumento de sistemas de gestão patrimonial de infraestruturas, devido ao apoio à transição para uma economia de baixa emissão de carbono financiada pelo PO SEUR – Portugal 2020 no seu eixo proteger o ambiente, publicado na portaria nº 57-B/2015 de 27 de fevereiro, e devido à necessidade de reabilitar as redes de acordo com o seu envelhecimento natural.

Até à década de 90 do século passado, a cartografia e a informação da RDA encontrava-se em suporte de papel. Na atualidade esta informação tende a estar desmaterializada, e o SIG é o veículo preferencial de armazenamento da informação destas infraestruturas.

A definição de SIG não é consensual. Uma das definições define-o como um sistema informático com capacidade para a entrada de informação digital, capacidade de armazenamento da informação, de transformação da mesma, de análise da informação introduzida e produzida e de apresentação espacial dos dados. Contudo a apresentação espacial dos dados tem uma definição alargada para a inclusão de tabelas, pontos de observação, imagens ou mapas (Eastman *et al.* 1993). Com uma definição semelhante, o SIG é definido como um sistema computadorizado que proporciona quatro tipos de capacidades de manipulação de dados georreferenciados: a entrada de dados, o processamento de dados, a manipulação e análise e a saída de dados (Aronoff 1989).

Mais recentemente, a definição de SIG foi generalizada como um conjunto de dados e ferramentas capazes de atuar sobre os mesmos dados e cuja origem pode ser analógica ou digital (Raju 2003). Esta definição redefine a primeira utilização de SIG. Assim, poderá considerar-se como a primeira aplicação publicada em SIG o estudo sobre a qualidade da água dos escoamentos subterrâneos, com a identificação do poço contaminado com cólera, em 1854 numa zona do *Soho* em Londres (Snow 1855).

As EG das RDA utilizadoras de SIG empregam-no para desmaterializar e organizar os seus serviços, pois estes permitem produzir mapas, analisar espacialmente os fenómenos e armazenar dados. Os SIG dão apoio à gestão da infraestrutura e à tomada de decisão. A informação armazenada e a sua representação facilitam a gestão de atividades e de processos, a gestão dos recursos, a gestão patrimonial, a georreferenciação e a gestão dos dados dos clientes, a gestão da informação, a gestão ambiental e a gestão do risco (Alegre e Covas 2010). Os SIG contribuem para maior eficácia, eficiência, maior produtividade e melhor controle sobre o acesso aos dados. Além de permitirem ao utilizador aceder aos dados armazenados, complementar com novos factos, bem como gerar nova informação com as ferramentas disponíveis.

Num SIG, cada dado geográfico tem uma localização geográfica e um conjunto de atributos descritivos. Os dados geográficos têm associações e ligações entre si. Os dados dos sistemas de abastecimentos de água contidos no SIG, além das coordenadas

geográficas, dispõem do cadastro (traçado das condutas, localização de ramais e acessórios, tipo de solo, etc.), códigos de identificação comuns (identificação, localização) e outros dados inclusive provenientes de instrumentação dispersa no sistema (Catarro 2012). Caso um SI seja apoiado num SIG, o mesmo poderá incluir informação alfanumérica, nomeadamente dados do sistema de clientes e respetivos consumos necessários ao sistema de faturação, dados do sistema de telegestão ou do sistema de telemedição através das tecnologias da informação e comunicação.

Os utilizadores do SIG dispõem de um conjunto de ferramentas informáticas que facilitam o mapeamento, a monitorização, a simulação e a manutenção das RDA (Bedford 2004). Assim, estas ferramentas garantem a integração da informação ou das outras ferramentas disponíveis na base de dados, uma melhor comunicação e cooperação entre todos os intervenientes, uma economia de tempo e de recursos na análise dos problemas diários, a seleção de soluções baseadas na relação custo-benefício e um enquadramento holístico dos problemas e das possíveis soluções para apoiar a decisão final (Shamsi 2005).

Quanto mais extensa e maior número de utilizadores existirem numa RDA, maiores serão os benefícios provenientes da utilização do SIG. Apesar de todas as vantagens, o custo de formação dos utilizadores, de manutenção e de atualização de todo o *hardware* e *software* condiciona as decisões de implementar este sistema. O custo de aquisição do SIG foi uma limitação severa à sua utilização, mas hoje em dia há soluções *open source*, inclusivamente específicas para serviços de águas (como por exemplo: <https://www.giswater.org/>). Para uma adequada utilização é necessária a compreensão do seu funcionamento, decorrente de formação específica. Em simultâneo, para qualquer projeto ou problema, as necessidades de entrada para utilizar as ferramentas do SIG devem estar em sintonia com os dados disponíveis.

3.4.3 Sistemas de telegestão

O sistema de telegestão agrega as medições hidráulicas registadas nos instrumentos de monitorização dispersos pela RDA, armazena as medições e respetivas evoluções temporais, efetua a sua apresentação e visualização, e gera relatórios e alarmes. Este conjunto de instrumentos de monitorização mede as grandezas das variáveis de estado e

de fronteira. Na posse destas grandezas fica assegurada a monitorização indispensável para a supervisão e para o controlo eficaz sobre o funcionamento da RDA.

O sistema de telegestão dispõe de um computador supervisor central, com *software* especializado, operadores na interface homem máquina (HMI), unidades remotas terminais, controladores programáveis com regras lógicas, infraestrutura de comunicação e elementos de controlo, transdutores, sensores e instrumentação.

Cada instrumento de medição ou tem um agente para armazenar em memória os dados recolhidos com periodicidade fixa (em segundos, minutos ou horas) ou transmite-os para uma entidade externa. A transmissão dos dados pode ser com ou sem fios e obedecendo aos protocolos ADSL, GSM ou GPRS (Wu e Walski 2012) ou Geo-satélite. A rápida transmissão das grandezas medidas (dados) suporta a telegestão e uma crescente coordenação e eficiência na transmissão de informação operacional sobre o funcionamento da infraestrutura com reduzida mão de obra.

Algumas ações são desempenhadas de modo automático pelas unidades terminais remotas ou pelos controladores programáveis. Os sistemas de alerta utilizam aplicações especializadas para otimizar o funcionamento do equipamento eletromecânico, podendo estar ligado a um simulador para modelar a RDA, podendo gerir a configuração ou atuar nas suas diferentes operações (Mounce *et al.* 2003; Fonseca 2011).

Os sistemas de telegestão mais recentes beneficiam da integração dos instrumentos de apoio à decisão, como por exemplo instrumentos com funções de alarme, com ferramentas de apoio ao diagnóstico ou à avaliação de risco (Alegre e Covas 2010). Nestes sistemas mais modernos é notório o avanço tecnológico na qualidade da visualização, com a inclusão de dados georreferenciados, a inclusão das novas tecnologias e protocolos nos instrumentos e na comunicação, e o acesso a multiutilizadores com ligações cooperantes ou não.

Da conexão entre os dados de operação registados no sistema de telegestão com a caracterização física do sistema armazenado no SIG é possível tomar as decisões operacionais e técnicas mais adequadas em cada momento de modo estratégico, o que melhora a eficiência e a qualidade do serviço prestado. O historial dos vários parâmetros monitorizados, com valores agregados ou não, permite a análise estatística, nomeadamente: o tempo de utilização dos equipamentos, a sua fiabilidade e estado de

funcionamento, as necessidades de ampliação/renovação de setores da rede e planeamento dos investimentos.

Consequentemente, os benefícios decorrentes da utilização do sistema de telegestão são o aumento da capacidade operacional, a apresentação de respostas pró-ativas, uma melhor gestão de ativos com a compreensão do respetivo desempenho individual, a redução nos custos energéticos e de produtos químicos, a redução das fugas por recurso a métodos avançados de localização aproximada das fugas e providenciar dados para tomadas de decisão no curto/longo prazo mais eficientes.

A informação disponível no sistema de telegestão e SIG é benéfica para a localização aproximada de fugas de água em RDA com o recurso a modelos matemáticos. A existência de um sistema de telegestão agiliza o processo de estruturação da RDA e permite compilar informação que poderá estar armazenada em SI independentes (Bedford 2004; Shamsi 2005). No interior de um SIG é possível desenvolver ferramentas específicas para a localização aproximada de fugas ou, em alternativa, disponibilizar dados para a execução de um programa com a mesma finalidade no exterior (Mamo e Juran 2014; Meseguer *et al.* 2014).

A arquitetura dos sistemas de telegestão e SIG, os modelos, as estruturas e a segurança dos dados, os possíveis sistemas de comunicação e os componentes elétricos e eletromecânicos dos diferentes órgãos não serão abordados nesta tese.

Da monitorização contínua ou pontual dos parâmetros do sistema, reflexo do estado de funcionamento da RDA, obtém-se a medição. Em contexto real, a medição é perturbada por fatores sistemáticos e aleatórios, pelo que as características metrológicas do equipamento possibilitam o julgamento da sua adequação à utilização, da exatidão do valor obtido e respetiva estimativa de inexatidão (Henriques *et al.* 2006). Estes desvios são inevitáveis, geram incerteza na análise e devem ser considerados como parte do processo e do problema. Assim será recomendável uma rede de monitorização que minimize os desvios nas medições (Luvizotto Jr. 1998).

No âmbito da presente tese só será abordada a instrumentação que registre variáveis de estado diretamente associáveis à evolução das fugas de água. Em pontos estratégicos, os parâmetros a medir são a cota topográfica, a pressão e o caudal.

3.4.3.1 Medidor de nível da superfície livre

Os medidores de nível permitem conhecer os valores da cota da superfície livre ou nível de água em qualquer instante nos reservatórios (Sousa 2003). Caso os reservatórios disponham de mais do que uma célula, os medidores de nível devem ser colocados em pelo menos duas células. Estes instrumentos de medição podem ter montagem emersa ou imersa. O medidor de nível ultrassónico de tempo de trânsito pode ter a montagem emersa ou imersa. Dois exemplos de medidores de nível com montagem emersa são o medidor de nível por radar com transdução por tempo de trânsito fora do líquido e o medidor de nível ultrassónico de tempo de trânsito (também fora do líquido). Dois exemplos de medidores de nível da superfície livre com montagem imersa são o medidor de pressão hidrostática e o medidor de nível ultrassónico de tempo de trânsito dentro do líquido (Henriques *et al.* 2006).

O medidor de nível por radar utiliza ondas eletromagnéticas com medição do tempo de trânsito, para deteção da distância do nível da água ao ponto de instalação do instrumento, através das ondas refletidas pela superfície livre. Esta técnica é imune à variação da temperatura e da agitação do ar e o seu maior inconveniente está associado às dimensões das antenas utilizadas como emissores e recetores de ondas do instrumento.

O medidor de nível ultrassónico por tempo de trânsito utiliza ondas acústicas e mede o intervalo de tempo do eco ultrassónico, ou seja, mede o tempo de ida e retorno da onda acústica. Neste instrumento as funções de emissor e recetor são realizadas no mesmo dispositivo de efeito reversível ou em dois dispositivos distintos. O sensor pode estar emerso e medir a distância a que se encontra da superfície livre ou pode estar imerso e medir a altura da lâmina líquida até à superfície livre. A velocidade de propagação da onda acústica é dependente da temperatura, pelo que a variação da temperatura do meio influencia o resultado e a incorporação de um sensor para a medição da temperatura permite compensar este efeito.

Em alternativa, a medição do nível de água pode ser realizada com transdutores de pressão colocados no fundo do reservatório. Estes transdutores de pressão possuem uma membrana que é deformada pela diferença de pressão entre os dois lados da membrana (lado em contato com o líquido e lado interior da câmara). Esta deformação é

transformada em sinal eléctrico através de extensómetros metálicos ou de semicondutores. A pressão no interior da câmara pode ser a pressão atmosférica no ambiente do local (medição relativa), a pressão atmosférica padrão (medição relativa padrão), pressão nula (medição absoluta) ou a pressão de outro fluido ou ambiente (medição diferencial), Figura 3.3.

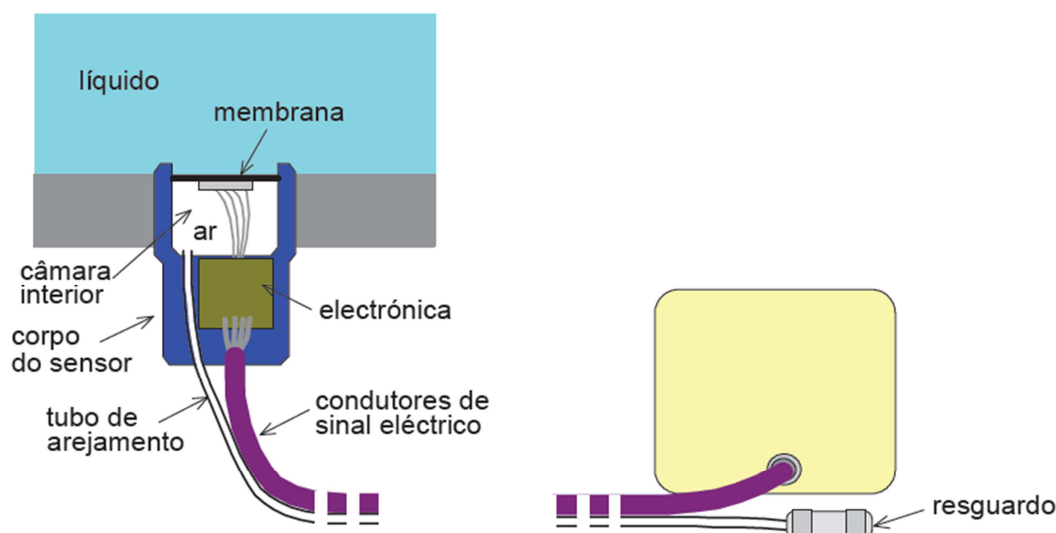


Figura 3.3 Princípio geral de um transdutor de pressão relativa com membrana (Henriques *et al.* 2006)

3.4.3.2 Instrumentos de medição de caudal

O Decreto-lei nº 71/2011 de 16 de Junho (DL71/ 2011) atualiza os requisitos dos instrumentos de medição e transpõe a Diretiva 2004/22/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 31 de Março e a Diretiva 2009/135/CE da Comissão de 10 de Novembro.

Os contadores de água são instrumentos concebidos para medir, totalizar e indicar o volume da água que os atravessa (Henriques *et al.* 2006). Os contadores podem ser mecânicos ou eletrónicos. Os registos dos contadores podem ser volumétricos, de velocidade, conjugados ou estáticos. Os contadores volumétricos registam a acumulação do volume. Os contadores de velocidade registam o movimento da passagem da água que é transmitido ao elemento indicador. Os contadores conjugados combinam contadores de velocidade numa única entidade e apresentam usualmente dois ou três contadores diferentes em paralelo.

Os caudalímetros são instrumentos concebidos para medir o caudal que passa através do transdutor de medição e poderão ser complementados com integradores que indicam o

volume acumulado. Os caudalímetros podem ser do tipo ultrassónico ou do tipo eletromagnético, consoante o efeito físico em causa seja a reflexão de ultrassons ou de um campo eletromagnético, respetivamente (Henriques *et al.* 2006).

Os medidores de caudal poderão estar instalados: à saída da captação, na entrada de água bruta/tratada importada, na saída de água bruta/tratada exportada, na entrada e saída da estação de tratamento de água, na saída de cada estação elevatória, na saída de cada reservatório, em todos os pontos de entrega de água a utilizadores e em diversos pontos da RDA visando o melhor controlo operacional do sistema, Figura 3.4.

A Portaria nº 21/2007 de 5 de Janeiro (Portaria21/ 2007) regulamenta o funcionamento dos contadores de água limpa, fria ou quente, para uso doméstico, comercial ou da indústria ligeira. Do cumprimento desta portaria resultam valores de erro máximo entre o caudal mínimo e o caudal de transição de $\pm 5\%$ e, no ensaio de durabilidade, valores de erros inferiores a $\pm 6\%$, entre a indicação do volume medido e o efetivo volume, para o intervalo entre o caudal mínimo e o de transição. Os caudais utilizados para cumprimento da portaria são caudais extremos mínimo e máximo, o que corresponde aos caudais onde a imprecisão na medição é máxima. Nas utilizações diárias, o caudal encontra-se entre estes valores extremos. As imprecisões associadas às medições dos contadores são independentes dos valores apresentados pela portaria.

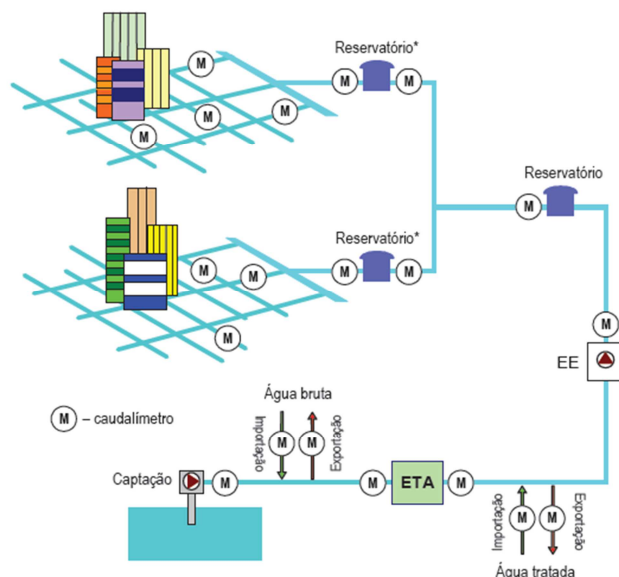


Figura 3.4 Localização típica de medidores de caudal em sistemas de abastecimento de água (*)⁴ (Henriques *et al.* 2006)

⁴ (*) O medidor de caudal instalado na entrada do reservatório só é recomendável caso corresponda à importação de água proveniente de outro sistema

Uma das imprecisões associadas às medições de água consumida, que contribuirá para as perdas aparentes, corresponde à elevada probabilidade de um contador não registar adequadamente um caudal inferior ao seu caudal mínimo (Taborda 1998) e faz Arregui *et al.* (2015) recomendarem a utilização de medidores de caudal de calibre mais reduzido nos ramais domiciliários. Contudo, a passagem de água por um contador produz uma elevada perda de carga localizada, que é mais notória quanto menor for o seu calibre.

De um modo genérico, o registo incorreto do funcionamento dos contadores pode estar associado (Covas 2008, Sousa 2011):

- à incorreta montagem ou por inadequação do tipo, ou do calibre, ou da classe metrológica do contador para a flutuação diária do caudal escoado e características da água;
- a avarias naturais do contador, isto é, por desgaste das peças internas, por envelhecimento, por incrustações calcárias, por perda da capacidade de magnetização dos imanes;
- a avarias provocadas por terceiros, defeito de fabrico, devido à violação e danificação intencional do contador ou condições de utilização;
- à falta de manutenção ou substituição periódica das suas peças ou vedantes;
- à perda de água por um elemento constituinte (exemplo clássico: o mostrador);
- à paragem do mecanismo de medição ou de registo.

A amostragem, e respetivo controlo estatístico, possibilita a avaliação do comportamento metrológico do parque de contadores instalados na RDA (Taborda 1998). Neste trabalho de 1998, os contadores foram agrupados segundo os modelos (calibre, tipo e classe) e idade (ciclo de arranque e paragem), foram testados e concluiu-se que a perda de precisão dos contadores aumenta com o aumento dos ciclos de arranque e paragem. Este trabalho recomenda a substituição de contadores com consumo não-doméstico maior de 29 m³/mês de 3 em 3 anos e os todos os restantes contadores de 5 em 5 anos.

Sanchez *et al.* 2000 e Sousa (2011) constataram a influência do caudal acumulado na precisão das leituras dos contadores. De modo semelhante, Hovany (2013) constatou a influência da duração do consumo na precisão das leituras dos contadores.

Mais recentemente, com os contadores instalados em território nacional, Balaguer e Arregui, (2015) analisaram, por amostragem, a frequência ótima de substituição dos contadores em função da idade e a evolução da subavaliação expressa como uma percentagem de erro global mínimo em função da idade e do consumo efetuado. Para cada contador, a precisão na medição tem comportamento diferente em função do caudal medido. O padrão de consumo de cada uso, entendido como a percentagem do consumo total para cada intervalo de caudal, irá influenciar a precisão da medição do contador. Este estudo concluiu que a idade económica de substituição dos contadores é superior ao prazo legal (12 anos).

A submedição dos contadores beneficia os utilizadores. As leituras nos medidores de caudal constituem as duas parcelas principais e com maior precisão do balanço hídrico, quer para a determinação da água de entrada no sistema, quer para a determinação do consumo autorizado faturado. Por consequência, a gestão do parque de contadores instalados é uma tática muito útil para conferir rigor às perdas aparentes.

Da junção da tecnologia de informação e comunicação com os contadores desenvolveram-se contadores mais modernos que dispõem de sistemas AMR – *Automatic Meter Reading*, ou seja, possibilitam a transmissão e a recolha remota dos dados da leitura nos contadores, a telecontagem. Além da contagem do volume de água, garantem a memorização remota dos valores em intervalos fixos de tempo e têm a capacidade de comunicar entre si e com equipamentos de recolha centralizada de informação (Martins 2010). Tanto dentro de propriedades privadas ou locais de difícil acesso, estas leituras facultam os dados para a faturação detalhada, para alertar a ocorrência de variações súbitas no padrão de consumos e para caracterizar os consumos dos utilizadores da rede: capitação, padrão horário, diário, semanal ou mensal de consumo (Loureiro *et al.* 2007).

A telecontagem apresenta diferentes desafios tanto em questões de *software*, de *hardware*, de direitos dos utilizadores e de retorno do investimento, entre outros

(Temido *et al.* 2014). Os benefícios são muitos conforme reportado por Beal e Flynn, (2014) e Cominola *et al.* (2015).

3.4.3.3 Instrumentos de medição de pressão

Quanto mais instrumentos de medição de pressão constituírem a rede de monitorização, maior será o número de observações (Liggett 1992). Estas observações podem gerar redundância de informação sobre uma zona, ou podem ser muito parcas ou de reduzida qualidade. Dependendo da independência e da qualidade das observações assim estimar-se-á a localização aproximada de fugas não reportadas em RDA (Pudar e Liggett 1992).

Regularmente, os medidores de pressão são colocados em pontos caracterizadores do comportamento hidráulico da RDA como, por exemplo, nos pontos mais sensíveis da rede, a jusante das estações elevatórias ou a montante e a jusante de VRP. Para cada cenário de solicitações, estes equipamentos monitorizam as pressões, informação imprescindível para a calibração da rede, ou seja para a caracterização física e operacional da rede (Savic *et al.* 2009), o que possibilita a confirmação dos valores de pressões regulamentares ou pressões desadequadas.

Os medidores de pressão apresentam-se como transdutores de pressão ou manómetros. Os transdutores de pressão podem ser piezoelétricos ou diferenciais, portáteis ou fixos, e podem registar a medição de forma contínua ou temporária. Os transdutores recebem uma pressão mecânica sobre uma parte da sua superfície e transformam-na num sinal eléctrico que será transmitido por um agente de transmissão de informação. O sinal será tratado no equipamento de monitorização. O transdutor poderá registar o valor medido se dispuser de um *data logger* local. Os instrumentos mais recentes dispõem de ligações para a recolha centralizada de valores em tempo real. Numa ZPC, caso o medidor de pressão disponha de transmissão directa de valores observados, esta transmissão possibilita a regulação remota do funcionamento da VRP (Berardi *et al.* 2015).

Os medidores de pressão requerem operações de calibração periódica. Os registos permitem a elaboração de gráficos explicativos da evolução da pressão no tempo para o ponto monitorizado e a definição da pressão média de serviço.

3.5 Definição da rede de monitorização

No âmbito do presente trabalho, a rede de monitorização proposta tem como objetivo ajudar a localizar as condutas da RDA com maior probabilidade de terem fugas e quantificar os respetivos caudais. Para concretizar este objetivo, as duas grandezas primordiais são o caudal e a pressão, sendo esta última convertida em cota piezométrica. A monitorização destas duas grandezas será abordada nas secções seguintes. Começa-se por definir onde armazenar a informação proveniente das duas grandezas, depois identificam-se os instrumentos de medição e finaliza-se com a localização dos pontos monitorizados da rede.

3.5.1 Monitorização do caudal

Para procederem à faturação, as EG detêm bastante informação sobre o caudal consumido em cada local de consumo.

Como já foi referido, por motivos de gestão efetua-se a monitorização, registo e observação dos caudais captados, tratados, aduzidos e armazenados. As boas práticas recomendam a medição do caudal na seção de saída de cada reservatório de uma RDA sem ZMC ou na seção de entrada de cada ZMC e ZPC, pelo que a rede de monitorização do caudal é inequívoca (Schaezen *et al.* 2000). A análise destes registos é a fonte primária de informação para indagar a existência de fugas na RDA.

Os valores das solicitações são genuinamente estocásticos. Os registos provenientes dos instrumentos de medição do caudal não alertam imediatamente para alterações no comportamento hidráulico da RDA. Estas alterações do comportamento hidráulico são detetadas devido à permanência de valores nos registos descontextualizados.

Associado ao dever de valorar e pagar o uso do serviço, insere-se o princípio do “utilizador-pagador”, com conseqüente registo da parcela da água fornecida. Estas observações têm, sobretudo, a função de possibilitar a faturação da água disponibilizada e poderão ser utilizadas na gestão da água. Tradicionalmente, os domicílios dos utilizadores da água estão munidos de contadores com leitura periódica manual, mecânica e local, mas existem zonas piloto no país com contadores eletrónicos com

armazenamento ou providos de transmissão analógica periódica de dados.

É boa prática das EG a monitorização do consumo autorizado mesmo que não faturado, visto disponibilizar dados relevantes e úteis, nomeadamente sobre os usos próprios da EG, sobre os usos de outros utilizadores e também como dados de entrada na análise do balanço hídrico.

Não obstante o rigor na micromedição dos consumos dos utilizadores e nas estimativas dos consumos não medidos, não é possível estimar as perdas anuais de água, nem efetuar uma análise do funcionamento da RDA fidedigna sem o valor da macromedição nos reservatórios. Acresce ainda que, perante a inevitabilidade da existência de fugas de água, a monitorização do CMN nos reservatórios ou nas secções de entrada das ZMC, permite determinar e confirmar rapidamente os volumes perdidos com rigor.

3.5.2 Monitorização da pressão

A pressão é uma outra variável da RDA que poderá ser observada. Esta variável permite estimar a cota piezométrica através da adição da pressão observada à cota topográfica do ponto de instalação do equipamento de medição da pressão. A definição da rede de monitorização da pressão é mais arbitrária porque os instrumentos envolvidos são mais baratos, mais versáteis e registam imediatamente as alterações do comportamento hidráulico da rede.

Nos nós de fronteira e de entrada da rede ou da ZMC, a EG poderá dispor de alguma informação sobre o valor da cota piezométrica, caso estejam instalados equipamentos para medição da pressão ou do nível da superfície livre. Contudo, na restante rede não existem imperativos funcionais para a observação desta variável.

Tradicionalmente, desde que a pressão garanta valores operacionais para os utilizadores da RDA, a sua amplitude diária não é avaliada pela EG. Por consequência, a monitorização da pressão não tem merecido a devida importância; não obstante existirem obrigações a respeitar, quanto a valores máximos, mínimos e amplitudes de variação, bem como limites para a resistência dos materiais das condutas (RGSPPDADAR DRn^o23/ 1995).

De igual modo, se estiverem instalados equipamentos para medição do nível da superfície livre nos reservatórios, a cota da superfície livre será conhecida e estará confinada entre valores extremos definidos na fase de execução.

A tentativa de melhorar a previsão do posicionamento das fugas de água decorre da análise das suas consequências, pelo que a evolução da cota piezométrica na RDA reflete a presença das fugas de água acompanhadas dos consumos. Para o efeito, é necessário definir uma rede de monitorização da pressão e converter os valores em cota piezométrica.

Caso a rede de monitorização seja redundante, os desvios nas medições das pressões e na estimativa das cotas piezométricas podem ser compensados, beneficiando o resultado final em rigor. A justificação prende-se com as características do problema inverso e mal condicionado (Franklin 1970; Kapelan *et al.* 2004; Lay-Ekuakille *et al.* 2009).

Assim, a seleção dos pontos a monitorizar para a modelação das RDA tem sido um tema profícuo. O problema de seleccionar a localização de medidores de pressão num universo de localizações possíveis tem uma natureza combinatória, e o espaço solução cresce com o aumento da dimensão da RDA.

3.5.3 Tipos de RDA e evolução da cota piezométrica

A dissipação de energia mecânica devida ao atrito desenvolvido entre o escoamento da massa de água e a superfície interior das tubagens e acessórios resulta na perda de carga total, contabilizada no sentido do escoamento. Quanto maior o caudal do escoamento, mais intensas serão as forças de atrito e maiores serão as perdas de carga totais. As fugas, tal como os consumos, são caudais que saem dos reservatórios para a rede. Assim, a RDA com consumos e fugas apresenta um aumento do caudal saído do reservatório em relação às necessidades de consumo e, nos nós, apresenta uma redução nas cotas piezométricas e na pressão prevista para a situação de existência exclusiva de consumos.

Os nós numa rede são definidos por condições bem estabelecidas e as suas ligações definem a conectividade e o tipo de rede. A maioria das RDA nos aglomerados é mista,

com zonas do tipo ramificada e outras do tipo emalhada (Wagner, *et al.* 1988; Wagner, *et al.* 1988(a)). Esta configuração depende da dispersão geográfica dos locais abastecedores, dos locais onde há procura de água e das barreiras físicas como as estradas, os edifícios, os rios entre outros exemplos (Yazdani e Jeffrey, 2011).

Nos modelos matemáticos de simulação hidráulica, o consumo está concentrado nos nós, em cada conduta o escoamento é uniforme e a sua perda de carga unitária é constante. Nas fórmulas de Darcy-Weisbach, de Chezy e de Gauckler-Manning-Strickler a perda de carga unitária é proporcional ao quadrado do caudal (Quintela 1981).

Numa zona da rede do tipo ramificada, a sua configuração estabelece um sentido de escoamento único e cada conduta transporta o caudal em concordância com o princípio da continuidade de um líquido incompressível aplicado a todos os nós. Em todas as condutas no percurso entre o reservatório (ou ponto abastecedor) e a posição da fuga de água a equação da energia é satisfeita, e verifica-se um acréscimo constante de caudal que supera o valor previsto para o consumo. Assim, no caso do aumento do caudal em relação ao previsto provocar um aumento observável de perda de carga em cada conduta, será observável um decréscimo na cota piezométrica face aos valores previsto em cada nó, decorrente do decréscimo na pressão. Entre a secção do reservatório e a posição em análise, o diferencial entre os valores -previsto e observado- é consequência do acumular de perdas de carga. A jusante da posição da fuga, todos os nós observam igual redução de cota piezométrica e de pressão face ao previsto.

Nas zonas emalhadas, a complexidade das ligações entre nós permite garantir o princípio da continuidade e da lei da energia, alterar o caudal e até o sentido de escoamento em qualquer conduta por consequência de alterações nas solicitações. Esta dinâmica do escoamento, que decorre da topologia da rede e dos diâmetros das suas condutas, tende a harmonizar o comportamento hidráulico da RDA e, consequentemente, aproxima o valor das cotas piezométricas entre os diferentes nós (Wood e Funk 1992; Saldarriaga 1998; Izquierdo *et al.* 2004). Por consequência, para o acréscimo de perda de carga ser observável, a rede tenderá a necessitar de um caudal de fuga maior do que é necessário numa rede ramificada. Em simultâneo, nas zonas emalhadas, só os nós mais próximos da fuga é que poderão tender a sofrer as maiores variações de pressão entre

os valores previsto na simulação hidráulica e os valores observados (Luvizotto Jr. 1998).

3.5.4 Rede de monitorização da pressão

Neste ponto, propõe-se uma reflexão sobre os locais onde colocar os transdutores de pressão na RDA. Este conjunto constituirá uma rede de monitorização da pressão, ou seja, será a rede de amostragem.

Da experiência da calibração de RDA, tanto Savic *et al.*, (2009) como Morosini *et al.*, (2014) recomendam respostas prévias para a magnitude observável da variável pelos instrumentos e para a identificação de quando, onde e quais são as condições para a sua existência desta magnitude observável.

Em simultâneo os dados recolhidos com magnitude observável deverão ser elucidativos na representação do comportamento hidráulico da RDA perante diferentes cenários. Neste sentido, é recomendável a monitorização de variáveis em circunstâncias onde a magnitude da leitura e a magnitude da variação da leitura dos dados seja muito diferente da magnitude dos desvios nas leituras dos instrumentos (Walski 1983; Walski 2000). Os dados contendo erros grosseiros também deverão ser eliminados.

Ao longo do dia, da semana ou do ano, a monitorização contínua de uma variável apresenta um padrão. Qualquer alteração a este padrão poderá indiciar uma alteração às características físicas ou operacionais da rede, se for excluída outra justificação.

Por outro lado, a monitorização instantânea de uma variável (caudal) permite usar leis da física, como as leis de resistência que relacionam as cotas piezométricas. Um exemplo é a monitorização da cota piezométrica, num instante, nos dois nós de extremidade de uma tubagem, de comprimento conhecido e sem válvulas, o que estabelece o caudal escoado na mesma. Generalizando, se duas tubagens partilham um nó de extremidade e sabendo as cotas piezométricas nos três nós com as leis de resistência poderá ser calculado o caudal escoado em cada uma das tubagens, bem como, sabendo a cota piezométrica num dos nós, o caudal numa das tubagens e o caudal saído no nó partilhado as restantes duas cotas piezométricas poderão ser calculadas

(Bribiesca e Maníes 1996).

Se conhecer a cota piezométrica em nós adjacentes permite estimar os caudais escoados entre estes nós, então conhecer as cotas piezométricas em vários pontos de uma RDA permitirá conhecer o escoamento na mesma? Ou permitirá melhorar a capacidade de localizar e isolar as fugas na RDA com ferramentas de modelação estática do comportamento hidráulico?

Na opinião de Farley *et al.*, (2010), Ribeiro *et al.*, (2015) e Sousa *et al.*, (2015) uma conduta com fugas é isolável se a rede de monitorização for adequada e permitir melhorar a compreensão do efeito do caudal das fugas e das perdas de carga associadas na RDA.

3.5.5 Revisão das principais metodologias utilizadas na definição da rede de monitorização numa RDA

A análise da qualidade da água propôs inúmeras metodologias procurando por exemplo maximizar a cobertura da rede de amostragem (Lee e Deininger 1992). Mais adaptado ao problema em análise, a experiência da calibração da rugosidade das tubagens no modelo da RDA evidenciou a necessidade de recorrer a regiões de confiança no interior das quais os valores dos parâmetros teriam alguma amplitude, variância, covariância, sensibilidade ou desvio padrão.

Para eliminar algumas observações com erros, seria ideal a existência de mais medições do que variáveis de estado. Em simultâneo, a localização do ponto de monitorização é vital para o desempenho representativo do modelo de simulação. Sterling e Bargiela (1984) propuseram um algoritmo para estimar o estado da RDA que procura minimizar as inconsistências das observações. Na formulação do problema as equações foram linearizadas, o que agilizou a computação.

Vários autores selecionaram a rede de monitorização com base na topologia da rede. Nas redes de distribuição de energia há vários trabalhos fundamentados na topologia (Clements *et al.* (1983). “; Bargiela *et al.* 1986; Chakrabarti *et al.* 2009) cujas noções foram adaptadas para a realidade das RDA. Bargiela (1985) foi pioneiro na definição de

um algoritmo para estimação de estados da rede com análise de observabilidade. Esta análise é fundamentada na topologia da rede e no conjunto de observações. O algoritmo proposto demonstrou ser adequado para a estimação de estados da rede quando o conjunto de observações no sistema é redundante.

Esta constatação dificulta a obtenção de uma solução pois, geralmente, não há observações suficientes para estimar os valores associados ao estado da rede. Uma outra dificuldade encontra-se na metodologia utilizada para resolver o problema inverso, o qual perante numerosas alternativas poderá tornar-se instável.

Recentemente, no trabalho de Sousa *et al.* (2015) o conceito de observabilidade foi integrado com a teoria dos grafos e com a análise *cluster*. A metodologia começa por aplicar o algoritmo Floyd-Warshall para determinar o caminho mais curto entre cada par de nós (tendo com critério a perda de carga) e recorre ao recozimento simulado para resolver um problema de otimização (minimização da máxima distância de cada nó a um ponto de monitorização).

A definição da rede de amostragem pode ser definida com a utilização do método Newton-Raphson e a matriz Jacobina. (Powell 1992). Seja a matriz Jacobiana:

$$J = \begin{pmatrix} \frac{\partial G_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial G_1}{\partial x_N} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial G_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial G_n}{\partial x_N} \end{pmatrix} \quad 3.30$$

com $x = (x_1, x_2, \dots, x_N)$ o vetor das variáveis dependentes ou variáveis básicas (Shamir 1974).

Considere-se ainda que o vetor sensibilidade $\left[\frac{\partial x}{\partial y_m} \right]$ das N variáveis dependentes perante uma alteração y_m de cada parâmetro pode ser expresso por:

$$\left[\frac{\partial G}{\partial x} \right] \cdot \left[\frac{\partial x}{\partial y_m} \right] = \left[- \frac{\partial G}{\partial y_m} \right] . \quad 3.31$$

Kiefer e Wolfowitz (1959), Kiefer (1961), Bush e Uber (1998), Lansey *et al.* (2001), Sumer e Lansey (2009) e Preis *et al.* (2010), entre outros autores, investigaram o resultado da utilização dos critérios de otimalidade denominados A, D e V. O critério de

otimalidade A baseia-se numa análise da matriz Jacobiana e pretende reduzir a variância σ^2 do conjunto de dados $[a_i]$, com média μ :

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i - \mu)^2}{N} = \frac{\sum_{i=1}^N (a_i)^2}{N} - \mu^2 = \frac{\sum_{i=1}^N a_i^2}{N} - \frac{(\sum_{i=1}^N a_i)^2}{N^2} \quad 3.32$$

Um exemplo de aplicação deste critério à análise dos erros de medição associados ao coeficiente de rugosidade pode ser encontrado em Bush e Uber (1998) e Lansey *et al.* (2001).

O critério de otimalidade V (representado por *CC*) determina a covariância entre 2 variáveis aleatórias reais x e y de acordo com os respetivos desvios padrão σ_x e σ_y .

$$CC = \frac{Cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{E[(X - \mu_x)(Y - \mu_y)]}{\sigma_x \sigma_y} \quad 3.33$$

Um valor de *CC* nulo indica a inexistência de correlação entre as variáveis, e valores de 1 e -1 uma dependência entre as duas variáveis (Sumer e Lansey 2009; Preis *et al.* 2010).

O critério de otimalidade D foi o primeiro critério a ser estabelecido (Kiefer e Wolfowitz 1959; Kiefer 1961). Este critério procura uma solução através de uma regressão, ou seja, através da minimização da raiz quadrada do determinante da matriz de covariância.

O trabalho de Sanz e Pérez, (2015) recomenda a utilização do critério de otimalidade A e não o critério de otimalidade V. O critério globalmente menos eficaz é o critério de otimalidade A que minimiza a incerteza dos parâmetros (Thompson *et al.* 2011). O trabalho de Behzadian *et al.*, (2008, 2009) integra a variância dos parâmetros num problema de otimização multiobjetivo.

A teoria das redes neuronais e os seus desenvolvimentos são apropriados para utilizar neste tipo de problemas. Gabrys e Bargiela (1999a) e Gabrys e Bargiela (1999b) abordam o problema da definição da rede de monitorização através da teoria das redes neuronais. As suas propostas reconhecem que as observações retiradas da RDA estão sempre associadas a um grau de incerteza bem como os modelos de simulação podem

ter erros e não serem representativos da realidade. Ragot e Maquin (2006) procuram definir a rede de monitorização recorrendo a uma análise *fuzzy*. Eles utilizaram regras para detetar e isolar erros nos medidores de caudal e aplicaram-nas ao funcionamento da RDA.

Ainda nesta linha de investigação, Izquierdo *et al.* (2007) propõem definir a rede de monitorização através da utilização de técnicas *neuro-fuzzy* que integram técnicas de modelação determinística com técnicas de aprendizagem das redes neuronais.

No decurso do seu trabalho, Poulakis *et al.* (2003) reconhece que a definição da rede de monitorização é uma decisão estratégica para a deteção de fugas nas RDA, não obstante o enquadramento probabilístico do método proposto.

Andersen e Powell (2000) apresentaram uma metodologia implícita para definir a rede de monitorização. Nos casos de estudo apresentados reconheceram que a metodologia apresentava dificuldades na convergência devido à utilização do método Newton-Raphson.

Outro modo de tentar abordar o problema da definição da rede de monitorização está associado à análise de sensibilidade, ou seja à avaliação das consequências da existência de fugas. Para efeitos de calibração de RDA visando a localização de fugas de água considera-se cada elemento da matriz de sensibilidade como o resultado da variação da pressão nos nós, em função do caudal de fuga em análise. Gertler *et al.* (2010) recomendam a normalização da matriz sensibilidade, bem como Pérez *et al.* (2010) recomenda a criação de uma matriz binária com a identificação das localizações onde os equipamentos de medição não apresentam observações detetáveis.

A matriz de sensibilidade ou Jacobiana (Kang e Lansey 2010) depende do funcionamento da rede, dos seus consumos e condições de fronteira. Pérez *et al.* (2010) consideram que o cálculo desta matriz é difícil por envolver muitas variáveis e requerer equações implícitas.

Nas RDA, o problema da localização de sensores poderá ter como hipótese algumas especificações para o correto diagnóstico da fuga, isto é, recorrendo a algumas noções da deteção, localização, isolamento, sensibilidade a falhas e/ou a fugas nos sistemas.

Estas noções foram adaptadas como estratégias de diagnóstico do funcionamento das redes e organizadas como um problema de otimização. Diferentes modelos foram apresentados com diferentes estratégias de diagnóstico, como por exemplo, com o objetivo de maximizar a capacidade de diagnóstico (Sarrate *et al.*, 2012), com o objetivo de maximizar a capacidade de isolar as fugas (Rosich *et al.* 2012), com o objetivo de maximizar a identificação das alterações introduzidas pela presença de fugas (Pérez *et al.* 2011), procurando maximizar a robustez da rede de amostragem atendendo à matriz de sensibilidade de falhas e às diferentes magnitudes dos caudais de fuga e cenários de operacionalidade (Blesa *et al.* 2014). Estas metodologias funcionam bem em redes teóricas, mas o seu funcionamento em casos reais é afetado pela incerteza dos consumos e pelas irregularidades nas observações.

Mais recentemente, Ferrandez-Gamot *et al.* (2015) propuseram a definição da rede de monitorização através da combinação de valores residuais estimados pelos modelos de simulação e os valores residuais obtidos com a sensibilidade à presença de uma fuga.

O problema da localização de sensores também poderá ser abordado considerando a hipótese da conectividade entre os nós da rede, logo utilizando a teoria de grafos. Com recurso à noção de redundância e ciente da restrição de dispersão longitudinal dos acontecimentos na rede no interior de cada conduta e dispersão radial em redor de cada nó, Christodoulou *et al.*, (2013) propõem uma localização de sensores acústicos, sem limitações quanto ao número, mas com a preocupação de garantir o correto diagnóstico, tal como no trabalho de Agathokleous *et al.* (2015).

A realização da análise com técnicas *cluster* permite definir a rede de monitorização. Fusco *et al.* (2014) define a rede de monitorização por junção em *cluster* das observações muito correlacionadas, conseguindo distinguir as falsas positivas previsões de localizações das fugas das localizações positivas. Candelieri *et al.* (2015), analisam um conjunto de cenários de fugas com diferentes localizações e amplitudes, as variações e pressões obtidas e correspondentes caudais são agrupadas com um algoritmo de *cluster* gráfico e estipuladas as relações entre as localizações das fugas, as variações de pressão e as variações dos caudais observadas.

Nejjari *et al.* (2015) recorrem a técnicas de *cluster* para identificar os nós a excluir da

análise devido à sua reduzida capacidade de diagnóstico. Esta redução de alternativas facilita a determinação e a utilização da matriz sensibilidade. Casillas *et al.* (2015) sugerem a utilização de otimização estocástica para a resolução do problema inteiro associado à definição da rede de monitorização. A cada nó candidato a ter fugas é atribuído um valor equivalente ao baricentro do hiperplano gerados com as diferentes magnitudes de caudal de fuga, admitindo uma relação proporcional entre o caudal e a pressão. Este estudo confirma a correlação negativa entre a função objetivo e a eficiência do método de deteção de fugas.

Mais recentemente Ribeiro *et al.* (2015) propõe a utilização do algoritmo *TrustRank* no âmbito da definição da rede de monitorização de modo a simplificar esta fase tendo obtido resultados muito promissores. Esta metodologia é estática e considera a topologia e o comportamento hidráulico da rede, sendo desenvolvida detalhadamente no próximo capítulo.

3.6 Referências bibliográficas

Agathokleous, A., Xanthos, S., Christodoulou, S. (2015). "Real-time monitoring of water distribution networks". *Water Util J.* 10:15–24.

Alegre, H., Covas, D. (2010). "Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água Uma abordagem centrada na reabilitação". LNEC. ERSAR, editor. Lisboa. Série GUIAS TÉCNICOS.

Andersen, J., Powell, R. (2000). "Implicit state-estimation technique for water network monitoring". *Urban Water.* 2:123–130.

Aragão, A. (2011). "A natureza não tem preço... mas devia. O dever de valorar e pagar os serviços dos ecossistemas".

Aronoff, S. (1989). "Geographic Information Systems : A Management Perspective". Wdl Pubns.

Arregui, F., Balaguer, M., Soriano J. (2015). "Quantifying measuring errors of new residential water meters considering different customer consumption patterns". *Urban Water J.* 12:1–13.

- Balaguer, M., Arregui, F. (2015). "Parque de contadores". Lisboa. Available from: http://iperdas.org/np4/?newsId=250&fileName=Forum_iPerdas_Contadores__MB_.pdf
- Bargiela, A., Hainsworth, D. (1989). "Pressure and flow uncertainty in water systems". *J Water Resour Plan Manag.* 115:40–48.
- Bargiela, A., Irving, M., Sterling, M. (1986). "Observability determination in power system state estimation using a network flow technique". *IEEE Power Eng Rev.*:108–114.
- Bargiela, A. (1985). "An algorithm for observability determination in water-system state estimation". *IEE Proc.* 132:245–250.
- Beal, C., Flynn, J. (2014). "The 2014 review of smart metering and intelligent water networks in Australia & New Zealand". Relatório para Water Services Association of Australia: por Smart Water Research Centre, Griffith University.
- Bedford, M. (2004). "Gis for water management in Europe". Esri Press.
- Behzadian, K., Ardeshtir, A., Kapelan, Z., Savic, D. (2008). "Stochastic sampling design for water distribution model calibration". *Int J Civ Eng.* 6:48–57.
- Behzadian, K., Kapelan, Z., Savic, D. (2009). "Stochastic sampling design using multiobjective genetic algorithm and adaptive neural networks". *Environmental Modelling & Software* 24:530–541.
- Berardi, L., Giustolisi, O., Todini, E. (2010). "Accounting for uniformly distributed pipe demand in WDN analysis: enhanced GGA". *Urban Water J.* 7:243–255.
- Berardi, L., Laucelli, D., Ugarelli, R., Giustolisi, O. (2015). "Hydraulic system modelling: background leakage model calibration in Oppegård municipality". *Procedia Eng.* 119:633–642.
- Bicik, J., Kapelan, Z., Savić, D. (2013). "Challenges in the implementation of a DSS for real-time WDS management". Em: *International Conference on Computing and Control for the Water Industry, CCWI*
- Blesa, J., Nejjari, F., Sarrate, R. (2014). "Robustness analysis of sensor placement for leak detection and location under uncertain operating conditions". *Procedia Eng.* 89:1553–1560.

Bribiesca, J., Maníes, Ó. (1996). "Método para detectar fugas mayores en una red de agua potable". *Ing del Agua*. 3:59–68.

Brunone, B. (1999). "Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes". *J Water Resour Plan Manag*. 125:302–306.

Bush, C., Uber, J. (1998). "Sampling design methods for water distribution model calibration". *J Water Resour Plan Manag*. 124:334–344.

Candelieri, A., Conti, D., Archetti, F. (2014). "Improving Analytics in Urban Water Management: A Spectral Clustering-based Approach for Leakage Localization". *Procedia - Soc Behav Sci*. 108:235–248.

Candelieri, A., Soldi, D., Archetti, F. (2015). "Cost-effective sensors placement and leak localization – the Neptun pilot of the ICeWater project". *J Water Supply Res Technol*. 64:567–583.

Carpentier, P., Cohen, G. (1993). "Applied mathematics in water supply network management". *Automatica*. 29:1215–1250.

Casillas, M., Garza-Castañón L., Puig, V. (2015). "Sensor placement for leak location in water distribution networks using the seak signature space". *IFAC-PapersOnLine*. 48:214–219.

Cassa, A., Van Zyl, J., Laubscher, R. (2010). "A numerical investigation into the effect of pressure on holes and cracks in water supply pipes". *Urban Water J*. 7:109–120.

Cassa, A., Van Zyl, J. (2008). "A numerical investigation into the behaviour of cracks in uPVC pipes under pressure". Em: 10th Annu Water Distrib Syst Anal Conf. Kruger National Park, South Africa, 17-20 Agosto.

Catarro, J. (2012). "Calibração de Modelos Hidráulicos em Sistemas de Abastecimento de Água". *Dissertação de Mestrado, Universidade de Coimbra*.

Cembrano, G., Quevedo, J., Puig, V., Pérez, R., Figueras, J., Verdejo J., Escaler I, Ramón, G., Barnet, G., Rodríguez, P., Casas, M. (2011). "PLIO: a generic tool for real-time operational predictive optimal control of water networks". *Water Sci Technol*. 64:448–59.

Cesario, L. (1995). "Modeling, analysis and design of water distribution systems".

Denver: American Water Works Association.

Chakrabarti, S., Kyriakides, E., Eliades, D. (2009). "Placement of synchronized measurements for power system observability". *IEEE Trans Power Deliv.* 24:12–19.

Cheng, W., He, Z. (2011). "Calibration of Nodal Demand in Water Distribution Systems". *J Water Resour Plan Manag.* 137:31–41.

Christodoulou, S., Gagatsis, A., Xanthos, S., Kranioti, S., Agathokleous, A., Fragiadakis, M. (2013). "Entropy-Based Sensor Placement Optimization for Waterloss Detection in Water Distribution Networks". *Water Resour Manag.* 27:4443–4468.

Clements, K., Krumpholz, G., Davis, P. (1983). "Power system state estimation with measurement deficiency: an observability / measurement placement algorithm". *IEEE Power Eng Rev.*:2012–2020.

Coelho, B., Andrade-Campos, A. (2014). "Efficiency achievement in water supply systems—A review". *Renew Sustain Energy Rev.* 30:59–84.

Colombo, A., Karney, B. (2002). "Energy and Costs of Leaky Pipes: Toward Comprehensive Picture". *J Water Resour Plan Manag.* 128:441–450.

Cominola, A., Giuliani, M., Piga, D., Castelletti, A., Rizzoli A. (2015). "Benefits and challenges of using smart meters for advancing residential water demand modeling and management: A review". *Environ Model Softw.* 72:198–214.

Covas, D. (2008). "Parte II: Controlo de perdas de água" [Internet]. :1–29. Available from: https://dspace.ist.utl.pt/bitstream/2295/179979/1/Aula_e11%-%20Parte%II_Perdas.pdf

DL194/. (2009). "Decreto-Lei nº 194/2009 de 20 de Agosto". *Diário da República* 1ª série:5418–5435.

DL71/. (2011). "Decreto-Lei Nº71/2011 de 16 de Junho". *Diário da República*.1ª série:3201-3243.

Eastman, J., Fulk, M., Toledano, J., Hutchinson, C. (1993). "The GIS Handbook". USAID/ARTS/FARA.; SARSA, editor.

Ediriweera, D., Marshall, I. (2010). "Monitoring water distribution systems: understanding and managing sensor networks". *Drink Water Eng Sci.* 3:107–113.

ERSAR. (2012). "Apuramento de custos e proveitos dos serviços de águas e resíduos prestados por entidades gestoras em modelo de geatão direta".

ERSAR. (2013). "Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal 2012 Volume 1 Caraterização geral do setor". Lisboa. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

Farley, B., Mounce, S., Boxall, J. (2010). "Field testing of an optimal sensor placement methodology for event detection in an urban water distribution network". *Urban Water J.* 7:345–356.

Farley, M., Trow, S. (2003). "Losses in water distribution networks and control - A practitioner's guide to assessment, monitoring and control". Cornwall, UK: IWA.

Farley, M. (2001). "Leakage management and control - A best practice training manual". Geneva, Switzerland: World Health Organization.

Ferrandez-Gamot, L., Busson, P., Blesa, J., Tornil-Sin, S., Puig, V., Duviella, E., Soldevila, A. (2015). "Leak localization in water distribution networks using pressure residuals and classifiers". *IFAC Proc Vol.* 48:220–225.

Ferreri, G., Napoli, E., Tumbiolo., A. (1994). "Calibration of roughness in water distribution network". Em: *2nd Int Conf Water Pipeline Syst.* Edinburgh, UK; p. 379–396.

Floudas, C. (1995). "Nonlinear and mixed-integer optimization fundamentals and applications". Oxford New York: Oxford University Press.

Fonseca, F. (2011). "Modelo de sistema de automação aplicado à setorização de redes de abastecimento hídrico". Tese de doutoramento, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Franchini, M., Lanza, L. (2014). "Use of Torricelli's equation for describing leakages in pipes of different elastic materials, diameters and orifice shape and dimensions". *Procedia Eng.* 89:290–297.

Franklin, J. (1970). "Well-posed stochastic extensions of ill-posed linear problems". *J Math Anal Appl.* 31:682–716.

Fusco, F., Eck, B., Kenna, S. (2014). "Bad data analysis with sparse sensors for leak

localisation in water distribution networks". Em: 22nd Int Conf Pattern Recognit. IEEE; p. 3642–3647.

Gabrys, B., Bargiela, A. (1999). "Neural Networks Based Decision Support in presence of Uncertainties". J Water Resour Plan Manag. 125:272–280.

Gabrys, B., Bargiela, A. (1999). "Analysis of Uncertainties in Water Systems Using Neural Networks". Meas Control. 32:145–147.

Germanopoulos, G. (1985). "A technical note on the inclusion of pressure dependent demand and leakage terms in water supply network models". Civ Engineering Syst. 2:171–179.

Gertler, J., Romera, J., Puig, V., Quevedo, J. (2010). "Leak detection and isolation in water distribution networks using principal component analysis and structured residuals". Em: 2010 Conf Control Fault-Tolerant Syst. Nice, France: IEEE; p. 191–196.

Giustolisi, O., Kapelan, Z., Savic, D. (2007). "A hydraulic simulation model for pipe networks with leakage out- flows and pressure-driven demand". Em: Proc World Environ Water Resour Congr. Tampa, Florida: ASCE.

Giustolisi, O., Laucelli, D., Berardi, L., Savić, D. (2012). "A computationally efficient modeling method for large size water network analysis". J Hydraul Eng. 138:313–326.

Giustolisi, O., Savic, D., Kapelan, Z. (2008). "Pressure-driven demand and leakage simulation for water distribution networks". J Hydraul Eng. 134:626–635.

Goulet, J., Smith, I. (2013). "Predicting the usefulness of monitoring for identifying the behavior of structures". J Struct Eng. 139:1716–1727.

Greyvenstein, B., Van Zyl, J. (2007). "An experimental investigation into the pressure - leakage relationship of some failed water pipes". J Water Supply Res Technol. 56:117–124.

Henriques, J., Palma, J., Ribeiro, Á. (2006). "Guia técnico 9 - Medição de caudal em sistemas de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais urbanas". Série Guia. Lisboa. Série GUIAS TÉCNICOS: LNEC IRAR.

Hovany, L. (2013). "Error in water meter measuring due to shorter flow and

consumption shorter than the time the meter was calibrated". Em: *Water Supply Syst Anal - Sel Top*. Hovany; p. 131–149.

Islam, M. (2012). "Water distribution system failures: an integrated framework". PhD Thesis, University of British Columbia, Okanagan.

Izquierdo, J., López, P., Martínez, F., Pérez, R. (2007). "Fault detection in water supply systems using hybrid (theory and data-driven) modelling". *Math Comput Model.* 46:341–350.

Izquierdo, J., Pérez, R., Iglesias, P. (2004). "Mathematical models and methods in the water industry". *Math Comput Model.* 39:1353–1374.

Kanakoudis, V., Gonelas, K. (2014). "Accurate water demand spatial allocation for water networks modelling using a new approach". *Urban Water J.* 1–18.

Kang, D., Lansey, K. (2010). "Optimal meter placement for water distribution system state estimation". *J Water Resour Plan Manag.* 136:337–348.

Kapelan, Z. (2000). "Inverse transient analysis in pipe networks for leakage detection and roughness calibration". Em: *Water Netw Model Optim Des Manag.*

Kapelan, Z., Savic, D., Walters, G. (2004). "Incorporation of prior information on parameters in inverse transient analysis for leak detection and roughness calibration". *Urban Water J.* 1:129–143.

Kapelan, Z., Savic, D., Walters, G. (2003). "A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks". *J Hydraul Res.* 41:481–492.

Kiefer, J., Wolfowitz, J. (1959). "Optimum designs in regression problems". *Ann Math Stat.* 30:271–294.

Kiefer, J. (1961). "Optimum designs in regression problems II". *Ann Math Stat.* 32:298–325.

Koppel, T., Vassiljev, A. (2013). "Estimation of real-time water fluxes in water distribution system on the basis of pressure measurements". *Adv Eng Softw.* 66:19–23.

Krause, A., Leskovec, J., Guestrin, C., Vanbriesen, J., Faloutsos, C. (2008). "Efficient sensor placement optimization for securing large water distribution networks". *J Water*

Resour Plan Manag. 134:516–526.

Lambert, A. (1994). "Accounting for losses: The bursts and background concept". *Water Environ J.* 8:205–214.

Lambert, A. (2000). "What do we know about pressure: leakage relationships in distribution systems?". Em: Proc IWA Conf Syst Approach to Leakage Control Water Distrib Syst Manag. Brno, Czech Republic; p. 1–8.

Lansey, K., Elshorbagy, W., Ahmed, I., Araujo, J., Haan, C. (2001). "Calibration assessment and data collection for water distribution networks". *J Hydraul Eng.* 127:270–279.

Lansey, K. (2000). "Chapter 7 - Optimal design of water distribution systems". Em: Mays L, editor. *Water Distrib Syst Handb.* McGraw-Hill; p. 7.1–7.15.

Lay-Ekuakille, A., Vendramin, G., Trotta, A. (2009). "Spectral analysis of leak detection in a zigzag pipeline: A filter diagonalization method-based algorithm application". *Meas J Int Meas Confed.* 42:358–367.

Lee, B., Deininger, R. (1992). "Optimal locations of monitoring stations in water distribution system". *J Environ Eng.* 118:4–16.

Lee, P., Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2005). "Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks". *J Hydraul Eng.* 131:596–604.

Lee, P., Vítkovský, J., Lambert, M., Simpson, A., Liggett, J. (2005). "Leak location using the pattern of the frequency response diagram in pipelines: a numerical study". *J Sound Vib.* 284:1051–1073.

Liggett, J., Chen, L. (1994). "Inverse transient analysis in pipe networks". *J Hydraul Eng.* 120:934–955.

Liggett, J. (1992). "Network monitoring and the algorithmic location of leaks under steady and unsteady conditions". Em: Cabrera E, Martinez F, editores. *Water Supply Syst State art Futur trends.* Southampton, RU: Computational Mechanics Publication; p. 253–270.

Lin, M., Liu, Y., Liu, G., Chu, C. (2007). "Scatter search heuristic for least-cost design of water distribution networks". *Eng Optim.* 39:857–876.

Loureiro, D., Álvares, A., Coelho, S. (2007). "Aplicação de sistemas de telemetria domiciliária em sistemas de distribuição de água". Em: I Conferência INSSAA - Model Sist Abast Água. Barcelos.

Luvizotto, Jr. (1998). "Relatório final de programa de pós doutoramento". Valencia: Universidade Politecnica de Valencia, Espanha.

Machell, J., Mounce, S., Boxall, J. (2010). "Online modelling of water distribution systems: a UK case study". *Drink Water Eng Sci.* 3:21–27.

Mamo, T., Juran, I. (2014). "Source of uncertainty in water supply pipeline leak detection using district meter area data". *Int J Sci Eng Res.* 2:9–17.

Martins, J. (2010). "B-Green : Comunicação sem Fios Aplicada à Telecontagem". Dissertação de Mestrado em Engenharia Eletrónica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro.

Mashford, J., Silva, D., Burn, S., Marney, D. (2012). "Leak detection in simulated water pipe networks using svm". *Appl Artif Intell.* 26:429–444.

Mays, L. (1999). "Water distribution systems handbook". New York, NY, USA: McGraw-Hill.

Medeiros, N., Loureiro, D., Mugeiro, J., Coelho, S., Branco, L. (2007). "Concepção, instalação e exploração de sistemas de telemetria domiciliária para apoio à gestão técnica de sistemas de distribuição de água". Em: I Conferência INSSAA - Model Sist Abast Água. Barcelos; p. 1–10.

Meniconi, S., Brunone, B., Ferrante, M., Massari, C. (2013). "Numerical and experimental investigation of leaks in viscoelastic pressurized pipe flow". *Drink Water Eng Sci.* 6:11–16.

Meseguer, J., Mirats-tur, J., Cembrano, G., Puig, V., Quevedo, J., Pérez, R., Sanz, G., Ibarra, D. (2014). "A decision support system for on-line leakage localization". *Environ Model Softw.* 60:331-345.

Modisette, J. (2009). "State estimation in online models". Em: Pipeline Simul Interes Gr Annu Meet. Vol. 0911. 12 a 15 Maio, Galveston, Texas, EUA: Pipeline Simulation Interest Group Annual; p. 1–9.

- Morosini, A., Costanzo, F., Veltri, P., Savi, D. (2014). "Identification of measurement points for calibration of water distribution network models". *Procedia Eng.* 89:693–701.
- Morrison, J., Tooms, S., Rogers, D. (2007). "District metered areas - guidance notes. Version 1". UK: International Water Association (IWA).
- Motiee, H., McBean, E., Motiei, A. (2007). "Estimating physical unaccounted for water (UFW) in distribution networks using simulation models and GIS". *Urban Water J.* 4:43–52.
- Mounce, S., Khan, A., Wood, A., Day, A., Widdop, P., Machell, J. (2003). "Sensor-fusion of hydraulic data for burst detection and location in a treated water distribution system". *Inf Fusion.* 4:217–229.
- Di Nardo, A., *et al.* (2015). "New perspectives for smart water network monitoring , partitioning and protection with innovative On-line measuring sensors". Em: E-proceeding 36th IAHR World Congr. 28 Junho-3 Julho Hague, Holanda: IAHR.
- Nejjari F., Sarrate, R., Blesa, J. (2015). "Optimal pressure sensor placement in water distribution networks minimizing leak location uncertainty". *Procedia Eng.* 119:953–962.
- Ormsbee, L., Lingireddy, S. (2000). "Chapter 14 Calibration of hydraulic network models". Em: Mays L, editor. *Water Distrib Syst Handb.* McGraw-Hill; p. 14.1–14.23.
- Ormsbee, L. (2006). "The history of water distribution network analysis: the computer age". Em: 8th Annu Water Distrib Syst Anal Symp 2006. 27-30 de Agosto de 2006, Cincinnati, Ohio: American Society of Civil Engineers; p. 1–6.
- Panguluri, S., Grayman, W., Clark, R. (2005). "Water Distribution System Analysis : Field Studies , Modeling and Management A Reference Guide for Utilities". EPA, United States Environmental Protection Agency.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E., Peralta, A. (2010). "Leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks: Application to the Barcelona case study". Em: Pierre Borne FF, editor. 12th IFAC Symp Large-Scale Syst Theory Appl. Villeneuve-d'Ascq, França; p. 1–6.
- Pérez, R., Puig, V., Pascual, J., Quevedo, J., Landeros, E., Peralta, A. (2011).

"Methodology for leakage isolation using pressure sensitivity analysis in water distribution networks". *Control Eng Pract.* 19:1157–1167.

Portaria21/. (2007). "Portaria nº 21 de 5 de Janeiro". *Diário da República 1ª série.*78-80.

Poulakis, Z., Valougeorgis, D., Papadimitriou, C. (2003). "Leakage detection in water pipe networks using a Bayesian probabilistic framework". *Probabilistic Eng Mech.* 18:315–327.

Powell, R. (1992). "On-line monitoring for operational control of water distribution networks". Tese de Doutoramento Durham University.

Preis, A., Whittle, A., Ostfeld, A., Perelman, L. (2010). "Efficient hydraulic state estimation technique using reduced models of urban water networks". *J Water Resour Plan Manag.* 137:343–351.

Pudar, R., Liggett, J. (1992). "Leaks in pipe networks". *J Hydraul Eng.* 118:1031–1046.

Quintela, A. (1981). "Hidráulica". Fundação Calouste Gulbenkian.

Ragot, J., Maquin, D. (2006). "Fault measurement detection in an urban water supply network". *J Process Control.* 16:887–902.

Rajani, B., Kleiner, Y. (2001). "Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models". *Urban Water.* 3:151–164.

Raju, P. (2003). "Fundamentals of geographical information system". Em: Sivakumar, M., Roy,P., Harmen ,K., Saha, S., editores. *Satell Remote Sens GIS Appl Agric Meteorol - Proc Train Work.* Dehra Dun, India: World meteorological organisation; p. 103–120.

RGSPDADAR DRnº23/. (1995). "Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais.Regulamentar nº 23/95 de 23 de Agosto de1995". *Diário da República 1ª série* 23 Agosto.:5284–5319.

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012). "Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: SEREA - XI Semin Ibero-Americano sobre Sist Abast e Dren. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A., Simões NE. (2015). "Locating leaks with TrustRank algorithm support". *Water.* 7:1378–1401.

- Romano, M. (2012). "Near real-time detection and approximate location of pipe bursts and other events in water distribution systems". PhD Thesis University of Exeter.
- Rosich, A., Sarrate, R., Nejjari, F. (2012). "Optimal sensor placement for leakage detection and isolation in water distribution networks". Em: 8th IFAC Symp Fault Detect Superv Saf Tech Process. Mexico City, Mexico.
- Rossman, L. (2000). "Epanet 2 users manual". Agency USEP, editor. Cincinnati, OH.
- Sá Marques, A., Sousa, J. (2011). "Hidráulica Urbana - sistemas de abastecimento de água e de drenagem de águas residuais". 3ª Edição. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Saldarriaga, J. (1998). "Hidráulica de tuberías". Ariza E, editor. Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Sanchez, J., Motta, S., Alves, W. (2000). "Estimativa de volume de água não medido em ligações residenciais por perda de exatidão nos hidrometros, na cidade de Juazeiro-BA". Em: XXVII Congr Interam Eng Sanitária e Ambient. Vol. D. Porto Alegre, Rio Grande de Sul, Brasil: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental; p. 1–14.
- Sanz, G., Pérez, R. (2015). "Comparison of demand calibration in water distribution networks using pressure and flow sensors". *Procedia Eng.* 119:771–780.
- Sarrate, R., Nejjari, F., Rosich, A. (2012). "Sensor placement for fault diagnosis performance maximization in Distribution Networks". 2012 20th Mediterr Conf Control Autom.:110–115.
- Savic, D., Kapelan, Z., Jonkergouw, P. (2009). "Quo vadis water distribution model calibration?" *Urban Water J.* 6:3–22.
- Savic, D., Walters, G. (1995). "An evolution program for optimal pressure regulation in water distribution networks". *Eng Optim.* 24:197–219.
- Schaetzen, D., Walters, G., Savic, D. (2000). "Optimal sampling design for model calibration using shortest path, genetic and entropy algorithms. *Urban Water*2:141-152.
- Shamir, U. (1974). "Optimal design and operation of water distribution systems". *Water Resour Res.* 10:27–36.

Shamsi, U. (2005). "GIS Applications for water, wastewater and stormwater Systems". Press C, editor. Taylor & Francis London and New York.

Silva, D., Mashford, J., Burn, S. (2011). "Computer aided leak location and sizing in pipe networks". Queensland, Austrália: Urban Water Security Research Alliance, Technical Report n° 17 (2nd Edition).

Snow, J. (1855). "On the mode of communication of cholera by John Snow , M.D. London, New Burlington Street, England, 1855". *HYGEIA Rev Brasieira Geogr Médica e da Saúde*, 2008. 3:1–11.

Soares, A. (2003). "Calibração de modelos de redes de distribuição de água para abastecimento considerando vazamentos e demandas dirigidas pela pressão". Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, S. Paulo.

Soares, A. (2007). "Calibração e detecção de vazamentos em modelos de sistemas hidráulicos no escoamento transitório". Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo.

Sousa A. (2011). "Avaliação de erros de sub-contagem em contadores de água domésticos". Departamento de Engenharia Civil, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra.

Sousa, E. (2003). "Apontamentos de SANEAMENTO AMBIENTAL I". Secção de Hidráulica e dos Recursos Hídricos e Ambientais Instituto Superior Técnico.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". Em: 13th Comput Control Water Ind Conf CCWI 2015. 2 a 4 Setembro, Leicester, Reino Unido.

Sousa, J., Ribeiro L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". *Procedia Eng.* 119:63–71.

Sousa, J. (2006). "Decision Aid Models for the Design and the Operation of Water Supply Systems". Tese de Doutorado, Universidade de Coimbra.

Steffelbauer, D., Neumayer, M., Gunther, M., Fuchs-Hanusch, D. (2014). "Sensor Placement and Leakage Localization considering Demand Uncertainties". *Procedia Eng.*

89:1160–1167.

Sterling, M., Bargiela, A. (1984). "Minimum norm state estimation for computer control of water distribution systems". IEE Proc. 131:57–63.

Storey, M., Gaag, B., Burns, B. (2010). "Advances in on-line drinking water quality monitoring and early warning systems". Water Res. 45:741–747.

Sumer, D., Lansey, K. (2009). "WDS calibration and assessment for alternative modelling objectives". Urban Water J. 6:265–277.

Tabesh, M., Yekta, A. (2005). "A software tool for non-revenue water calculations in urban water systems in conjunction with hydraulic and GIS models". Proc IWA Spec Conf Leakage 2005.:1–11.

Taborda, C. (1998). "Melhorar a qualidade da medição". Em: 4º Congr da Água Lisboa. Available from: <http://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/145.pdf>

Temido, J., Sousa, J., Malheiro, R. (2014). "SCADA and Smart Metering systems in water companies . A perspective based on the value creation analysis". Procedia Eng. 70:1629–1638.

Thompson, K., Vamvakeridou-Lyroudia, L., Kapelan, Z., Savic, D. (2011). "Optimal macro-location methods for sensor placement in urban water systems". Centre for Water Systems, University of Exeter.

Tucciarelli, T., Criminisi, A., Termini, D. (1999). "Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation". J Hydraul Eng. 125:277–285.

Ulanicki, B., Bounds, P., Rance, J., Reynolds, L. (2000). "Open and closed loop pressure control for leakage reduction". Urban Water. 2:105–114.

Vassiljev, A., Koor, M., Koppel, T. (2015). "Real-time demands and calibration of water distribution systems". Adv Eng Softw. 89:108–113.

Vítkovský, J., Simpson, A., Lambert, M. (2000). "Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms". J Water Resour Plan Manag. 126:262–265.

Wagner, J., Shamir, U., Marks, D. (1988). "Water distribution reliability: simulation methods". J Water Resour Plan Manag. 114:276–294.

Wagner, J., Shamir, U., Marks, H. (1988). "Water distribution reliability: analytical

methods". *J Water Resour Plan Manag.* 114:253–275.

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

Walski, T. (1983). "Technique for calibrating network models". *J Water Resour Plan Manag.* 109:360–371.

Walski, T. (1992). "Analysis of water distribution systems. (reprint)". Malabar, Florida: Krieger Publishing Company.

Walski, T. (2000). "Model calibration data: the good, the bad, and the useless". *J AWWA.* 92:94–99.

Wood, D., Funk, E. (1992). "Hydraulic analysis of water distribution systems Part 1 Hydraulic network equations and reliability of solutions". Em: *Proc Int Conf Water Supply Syst State Art Futur Trends*. Computational Mechanics Publication, 1993; p. 43–68.

Wu, Z., Walski, T. (2005). "Diagnosing error prone application of optimal model calibration". Em: *Int Conf Comput Control Water Ind*. Exeter, UK; p. 1–7.

Wu, Z., Walski, T. (2012). "Effective approach for solving battle of water calibration network problem". *J Water Resour Plan Manag.* 138:533–543.

Wu, Z. (2009). "Unified parameter optimisation approach for leakage detection and extended-period simulation model calibration". *Urban Water J.* 6:53–67.

Xia, L., Guo-jin, L. (2010). "Leak detection of municipal water supply network based on the cluster-analysis and fuzzy pattern recognition". Em: *Int Conf E-Product E-Service E-Entertainment*. IEEE; p. 7–9.

Yazdani, A., Jeffrey, P. (2011). "Complex network analysis of water distribution systems". *Chaos An Interdiscip J Nonlinear Sci.* 21:016111 1–10.

Yoo, D., Kang, D., Jun H, Kim JH. (2014). "Rehabilitation Priority Determination of Water Pipes Based on Hydraulic Importance". *Water.* 6:3864–3887.

4 Metodologias Propostas para a Localização Aproximada de Fugas em Redes de Distribuição de Água

4.1 Enquadramento

Este quarto capítulo realça as metodologias propostas para a localização aproximada não convencional de fugas, baseada na observação do caudal à saída do ponto fornecedor de água e na observação da pressão num conjunto de nós monitorizados.

A priori é desconhecido o número, onde ocorrem e o caudal perdido em cada uma das fugas não reportadas. As metodologias propostas pretendem ajudar no planeamento das intervenções para a localização exata de fugas. As metodologias consistem no desenvolvimento de ferramentas computacionais para funcionar sobre os modelos de simulação hidráulica. Estas ferramentas têm o objetivo de ajudar a localizar as zonas da RDA com maiores fugas não reportadas, o que corresponde a identificar as zonas com maior probabilidade de terem fugas e disponibilizar estimativas para os respetivos caudais.

Tal como o terceiro capítulo, este capítulo terá duas grandes seções, correspondendo cada uma delas a uma metodologia proposta. Ambas metodologias contribuem para o mesmo objetivo e para o desenvolvimento dos trabalhos da tese.

Admita-se que a topologia da RDA é conhecida, bem como o caudal fornecido à rede. Os consumos, a cota topográfica e a pressão também são conhecidos. Estes dados são

suficientes para garantir uma adequada simulação hidráulica do comportamento da rede. Os resultados estimados através da modelação matemática representam com fiabilidade o comportamento hidráulico da mesma.

Para o adequado funcionamento da metodologia proposta é necessária a monitorização da pressão. Assim, a primeira ferramenta computacional a apresentar está orientada para a definição da rede de monitorização da pressão. A metodologia proposta para definir a rede de monitorização procura identificar os nós da rede onde as observações das suas pressões reúnem características relevantes para a adequada localização e quantificação das fugas. Por conseguinte, esta ferramenta apresenta uma proposta para a constituição da rede de amostragem das pressões. Esta proposta resulta da aplicação de um algoritmo desenvolvido para a seleção e ordenação da informação na internet ao problema da constituição da rede de amostragem. O algoritmo em causa denomina-se *TrustRank* e é utilizado nos motores de pesquisa da Google.

A segunda ferramenta computacional utiliza as observações da RDA provenientes da rede de monitorização da pressão. Os valores observados são introduzidos num modelo de otimização. O objetivo do modelo de otimização é resolver um problema inverso que consiste em localizar e quantificar as fugas não reportadas. Para o efeito, compara os valores observados *in situ* com valores estimados pelo simulador do comportamento hidráulico para cenários hipotéticos de fugas. As restrições deste modelo de otimização são não lineares. Para a resolução deste tipo de modelo de otimização não lineares é necessário recorrer a heurísticas modernas. Devido à natureza do problema, considerou-se a utilização da heurística moderna recozimento simulado.

Ambas metodologias propostas originaram ferramentas computacionais cujos desempenhos são apresentados no capítulo 5.

4.2 Metodologia proposta para a definição da rede de monitorização das pressões

A rede de monitorização das pressões é definida através da localização dos equipamentos para medição. Na literatura da especialidade há inúmeras propostas quanto ao melhor posicionamento dos equipamentos para medição da pressão. Todas as

metodologias têm como objetivo identificar os nós onde a respectiva medição da pressão é representativa do desempenho geral da rede.

O ideal seria colocar muitos equipamentos de monitorização com excelente exatidão, isto é, o resultado da medição coincide com o valor verdadeiro da grandeza medida, em todos os pontos, garantindo por conseguinte a obtenção de soluções finais de qualidade e com fiabilidade. Contudo, devido ao preço do equipamento, aos condicionamentos financeiros e limitações técnicas, é conveniente que este número seja mínimo e limitado à capacidade de investimento da EG.

A metodologia proposta nesta tese para a definição da rede de monitorização das pressões considera apenas a importância relativa dos nós. Para facilitar a sua compreensão é necessário recordar alguns conceitos básicos da teoria de grafos.

4.3 Conceitos básicos da teoria de grafos

A RDA é representável por um grafo $G=(V, \mathcal{E})$ onde V é o conjunto não vazio de vértices (como representação dos nós da RDA), \mathcal{E} é o conjunto finito de arestas (como representação das condutas da RDA).

O grau de entrada (ζ) de um vértice v_1 é o número de arestas que convergem ou têm fim em v_1 , $\zeta(v_1)$. O grau de saída (w) de um vértice v_1 é o número de arestas que têm origem ou divergem de v_1 , $w(v_1)$. Um par de vértices é adjacente se existir uma aresta que os ligue, e um par de arestas é adjacente se tiverem um vértice comum.

A RDA é um grafo conexo, porque quaisquer que sejam os vértices v_1 e v_2 pertencentes a V , existe sempre um caminho a uni-los. Dados dois vértices, o percurso no grafo é qualquer sequência finita constituída no mínimo por uma aresta, tal que, de acordo com a ordem da sequência, o extremo final de cada aresta coincida com o extremo inicial da aresta seguinte. O comprimento do percurso é o número de arcos no percurso.

Um dígrafo ou grafo dirigido é caracterizado por todas as arestas definidas estarem orientadas, o que ocorrerá sempre que existe escoamento na RDA decorrente de solicitações.

Seja G um grafo com o conjunto de vértices $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$. A matriz de adjacência de G é uma matriz $m \times m$: $A = A(G)$ tal que a_{ij} é o número de arestas distintas que ligam v_i a v_j .

Seja G um grafo com o conjunto de vértices $\{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ e um conjunto de arestas orientadas $\{e_1, e_2, \dots, e_n\}$. A matriz de incidência de G é uma matriz $n \times m$: $\Gamma = \Gamma(G)$, que toma os valores -1 –no caso da aresta e_j divergir do vértice v_i –, ou 1 –no caso da aresta e_j incidir no vértice v_i .

4.4 Algoritmo *TrustRank*

O algoritmo *TrustRank* (Gyöngyi *et al.* 2004) foi desenvolvido para hierarquizar a reputação e importância das páginas da internet. Este algoritmo tem sido utilizado pelo motor de busca de informação Google para classificar a relevância das várias páginas perante uma solicitação. Atualmente, a resposta do Google resulta da aplicação de vários algoritmos.

Por paralelismo, a internet pode ser representada como um grafo com as arestas a representarem os *links*, e os vértices a representarem as páginas da internet. Os motores de pesquisa utilizam *software* conhecido para indagar sobre o pretendido. Os motores de pesquisa de informação na internet deparam-se com inúmeras páginas com informação. A qualidade de cada página pode ser boa ou má, pode ser de editores ou autores credenciados, *wikis*, *blogs*, fóruns, domínios duplicados, domínios falsos, páginas dinâmicas geradas em tempo real, entre outras possibilidades. Obviamente, as diferentes páginas têm reputação, importância e relevância diferente face à indagação, pelo que o resultado final requer uma ordenação.

O principal objetivo do algoritmo *TrustRank* é separar as páginas da internet em relevantes e irrelevantes face a uma questão. Para o efeito, o algoritmo hierarquiza as páginas da internet considerando primeiro as páginas consideradas fidedignas para a questão.

Na utilização na internet, o algoritmo *TrustRank* começa por considerar a avaliação das diferentes páginas por uma entidade externa. Seleciona as páginas com avaliação

máxima. A este conjunto de páginas boas e de confiança atribui uma elevada avaliação de *Trust*. Devido à sua qualidade, estas páginas fidedignas sugerem outras páginas boas, e muito raramente poderão sugerir uma ligação para páginas com informação falsa ou irrelevante.

Na recomendação entre páginas da internet (estabelecida pela sugestão) há transmissão da avaliação de *Trust*. A sugestão de uma página para outra representa que a primeira é uma autoridade perante a segunda. Assim a transmissão da avaliação de *Trust* tem o sentido da ligação estabelecida entre as páginas. Por cada recomendação ocorre um decaimento da avaliação de *Trust* transmitida.

Cada página da internet apresenta sugestões para outras páginas. Se apresenta poucas sugestões, as páginas sugeridas foram cuidadosamente selecionadas. Caso contrário, se a página apresenta muitas sugestões, a seleção das páginas sugeridas poderá não ter sido muito cuidada. Por consequência, para reproduzir esta potencial falta ou excesso de cuidado na seleção de recomendações para outras páginas, estima-se a transmissão de *Trust* entre a página autoridade para as outras como inversamente proporcional ao número de páginas da internet recomendadas pela página autoridade.

Na forma matricial, as relações entre páginas da internet são representáveis pelo conjunto de arestas \mathcal{E} . Define-se a inversa da matriz transição U entre quaisquer páginas de v_1 para v_2 com o grau de entrada do vértice v_2 , $\zeta(v_2)$:

$$U(v_1, v_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } (v_1, v_2) \notin \mathcal{E} \\ \frac{1}{\zeta(v_2)} & \text{se } (v_1, v_2) \in \mathcal{E} \end{cases} \quad 4.1$$

A matriz de transição Tr também é definida com base no grafo com as ligações entre páginas v_1 e v_2 . Esta matriz caracteriza-se pelo grau de saída do vértice v_1 , $w(v_1)$ pelo que:

$$Tr(v_1, v_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } (v_1, v_2) \notin \mathcal{E} \\ \frac{1}{w(v_1)} & \text{se } (v_1, v_2) \in \mathcal{E} \end{cases} \quad 4.2$$

Como o grau de entrada de um vértice é independente do seu grau de saída, estas matrizes são independentes.

4.4.1 Avaliação de *Trust*

A identificação algorítmica de páginas com informação irrelevante é muito difícil. Assim, é necessário apoio humano em algumas fases do algoritmo, nomeadamente na definição do resultado da função *Oracle* sobre as páginas $O(v_1)$. Na internet, um conjunto pequeno de páginas é selecionado e um utilizador avalia a respetiva veracidade, ou é válido ou não. Esta função é importantíssima e fundamental para a avaliação posterior das várias páginas da internet, tendo como referência as suas ligações.

4.4.2 Funções *Oracle* e *Trust*

A função *Oracle*, $O(v_1)$, exige intervenção humana para determinar se uma página da internet é fidedigna ou contém informação falsa ou enganadora. A função é assim subjetiva e o resultado da função é uma variável binária:

$$O(v_1) = \begin{cases} 0 & \text{se } v_1 \text{ contém informação falsa} \\ 1 & \text{se } v_1 \text{ contém informação válida} \end{cases} \quad 4.3$$

A aplicação da função *Oracle* é morosa, logo encarece a sua aplicação. Assim, reduz-se a sua aplicação a uma amostra da rede internet para evitar a sua aplicação generalizada.

4.4.3 *Trust* ideal

A função *Trust* T de cada página v_1 varia entre zero (páginas falsas), até 1 (páginas fidedignas), e indica a probabilidade de uma página v_1 ser fidedigna.

Na internet, nas páginas excluídas da amostragem é difícil identificar uma página com avaliação *Trust* ideal. Esta página com avaliação ideal será muito fidedigna e poderá afirmar-se que:

$$T(v_1) = Pr|O(v_1) = 1| \quad 4.4$$

Se uma página da internet recebe uma avaliação superior ao limite máximo há garantia da sua informação ser muito fiável. A função $T(v_1)$ deverá identificar a boa qualidade da página, contudo limitando a apreciação a um valor máximo, neste caso, igual à unidade.

4.4.4 Decaimento de *Trust*

Como já foi mencionado, neste algoritmo verifica-se o decaimento da propriedade *Trust*. Este decaimento é determinado com uma expressão matemática. A técnica de decaimento de *Trust* escolhida para o problema fundamenta-se na psicologia humana. O cuidado de cada detentor de uma página da internet na apresentação de recomendações é inversamente proporcional ao número de ligações da mesma. Assim, se as páginas fidedignas têm poucas recomendações admite-se que terão sido cuidadosamente selecionadas e serão consideravelmente boas. Em oposição, se as páginas da internet apresentam muitas recomendações, será provável que algumas dessas recomendações não tenham merecido a devida atenção e tenham qualidade duvidosa, ou não são totalmente relacionadas com a página inicial.

As várias recomendações provenientes de múltiplas páginas autoridade para uma página destino têm efeito acumulativo, não podendo o valor acumulado exceder o valor máximo estipulado para as páginas fidedignas. Caso uma página receba múltiplas recomendações é provável que contenha informação relevante e de qualidade, o que é comprovado através do resultado da acumulação de recomendações. A transmissão da fiabilidade *Trust* através de uma aresta é definida por:

$$R(v_1, v_2) = \frac{T(v_1)}{w(v_1)} \quad 4.5$$

onde:

$R(v_1, v_2)$ – representa a transmissão de *Trust* da página v_1 para a página de destino v_2 ;

$T(v_1)$ – representa a avaliação *Trust* da página v_1 ;

$w(v_1)$ – representa o número de recomendações sugeridas pela página v_1 , ou grau de saída do vértice v_1 .

Todas as entradas na matriz *Tr* são não negativas e a soma de cada coluna é 1, a menos que a página não efetue nenhuma recomendação. As páginas com grau de saída nulo são nós pendentes e caracterizam-se por receberem uma parcela da fiabilidade das outras páginas mas não a transmitem.

Na Figura 4.1 apresenta-se um conjunto de páginas numeradas de 1 a 5. A página 1 e 2 são muito fidedignas e têm grau de saída 2 e 3 respetivamente. Os elementos da matriz de transição com origem na página 1 valem 0,5. Os elementos da matriz de transição com origem na página 2 valem 0,33. A transmissão da fiabilidade Trust é o produto da avaliação Trust da página 1 ou 2 pelo respetivo valor da matriz de transição.

A página 3 da Figura 4.1 tem grau de entrada 2, acumulando as duas transmissões da fiabilidade Trust. Esta página tem avaliação Trust de 0,833. Como o seu grau de saída é dois, os respetivos elementos da matriz de transição valem 0,5. A sua transmissão de fiabilidade Trust é então o produto da avaliação Trust da página 3 pelo valor da matriz de transmissão.

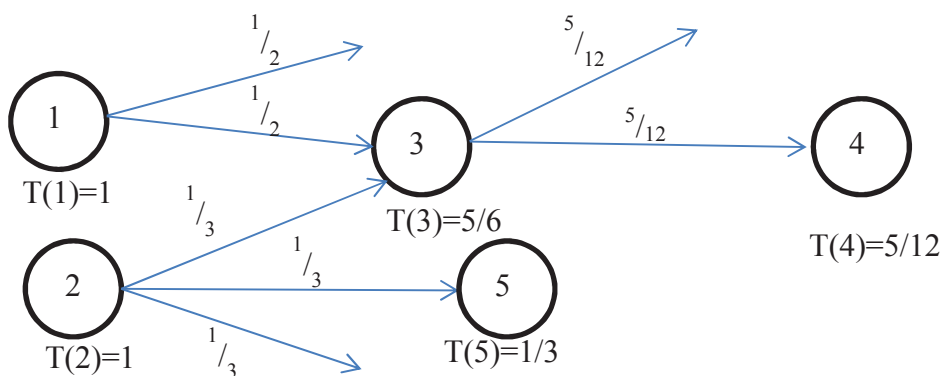


Figura 4.1 Decaimento de Trust e avaliação da fiabilidade das diferentes páginas

4.4.5 Ordenação e limite de Trust

Para qualquer par de páginas distintas da internet v_1 e v_2 poderá afirmar-se que:

$$\begin{aligned}
 T(v_1) < T(v_2) &\Leftrightarrow Pr|O(v_1) = 1| < Pr|O(v_2) = 1| \\
 T(v_1) = T(v_2) &\Leftrightarrow Pr|O(v_1) = 1| = Pr|O(v_2) = 1|
 \end{aligned}
 \tag{4.6}$$

De modo distinto, poderá proceder-se ao relaxamento de T com a introdução de valores limites.

Paralelamente, se uma página v_2 recebe uma avaliação T superior a um valor δ , ela será provavelmente credível. No caso contrário, nada poderá ser proferido.

$$T(v_2) > \delta \Leftrightarrow O(v_2) = 1 \quad 4.7$$

4.4.6 Evolução da Métrica

Seja χ um conjunto aleatório de páginas da internet, sobre o qual poderá operar a função T e a função O . A função T avalia uma propriedade isolada e é aplicada sobre o conjunto de páginas.

A primeira métrica avalia a propriedade ordenada de *Trust*. A função binária $I(T, O, v_1, v_2)$ sinaliza se as páginas falsas recebem uma avaliação de *Trust* igual ou superior ao valor das páginas avaliadas como boas. Esta situação configura uma violação da propriedade ordenada de *Trust* representada por (Gyöngyi *et al.* 2004):

$$I(T, O, v_1, v_2) = \begin{cases} 0 & \text{se } T(v_1) \geq T(v_2) \text{ e } O(v_1) < O(v_2) \\ 0 & \text{se } T(v_1) \leq T(v_2) \text{ e } O(v_1) < O(v_2) \\ 1 & \text{outras situações.} \end{cases} \quad 4.8$$

4.4.7 Determinação de *Trust* em cada página

A determinação do *Trust* de cada nó v_2 é o resultado do somatório das contribuições de todas as arestas $\{e_1, e_2, \dots, e_{\zeta(v_2)}\}$ que convergem para o nó v_2 . A expressão geral de aplicação à RDA pode ser expressa por:

$$T(v_2) = \sum_{v_2:(v_1, v_2) \in \varepsilon} \frac{T(v_1)}{\omega(v_1)} \quad 4.9$$

4.5 Aplicação do algoritmo *TrustRank* ao problema da localização de transdutores de pressão em RDA

As RDA são estruturas bem mais simples que a internet. Os vários nós da RDA estão ligados por condutas. Dependendo das solicitações, os escoamentos nas condutas têm um sentido único. Para a averiguação dos nós a monitorizar na RDA, a metodologia recorre à simulação da situação estática da rede quando está unicamente sujeita aos

consumos. A simulação é efetuada com recurso a modelos matemáticos representativos do comportamento hidráulico da rede.

O resultado da simulação estima o sentido do escoamento univocamente.

Para efeito de aplicação da metodologia, os nós da RDA correspondem às páginas da internet e aos vértices do grafo, as condutas correspondem às ligações entre as diferentes páginas e às arestas do grafo. O sentido do caudal estimado na simulação hidráulica corresponde ao sentido das ligações entre as páginas da internet.

Após a aplicação da metodologia baseada no algoritmo *TrustRank*, os nós são avaliados e ordenados com o respetivo resultado final. A rede de monitorização proposta seleciona os nós com resultado de avaliação mínima. A representação esquemática pode ser visualizada na Figura 4.2.



Figura 4.2 Representação esquemática da metodologia proposta.

Os detalhes da implementação da metodologia são descritos nas seções seguintes.

4.5.1 Funções *Oracle* e *Trust*

A aplicação da metodologia começa por identificar os nós com máxima fiabilidade e remover da rede as condutas cujo sentido do escoamento seja dúbio.

Na aplicação à RDA, os nós com máxima fiabilidade são os reservatórios, porque são vértices com grau de entrada nulo. Assim, atribui-se o valor máximo de fiabilidade (1.0) a estes nós.

Convém ressaltar que o número de páginas da internet na *web* é muito maior do que o número de nós de uma RDA, por isso, é possível analisar toda a rede (nós e condutas) e não uma amostra de elementos (páginas da internet e respetivas ligações), o que equivale a não existir a necessidade de aplicar a função *Oracle* aos nós.

Mesmo assim, na aplicação do algoritmo à RDA, a função *Oracle* é utilizada nas condutas da rede. A função *Oracle* compara a estimativa da perda de carga total ocorrida em cada conduta $i = (v_1, v_2)$ e o erro de fecho admitido no simulador do equilíbrio hidráulico. Caso a estimativa da perda de carga (ΔH_i) seja inferior ao rigor definido pelo simulador (ϵ_H), o resultado da função *Oracle* é nulo:

$$O(i) = \begin{cases} 0 & \text{se } \Delta H_i < \epsilon_H \\ 1 & \text{se } \Delta H_i > \epsilon_H \end{cases} \quad 4.10$$

4.5.2 Propagação de *Trust*

O escoamento na RDA, para cada solicitação, é estimado e unívoco. Apesar do seu carácter estocástico, o consumo será a referência para o posicionamento dos transdutores de pressão na RDA. A consideração da solicitação estar reduzida ao consumo irá estabelecer o sentido de escoamento na RDA. Este sentido define um grafo dirigido que orientará a aplicação da metodologia.

4.5.3 Decaimento de *Trust* por decomposição

Devido às características intrínsecas da RDA, considera-se que o decaimento de *Trust* ocorre por decomposição. Cada conduta i , desde o nó de montante p até ao nó de jusante q , efetua a transmissão de *Trust* expressa por:

$$R(i) = \frac{T(p)}{w(p)} \quad 4.11$$

onde:

$R(i)$ – representa a transmissão de *Trust* pela conduta i desde o nó de montante p para o nó de jusante q ;

$T(p)$ – representa a avaliação *Trust* do nó de montante p ;

$w(p)$ – representa o número de condutas abastecidas a partir do nó de montante p , correspondendo ao grau de saída do vértice p .

4.5.4 Determinação de *Trust* em cada nó da RDA

A determinação do *Trust* de cada nó q da rede resulta do somatório das contribuições de todas as condutas i que tem o nó de jusante q . A expressão geral para determinação de *Trust* em cada nó de jusante p das condutas de uma RDA pode ser expressa por:

$$T(p) = \sum_{p:(q,p) \in \epsilon} \frac{T(q)}{\omega(q)} \quad 4.12$$

A aplicação da metodologia a um estudo de caso, Quadro 4.1, pode ser encontrada no capítulo 5.

Quadro 4.1 Algoritmo proposto para implementação do *TrustRank*

Identificar os nós com avaliação *Trust* máxima;

Definir o sentido do escoamento na RDA considerando apenas os consumos;

Aplicar a função Oracle às condutas;

Definir o grau de entrada (ζ) e o grau de saída (w) de cada nó p da RDA;

Determinar a transmissão de *Trust* por cada conduta;

Determinar o valor de *Trust* em cada nó;

Ordenar os nós com base no valor de *Trust* apresentando os valores mais baixos no topo da lista.

4.6 Metodologia proposta para a localização aproximada de fugas de água numa RDA

Como foi mencionado no capítulo 3, a outra ferramenta computacional proposta nesta tese utiliza as observações obtidas na rede de monitorização da RDA. Estes valores, tal como outras características da rede, são introduzidos num modelo de otimização desenvolvido para o problema da localização das fugas de água.

O modelo de otimização proposto recorre à simulação estática do comportamento hidráulico da RDA considerando a presença das fugas de água para confinar as zonas da rede com fugas e estimar os respetivos caudais.

Esta ferramenta computacional será apresentada a funcionar sobre um modelo de simulação hidráulica, podendo funcionar do mesmo modo sobre outros modelos de simulação hidráulica. A metodologia necessita de um volume de dados exequível, provenientes da caracterização e observação da rede, e possibilita a localização aproximada de saídas não previstas de água, usualmente fugas, tanto as fugas recentes como as fugas antigas e eventualmente consumos ilícitos.

O esquema de funcionamento da ferramenta computacional pode ser visualizado na Figura 4.3, e é fortemente condicionado pelo rigor na descrição do comportamento físico da RDA, pelo rigor nas observações da rede e pelos critérios de convergência definidos na fase de cálculo computacional.

Nas próximas secções a função objetivo, as variáveis de decisão, as restrições do modelo, e o modo de integrar as fugas de água serão explicadas. A resolução do modelo de otimização não linear proposto será executada através do método do recozimento simulado.

4.6.1 Função objetivo

A representação concisa do problema é apresentada na função objetivo $F(x)$. Esta função deve detalhar univocamente o(s) objetivo(s) do critério de decisão e analisar o mérito de cada solução numa escala numérica.

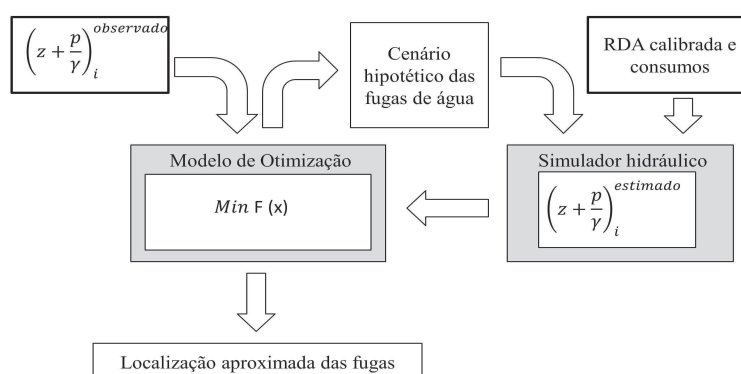


Figura 4.3 Esquema simplificado do funcionamento da ferramenta proposta para a localização aproximada de fugas de água numa RDA.

Diferentes modelos de otimização foram comparados. A diferença fundamental entre os modelos foi a utilização de diferentes funções objetivo. Todas as funções objetivo avaliavam o mérito dos cenários de fugas propostos na representação do funcionamento da RDA. Para simplificar o texto as diferentes expressões utilizadas como função objetivo serão apresentadas.

A primeira definição da função objetivo minimiza a maior diferença entre a altura piezométrica observada e a altura piezométrica estimada com o simulador hidráulico, em cada nó da rede de monitorização. Assim, a função objetivo $F_{1,1}(x)$ (também apresentada com a denominação $F_{2,3}(x)$) é expressa por:

$$F_{1,1}(x) = M\acute{A}X \left\{ \left| \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_n^{Observado} - \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_n^{Estimado} \right| \right\} \forall n = 1, 2, \dots, NPO \quad 4.13$$

A segunda definição da função objetivo minimiza a soma dos quadrados das diferenças entre a pressão medida e a pressão estimada com o simulador hidráulico, $F_{2,1}(x)$:

$$F_{2,1}(x) = \sum_{j=1}^{NPO} \left| \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_j^{Observado} - \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_j^{Estimado} \right|^2 \quad 4.14$$

A função objetivo seguinte minimiza a soma das diferenças entre a pressão medida e a pressão estimada com o simulador hidráulico, $F_{2,2}(x)$:

$$F_{2,2}(x) = \sum_{j=1}^{NPO} \left| \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_j^{Observado} - \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_j^{Estimado} \right| \quad 4.15$$

A combinação das funções objetivo anteriores permitiu estabelecer uma nova função objetivo $F_{2,4}(x)$ que procura minimizar a soma da máxima diferença observada ($F_{2,3}(x)$) com a média das diferenças calculada com ($F_{2,2}(x)$):

$$F_{2,4}(x) = \frac{F_{2,2}(x)}{NPO} + F_{2,3}(x) \quad 4.16$$

Uma combinação diferente das funções objetivo iniciais define a nova função objetivo $F_{2,5}(x)$, integrando numa soma as funções objetivo definidas por $F_{2,1}(x)$, $F_{2,2}(x)$ e $F_{2,3}(x)$, harmonizadas à mesma ordem de grandeza:

$$F_{2,5}(x) = \sqrt[2]{\frac{F_{2,1}(x)}{NPO}} + \frac{F_{2,2}(x)}{NPO} + F_{2,3}(x) \quad 4.17$$

4.6.2 Variáveis de decisão do modelo

O modelo de otimização tem como variáveis de decisão a localização da fuga e o respetivo caudal. A variável localização da fuga é uma variável binária. A variável caudal é uma variável contínua.

4.6.3 Restrições do modelo de otimização

Neste trabalho as restrições são introduzidas no modelo de otimização como resultado da análise da RDA. A formulação matemática para proceder à análise do comportamento hidráulica recorre à aplicação das leis fundamentais da física.

A formulação utilizada para a análise do comportamento hidráulico foi a formulação dos nós. A formulação dos nós organiza a lei de resistência ao escoamento e a lei da continuidade em cada nó, de modo a considerar as cotas piezométricas como incógnitas.

A energia mecânica total por unidade de peso de líquido entre dois nós adjacentes diminui no sentido do escoamento. Esta diferença de energia ($\Delta H = H_i - H_j$) pode ser estimada com a expressão de perda de carga total no troço, em função de uma lei de resistência ao escoamento.

A formulação dos nós começa por reescrever a equação de Bernoulli, com a substituição dos valores de ΔH pela expressão de perda de carga total no troço. Nesta expressão de perda de carga, os valores característicos de cada conduta determinam o coeficiente de perda de carga modificado (K_{ij}) para a lei de resistência, obtendo-se:

$$K_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot |Q_{ij}^{n-1}| = H_i - H_j \quad (T \text{ equações}) \quad 4.18$$

Naturalmente, a perda de carga tem o mesmo sinal que o sentido do caudal, assim esta grandeza é explícita e o seu sentido conhecido. A função sinal (sgn) determina o sinal de um qualquer número real, obtendo-se:

$$Q_{ij} = \text{sgn}(H_i - H_j) \left(\frac{|H_i - H_j|}{K_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (T \text{ equações}) \quad 4.19$$

Sabendo o número de troços confluentes a cada nó i (nt_i), a substituição direta da expressão anterior na lei da continuidade em cada nó obtém-se:

$$\sum_{i=1}^{m_i} \left[\operatorname{sgn}(H_i - H_j) \left(\frac{|H_i - H_j|}{K_{ij}} \right)^{\frac{1}{n}} \right] - C_i = 0 \quad (N \text{ equações}) \quad 4.20$$

As solicitações consideradas em cada nó (C_i) decorrem da presença de consumos efetivamente conhecidos e das fugas na rede.

4.6.4 Modelação de fugas nas restrições do modelo

Nesta metodologia assume-se que a ocorrência de fugas de água na rede não tem uma justificação plausível. Deste modo, a ocorrência das fugas é totalmente independente das condições de funcionamento da rede, das características das condutas ou dos consumos. Admite-se que em cada elemento da rede, quer seja nó ou conduta, só poderá existir uma única fuga de água, cujo caudal está limitado a um valor máximo.

Neste enquadramento, inicialmente, optou-se por associar as fugas aos nós. Com efeito, é muito simples adicionar aos consumos conhecidos os cenários hipotéticos de fugas se estas ocorrerem nos nós. Todavia, esta não representa a situação mais comum.

Na verdade, é mais credível admitir a ocorrência de fugas nos troços, pois os troços fornecem água aos ramais domiciliários. Em diferentes inquéritos com EG verificou-se que a maioria das fugas ocorria nestes ramais (DTA-A2 2004; Pinto 2011). Com base neste facto, a modelação das fugas nas restrições do modelo foi alterada para representar a ocorrência nas condutas. A modelação da fuga ocorrida na conduta passou a ser representada do seguinte modo: o caudal da fuga hipotética foi dividido de modo equitativo e cada metade do caudal da fuga foi adicionada aos consumos conhecidos nas extremidades da conduta com fuga.

Após concluir a definição do modelo de otimização, neste trabalho testa-se a utilização da heurística moderna recozimento simulado como ferramenta de resolução do modelo de otimização.

4.7 Recozimento Simulado

A metodologia proposta para a localização aproximada não convencional de fugas em RDA baseada na observação do caudal e da cota piezométrica é um problema de otimização não linear. Cada localização pode ser ou não um local onde ocorre uma fuga

de água (característica combinatória) com um caudal que varia de forma contínua entre um máximo e um valor nulo.

A região admissível ou espaço das soluções admissíveis é o conjunto de todas as soluções admissíveis, sendo esta qualquer especificação de valores para as variáveis de decisão que satisfaçam todas as restrições do problema.

A solução ótima global do problema é a solução ótima maximizante ou minimizante da função objetivo. A solução ótima global poderá ser obtida se a função objetivo e as restrições forem convexas no espaço solução.

Para a pesquisa pela solução ótima num problema com esta complexidade recorre-se a técnicas de investigação operacional adequadas, habitualmente a algoritmos constituídos por operações matemáticas, lógicas e aritméticas executadas de forma iterativa. As pesquisas mais eficazes têm resultado da aplicação de heurísticas modernas, ou seja, da utilização de heurísticas de melhoramento com estratégias de pesquisa inspiradas nos comportamentos existentes na natureza, de que são exemplo: algoritmos genéticos, recozimento simulado, pesquisa tabu ou colónia de formigas. Estas heurísticas modernas inserem-se na classe de métodos de resolução aproximada e são utilizados para abordar problemas muito complexos de otimização. As heurísticas modernas têm um comportamento estocástico, o que lhes permite a procura de soluções em problemas mal condicionados, com funções objetivo não convexas, não diferenciáveis ou descontínuas no domínio. Elas têm um funcionamento interno simples e evitam o cálculo de gradientes, por isso são fáceis de implementar computacionalmente. O seu funcionamento é flexível, logo são fáceis de adaptar aos problemas, são independentes do espaço das soluções admissíveis, analisam de modo expedito vastas regiões admissíveis, são geralmente mais rápidas que as técnicas convencionais, principalmente em problemas NP-difícil e apresentam sempre uma solução final, habitualmente de boa qualidade. Para problemas como o apresentado, um problema de elevada complexidade, a apresentação de boas soluções rapidamente é suficiente, pois estas soluções aproximam-se às soluções ótimas (Pirlot 1996; Gendreau e Potvin 2005).

Em problemas reais, e por comparação às abordagens clássicas (programação linear, programação não linear e programação dinâmica), as heurísticas modernas têm a desvantagem de serem incapazes de garantir que uma dada solução seja ótima global.

O método do recozimento simulado (Trosset 2001; Aarts *et al.* 2003) foi selecionado para a resolução do problema de otimização anteriormente descrito na seção 4.6. Trata-se de uma heurística moderna inspirada no processo da mecânica estatística para transformar um sólido, com um determinado nível de energia, no seu nível de energia mínima.

A justificativa e as vantagens da aplicação do recozimento simulado são a sua aplicabilidade a funções objetivo não lineares, descontínuas ou estocásticas, o processamento com todas as restrições, a sua simplicidade, a facilidade de implementação, o código pouco extenso quando comparada com outras heurísticas modernas, o reduzido espaço de memória computacional requerido, a sua robustez, a incorporação de mecanismos para pesquisa de diferentes zonas do espaço solução, a exploração em teoria de todo o espaço solução, a possibilidade de associações com outras técnicas analíticas e métodos numéricos, a possibilidade de implementações computacionais paralelas e a sua convergência assintótica em condições muito particulares.

Esta convergência assintótica garante, teoricamente, a convergência para o ótimo global (Mitra *et al.* 1985; Van Laarhoven e Aarts 1987; Ingber 1993). Para problemas de otimização global com função objetivo e variáveis contínuas, num espaço solução convexo, compacto e dimensional completo, com um número limitado de soluções ótimas globais e sob condições específicas para o arrefecimento, o algoritmo demonstrou ser convergente teoricamente (Locatelli 2000). Meise (1998) também demonstrou a convergência teórica do recozimento simulado com a implementação em paralelo e sob condições muito especiais.

Contudo, nas aplicações correntes, as condições que garantem a convergência para o ótimo global não são exequíveis, e por conseguinte não é possível garantir que a melhor solução encontrada represente a solução ótima global. A implementação de um algoritmo de recozimento simulado necessita de um conjunto de decisões sobre o seu funcionamento, que poderão aumentar ou reduzir o seu tempo de processamento. Este

tempo de processamento depende de parâmetros associados à calibração da técnica, de parâmetros físicos intrínsecos ao problema e da qualidade pretendida para a solução final.

Na literatura da especialidade há inúmeras propostas de resolução de problemas com o algoritmo recozimento simulado. No universo dos problemas de otimização não lineares e de transporte de fluidos há vários problemas resolvidos com o recozimento simulado (Dolan *et al.* 1989; Cardoso *et al.* 1994; Henderson *et al.* 2003; Mahlke *et al.* 2007). Efetivamente, os algoritmos do recozimento simulado obtiveram boas soluções e contribuíram para a resolução de problemas hidráulicos reais tão diversos como por exemplo a reabilitação de aquíferos (Marryott 1996), o dimensionamento otimizado de RDA (Sousa e Cunha 1998; Cunha e Sousa 1999), a regulação de válvulas para a gestão das fugas na rede de distribuição (Tucciarelli *et al.* 1999), o dimensionamento otimizado de RDA com estações elevatórias (Costa *et al.* 2000), a gestão da produção agrícola condicionada pela disponibilidade de recursos hídricos (Kuo *et al.* 2001), o planeamento regional de sistemas de drenagem (Sousa *et al.* 2002), a gestão da produção elétrica de barragens sequenciais (Mantawy *et al.* 2003), a monitorização de escoamentos subterrâneos (Nunes 2003), o dimensionamento otimizado com inclusão da fiabilidade e desempenho técnico (Sousa *et al.* 2005), a otimização do desempenho da rede de distribuição com a inclusão do funcionamento de bombas e a qualidade da água (Goldman e Mays 2005), o equilíbrio hidráulico da RDA (Yeh e Lin 2008), a calibração de parâmetros de aquíferos (Huang *et al.* 2008), a gestão dos recursos hídricos com múltiplos reservatórios (Khodabakhshi *et al.* 2009), o dimensionamento robusto de RDA (Cunha e Sousa 2010), a delimitação de zonas de medição e controlo (Gomes *et al.* 2013), a localização de fugas em condutas com regime variável (Huang *et al.* 2016), entre outros.

Este conjunto de exemplos indicia que a utilização de uma ferramenta de resolução baseada nos algoritmos de recozimento simulado poderá contribuir positivamente para a resolução do presente modelo de otimização.

4.7.1 Interpretação física do fenómeno do recozimento

O recozimento simulado (Kirkpatrick *et al.* 1983; Kirkpatrick 1984; Cerný 1985) insere-se num vasto conjunto de técnicas de resolução de problemas de otimização que mimetizam a natureza. Através de um conjunto coerente e ordenado de operações, o recozimento simulado tenta reproduzir o processo de formação de sólidos com estruturas cristalinas a partir de qualquer tipo de estrutura sólida. Por aquecimento do material do sólido até atingir a temperatura correspondente ao seu ponto de fusão, obtém-se o estado de liquidificação caracterizado por partículas animadas de elevada energia e mobilidade, típicas de estruturas muito desorganizadas. O arrefecimento controlado do material, reflexo das perdas energéticas, obriga à reorganização das partículas para acompanhar os novos estados de energia e correspondente aumento progressivo da ligação entre átomos. Se o mecanismo de arrefecimento for suficientemente lento, as partículas irão reorganizar-se numa nova estrutura cristalina (estado de energia mínima local) sucessivamente e irão obter um estado estável, em suma um cristal perfeito com um estado de energia mínima global. Caso o material inicial não esteja na temperatura de fusão, ou a estratégia de arrefecimento seja indevidamente controlada, a obtenção do equilíbrio em cada temperatura fica comprometida e originará um sólido final muito imperfeito e amorfo. Este facto é constatado na indústria vidreira e metálica.

Com uma temperatura inicial de fusão, para Aarts e Korst (1989) a sequência ideal de temperaturas para estabelecimento de estados em equilíbrio térmico é representada por uma distribuição de Boltzman. Matematicamente, para cada temperatura de ordem k (T_k), e procurando num espaço solução S , isto pode ser expresso pelo cálculo da probabilidade de se encontrar em equilíbrio térmico ou em estado estacionário de energia E_i :

$$P_{T_k}(X_i = i) = \frac{1}{\sum_{\forall j \in S} e^{\frac{-E_j}{K_B T_k}}} e^{\frac{-E_i}{K_B T_k}} \quad \forall i \in S \quad 4.21$$

onde:

X_i representa a variável estocástica no estado corrente de energia;

E_j representa o valor de energia no estado j ;

K_B representa a constante de *Avogadro*;

T_k representa a temperatura de ordem k ;

S representa o espaço solução.

Seguindo esta distribuição, a ocorrência de transições para estados de energia mais elevados diminui à medida que a temperatura decresce. Por conseguinte, o algoritmo tende para uma distribuição uniforme sobre um conjunto ótimo de estados ou soluções independentes da solução inicial, o que materializa uma convergência assintótica para a solução ótima global. Esta convergência assintótica para a solução ótima global é demonstrada com a análise dos limites da função anterior (Van Laarhoven e Aarts 1987).

A demonstração baseia-se num conjunto de soluções ótimas locais representadas por S^* com o correspondente valor de energia E_{opt} . Define-se ainda uma função $I_A()$, como uma função característica para qualquer solução a_i do conjunto $A \subset S$ tal que:

$$I_A(a_i) = \begin{cases} 1 & \forall a_i \in A \\ 0 & \forall a_i \notin A \end{cases} \quad 4.22$$

A convergência do recozimento simulado está vinculada à minimização da energia global do sistema pois:

$$\forall a_i \leq 0 \quad \lim_{T_k \rightarrow 0} e^{\frac{a_i}{T_k}} = \begin{cases} 1 & a_i = 0 \\ 0 & \forall a_i \neq 0 \end{cases} \quad 4.23$$

A convergência do recozimento simulado recorre à teoria das cadeias de Markov (Dent e Ballintine 1971) gerada em cada temperatura. Esta pode ser determinada com a expressão:

$$\begin{aligned} \lim_{X_i \rightarrow 0} P_i(X_i = i) &= \lim_{X_i \rightarrow 0} \frac{1}{\sum_{\forall j \in S} e^{\frac{-E_j}{K_B T_k}}} e^{\frac{-E_i}{K_B T_k}} = \lim_{X_i \rightarrow 0} \frac{1}{\sum_{\forall j \in S} e^{\frac{E_{opt} - E_j}{K_B T_k}}} e^{\frac{E_{opt} - E_i}{K_B T_k}} \quad \forall i \in S \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow \lim_{X_i \rightarrow 0} P_i(X_i = i) &= \lim_{X_i \rightarrow 0} \frac{1}{\sum_{\forall j \in S} e^{\frac{E_{opt} - E_j}{K_B T_k}}} I_{S^*}(i) + \lim_{X_i \rightarrow 0} \frac{1}{\sum_{\forall j \in S} e^{\frac{E_{opt} - E_j}{K_B T_k}}} e^{\frac{E_{opt} - E_i}{K_B T_k}} I_{S \setminus S^*}(i) \quad \Leftrightarrow \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \lim_{X_i \rightarrow 0} P_i(X_i = i) = \frac{1}{|S_*|} I_{S_*}(i) + 0 \quad 4.24$$

4.7.2 Analogia entre o fenómeno de recozimento e os problemas de otimização

O paralelismo existente entre o comportamento físico do sistema e o problema de otimização é evidente. Por analogia com o processo físico, num problema de otimização, as transições entre os parâmetros de controlo e a geração de solução vizinha (temperatura do sistema e perturbação de estados) vão permitir escapar dos ótimos locais e possibilitar a procura de melhores soluções. As diferentes soluções do problema de otimização correspondem às diferentes configurações de um sistema físico (estados); e os valores da função objetivo destas soluções correspondem à energia de cada estado. O Quadro 4.2 apresenta a analogia mencionada.

Quadro 4.2 Analogia entre processo físico e o problema de otimização. Adaptado de Michalewicz e Fogel (2000)

Processo físico	Problema de otimização
Estado do sistema	Solução do problema
Energia de um estado	Valor da função objetivo
Perturbação de um estado	Geração de solução vizinha
Temperatura do sistema	Parâmetro de controlo
Estrutura amorfa	Solução ótima local
Estado fundamental	Solução ótima global

4.7.3 Construção de algoritmos de recozimento simulado

A construção de algoritmos de recozimento simulado exige decisões em duas vertentes independentes, Quadro 4.3. Uma vertente exige decisões específicas referentes ao problema a tratar, a outra vertente exige decisões específicas referentes ao funcionamento do recozimento simulado (Henderson *et al.* 2003; Azizi e Zolfaghari 2004).

Quadro 4.3 Síntese de decisões específicas para a implementação do recozimento simulado

Decisões do problema	Decisões sobre o funcionamento do RS
Função objetivo	Valor inicial dos parâmetros de controlo (Temperatura, Nº de avaliações)
Identificação do domínio	Regras para alteração dos parâmetros de controlo (Função de decaimento, arrefecimento)
Condições específicas	Regras para geração de solução vizinha (Mecanismo de perturbação e ligações entre soluções)
	Função de probabilidade de aceitação Comprimento da cadeia de Markov (Função do comprimento da cadeia finita)
	Valor final dos parâmetros de controlo (Critério de paragem)

De entre as decisões específicas, as restrições do problema são as mais fáceis de introduzir. As restrições do problema decorrem da análise das limitações do problema ou de regras técnicas ou matemáticas impostas pela realidade. A definição da função objetivo também é fácil de efetuar, pois reflete o critério utilizado no processo de tomada de decisão e é selecionado com base no objetivo do problema.

O procedimento geral para a construção de algoritmos de recozimento simulado é descrito no Quadro 4.4, adaptado de Sousa (2006).

Nos algoritmos de recozimento simulado, em cada iteração, procura-se melhorar a solução corrente existente com a introdução de uma pequena alteração. A solução candidata é o resultado do efeito da pequena alteração na solução corrente. A alteração introduzida é denominada por mecanismo de transição entre soluções e corresponde à introdução de uma perturbação compatível com as ligações existentes entre as diferentes soluções. A definição de um ou vários mecanismos para gerar uma solução candidata é uma das tarefas que só deve ser efetuada depois dos parâmetros associados ao funcionamento interno do recozimento simulado estarem definidos. Estes mecanismos devem permitir tanto a intensificação como a diversificação da pesquisa, de modo a viabilizar a passagem da solução corrente para uma qualquer outra solução existente no espaço solução.

Quadro 4.4 Algoritmo proposto para a implementação do recozimento simulado.

Gerar uma solução inicial e avaliar com a função objetivo,	$X_0 \in S \wedge F(X_0)$
Inicializar a solução corrente e a solução ótima,	$X_{corr} \leftarrow X_0 \wedge F(X_{corr}) \leftarrow F(X_0)$ $X_{opt} \leftarrow X_0 \wedge F(X_{opt}) \leftarrow F(X_0)$
Inicializar o contador global de temperatura	$k = 0$
Determinar o parâmetro temperatura inicial	T_0
Determinar o número de avaliações a executar na temperatura T_0	L_0
Inicializar o contador local de avaliações em cada temperatura	$t = 0$
Contador local	$t = 1$
Repetir	
Gerar uma solução candidata na vizinhança da solução corrente:	
	$X_{cand}^t \in V(X_{corr})$
Avaliar a solução com a função objetivo	$F(X_{cand}^t)$
Calcular a variação do valor entre as funções objetivo:	
	$\Delta f = F(X_{cand}^t) - F(X_{corr})$
Calcular a probabilidade de aceitação de acordo com a distribuição de Boltzmann:	
	$Pa_{corr} = e^{\frac{-\Delta f}{T_k}}$
Gerar uma probabilidade de referência	$Pa_{ref} \in [0;1]$
Se $Pa_{corr} \geq Pa_{ref}$ então:	$X_{corr} \leftarrow X_{cand}^t \wedge F(X_{corr}) \leftarrow F(X_{cand}^t)$
Se $F(X_{corr}) < F(X_{opt})$ então:	$X_{opt} \leftarrow X_{corr} \wedge F(X_{opt}) \leftarrow F(X_{corr})$
Incrementar o contador local de avaliações:	
Se	$t \leq L_k \Rightarrow t = t + 1$
Caso contrário	$t > L_k \Rightarrow T_{k+1} = f(T_k) \wedge L_{k+1} = g(T_k)$
Incrementar o contador global de temperaturas	$k = k + 1$
Caso seja verificado o critério de paragem, devolver a solução final	$X_{opt}, F(X_{opt})$

Assim, de entre estes parâmetros há uma dicotomia entre a regra de decaimento da temperatura e o comprimento da cadeia de Markov. A temperatura e a sua função de arrefecimento influenciam o resultado da aplicação da distribuição Boltzmann. Quanto mais elevada é a temperatura, menor é a importância do mérito relativo entre soluções, o que permite pesquisas mais aleatórias com aceitação da maioria das soluções candidatas. Em contraste, quanto mais reduzida é a temperatura, maior relevância é atribuída ao mérito da solução candidata, com maior número de rejeições na aceitação de soluções candidatas de reduzida qualidade, o que aproxima o comportamento do algoritmo com o comportamento do método do gradiente. Por conseguinte, os algoritmos de recozimento simulado adaptam a sua orientação de pesquisa com as alterações do parâmetro que regula a temperatura, facto que justifica a importância da função de arrefecimento da temperatura no processo de pesquisa.

A influência da função de arrefecimento da temperatura é mantida até à verificação de um critério de paragem. A cada temperatura, a sequência das soluções isoladas ou a cadeia de Markov é finita, e cada solução candidata faz parte desta cadeia em função da solução corrente, do seu mérito e da temperatura.

O mérito no desempenho do algoritmo assenta na qualidade dos resultados obtidos e do tempo de execução requerido. Como já foi exposto, o esquema de arrefecimento é essencial para a obtenção de boas soluções num reduzido espaço de tempo (Romeo e Sangiovanni-Vincentelli 1991; Cardoso *et al.* 1994).

O algoritmo de recozimento simulado inicia o processo de pesquisa numa solução inicial (X_0), que será admissível se pertencer ao espaço solução. Define-se uma temperatura inicial obrigatoriamente elevada (T_0). A qualidade da solução inicial é analisada com a função objetivo ($F(X_0)$).

A solução inicial assume o papel de solução corrente. Sobre a solução corrente, um mecanismo de perturbação gera na sua vizinhança uma solução candidata. A solução candidata é avaliada com a função objetivo.

Com a avaliação da função objetivo sobre o mérito da solução corrente e da solução candidata recorre-se ao algoritmo de Metropolis (Metropolis *et al.* 1953) para representar o comportamento do recozimento. Para um problema de minimização, se o valor da função objetivo da solução candidata for menor do que o valor da função

objetivo da solução corrente, a solução candidata é aceite imediatamente e passa a ser a solução corrente. Se o valor da função objetivo da solução candidata for maior do que o valor da função objetivo da solução corrente, por analogia com a distribuição de Boltzmann (Aarts e Korst 1989), a solução candidata será aceite com uma probabilidade:

$$Pa = e^{-\frac{\Delta f}{t.K_B}} \quad 4.25$$

onde:

Δf representa a variação do valor entre as funções objetivo;

t representa a temperatura corrente;

K_B representa a constante de Boltzmann¹.

Para cada temperatura de ordem k , T_k , ao fim de L_k transições efetua-se o arrefecimento da temperatura corrente e repete-se todo o procedimento (Cardoso 1998). O número de transições a cada temperatura deverá ser um número inteiro superior à unidade. A interação entre o número de transições e o arrefecimento da temperatura deverá contribuir para gerar situações de quasi-equilíbrio, ou situações próximas no final de cada cadeia de Markov, facilitando a identificação do conjunto de soluções ótimas com a progressiva redução da temperatura.

4.7.4 Modelação numérica do fenómeno físico do recozimento simulado

A aplicação de um algoritmo de recozimento simulado a um problema exige a especificação de três itens: a representação concisa do problema, um mecanismo de transição entre as soluções e uma função de arrefecimento da temperatura.

4.7.4.1 Mecanismo de transição entre soluções

Para cada iteração, a introdução de uma pequena perturbação à solução corrente pode ser produzida ou por uma função estocástica ou por um mecanismo determinístico. Deste modo, cada solução candidata é baseada na solução corrente. Estes mecanismos

¹ No caso da temperatura ser fictícia pode assumir o valor unitário.

de perturbação podem ser alterações aleatórias simples ou regras heurísticas usuais na resolução do problema em causa. Em teoria, estes mecanismos devem assegurar o acesso a todas as restantes soluções no espaço solução, a partir de toda a solução corrente. Dos diversos mecanismos possíveis, será vantajoso utilizar os rearranjos que permitam uma rápida avaliação do valor da função objetivo. Vários autores defendem que estes mecanismos de transição devem ter um comportamento dependente da profundidade dos vários mínimos locais (Hajek 1988; Fleischer e Jacobson 1999) e da dimensão do espaço solução (Goldstein e Waterman 1988).

4.7.4.2 Função de arrefecimento da temperatura

A temperatura inicial ideal deve ser elevada e, por consequência, permitir que quase todas as soluções candidatas sejam aceites numa fase inicial. Para o presente problema, esta escolha deverá ser acompanhada de um elevado número de avaliações, o que promove um elevado tempo de execução do algoritmo.

O arrefecimento da temperatura é um dos parâmetros que mais influencia a solução final, contando com valores razoáveis para os restantes parâmetros. Frequentemente, o arrefecimento brusco orienta o algoritmo para ótimos locais e condiciona a aproximação ao ótimo global.

4.7.4.3 Cadeia de Markov

A escolha do número de avaliações efetuadas a cada temperatura representa o tamanho da cadeia de Markov. Esta deve refletir o efeito do arrefecimento da temperatura e permitir o estabelecimento de situações de quase-equilíbrio. Assim, quanto mais brusco for o arrefecimento, maior número de avaliações são requeridas a cada temperatura, bem como quanto mais progressivo for o arrefecimento, menor número de avaliações são requeridas.

4.7.5 Algoritmo de otimização proposto

4.7.5.1 Solução inicial

Nos algoritmos de recozimento simulado é recomendável uma solução inicial a que corresponda um nível de energia elevada. No algoritmo proposto a solução inicial pertence ao espaço solução.

Em alguns casos de estudo, para o problema proposto, a solução inicial correspondeu à distribuição do caudal da fuga por todos os nós da RDA.

Para outros casos de estudo, e após várias experiências, a solução inicial proposta (X_0) foi obtida com o procedimento descrito no Quadro 4.5.

Quadro 4.5 Proposta para seleção da solução inicial.

Definir em quantas unidades é adequado dividir o valor total do caudal de fugas;

Calcular o valor da unidade elementar do caudal de fuga, resultado da divisão do valor total do caudal de fugas pelo número de unidades;

No simulador hidráulico, a topologia da RDA está definida e a cada nó está atribuído o seu consumo;

Repetir

- Avaliar com a função objetivo o efeito da afetação de uma unidade elementar de caudal em cada um dos troços para todos os troços da rede de distribuição;
- Comparar os valores obtidos com a função objetivo;
- Afetar a unidade elementar de caudal ao troço com menor valor da função objetivo;
- Repetir o processo até o valor total de fugas estar atribuído.

4.7.5.2 Temperatura inicial

A temperatura inicial é selecionada com base no valor da função objetivo e valor para a probabilidade de aceitação inicial. De acordo com o critério de Metropolis a temperatura inicial deve permitir a aceitação da totalidade de soluções. Neste trabalho o valor adotado para a percentagem de aceitação inicial (Pa_0) é da ordem dos 50%.

$$T_0 = -\frac{0,1F(X_0)}{\ln(Pa_0)} \quad 4.26$$

4.7.5.3 Mecanismos de transição entre soluções

Como já foi mencionado, os mecanismos de transição entre soluções são um aspeto que requer muita atenção na aplicação do algoritmo a cada problema específico. Estes mecanismos devem permitir uma profusa exploração do espaço solução. Para tal, devem coexistir mecanismos de transição com estratégias de intensificação ou contração (melhoria local da solução) com mecanismos de transição com estratégias de diversificação ou expansão (procura de soluções em zonas do espaço solução não investigadas). Contudo, em cada iteração só uma solução é gerada, resultado da utilização de um único mecanismo de transição.

Do trabalho desenvolvido concluiu-se que os seguintes procedimentos são os mais adequados para o problema em estudo. Estes procedimentos de expansão e de contração ocorrem aleatoriamente com igual probabilidade:

- O melhor procedimento para a expansão da solução corrente do problema é sortear duas condutas adjacentes, em que pelo menos uma das condutas tem caudal de fuga, e permitir a passagem de uma unidade de caudal elementar de fuga de uma para a outra conduta.
- O melhor procedimento para a contração da solução corrente do problema é sortear uma conduta com fuga e concentrar nela todas as fugas das condutas adjacentes.

A decisão de aceitar a nova solução candidata decorre do comportamento hidráulico da mesma e do critério de aceitação expresso pelo critério de Metropolis.

4.7.5.4 Função de arrefecimento

A diminuição da temperatura, ou seja a função de arrefecimento, pode ser dinâmica ou estática. Este trabalho utiliza uma função de arrefecimento tal como foi proposta inicialmente por Kirkpatrick *et al.* (1983). Esta função de arrefecimento geométrica define a redução da temperatura de acordo com o comportamento da pesquisa, representado pelo quociente entre o número de soluções candidatas aceites e o número de soluções candidatas geradas (probabilidade de aceitação, Pa):

$$Pa_K = \frac{\text{número de soluções candidatas aceites}}{\text{número de soluções candidatas geradas}} \quad 4.27$$

Na fase inicial, quando este quociente se aproxima de um, a diferença entre a temperatura atual e a seguinte é maior, causando um arrefecimento rápido. Na fase final da pesquisa, a probabilidade de aceitação é menor e tende a aproximar-se de um valor nulo, a diferença entre as duas temperaturas é proporcionalmente mais reduzida, causando um arrefecimento lento:

$$T_{k+1} = \alpha T_k \quad \forall K \geq 0 \quad 4.28$$

onde:

$$\alpha = \begin{cases} 0.60 & \text{se } Pa_K > 80\% \\ 0.75 & \text{se } 50\% < Pa_K \leq 80\% \\ 0.90 & \text{se } 20\% < Pa_K \leq 50\% \\ 0.95 & \text{se } Pa_K \leq 20\% \end{cases} \quad 4.29$$

4.7.5.5 Número de iterações a cada temperatura

A cada temperatura ocorre um aumento do número de iterações, logo, aumenta a dimensão da cadeia de Markov. O número de iterações definido para cada temperatura utiliza uma função geométrica. Esta função tem o coeficiente geométrico definido com base na função da probabilidade de aceitação na temperatura antecedente.

$$L_{k+1} = \beta NT \quad \forall K \geq 0 \quad 4.30$$

onde:

NT representa o número de troços da RDA;

$$\beta = \begin{cases} 40 & \text{se } Pa_K > 80\% \\ 60 & \text{se } 50\% < Pa_K \leq 80\% \\ 80 & \text{se } 20\% < Pa_K \leq 50\% \\ 100 & \text{se } Pa_K \leq 20\% \end{cases} \quad 4.31$$

4.7.5.6 Critério de paragem

Durante o processo de pesquisa a função de arrefecimento aumenta a dificuldade de aceitação de soluções candidatas com menor qualidade e o seu comportamento aproxima-se do de um algoritmo de pesquisa local.

De modo a evitar a continuação da pesquisa sem benefícios evidentes, o processo de pesquisa é interrompido quando, após duas descidas de temperaturas sucessivas, não ocorrer nenhum melhoramento na solução ótima e a percentagem de aceitação na última temperatura for inferior a 5%.

No próximo capítulo as abordagens propostas neste capítulo serão utilizadas em estudos de caso para demonstrarem a sua utilidade.

4.8 Referências bibliográficas

Aarts, E., Korst, J. (1989). "Simulation annealing and boltzmann machines: A stochastic approach to combinatorial optimization and neural computing". John Wiley & Sons.

Aarts, E. , Korst, J., Michiels, W. (2003). "Chapter 7 Simulated annealing". Em: Burke E, Kendall G, editores. Search Methodologies. Springer Science+Business Media; p. 187–210.

Azizi, N., Zolfaghari, S. (2004). "Adaptive temperature control for simulated annealing: a comparative study". *Comput Oper Res.* 31:2439–2451.

Cardoso, M., Salcedo, R., Azevedo, S. (1994). "Nonequilibrium Simulated Annealing". *Ind Eng Chem Res.* 33:1908–1918.

Cardoso, M. (1998). "À procura do ótimo global". PhD Theses. Universidade do Porto.

Cerný, V. (1985). "Thermodynamical approach to the traveling salesman problem: An efficient simulation algorithm". *J Optim Theory Appl.* 45:41–51.

Costa, A., Medeiros, J., Pessoa, F. (2000). "Optimization of pipe networks including pumps by simulated annealing". *Brazilian J Chem Eng.* 17:887–895.

Cunha, MC., Sousa, J. (1999). "Water Distribution Network Design Optimization: Simulated Annealing Approach". *J Water Resour Plan Manag.* 125:215–221.

Cunha, MC., Sousa, J. (2010). "Robust Design of Water Distribution Networks for a

Proactive Risk Management". *J Water Resour Plan Manag.* 136:227–236.

Dent, W., Ballantine, R. (1971). "A review of the estimation of transition probabilities in Markov chains". *Aust J Agric Econ.* 15:69–81.

Dolan, W., Cummings, P., Le Van, M. (1989). "Process optimization via simulated annealing: Application to network design". *AIChE J.* 35:725–736.

DTA-A2. (2004). "DTA A2 - Indicadores de perdas nos sistemas de abastecimento de água". Programa nacional de combate ao desperdício de água (PNCDA), Brasil Ministério das Cidades - Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental.

Fleischer, M., Jacobson, S. (1999). "Information Theory and the Finite-Time Behavior of the Simulated Annealing Algorithm: Experimental Results". *INFORMS J Comput.* 11:35–43.

Gendreau, M., Potvin, J. (2005). "Metaheuristics in combinatorial optimization". *Ann Oper Res.* 140:189–213.

Goldman, F., Mays, L. (2005). "Water distribution system operation: Application of simulated annealing". Em: Mays LW, editor. *Water Resouces Syst Manag Tools.* McGraw-Hill; p. 5.1–5.17.

Goldstein, L., Waterman, M. (1988). "Neighborhood size in the simulated annealing algorithm". *Am J Math Manag Sci.* 8:409–423.

Gomes, R., Sá Marques, A., Sousa, J. (2013). "District metered areas design under different decision makers' options: cost analysis". *Water Resour Manag.* 27:4527–4543.

Gyöngyi, Z., Garcia-Molina, H., Pedersen, J. (2004). "Combating web spam with trustrank". Em: *Proc Thirtieth Int Conf Very Large Data Bases.* Toronto, Ontario, Canada: Morgan Kaufmann; p. 576–587.

Hajek, B. (1988). "Cooling schedules for optimal annealing". *Math Oper Res.* 13:311–330.

Henderson, D., Jacobson, S., Johnson, A. (2003). "Chapter 10 - The theory and practice of simulated annealing". Em: *Handb metaheuristics Int Ser Oper Manag Sci.* p. 287–319.

Huang, Y., Lin, C., Yeh, H. 2016. "An optimization approach to leak detection in pipe

networks using simulated annealing". *Water Resour Manag.* 29:4185–4201.

Huang, Y., Yeh, H., Lin, Y. (2008). "A computer method based on simulated annealing to identify aquifer parameters using pumping-test data". *Int J Numer Anal Methods Geomech.* 32:235–249.

Ingber, L. (1993). "Simulated annealing: practice versus theory". *Math Comput Model.* 8:29–57.

Khodabakhshi, F., Ghirian, A., Khakzad, N. (2009). "Applying simulated annealing for optimal operation of multi-reservoir systems". *Am J Eng Appl Sci.* 1:80–87.

Kirkpatrick, S., Gelatt, C., Vecchi, M. (1983). "Optimization by simulated annealing". *Science.* 220:671–680.

Kirkpatrick, S. (1984). "Optimization by simulated annealing: Quantitative studies". *J Stat Phys.* 34:975–986.

Kuo, S-F, Liu, C-W, Merkley, G. (2001). "Application of the simulated annealing method to agricultural water resource management". *J Agric Eng Res.* 80:109–124.

Van Laarhoven, P., Aarts, E. (1987). "Simulated Annealing : Theory and Applications". *Mathematics and Statistics.*

Locatelli, M. (2000). "Convergence of a simulated annealing algorithm for continuous global optimization". *J Glob Optim.* 18:219–234.

Mahlke, D., Martin, A., Moritz, S. (2007). "A simulated annealing algorithm for transient optimization in gas networks". *Math Methods Oper Res.* 66:99–115.

Mantawy, A., Soliman, S., El-Hawary, M. (2003). "An innovative simulated annealing approach to the long-term hydroscheduling problem". *Int J Electr Power Energy Syst.* 25:41–46.

Marryott, R. (1996). "Optimal ground-water remediation design using multiple control technologies". *Ground Water.* 34:425–433.

Meise, C. (1998). "On the convergence of parallel simulated annealing". *Stoch Process their Appl.* 76:99–115.

Metropolis, N., Rosenbluth, A., Rosenbluth, M., Teller A., Teller, E. (1953). "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines". *J Chem Phys.* 21:1087–1092.

Michalewicz, Z., Fogel, D. (2000). "How to Solve It: Modern Heuristics". Springer Verlag Berlin Heidelberg.

Mitra, D., Romeo, F., Sangiovanni-Vincentelli, A. (1985). "Convergence and finite time behavior of simulated annealing". Em: Proc 24th Conf Decis Control. Lauderdale; p. 761–767.

Nunes, L. (2003). "Monitoring networks optimization with simulated annealing". PhD Thesis, IST Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Pinto, P. (2011). "Contribuições teóricas e experimentais para controlo de perdas de água em redes de distribuição O caso do Concelho de Valongo". Dissertação em Engenharia Civil - Especialização em Hidráulica, Universidade do Porto.

Pirlot, M. (1996). "General local search methods". Eur J Oper Res. 92:493–511.

Romeo, F., Sangiovanni-Vincentelli, A. (1991). "A theoretical framework for simulated annealing". Algorithmica. 6:302–345.

Sousa, J., Cunha, MC., Sá Marques, A. (2005). "Simulated annealing reaches «ANYTOWN »". Em: 8th Int Conf Comput Control Water Ind - CCWI 2005. Exeter.

Sousa, J., Cunha, MC. (1998). "Dimensionamento optimizado de redes malhadas de distribuição de água". Em: 4º Congr da Água - A água como Recur estruturante do desenvolvimento, Lisboa. p. 1–15.

Sousa, J., Ribeiro, A., Cunha, MC., Antunes, A. (2002). "An optimization approach to wastewater systems planning at regional level". J Hydroinformatics. 4:115–123.

Sousa, J. (2006). "Decision Aid Models for the Design and the Operation of Water Supply Systems". PhD Thesis, Coimbra University.

Trosset, M. (2001). "What is simulated annealing? ". Optim Eng. 2:201–213.

Tucciarelli, T., Criminisi, A., Termini, D. (1999). "Leak analysis in pipeline systems by means of optimal valve regulation". J Hydraul Eng. 125:277–285.

Yeh, H., Lin, Y. (2008). "Pipe network system analysis using simulated annealing". J Water Supply Res Technol —AQUA. 57:317–327.

5 Análise crítica do desempenho das aplicações computacionais desenvolvidas

5.1 Enquadramento

O presente capítulo apresenta e analisa o conjunto de aplicações computacionais desenvolvidas ao longo da investigação e respetivas aplicações em estudos de caso. Este conjunto de trabalhos tem duas linhas de investigação independentes que convergem para um objetivo comum, a localização não convencional das fugas de água numa RDA. Cada linha de investigação tem casos de estudo próprios, podendo utilizar a mesma RDA. O último estudo de caso reúne as duas linhas de investigação numa exemplificação em contexto real.

A primeira linha de investigação refere-se ao desenvolvimento de uma aplicação computacional fiável e robusta para quantificar e localizar aproximadamente fugas numa RDA. A esta linha de investigação correspondem os 2 primeiros estudos de caso.

A segunda linha de investigação refere-se à procura da melhor rede de monitorização da pressão capaz de garantir o objetivo definido na primeira linha de investigação com os mínimos recursos possíveis. A esta temática correspondem os restantes estudos de caso. Como é espectável, para averiguar a qualidade de uma rede de monitorização é necessária a utilização da aplicação computacional desenvolvida na primeira linha de investigação.

O capítulo termina com a apresentação de um estudo de caso real numa RDA do concelho de Penacova.

Cada estudo de caso apresenta a aplicação computacional envolvida e o respetivo resultado da aplicação, existindo alguma concordância entre a complexidade do problema e o nível de aprofundamento do trabalho. Os detalhes dos estudos de caso são apresentados em anexos.

As referências bibliográficas necessárias para o desenvolvimento, compreensão e justificação das opções deste capítulo são apresentadas no final do mesmo.

5.2 Aplicação computacional para quantificar e localizar as fugas de água

A primeira linha de investigação desenvolvida decorre da análise e consulta da bibliografia especializada que relata diferentes trabalhos de investigação referentes à localização aproximada de fugas de água nas RDA. Estas diferentes abordagens contribuíram para responder a um conjunto de questões, nomeadamente, na análise crítica da importância da definição da função objetivo e na orientação da pesquisa para zonas da RDA com potencialidade para terem fugas. Para o efeito é utilizado um simulador hidráulico em regime permanente, ou quase permanente, a observação da pressão nos nós, e a observação do caudal fornecido à RDA. A cada estudo de caso corresponde uma RDA com as suas características bem definidas. As RDA utilizadas serão cada vez, ou maiores, ou mais complexas. No total serão analisadas quatro redes diferentes.

Cada RDA foi sujeita a diferentes hipóteses e objetivos, a que correspondem diferenças ou no modelo de otimização (nomeadamente na função objetivo utilizada e na definição da solução inicial) ou nas observações registadas (por exemplo nos locais, caudais, pressões ou solicitações). Os estudos de caso são apresentados de modo sequencial, em paralelo com o decorrer dos trabalhos. A análise crítica dos resultados obtidos evidencia tanto as necessidades de melhoramento em cada fase como os benefícios obtidos com a utilização da metodologia proposta.

5.2.1 Estudo de caso 1

O primeiro estudo de caso (Ribeiro *et al.* 2012a) analisa a RDA proposta no trabalho de Pudar e Liggett (1992), e que foi posteriormente analisado por Wu *et al.* (2010). A rede sintética é constituída por 12 troços e 8 nós. A cota topográfica da superfície livre no reservatório é conhecida. A monitorização da pressão ocorre em três nós da RDA, tal como está representada na Figura 5.1. Não ocorrem fugas nos nós monitorizados.

Nos Anexos, no Quadro A.1 apresentam-se as características dos nós da RDA: cota topográfica, consumo, caudal de fuga e pressão medida. No Quadro A.2 caracterizam-se as condutas: os diâmetros, os comprimentos e os coeficientes de Hazen-Williams a utilizar na lei de resistência ao escoamento (equação 3.13).

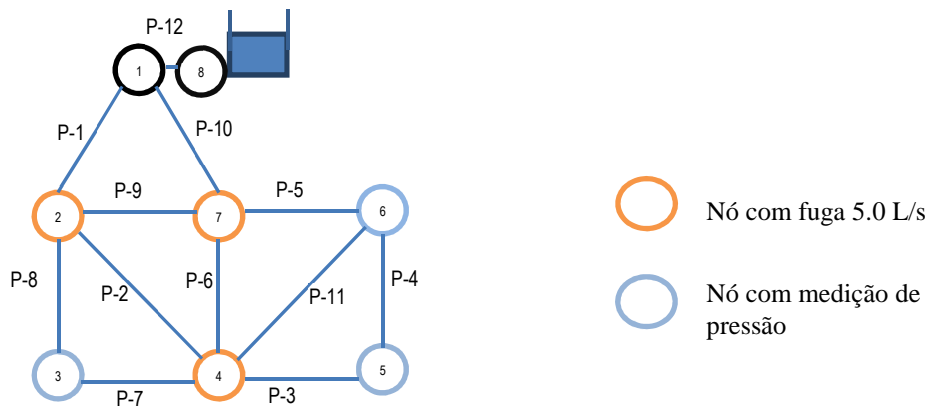


Figura 5.1 Rede de distribuição de água analisada no estudo de caso 1.

5.2.1.1 Hipótese 1.1

Primeiramente, para a construção da aplicação computacional, procurou-se ir ao encontro de uma função objetivo eficaz e das correções mais apropriadas para a alteração do caudal de fuga em cada nó da rede. A hipótese 1.1 analisou de que modo uma função objetivo simples e rápida poderia ser útil na construção do modelo de otimização. Esta função objetivo minimiza a maior diferença entre a altura piezométrica observada e a estimada com o simulador hidráulico, em cada nó da rede monitorizado. Assim, a função objetivo $F_{1.1}(x)$ é expressa por:

$$F_{1.1}(x) = MÁX \left\{ \left| \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_n^{Observado} - \left(z + \frac{p}{\gamma} \right)_n^{Estimado} \right| \right\} \forall n = 1, 2, \dots, NPO \quad 5.1$$

Em simultâneo, a hipótese 1.1 analisou a importância dos diferentes valores da unidade elementar do caudal de fuga em cada nó no processo de pesquisa. Na secção de saída do reservatório regista-se um caudal de 55,0 L/s. O consumo autorizado é de 40,0 L/s, o que indica um caudal total de fuga de 15,0 L/s. Neste estudo de caso todas as fugas têm o caudal igual, com o valor 5,0 L/s e só ocorrem nos nós.

A solução inicial proposta para aplicação da técnica de resolução distribui o caudal total das fugas por todos os nós de junção da RDA. A perturbação introduzida na solução corrente para construir uma solução candidata é alterar o caudal de fuga em dois nós sorteados aleatoriamente. Em 80% das iterações, no nó de maior pressão o caudal da fuga é aumentado num valor fixo que é retirado do nó com menor pressão. Nas restantes iterações ou se as pressões dos dois nós são semelhantes, os caudais de fuga são alterados de modo aleatório num valor fixo. O valor da alteração do caudal é fixo, representado por ΔQ , e representa a divisão do caudal total de fugas em 15 ou mais parcelas. As figuras apresentando os resultados consideram os diferentes valores da unidade elementar de caudal de fuga: 1,00 L/s, 0,50 L/s, 0,10 L/s e 0,05 L/s.

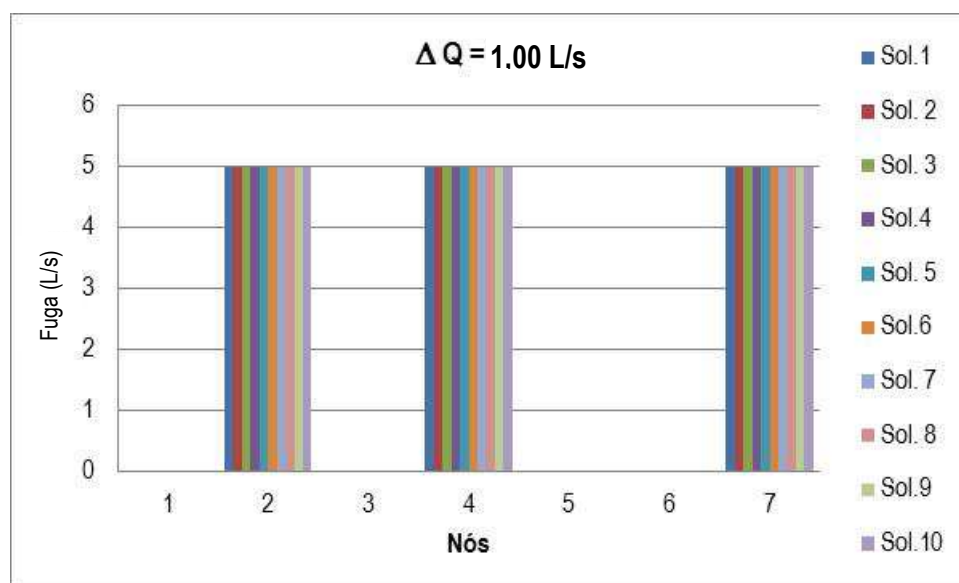


Figura 5.2 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal 1,00L/s.

Os excelentes resultados obtidos na Figura 5.2 correspondem à primeira análise com o valor da unidade elementar do caudal de fuga em cada nó de 1,00 L/s e com a utilização de dez conjuntos de números aleatórios, representados por Sol. 1 a Sol. 10.

Os resultados obtidos na Figura 5.3 correspondem à segunda análise efetuada com o valor da unidade elementar do caudal de fuga em cada nó de 0,50 L/s e com a utilização de dez conjuntos de números aleatórios (Sol. 1 a Sol. 10).

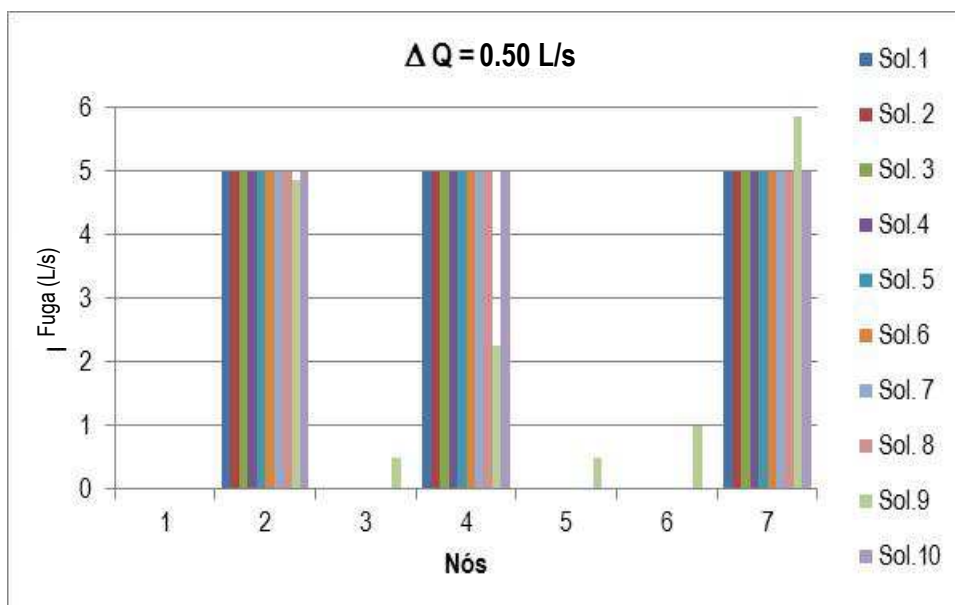


Figura 5.3 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga 0,50 L/s.

Os resultados apresentados na Figura 5.4 correspondem à terceira análise com o valor da unidade elementar do caudal de fuga em cada nó de 0,25 L/s e com a manutenção dos conjuntos de números aleatórios (Sol. 1 a Sol. 10).

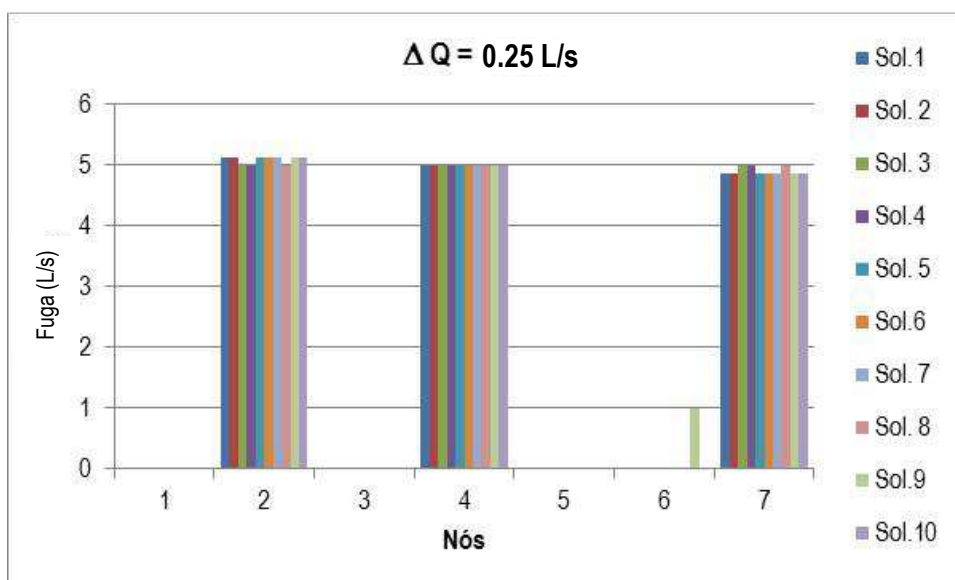


Figura 5.4 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga 0,25 L/s.

A capacidade de identificação dos nós com fugas de água deteriora-se na penúltima análise, resultado da utilização do valor da unidade elementar do caudal de fuga em

cada nó de 0,10 L/s. Na Figura 5.5 é visível a perda de estabilidade das soluções finais apresentadas pelo modelo de resolução do problema de otimização, com a utilização dos dez conjuntos de números aleatórios, representados por Sol. 1 a Sol. 10.

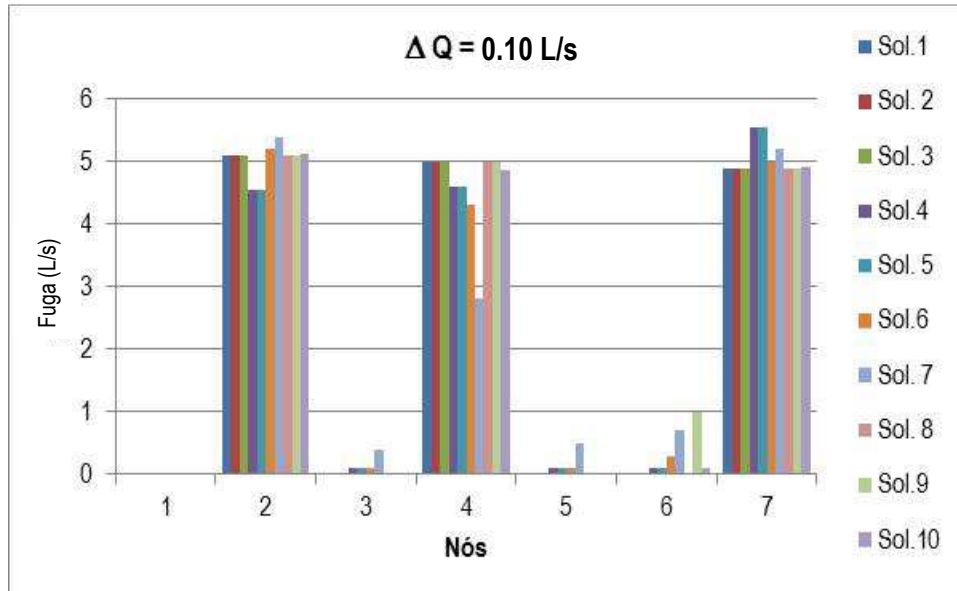


Figura 5.5 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,10 L/s.

Na Figura 5.6 há uma dispersão generalizada de caudal de fugas por nós que não as têm mas mantém-se a correta identificação dos nós com fugas.

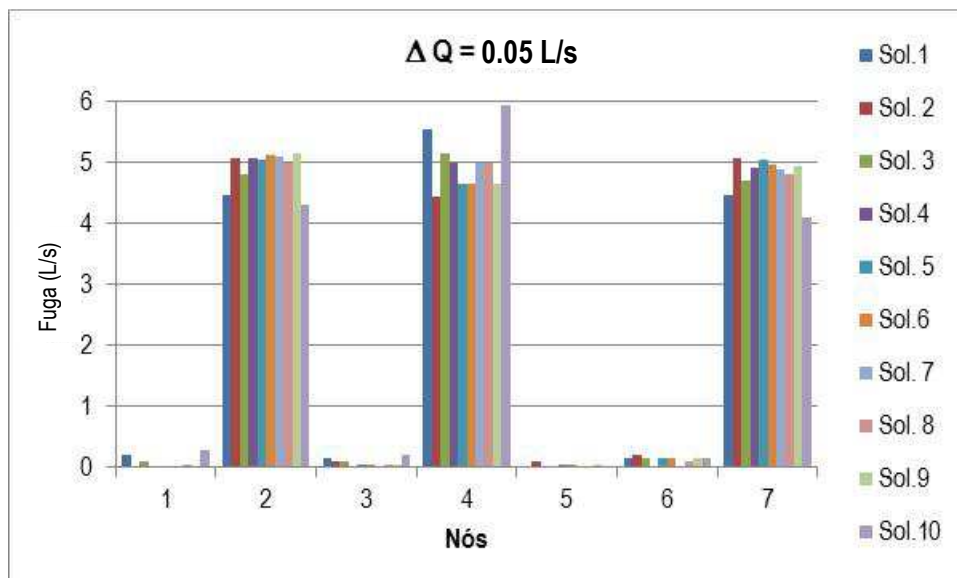


Figura 5.6 Resultado da localização das fugas em cada nó com o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,05 L/s.

Estes resultados menos bons correspondem à análise com o valor da unidade elementar do caudal de fuga em cada nó de 0,05 L/s e com a utilização de dez conjuntos de números aleatórios (Sol. 1 a Sol. 10).

5.2.1.2 Hipótese 1.2

Os resultados obtidos anteriormente indiciam a necessidade de melhorar a implementação do recozimento simulado, sobretudo quando o caudal total de fuga é muito fracionado e apresenta as menores correções de caudal descritas na hipótese 1.1. Com este objetivo, a RDA do estudo de caso 1 foi analisada procedendo a alterações no processo de pesquisa com o recozimento simulado, através do re-recozimento simulado ou a execução de duas pesquisas sequenciais. A primeira pesquisa é executada a partir da solução inicial proposta na hipótese 1.1 e com os mesmos parâmetros. O re-recozimento simulado, ou seja a segunda pesquisa, é executada admitindo a solução inicial igual à solução final apresentada pelo recozimento simulado na primeira pesquisa. Todos os restantes parâmetros de controlo são mantidos (Ribeiro *et al.* 2012a). O fracionamento do caudal total da fuga mantém-se igual. Para distinguir os resultados obtidos com o algoritmo do re-recozimento simulado dos resultados obtidos com o recozimento simulado, no primeiro caso a correção do caudal de fuga é representada por ΔQ_{rsa} .

A hipótese 1.2 centra-se na potencialidade de melhorar as soluções finais. Os resultados finais são efetivamente melhorados, acompanhados de um esforço computacional também muito superior. Na Figura 5.7 observam-se resultados finais iguais, admitindo unidades elementares de caudal de fuga (ΔQ_{rsa}) de 1,00 L/s ou 0,50 L/s.

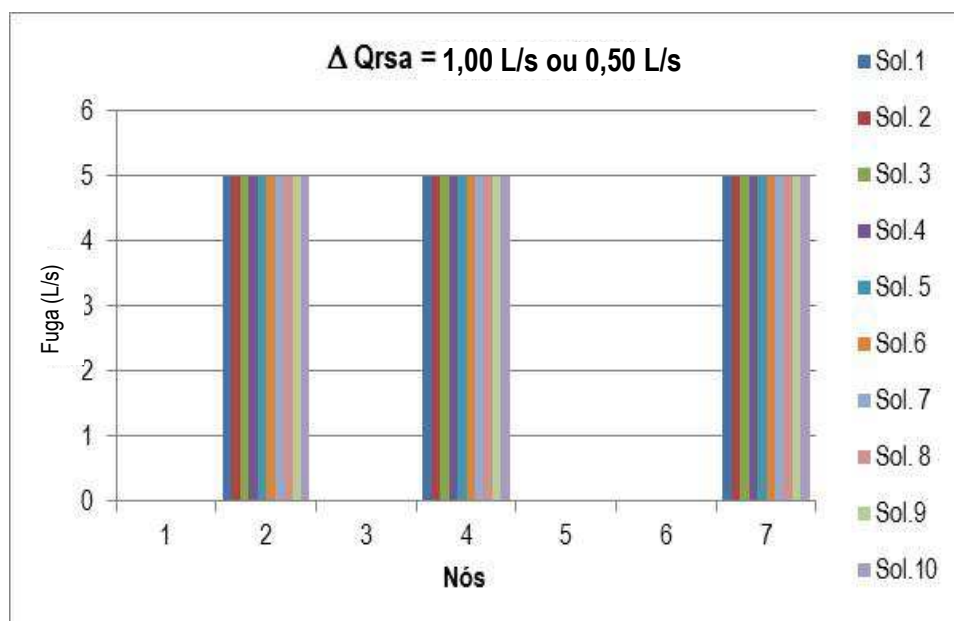


Figura 5.7 Resultados da localização de fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado admitindo o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 1,0 L/s ou 0,5 L/s.

Com o valor da unidade elementar do caudal da fuga de 0,25 L/s a identificação dos nós com fugas é correta e os valores de caudal atribuídos em cada nó são mais semelhantes, Figura 5.8.

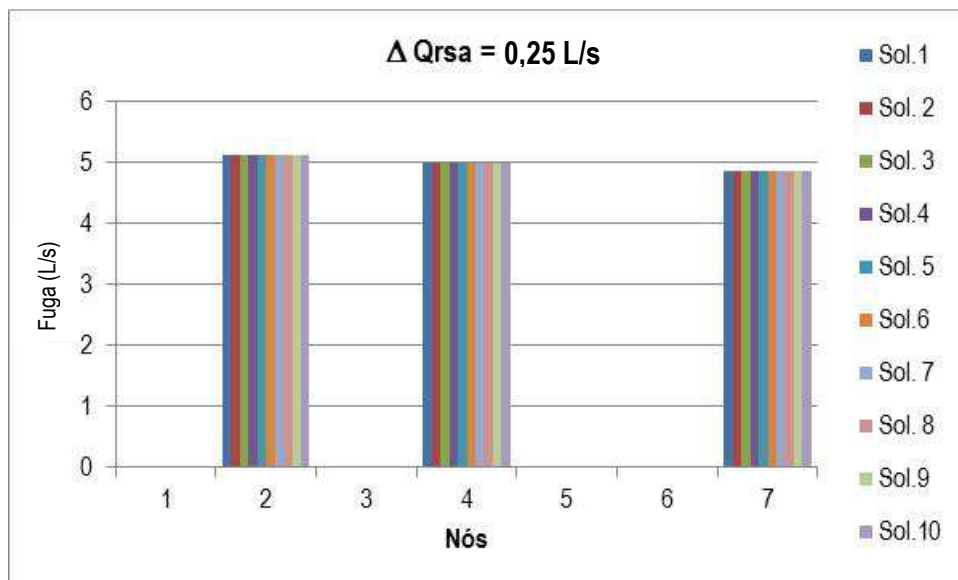


Figura 5.8 Resultados da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,25 L/s.

O comportamento observado na Figura 5.8 mantém-se no valor da unidade elementar do caudal de 0,10 L/s, com evidente redução de erro no resultado do caudal da fuga em cada nó, Figura 5.9.

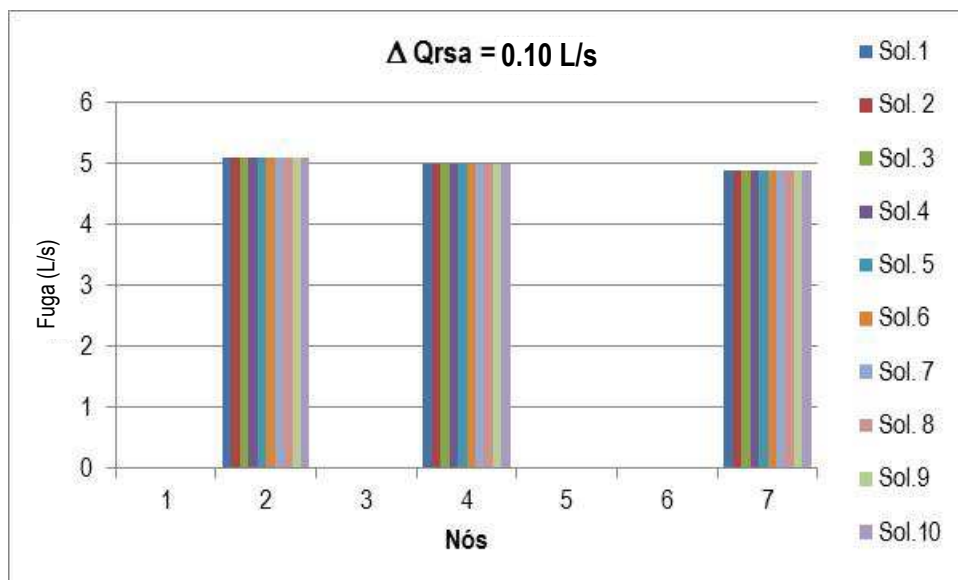


Figura 5.9 Resultado da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,10 L/s.

Com uma discretização mais fina do caudal total de fuga é possível constatar maior rigor na identificação dos nós com fugas, Figura 5.10.

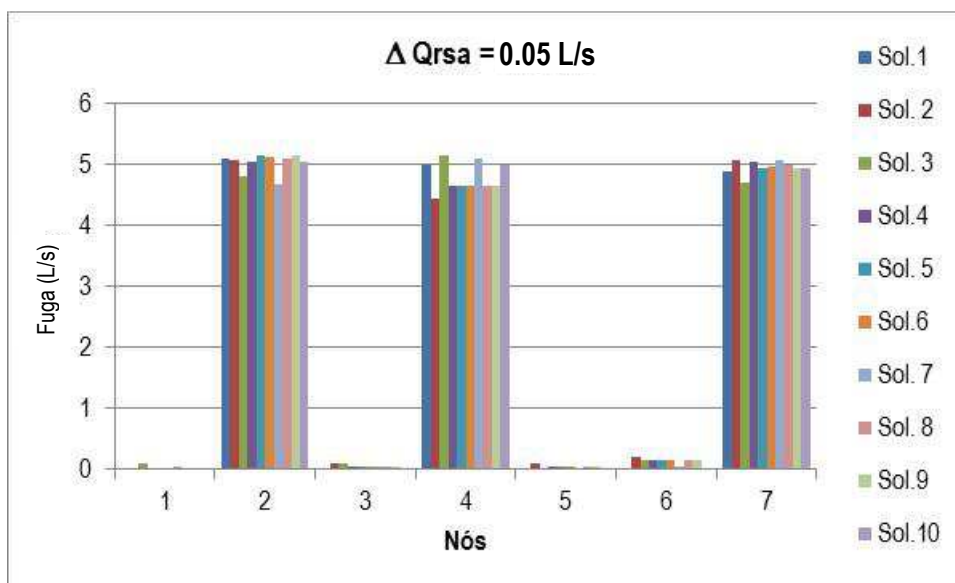


Figura 5.10 Resultado da localização das fugas com um algoritmo de re-recozimento simulado e o valor da unidade elementar do caudal de fuga de 0,05 L/s.

5.2.1.3 Hipótese 1.3

Nos modelos de simulação do comportamento hidráulico é muito relevante a correta caracterização da RDA e de todos os seus parâmetros. Entre os diferentes parâmetros a considerar, talvez o diâmetro interno das condutas e o coeficiente de rugosidade sejam os mais dúbios (Ribeiro *et al.* 2012a).

Uma vez que se constatou que com correções de caudal muito pequenas existia tendência para atribuir fugas a nós inadequados, optou-se por seleccionar o valor da unidade elementar do caudal de fuga com melhor desempenho, ou seja, admitindo como unidade de correção do caudal em cada nó o resultado da divisão do caudal total de fuga em 15 frações e procedeu-se à utilização do algoritmo de recozimento simulado conforme apresentado na hipótese 1.1.

Por forma a averiguar o impacto da incorreta estimativa destes parâmetros no modelo de otimização, introduziu-se um desvio de $\pm 10\%$ no coeficiente de Hazen-Williams que caracteriza o atrito desenvolvido nas paredes internas de cada conduta da RDA.

Os resultados estão apresentados nas Figuras 5.11 e 5.12. Nestas figuras está bem patente que a metodologia obtém más soluções, resultado da reduzida capacidade para

identificar os nós problemáticos. Se o coeficiente de Hazen-Williams é sobreavaliado, há uma subavaliação das perdas de carga contínuas induzindo à localização das fugas a jusante dos nós onde de facto ocorrem (Figura 5.11).

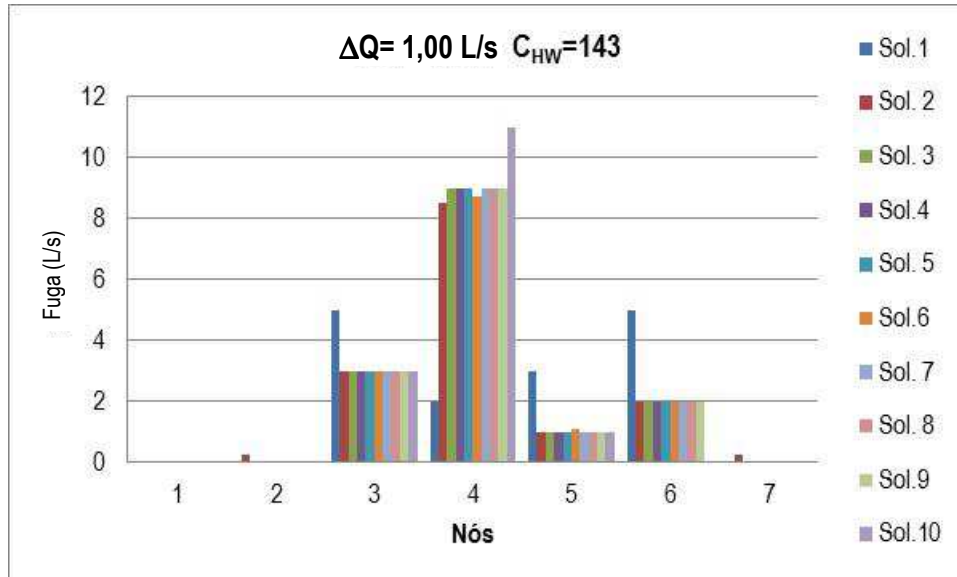


Figura 5.11 Resultado da localização das fugas com um modelo de simulação em que o coeficiente de Hazen-Williams está sobreavaliado em 10%.

Se o coeficiente de Hazen-Williams é subavaliado, há uma sobreavaliação das perdas de carga contínuas induzindo à localização das fugas a montante dos nós onde de facto ocorrem (Figura 5.12).

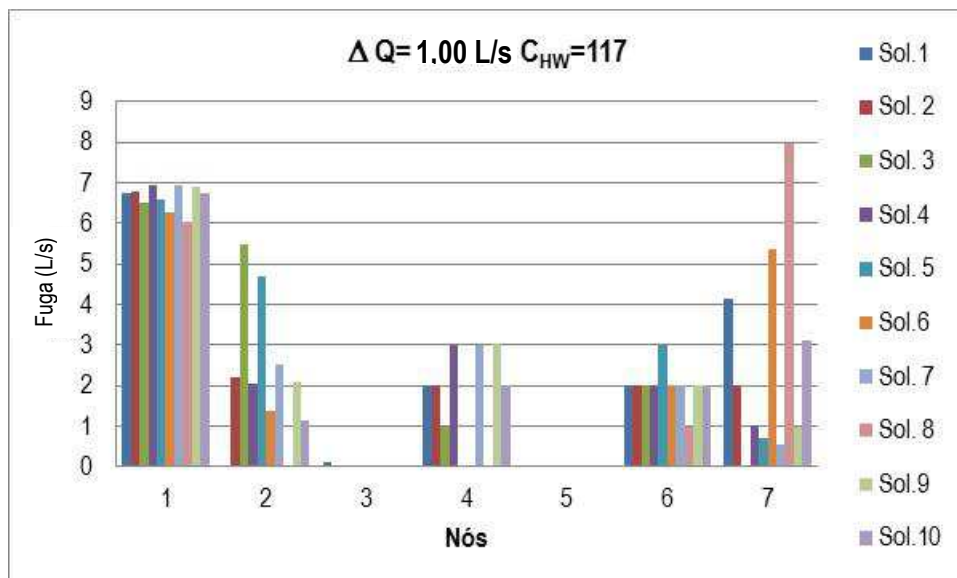


Figura 5.12 Resultado da localização das fugas com um modelo de simulação em que o coeficiente de Hazen-Williams está subavaliado em 10%.

5.2.2 Estudo de caso 2

Seguidamente, a rede analisada (Ribeiro *et al.* 2012b; Ribeiro *et al.* 2012c) foi criada com o *software* WaternetGen (Muranho 2012; Muranho *et al.* 2012). A RDA é fictícia, tem 101 nós, 1 reservatório e 111 troços. A cota da superfície livre do único reservatório abastecedor é conhecida. A rede está representada na Figura 5.13. A caracterização dos nós e das condutas encontram-se nos Anexos (Quadros A.3 e A.4)

A extensão da rede aumenta a probabilidade de ocorrência de fenómenos de fugas ao longo das condutas, o que está de acordo como a experiência em campo que relata elevadas ocorrências de fugas nos ramais domiciliários e ao longo da conduta. Assim, melhorou-se a aplicação computacional para a quantificação e localização aproximada de fugas admitindo a ocorrência das fugas de água nas condutas da rede. Para proceder à modelação hidráulica do comportamento da rede, a hipótese da fuga ocorrer na conduta exige uma repartição, assumida como equitativa, do caudal da fuga que ocorre em cada conduta pelos nós extremos que a definem.

5.2.2.1 Hipótese 2.1

Na seção de saída do reservatório regista-se um caudal igual a 38,148 L/s. O consumo na rede é 23,148 L/s e está concentrado nos nós. A diferença de caudal entre o saído do reservatório e o consumido corresponde ao caudal total de fugas (15,0 L/s) que estão repartidas por cinco condutas, tendo cada uma das condutas uma fuga com o caudal de 3,0 L/s (Ribeiro *et al.* 2012b). A hipótese 2.1 de fuga na RDA está representada na Figura 5.13.

A rede de monitorização é constituída por vinte transdutores de pressão colocados nas extremidades das condutas ramificadas.

Fundamentalmente, com a hipótese 2.1 pretende-se relacionar a definição genérica da função objetivo, a orientação do processo de pesquisa, a qualidade dos resultados e a rapidez da análise com a expressão utilizada, uma vez que na literatura da especialidade coexistem diferentes expressões e a expressão $F_{1,1}(x)$ apresenta algumas fragilidades quando aplicada a esta rede.

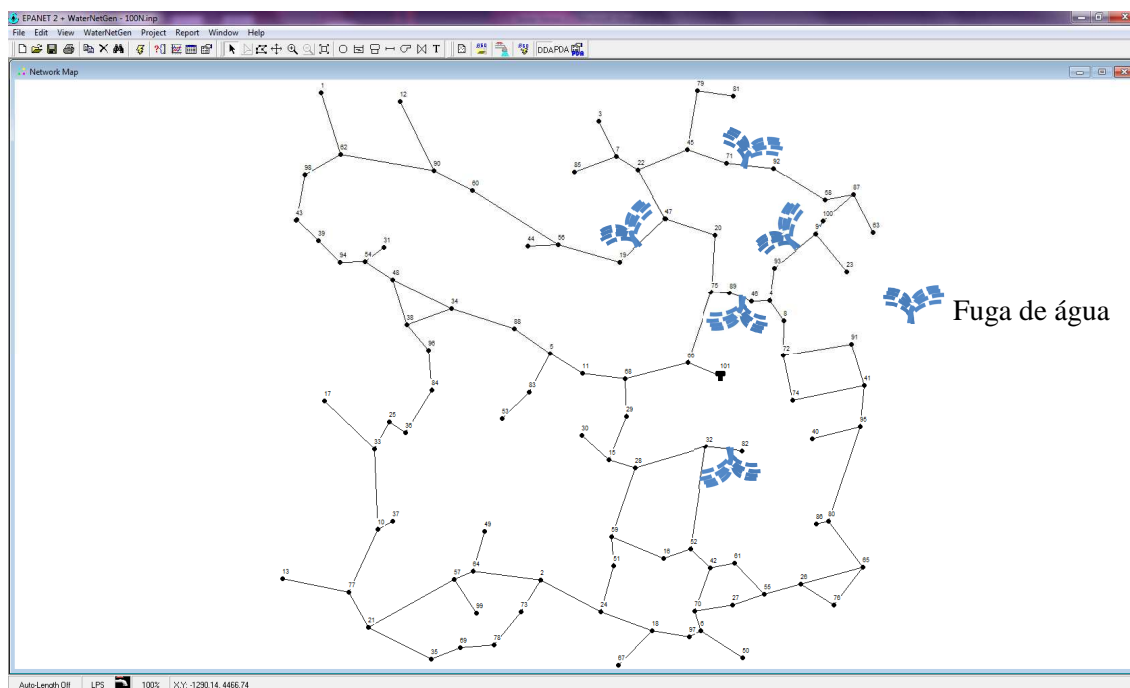


Figura 5.13 Planta da RDA do segundo estudo de caso gerada com Waternetgen (Muranho *et al.* 2012) com a hipótese de fuga 2.1.

Neste âmbito, a principal discussão centra-se na melhoria da representação matemática da presença das fugas de água numa RDA, e expressa numa função objetivo ágil na identificação da solução correta rapidamente. Após análise da literatura da especialidade no capítulo 4, as possibilidades para a função objetivo são as apresentadas na secção 4.6.1

Com cinquenta conjuntos de números aleatórios averiguou-se o número de soluções finais corretas, o tempo mínimo e o tempo máximo de execução aquando da execução da aplicação computacional. Os resultados obtidos estão no Quadro 5.1.

Quadro 5.1 Resultados com cinquenta conjuntos de números aleatórios e diferentes funções objetivo.

Função objetivo	Soluções corretas	Tempo mínimo de execução	Tempo máximo de execução
$F_{2.1}$	50 soluções	12,13 min	14,21 min
$F_{2.2}$	49 soluções	4,06 min	7,34 min
$F_{2.3}$	30 soluções	3,13 min	13,59 min
$F_{2.4}$	37 soluções	2,50 min	13,12 min
$F_{2.5}$	41 soluções	3,04 min	11,46 min

Com os resultados obtidos constata-se que a função objetivo $F_{2.1}(x)$ obtém os melhores resultados estatísticos, mas apresentou o maior tempo de execução. A função objetivo

$F_{2.2}(x)$ conduz a pesquisa para bons resultados estatísticos de um modo mais célere do que a anterior. A função objetivo $F_{2.3}(x)$ não conduz eficazmente a pesquisa para resultados com fiabilidade estatística mas apresenta uma elevada rapidez de execução.

As funções objetivo $F_{2.4}(x)$ e $F_{2.5}(x)$ orientam a pesquisa para soluções mais fiáveis do que as obtidas com a função objetivo $F_{2.3}(x)$, com tempos de execução muito semelhantes. Contudo, o desempenho estatístico das soluções finais é inferior ao desempenho obtido com as duas primeiras funções objetivo.

Face ao carácter estocástico do método do recozimento simulado e à importância da definição da função objetivo na orientação da pesquisa para boas soluções, as duas primeiras funções objetivo ($F_{2.1}(x)$ e $F_{2.2}(x)$) são as mais adequadas.

O tempo de execução será o critério de distinção, pelo que a função objetivo $F_{2.2}(x)$ será a selecionada para a aplicação computacional uma vez que, rapidamente, obtém soluções fiáveis.

5.2.2.2 Hipótese 2.2

O estudo de caso 2 estará sujeito à função objetivo $F_{2.2}(x)$. A hipótese 2.2 e seguintes vão demonstrar as potencialidades da aplicação computacional através de análises de cenários de solicitações (Ribeiro *et al.* 2012c). A rede de monitorização é constituída por vinte transdutores de pressão colocados em todas as juntas cegas das condutas ramificadas da RDA.

Nas primeiras horas do dia, o consumo da rede é 2,315 L/s e são analisados dois cenários de fuga 15,0 L/s e 1,5 L/s, denominados cenário 1 e cenário 2, respetivamente. O caudal total de fuga encontra-se repartido por cinco condutas ramificadas, na periferia da rede, e escolhidas aleatoriamente, ver Figura 5.14. Para cada um dos cenários, os caudais das fugas são diferentes em cada conduta, conforme está apresentado no Quadro 5.2.

Quadro 5.2 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.2.

Conduta	Cenário 1	Cenário 2
	Fugas = 15,0 L/s	Fugas = 1,5 L/s
5	5,0 L/s	0,5 L/s
25	3,0 L/s	0,3 L/s
35	4,0 L/s	0,4 L/s
37	2,0 L/s	0,2 L/s
82	1,0 L/s	0,1 L/s

A aplicação foi executada cinquenta vezes, com diferentes conjuntos de números aleatórios, obtendo-se os números de soluções corretas apresentados no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 Resultados finais com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.2.

Cenário	Soluções corretas	Consumo da rede (L/s)	Fugas (L/s)
1	50 soluções	2,315	15,0
2	50 soluções	2,315	1,5

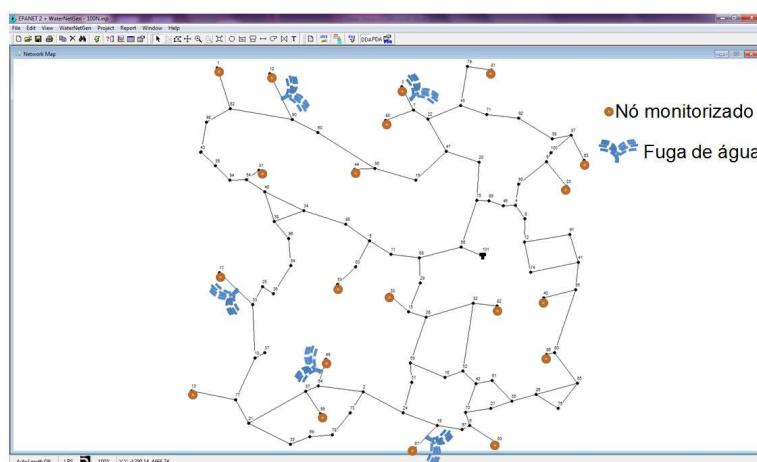


Figura 5.14 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.2.

5.2.2.3 Hipótese 2.3

Partindo do estudo de caso 2 e utilizando a função objetivo $F_{2.2}(x)$, esta terceira hipótese surge para averiguar a capacidade da aplicação computacional isolar as fugas quando estas existem em condutas adjacentes, sendo quatro das condutas com fugas pertencem a uma mesma malha, Figura 5.15.

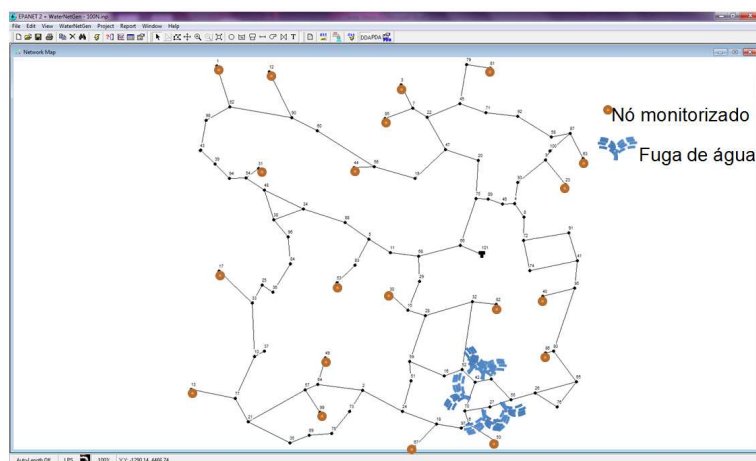


Figura 5.15 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.3.

Esta distribuição das fugas é bastante complexa, devido à proximidade das fugas em condutas adjacentes e à partilha de um nó pertencente às duas condutas com fugas. Tal como na hipótese 2.2, no cenário 1 de 15,0 L/s, os valores das fugas nas condutas variam entre 5 L/s e 1 L/s, e no cenário 2 de 1,5 L/s, os valores das fugas nas condutas oscilam entre 0,5 L/s e 0,1 L/s, conforme está apresentado no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.3.

Conduta	Cenário 1	Cenário 2
	Fugas =15,0 L/s	Fugas =1,5 L/s
54	1,0 L/s	0,1 L/s
55	2,0 L/s	0,2 L/s
57	5,0 L/s	0,5 L/s
74	3,0 L/s	0,3 L/s
86	4,0 L/s	0,4 L/s

A estabilidade da aplicação computacional foi testada com diferentes conjuntos de números aleatórios. Para cada cenário, o número de soluções corretas obtidas está apresentado no Quadro 5.5.

Quadro 5.5 Resultados finais com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.3.

Cenário	Soluções corretas	Consumo da rede (L/s)	Fugas (L/s)
1	50 soluções	2,315	15,0
2	50 soluções	2,315	1,5

5.2.2.4 Hipótese 2.4

A quarta hipótese do estudo de caso 2 averigua o desempenho da aplicação computacional no correto posicionamento das fugas quando as condutas com fugas são próximas mas não adjacentes, Figura 5.16 e Quadro 5.6. Os procedimentos são iguais aos apresentados nas hipóteses anteriores: a função objetivo utilizada é $F_{2.2}(x)$ e a rede de monitorização é constituída por vinte transdutores de pressão.

Quadro 5.6 Discriminação das fugas nas condutas da RDA de acordo com o cenário analisado – Hipótese 2.4.

Conduta	Cenário 1	Cenário 2
	Fugas =15,0 L/s	Fugas =1,5 L/s
39	1,0 L/s	0,1 L/s
41	2,0 L/s	0,2 L/s
44	4,0 L/s	0,4 L/s
69	5,0 L/s	0,5 L/s
98	3,0 L/s	0,3 L/s

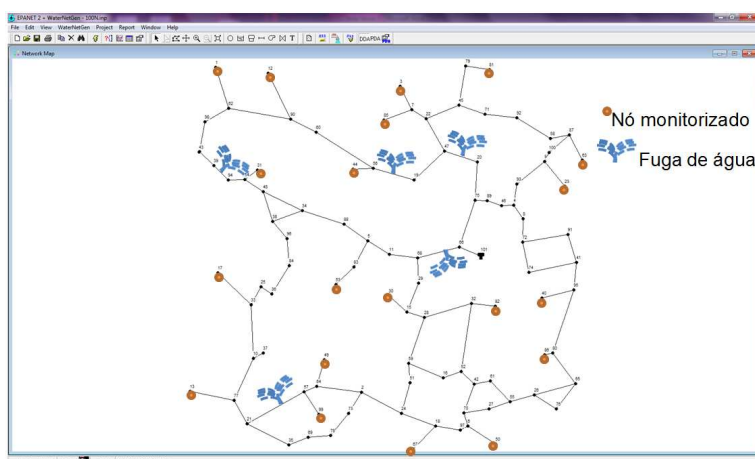


Figura 5.16 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.4.

A aplicação foi executada cinquenta vezes, com diferentes conjuntos de números aleatórios, identificando-se as soluções corretas para os cenários apresentados conforme apresentado no Quadro 5.7.

Quadro 5.7 Resultados finais corretos com cinquenta conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.4.

Cenário	Soluções corretas	Consumo da rede (L/s)	Fugas (L/s)
1	50 soluções	2,315	15,0
2	50 soluções	2,315	1,5

5.2.2.5 Hipótese 2.5

A quinta hipótese de cenário de solicitação para o estudo de caso 2 demonstra a capacidade da aplicação computacional posicionar e quantificar as fugas numa RDA quando as condutas onde ocorrem as fugas são aleatórias e cada uma das condutas com fugas pertence a uma malha diferente. Os procedimentos são mantidos iguais aos previamente apresentados. No Quadro 5.8 identificam-se as condutas com fugas e respetivo caudal que pode ser visualizado na Figura 5.17.

Quadro 5.8 Identificação das condutas com fugas e respetivo caudal em cada um dos cenários – Hipótese 2.5.

Conduta	Cenário 1	Cenário 2
	Fugas =15,0 L/s	Fugas =1,5 L/s
10	1,0 L/s	0,1 L/s
30	2,0 L/s	0,2 L/s
55	3,0 L/s	0,3 L/s
75	4,0 L/s	0,4 L/s
95	5,0 L/s	0,5 L/s

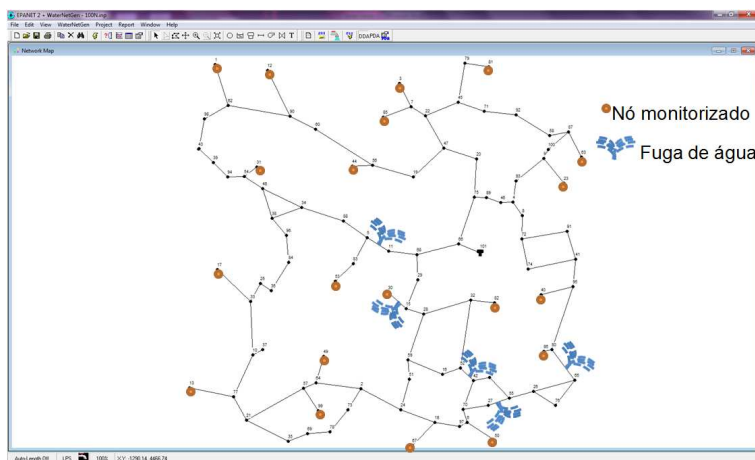


Figura 5.17 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.5.

Após realizar os cinquenta testes com diferentes conjuntos de números aleatórios, obtiveram-se os números de soluções corretas apresentados no Quadro 5.9, que merecem uma reflexão, Figura 5.18.

Quadro 5.9 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.5.

Cenário	Soluções corretas	Consumo da rede (L/s)	Fugas (L/s)
1	29 soluções	2,315	15,0
2	36 soluções	2,315	1,5

Para esta hipótese, o número de soluções corretas diminuiu e obtiveram-se mais soluções corretas com o caudal de fuga mínimo. Uma solução diz-se correta se for verificada uma correta identificação da conduta com fuga e a correta quantificação do seu caudal. Uma vez que existem 5 fugas com posicionamento distinto e com caudais distintos, as soluções consideradas não corretas no Quadro 5.9 são soluções muito semelhantes à solução correta e identificam bem parte da hipótese de fuga.

Numa análise mais detalhada aos resultados constata-se que as fugas nas condutas 10 e 30 são sempre corretamente posicionadas e são-lhes atribuídos os caudais corretos. As restantes três fugas, nas condutas 55, 75 e 95, nem sempre são localizadas na posição correta. Noutros casos, estas mesmas três fugas são localizadas nas condutas corretas com a atribuição de um caudal inferior ao existente. Convém ressaltar que o conjunto das condutas indevidamente identificadas encontra-se numa posição muito próxima da localização das condutas corretas, tal como pode ser visualizado na Figura 5.18.

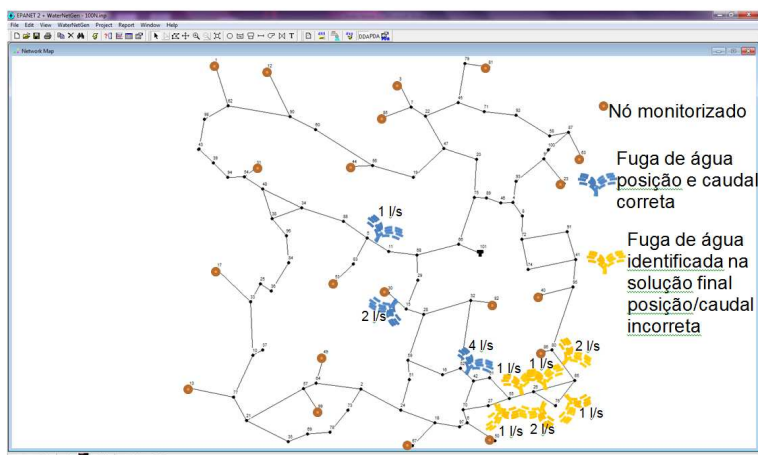


Figura 5.18 Planta da RDA e soluções finais para o posicionamento das fugas na hipótese 2.5 no cenário 2.

Hipótese 2.6

A hipótese 2.6 apresenta um cenário de solicitação no qual as condutas com fugas de água estão na periferia da RDA, Figura 5.19 e Quadro 5.10.

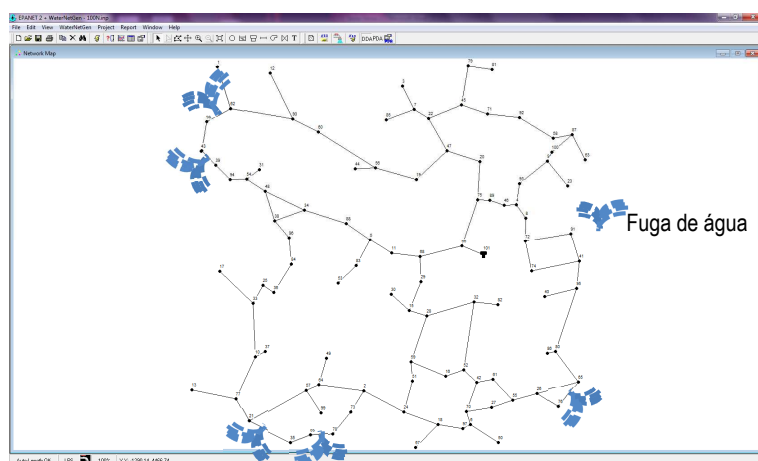


Figura 5.19 Planta da RDA e posicionamento das fugas na hipótese 2.6.

Quadro 5.10 Condutas e respectivos caudais de fuga na hipótese 2.6.

Conduta	Cenário 1	Cenário 2
	Fugas =15,0 L/s	Fugas =1,5 L/s
28	1,0 L/s	0,1 L/s
44	2,0 L/s	0,2 L/s
92	4,0 L/s	0,4 L/s
96	5,0 L/s	0,5 L/s
99	3,0 L/s	0,3 L/s

Após testes com cinquenta conjuntos de números aleatórios obtiveram-se os resultados apresentados no Quadro 5.11.

Quadro 5.11 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.6.

Cenário	Soluções corretas	Consumo da rede (L/s)	Fugas (L/s)
1	50 soluções	2,315	15,0
2	50 soluções	2,315	1,5

Neste cenário, a capacidade de identificação das condutas com fugas é estável, robusta e conduz à correta descrição do problema.

5.2.3 Interpretação dos resultados

A metodologia de suporte à localização aproximada de fugas de água utiliza um simulador hidráulico em regime permanente ou quase permanente, a observação da pressão nos nós, e a observação do caudal fornecido à RDA pelo reservatório e do

caudal consumido. Cada estudo de caso descrito corresponde a uma RDA com as suas características bem definidas. A mesma RDA foi objeto de diferentes hipóteses. O encadeado de hipóteses corresponde a evoluções no modelo de otimização (nomeadamente na função objetivo utilizada e na definição da solução inicial) ou na discretização do caudal total de fuga. Após a obtenção de uma aplicação computacional para a localização aproximada de fugas relativamente estruturada, efetuou-se uma análise alargada de cenários de solicitações com diferentes condutas com fugas e diferentes caudais, de um modo sequencial. Para estas hipóteses de cenários de solicitações os locais de observação do caudal e da pressão foram fixos.

Tal como esperado, os resultados obtidos demonstram que a recolha de observações na RDA, nomeadamente o caudal fornecido, o caudal consumido e a pressão, permite identificar a zona onde a fuga ocorre. Esta aproximação da zona com fuga ficou muitas vezes confinada à conduta onde a fuga existe. Deste modo, esta aproximação pode reduzir consideravelmente o esforço das equipas de localização de fugas tanto na fundamentação para a seleção de uma técnica específica de acordo com as condições da zona, como no esforço envolvido na aplicação da técnica de localização exata, e ainda na duração da atividade envolvida.

Na maioria das diferentes hipóteses constatou-se que solicitações maiores (frequentemente causadas pelo elevado caudal da fuga de água), permitiam uma boa identificação do posicionamento da fuga, por vezes associando à conduta correta e outras estimando adequadamente o caudal previsto para o caudal da fuga real.

Esta constatação tende a manter-se com as mesmas características quando uma rede tem várias fugas com caudais muito diferentes. A aplicação computacional tende a isolar e identificar melhor as fugas com caudais maiores, em detrimento das fugas com caudais menores.

Efetivamente, o escoamento de caudais maiores está associado a maiores perdas de carga devido ao aumento do atrito. Este aumento é de tal modo que amplifica as variações da pressão registada nos transdutores e aumenta a sensibilidade do modelo.

Face a esta realidade, há mais probabilidade de sucesso na aplicação desta metodologia a estudos de caso que envolvam grandes caudais de fugas, não obstante ser francamente benéfica a sua utilização em redes com reduzido caudal.

5.3 Aplicação computacional para a localização dos transdutores de pressão nos nós mais sensíveis

A segunda linha de investigação desenvolvida decorre da necessidade de utilizar um reduzido número de transdutores de pressão e garantir resultados satisfatórios na localização aproximada de fugas de água. Para esta necessidade de reduzir o número de transdutores são inicialmente utilizados os nós mais sensíveis à variação da pressão, posteriormente analisa-se a utilização de algoritmos de pesquisa de informação ao problema e termina-se com a constatação da realidade. *In situ* são poucos os locais que têm espaço e condições técnicas para a colocação dos transdutores e ainda são menos os locais que permitem a permanência dos equipamentos durante algumas horas, sem o risco de roubo ou de atos de vandalismo.

5.3.1.1 Hipótese 2.7

Numa rede fictícia é possível a utilização de um qualquer número de equipamentos para monitorização da pressão. No estudo de caso 2 utilizaram-se vinte transdutores de pressão desde a hipótese 2.1 até à hipótese 2.6. Numa rede real a utilização de tantos transdutores é muito difícil e extremamente onerosa. A hipótese 2.7 procura avaliar em que medida, com a monitorização de 10% das cotas piezométricas da RDA –uso de dez transdutores de pressão– é reduzida a capacidade para a localização aproximada de fugas com a aplicação computacional proposta.

Na validação dos resultados obtidos com modelos de simulação do comportamento hidráulico da RDA tem sido recomendada a recolha de dados nos nós mais sensíveis à variação de pressão. Assim, numa primeira tentativa de reduzir o número de transdutores de pressão, optou-se por posicioná-los nos nós que sofriam maior variação de cota piezométrica entre o cenário de consumo mínimo e o cenário de consumo máximo, sendo o consumo máximo 10 vezes maior do que o valor do consumo mínimo, 23,148 L/s e 2,315 L/s, respetivamente. Os transdutores de pressão ainda necessitavam de estar afastados entre si no mínimo três condutas. A proposta final para a rede de

monitorização da RDA com dez transdutores de pressão pode ser visualizada na Figura 5.20.

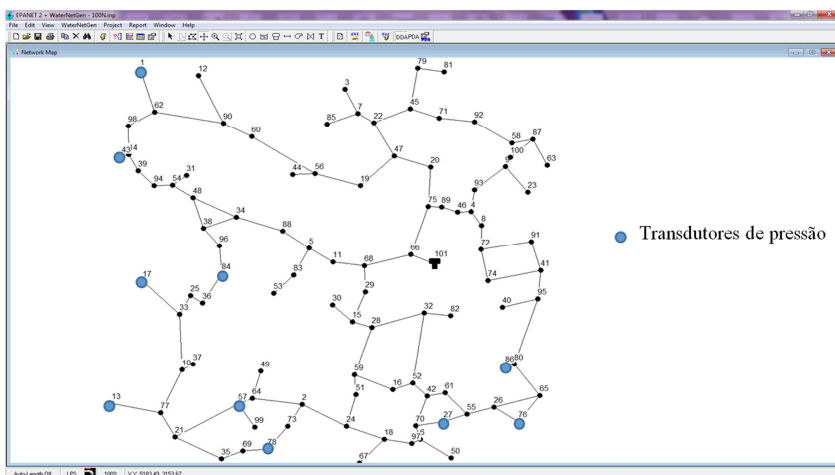


Figura 5.20 Rede de monitorização das hipóteses 2.7, 2.8 e 2.9.

Neste estudo de caso (Ribeiro *et al.* 2012d; Ribeiro *et al.* 2013) será utilizada exclusivamente a pressão medida nos transdutores num cenário construído com o consumo mínimo de 2,315 L/s. A localização das condutas com fugas corresponde às descritas para as hipóteses 2.2 a 2.6 e podem ser visualizadas na Figura 5.21. Como é expectável, a redução de informação recolhida na rede, decorrente da redução do número de transdutores de pressão instalados, conduz a resultados menos fiáveis. Mesmo assim, as condutas problemáticas são devidamente identificadas.

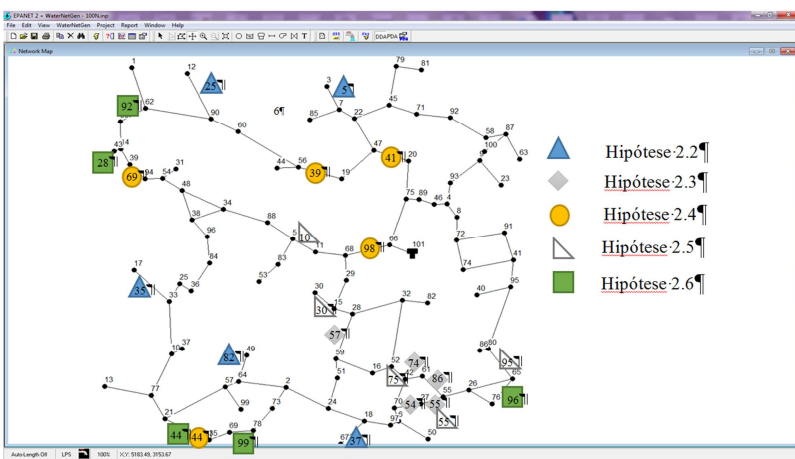


Figura 5.21 Síntese das condutas com fugas nas hipóteses entre 2.2 a 2.6.

Os cenários de fugas nos diferentes estudos de caso mantêm a dualidade de fugas totais de 15 L/s no cenário 1 e 1,5 L/s no cenário 2. Como as soluções finais obtidas são de qualidade inferior, convém averiguar o número de vezes que as condutas com fugas de

cada hipótese fazem parte da solução final, independentemente do caudal atribuído à mesma.

Após a análise dos resultados, ver Quadro 5.12, verifica-se que no cenário 1 as soluções finais apresentadas pela aplicação computacional representam melhor a realidade do que as soluções finais apresentadas para o cenário 2. Esta melhoria na qualidade das soluções finais pode ser a consequência do maior caudal de fuga, que supera largamente o consumo da rede, ao contrário do que sucede no cenário 2.

No Quadro 5.12, na primeira linha apresentam-se as hipóteses analisadas desde a hipótese 2.2 até à 2.6. Cada hipótese encontra-se dividida em duas colunas, uma referente ao cenário 1, com um caudal total de fuga de 15,0 L/s, e outra referente ao cenário 2, com um caudal total de fuga de 1,5 L/s. Para cada hipótese e cenário são apresentados os resultados obtidos para cada uma das condutas com fugas, sendo apresentado o número de identificação de cada conduta com fuga e na linha imediatamente a seguir e dentro de parêntesis o número de vezes que ela foi identificada como uma conduta com fuga em cinquenta avaliações.

Quadro 5.12 Resultados de cinquenta testes com diferentes números aleatórios – Hipótese 2.7 (Cen. 1 representa o cenário 1; Cen. 2 representa o cenário 2).

Hipótese 2.2		Hipótese 2.3		Hipótese 2.4		Hipótese 2.5		Hipótese 2.6	
Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s
5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
(32/50)	(6/50)	(17/50)	(15/50)	(45/50)	(0/50)	(18/50)	(13/50)	(50/50)	(50/50)
25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
(39/50)	(29/50)	(17/50)	(19/50)	(45/50)	(42/50)	(5/50)	(8/50)	(50/50)	(50/50)
35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
(50/50)	(50/50)	(14/50)	(6/50)	(50/50)	(50/50)	(24/50)	(21/50)	(50/50)	(50/50)
37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
(50/50)	(0/50)	(13/50)	(19/50)	(45/50)	(43/50)	(18/50)	(18/50)	(50/50)	(50/50)
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99
(50/50)	(50/50)	(26/50)	(33/50)	(50/50)	(46/50)	(39/50)	(45/50)	(50/50)	(50/50)

5.3.1.2 Hipótese 2.8

Como está documentado na literatura, os testes com caudais de incêndio podem ser muito úteis para a correta calibração da RDA através da monitorização da pressão e do caudal (Ormsbee e Lingireddy 2000). O aumento das solicitações conseguido através da ativação do caudal de incêndio causa o aumento da velocidade do escoamento nas condutas adjacentes ao marco ativado, bem como amplifica a variação da pressão nos nós, isto é, um aumento de sensibilidade na pressão nodal (Kang e Lansey 2010; Kang e Lansey 2011).

Acompanhando esta constatação, nesta oitava hipótese sobre o estudo de caso 2, procura-se averiguar o impacto que poderá ser obtido com o aumento de solicitação na RDA com a abertura isolada de marcos de incêndio durante um cenário com consumo reduzido (Ribeiro *et al.* 2012d; Ribeiro *et al.* 2013). Os marcos são ativados individualmente (Figura 5.22) e com as novas observações a aplicação computacional procura o posicionamento das condutas com fugas na rede.

Os resultados obtidos a partir da aplicação computacional para estas hipóteses de cenários de solicitações são mais assertivos e com maior fiabilidade do que os resultados apresentados na hipótese 2.7. Esta constatação confirma a utilidade da execução de testes com caudais de incêndio visando a localização de fugas.

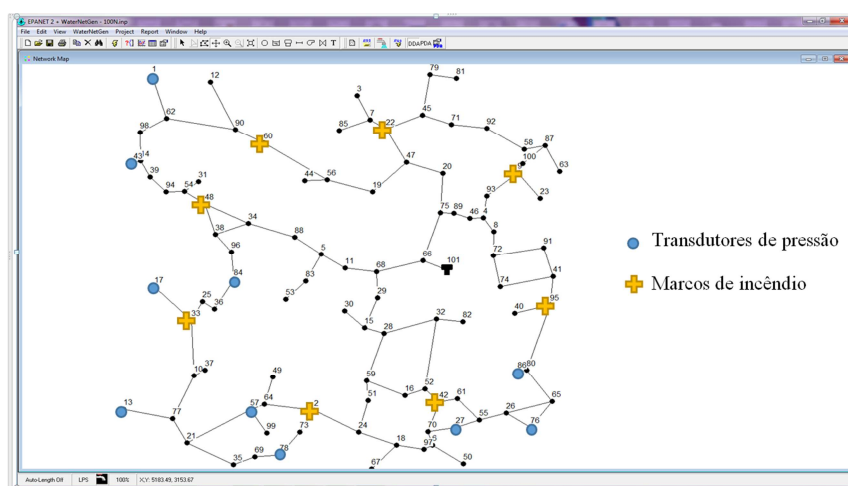


Figura 5.22 Localização dos marcos de incêndio ativados e localização dos transdutores de pressão.

No Quadro 5.13, na primeira coluna é apresentado o nó onde o caudal de incêndio é retirado. Para cada um das hipóteses, desde 2.2 até à 2.6, são apresentados os resultados obtidos para cada uma das condutas com fugas, com cada hipótese isolada numa coluna

e podendo apresentar um caudal total de fuga desde 1,5 L/s até 15 L/s. Cada conduta com fuga é identificada e na linha imediatamente inferior apresenta-se o número de vezes que ela fez parte da solução final nas cinquenta avaliações efetuadas.

Os resultados obtidos corroboram as expectativas. A execução de testes de incêndio durante o período de consumo mínimo agiliza a aplicação computacional no posicionamento adequado das fugas de água.

Quadro 5.13 Localização aproximada de fugas com a execução de testes de incêndio com 15 L/s, para dois cenários (Cen.1 – cenário 1 com fuga de 15 L/s e Cen. 2 – cenário 2 com fuga de 1,5 L/s). Resultados obtidos com cinquenta testes com diferentes conjuntos de números aleatórios – Hipótese 2.8.

Nó teste	Hipótese 2.2		Hipótese 2.3		Hipótese 2.4		Hipótese 2.5		Hipótese 2.6	
	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15L/s	Cen. 2 1,5 L/s
2	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(47/50)	(50/50)	(12/50)	(20/50)	(50/50)	(3/50)	(39/50)	(15/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(47/50)	(50/50)	(26/50)	(32/50)	(50/50)	(0/50)	(23/50)	(1/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(8/50)	(18/50)	(50/50)	(50/50)	(43/50)	(28/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(49/50)	(50/50)	(32/50)	(36/50)	(50/50)	(44/50)	(30/50)	(30/50)	(50/50)	(50/50)
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99	
	(50/50)	(50/50)	(48/50)	(28/50)	(50/50)	(3/50)	(46/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)
9	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(35/50)	(2/50)	(17/50)	(18/50)	(50/50)	(0/50)	(35/50)	(12/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(41/50)	(17/50)	(22/50)	(15/50)	(50/50)	(1/50)	(18/50)	(10/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(2/50)	(19/50)	(50/50)	(50/50)	(35/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(50/50)	(46/50)	(17/50)	(21/50)	(46/50)	(41/50)	(20/50)	(12/50)	(50/50)	(50/50)
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99	
	(50/50)	(50/50)	(15/50)	(33/50)	(50/50)	(10/50)	(46/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)

Nó teste	Hipótese 2.2		Hipótese 2.3		Hipótese 2.4		Hipótese 2.5		Hipótese 2.6	
	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15L/s	Cen. 2 1,5 L/s
22	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(28/50)	(3/50)	(9/50)	(14/50)	(37/50)	(28/50)	(39/50)	(13/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(27/50)	(10/50)	(24/50)	(8/50)	(36/50)	(28/50)	(16/50)	(7/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(5/50)	(12/50)	(50/50)	(50/50)	(27/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(50/50)	(10/50)	(5/50)	(28/50)	(39/50)	(29/50)	(21/50)	(0/50)	(50/50)	(50/50)
42	82	82	86	86	98	98	95	95	99	99
	(50/50)	(50/50)	(27/50)	(31/50)	(48/50)	(15/50)	(47/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)
	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(28/50)	(0/50)	(19/50)	(2/50)	(50/50)	(0/50)	(45/50)	(34/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(35/50)	(22/50)	(18/50)	(10/50)	(50/50)	(28/50)	(9/50)	(12/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(25/50)	(25/50)	(50/50)	(50/50)	(16/50)	(21/50)	(50/50)	(50/50)
48	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(37/50)	(13/50)	(17/50)	(26/50)	(47/50)	(45/50)	(10/50)	(11/50)	(50/50)	(50/50)
	82	82	86	86	98	98	95	95	99	99
	(50/50)	(47/50)	(29/50)	(47/50)	(50/50)	(50/50)	(48/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)
	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(44/50)	(22/50)	(23/50)	(13/50)	(46/50)	(49/50)	(26/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(45/50)	(24/50)	(17/50)	(13/50)	(46/50)	(49/50)	(14/50)	(0/50)	(50/50)	(50/50)
48	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(9/50)	(17/50)	(50/50)	(50/50)	(31/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(50/50)	(50/50)	(21/50)	(27/50)	(45/50)	(49/50)	(19/50)	(0/50)	(50/50)	(50/50)
	82	82	86	86	98	98	95	95	99	99
	(50/50)	(50/50)	(25/50)	(33/50)	(50/50)	(49/50)	(44/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)

Continuação Quadro 5.13

Nó teste	Hipótese 2.2		Hipótese 2.3		Hipótese 2.4		Hipótese 2.5		Hipótese 2.6	
	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15L/s	Cen. 2 1,5 L/s
60	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(19/50)	(19/50)	(12/50)	(20/50)	(15/50)	(25/50)	(30/50)	(40/50)	(49/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(24/50)	(29/50)	(23/50)	(12/50)	(43/50)	(22/50)	(13/50)	(33/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(12/50)	(7/50)	(50/50)	(50/50)	(33/50)	(38/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(48/50)	(44/50)	(16/50)	(30/50)	(19/50)	(34/50)	(18/50)	(32/50)	(50/50)	(50/50)
95	82	82	86	86	98	98	95	95	99	99
	(50/50)	(50/50)	(27/50)	(25/50)	(50/50)	(45/50)	(45/50)	(41/50)	(50/50)	(50/50)
	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(39/50)	(11/50)	(13/50)	(6/50)	(50/50)	(16/50)	(38/50)	(39/50)	(49/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(34/50)	(30/50)	(15/50)	(23/50)	(50/50)	(16/50)	(25/50)	(0/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(5/50)	(37/50)	(50/50)	(49/50)	(43/50)	(48/50)	(50/50)	(50/50)
37	37	74	74	69	69	75	75	96	96	
(47/50)	(32/50)	(25/50)	(11/50)	(48/50)	(18/50)	(29/50)	(40/50)	(50/50)	(50/50)	
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99	
(50/50)	(35/50)	(13/50)	(47/50)	(50/50)	(49/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)	(50/50)	

Fim da continuação Quadro 5.13.

Outra conclusão deste caso de estudo é a tendência para existirem benefícios na execução de testes de incêndio nas imediações das zonas com condutas com fugas de água, sendo estas sempre desconhecidas.

A realização dos testes de incêndio causa um aumento de solicitações no local da sua execução. Caso nas imediações existam fugas, o aumento de escoamento de caudal para a zona causa o aumento da velocidade no interior destas condutas e o aumento das perdas de carga associadas ao escoamento. O incremento das perdas de carga nas condutas amplifica a variação da pressão nos nós, obtendo-se no caso de existência de fugas de água valores de pressão inferiores aos esperados. Estas observações fornecem

informação relevante à aplicação computacional para a melhoria da localização aproximada das fugas na RDA.

5.3.1.3 Hipótese 2.9

As EG têm implementadas rotinas de manutenção e limpeza da RDA para garantir um serviço de boa qualidade. Estas rotinas envolvem caudais mais elevados que os consumos usuais e inferiores aos caudais de combate a incêndio, pelo que a sua execução é tecnicamente viável em qualquer cenário de consumo e em todos os pontos da rede. A execução destas tarefas não costuma afetar os utilizadores nem comprometer o regular funcionamento da rede.

Nesta nona hipótese sobre o estudo de caso 2 avaliou-se as potenciais mais-valias provenientes da execução e monitorização da pressão durante estas rotinas de limpeza num nó em particular (Ribeiro *et al.* 2012d; Ribeiro *et al.* 2013). O nó selecionado é a extremidade de uma conduta ramificada com o diâmetro interior de 81 mm (Figura 5.23). As condutas com fugas (posições e caudais) são as descritas para as hipóteses 2.2 a 2.6.

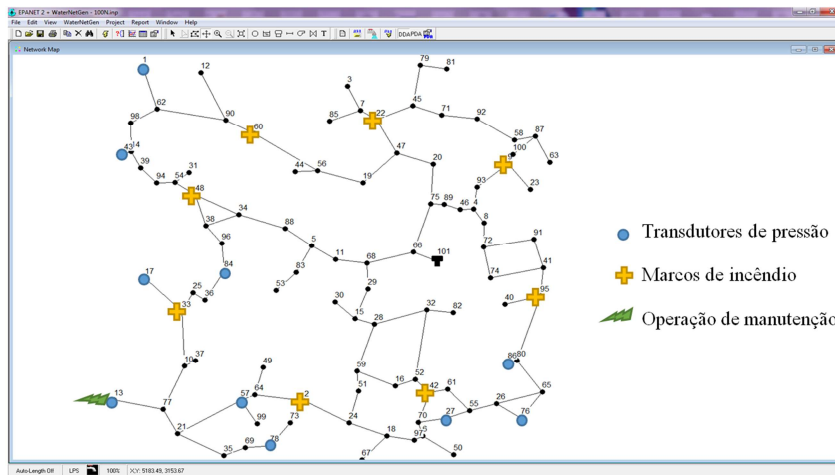


Figura 5.23 RDA com a identificação da localização dos transdutores de pressão e da localização da operação de manutenção.

Os resultados estão apresentados no Quadro 5.14, onde para cada cenário de solicitação é listado o número de ordem da conduta envolvida seguido, na linha de baixo e dentro de parêntesis, do número de vezes que a mencionada conduta faz parte da solução final nos cinquenta testes com conjuntos de números aleatórios diferentes.

Os resultados obtidos indiciam que a monitorização destas operações de manutenção tem potencial para ajudar na localização aproximada de fugas nas RDA. Contudo, esta identificação fica aquém da que é possível com os caudais de incêndio, como ficou demonstrado na hipótese 2.8. A avaliação dos efeitos das operações de manutenção noutros nós da rede poderia elucidar as vantagens desta hipótese.

Quadro 5. 14 Resultados obtidos na hipótese 2.9 (Cen.1 – cenário 1 com fuga de 15 L/s e Cen. 2 – cenário 2 com fuga de 1,5 L/s). Resultados obtidos com cinquenta testes com diferentes conjuntos de números aleatórios.

Nó teste 13	Hipótese 2.2		Hipótese 2.3		Hipótese 2.4		Hipótese 2.5		Hipótese 2.6	
	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s	Cen. 1 15 L/s	Cen. 2 1,5 L/s
5 L/s	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(42/50)	(46/50)	(24/50)	(17/50)	(50/50)	(49/50)	(14/50)	(19/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(48/50)	(47/50)	(11/50)	(29/50)	(49/50)	(47/50)	(9/50)	(20/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(5/50)	(9/50)	(50/50)	(50/50)	(17/50)	(30/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(50/50)	(50/50)	(23/50)	(30/50)	(49/50)	(47/50)	(11/50)	(27/50)	(50/50)	(50/50)
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99	
(50/50)	(50/50)	(28/50)	(33/50)	(50/50)	(49/50)	(40/50)	(46/50)	(50/50)	(50/50)	
7,5 L/s	5	5	54	54	39	39	10	10	28	28
	(41/50)	(44/50)	(8/50)	(10/50)	(50/50)	(17/50)	(32/50)	(28/50)	(50/50)	(50/50)
	25	25	55	55	41	41	30	30	44	44
	(40/50)	(46/50)	(27/50)	(25/50)	(50/50)	(23/50)	(14/50)	(15/50)	(50/50)	(50/50)
	35	35	57	57	44	44	55	55	92	92
	(50/50)	(50/50)	(8/50)	(9/50)	(50/50)	(50/50)	(29/50)	(29/50)	(50/50)	(50/50)
	37	37	74	74	69	69	75	75	96	96
	(50/50)	(45/50)	(10/50)	(39/50)	(50/50)	(6/50)	(16/50)	(20/50)	(50/50)	(50/50)
82	82	86	86	98	98	95	95	99	99	
(50/50)	(50/50)	(38/50)	(29/50)	(50/50)	(45/50)	(44/50)	(49/50)	(50/50)	(50/50)	

5.4 Aplicação computacional para a localização dos transdutores de pressão com o algoritmo *TrustRank*

5.4.1 Hipótese 2.10

A utilização do algoritmo *TrustRank* para o posicionamento dos transdutores de pressão na RDA (Ribeiro *et al.* 2015) será testada nesta décima hipótese. Com esta nova disposição espacial de transdutores a aplicação computacional comprova a sua capacidade de ajudar na localização aproximada de fugas.

Nesta hipótese é aumentado o número de cenários de solicitações de fugas avaliadas. A análise continua a identificar um consumo de 2,315 L/s e continuam a ser avaliados os cenários 1 e 2, com caudal de fuga de 15,0 L/s e 1,5 L/s, respetivamente. No Quadro 5.15 apresenta-se a síntese de cada uma das dez situações analisadas no cenário 2. Cada situação de fuga é descrita numa coluna que começa por identificar o número da conduta onde a fuga ocorre seguido pelo caudal de fuga existente na mesma. Nas condutas discriminadas no Quadro 5.15, o cenário 1 é elaborado com um caudal de fuga dez vezes maior do que o caudal de fuga do cenário 2.

Quadro 5. 15 Síntese das dez situações de solicitação analisadas, na coluna identificam-se as condutas pelo número e o respetivo caudal – Hipótese 2.10.

Situação — Conduta/Caudal da fuga no cenário 2 (L/s)									
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5/0,5	54/0,1	39/0,1	10/0,1	28/0,1	3/0,5	4/0,1	22/0,1	32/0,1	6/0,5
25/0,3	55/0,2	41/0,2	30/0,2	44/0,2	66/0,3	17/0,2	62/0,2	34/0,2	10/0,2
35/0,4	57/0,5	44/0,4	55/0,3	92/0,4	71/0,4	43/0,5	72/0,4	61/0,3	63/0,1
37/0,2	74/0,3	69/0,5	75/0,4	96/0,5	85/0,2	87/0,3	107/0,5	64/0,5	87/0,4
82/0,1	86/0,4	98/0,3	95/0,5	99/0,3	91/0,1	111/0,4	108/0,3	68/0,4	98/0,3

Da aplicação do algoritmo *TrustRank* às RDA obtém-se uma hierarquização dos nós pertencentes à rede. Começou-se por averiguar a qualidade das soluções obtidas quando 10% dos nós da rede eram monitorizados e adicionou-se pares de transdutores até 20 % dos nós da rede serem monitorizados. Os transdutores são colocados progressivamente,

começando inicialmente com dez e aumentando progressivamente com um par de transdutores até perfazer os vinte, Quadro 5.16 e Figura 5.24.

Quadro 5. 16 Nós selecionados para a localização dos transdutores de pressão.

Transdutores	Nós (localização)
Primeiros 10	13, 17, 37, 49, 50, 63, 67, 85, 86, 99
11° e 12°	12, 81
13° e 14°	31, 82
15° e 16°	1, 3
17° e 18°	23, 40
19° e 20°	44, 53

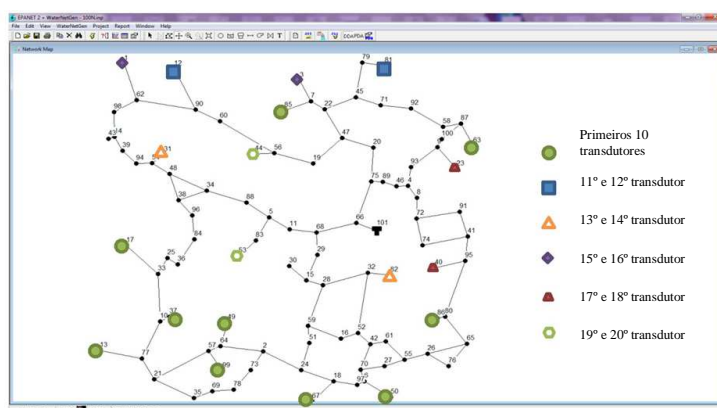


Figura 5. 24 Distribuição espacial dos transdutores de pressão obtida com a aplicação do algoritmo *TrustRank*.

No Quadro 5.17 são apresentados os números de condutas que são consideradas com elevada probabilidade de terem fugas de água (condutas fiáveis), pois surgem mais vezes na solução final (mais do que 9 vezes nas 50 avaliações com diferentes conjuntos de números aleatórios). Para cada situação de solicitação, identificada em cada linha, obtêm-se resultados diferentes, conforme o número de transdutores de pressão e o cenário considerado - fugas totais de 15 L/s ou 1,5 L/s.

O Quadro 5.18 identifica, para cada uma das situações identificadas em cada linha, em função do número de transdutores de pressão instalados na rede (identificado em cada coluna) e também para os dois cenários, o número total de condutas que fizeram parte da solução final.

O número total de condutas identificadas na solução final tende a diminuir com o aumento do número de transdutores instalados. Na larga maioria das situações, com um

caudal de fugas superior (15,0 L/s) o número total de condutas é menor do que as correspondentes condutas identificadas na situação de menor caudal de fuga (1,5 L/s).

Quadro 5. 17 Número de condutas fiáveis identificadas na solução - Hipótese 2.10 (cenário 1/cenário 2).

Situação	Número de transdutores de pressão					
	10	12	14	16	18	20
1	5/7	5/7	5/7	5/5	5/5	5/5
2	5/14	5/14	5/6	5/6	5/7	5/10
3	6/18	6/10	5/12	5/12	5/8	5/8
4	14/16	16/13	9/11	9/12	9/12	9/17
5	5/11	5/9	5/8	5/7	5/7	5/7
6	7/19	6/14	12/15	5/12	5/5	5/5
7	5/17	5/9	5/8	5/7	5/8	5/8
8	5/16	5/14	5/13	5/9	5/6	5/6
9	12/13	11/17	7/16	7/15	7/16	7/10
10	11/19	5/12	5/11	5/9	5/12	5/10

Quadro 5. 18 Número total de condutas identificadas numa solução – Hipótese 2.10 (cenário 1/cenário 2).

Situação	Número de transdutores de pressão					
	10	12	14	16	18	20
1	5/7	5/7	5/7	5/5	5/5	5/5
2	19/24	17/26	9/24	9/18	5/20	11/22
3	24/36	27/31	5/16	5/12	5/10	5/8
4	25/31	25/28	14/18	11/20	17/22	14/23
5	5/34	5/14	5/8	5/12	5/11	5/11
6	45/68	28/47	30/50	25/32	7/18	5/5
7	34/49	6/21	6/8	5/7	5/11	5/12
8	5/32	5/27	5/20	5/20	5/6	5/6
9	34/42	35/45	13/33	16/26	9/25	7/19
10	54/63	38/46	30/21	22/24	5/20	5/14

Em todas as situações, e independentemente do número de transdutores de pressão considerado, o caudal da fuga é atribuído corretamente à conduta com fuga de água ou a uma conduta adjacente. Quando o número de transdutores é menor há uma tendência

para espalhar a fuga na conduta correta e nas suas condutas adjacentes, ao que corresponde uma identificação mais difusa das condutas problemáticas. Esta característica de identificação difusa é agravada no cenário identificado com menor caudal total de fuga.

5.4.1 Hipótese 2.11

Com a rede de transdutores de pressão selecionada com o algoritmo *TrustRank*, procedeu-se ainda à averiguação da importância da extensão da rede no processo de identificação das condutas com fugas de água (Ribeiro *et al.* 2015). Neste estudo de caso admitiu-se que cada conduta tinha metade da extensão identificada no Quadro A.4.

Relativamente ao observado na hipótese 2.10, a redução para metade da extensão das condutas reduz para metade a perturbação na pressão provocada pela presença das fugas de água.

Tal como na hipótese 2.10, apresenta-se no Quadro 5.19 o número de condutas que foram identificadas com frequência elevada como tendo fugas de água (mais de nove vezes nas cinquenta avaliações efetuadas com diferentes números aleatórios).

Quadro 5. 19 Número de condutas fiáveis identificadas na solução – Hipótese 2.11 (cenário 1/cenário 2).

Situação	Número de transdutores de pressão					
	10	12	14	16	18	20
1	5/8	5/7	5/5	5/5	5/5	5/5
2	5/21	5/18	5/16	5/17	5/19	5/18
3	6/17	5/15	5/17	5/11	5/11	5/11
4	15/11	13/17	9/13	9/15	9/16	9/14
5	10/15	6/18	5/15	5/14	5/14	5/13
6	9/16	5/20	7/17	13/23	5/18	5/18
7	5/21	5/18	5/18	5/17	5/11	5/8
8	5/18	5/14	5/13	5/13	5/10	5/8
9	11/19	11/17	6/12	7/14	7/13	6/12
10	12/18	5/23	5/19	5/22	5/12	5/12

No Quadro 5.20 apresenta-se o número total de condutas que fizeram parte das soluções finais. Da análise dos resultados verifica-se que a identificação das condutas com fugas

de água mantém a capacidade de circunscrever as mesmas às condutas realmente com fugas de água. Contudo, observa-se um comportamento mais difuso na identificação quando o caudal total de fuga é mais reduzido e o número de transdutores de pressão também é menor.

Quadro 5. 20 Número total de condutas identificadas numa solução – Hipótese 2.11 (cenário 1/cenário 2).

Situação	Número de transdutores de pressão					
	10	12	14	16	18	20
1	5/14	5/7	5/5	5/5	5/5	5/5
2	8/38	21/38	5/23	5/26	5/26	9/24
3	26/38	29/36	5/28	5/18	5/14	5/14
4	31/31	30/29	17/28	11/20	17/22	18/22
5	10/38	6/24	5/25	5/14	5/15	5/13
6	39/84	41/70	32/66	32/60	5/36	5/32
7	30/40	8/28	6/23	7/24	5/17	5/8
8	18/38	5/22	5/19	5/26	5/14	5/8
9	41/42	26/43	13/31	13/35	13/37	9/30
10	59/64	45/49	20/42	24/37	13/22	5/18

5.5 Aplicação da aplicação computacional a uma RDA com uma rede de monitorização definida com a teoria dos grafos

5.5.1 Estudo de caso 3

A RDA do terceiro estudo de caso foi gerada com o *software* WaternetGen (Muranho 2012; Muranho *et al.* 2012). A rede de distribuição é fictícia, tem 100 nós, 1 reservatório, 129 troços e 29 malhas. Os Quadros A.5 e A.6, nos Anexos apresentam a caracterização da RDA. A cota da superfície livre do único reservatório abastecedor é conhecida, a rede tem uma extensão total de 108 km e abastece 4,63 L/s (Sousa *et al.* 2015). A RDA encontra-se representada na Figura 5.25 e a respetiva rede de monitorização, constituída por 10 transdutores de pressão, consta do Quadro 5.21.

Quadro 5.21 Nós selecionados para a colocação dos transdutores de pressão.

Número de transdutores de pressão	Nós selecionados
10	13, 21, 31, 35, 37, 39, 71, 75, 80, 96

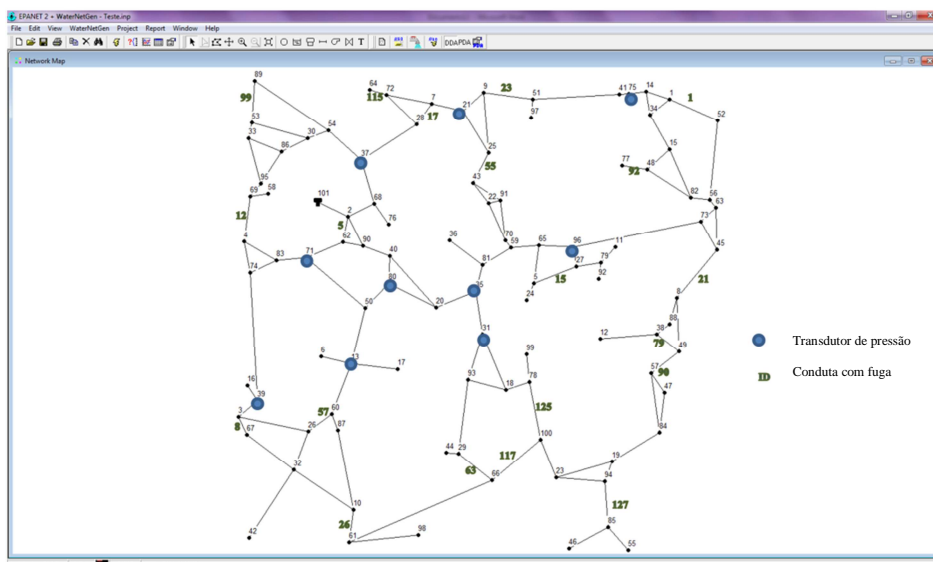


Figura 5.25 Rede de distribuição de água do Estudo de caso 3 e respetiva rede de monitorização.

5.5.1.1 Hipótese 3.1

A hipótese em análise testa a capacidade da aplicação computacional para quantificar e localizar fugas de água quando é sabido o caudal de fuga e assume-se que o caudal total da fuga não necessita de ser dividido em frações. Para esta hipótese foram utilizados 20 cenários isolados de fugas de água, Quadro 5.22, que com o consumo da rede definiram vinte cenários de solicitações. Os caudais das fugas de água variam entre 0,25 L/s; 0,5 L/s; 1,0 L/s e 1,5 L/s.

Na primeira coluna do Quadro 5.22 é apresentada a conduta com fuga. O caudal desta fuga pode ter 4 valores diferentes, entre 0,25 L/s e 1,5 L/s. A interseção de cada linha com cada coluna representa o número de vezes que a conduta na primeira coluna da linha foi identificada como uma conduta com fuga nas cinquenta avaliações. O símbolo * representa que a conduta identificada com fuga é adjacente à conduta que tem realmente a fuga. O símbolo ** representa que a conduta identificada com fuga está afastada uma conduta da conduta que realmente tem a fuga de água, ou seja, uma conduta ao lado. Com exceção dos resultados obtidos com a conduta 127, a

identificação de condutas na vizinhança da conduta com fuga tende a ocorrer quando o caudal é mais reduzido.

Quadro 5. 22 Resultados obtidos para diferentes caudais de fuga em 20 condutas – Hipótese 3.1.

Conduta com fuga	Caudal da fuga (L/s)			
	0,25	0,5	1,0	1,5
1	50	50	50	50
5	50	50	50	50
8	50	50	50	50
12	50	50	50	50
15	50	50	50	50
17	50	50	50	50
21	50	50	50	50
23	50	50	50	50
26	50	50	50	50
55	50	50	50	50
57	50	50	50	50
63	50	50	50	50
79	50	50	50	50
90	50	50	50	50
92	**	50	50	50
99	**	*	50	50
115	50	50	50	50
117	50	50	50	50
125	50	50	50	50
127	*	*	*	*

5.5.1.2 Hipótese 3.2

A aplicação da metodologia desenvolvida para a localização aproximada de fugas de água foi aplicada à hipótese de a rede ter duas fugas com localizações distintas. Neste sentido, as duas condutas com fugas estão apresentadas no Quadro 5.23 nas duas primeiras colunas. Os testes realizados utilizaram vinte conjuntos de números aleatórios. No Quadro 5.23, desde a terceira à sexta coluna, estão apresentados os resultados finais obtidos. Na terceira coluna apresenta-se o número de vezes que a

primeira conduta com fuga foi identificada na solução final. Na quarta coluna apresenta-se o número de vezes que a segunda conduta com fuga foi identificada na solução final. Quando os resultados da terceira ou quarta coluna são inferiores a vinte, outras condutas são apresentadas na solução final. Na quinta e sexta colunas do quadro estão discriminados os números de vezes que outras condutas adjacentes ou ao lado foram identificadas na solução final e dentro de parêntesis o número de condutas identificadas com falsas fugas.

Quadro 5.23 Número de soluções que identificaram a conduta com fuga, uma conduta adjacente ou uma conduta ao lado – Hipótese 3.2 (os parêntesis representam o número de falsas condutas com fugas identificadas na solução final).

1ª conduta com fuga	2ª conduta com fuga	Número de condutas identificadas			
		1ª conduta	2ª conduta	Conduta adjacente*	1 conduta ao lado*
5	15	20	15	6 (2 condutas)	4 (2 condutas)
8	57	20	20	0	0
8	92	20	20	0	0
17	23	20	20	0	0
17	115	18	18	14 (2 condutas)	0
55	57	20	20	0	0
63	117	20	20	0	0
63	125	18	18	6 (3 condutas)	0
79	90	0	20	40 (2 condutas)	0
115	127	20	17	9 (2 condutas)	0
117	125	20	20	0	0

Como é visível, a metodologia identifica um conjunto reduzido de condutas como potenciais condutas com fugas de água. Num universo potencial de 129 condutas candidatas a terem fugas, o resultado da metodologia identifica na pior combinação 6 condutas com potencialidade para terem fugas, em que estas condutas são ou adjacentes ou com uma conduta de intervalo. Na melhor combinação as duas condutas com fugas são devidamente identificadas.

5.6 Interpretação de resultados para a seleção da rede de monitorização

Em função da complexidade e topologia de cada RDA, a seleção de uma rede de monitorização robusta e eficaz pode ser muito difícil. A robustez e versatilidade da primeira aplicação computacional foram testadas com diferentes redes de monitorização. Os diferentes estudos de caso apresentados e discutidos apresentam resultados bastante satisfatórios. As soluções produzidas nem sempre correspondem à solução ótima global do problema, mas todas as soluções finais apresentadas partilham características com a solução ótima global. Efetivamente, estas características permitem identificar a zona com maior potencialidade de ter fugas de água.

Retomando os objetivos da aplicação computacional, pretendia-se uma localização aproximada, de forma a que a utilização das técnicas de localização exata seja facilitada e que as equipas de deteção sejam enviadas para as zonas onde será mais provável a obtenção de resultados positivos.

Além disto, também ficou demonstrado que a definição da rede de monitorização influencia os resultados obtidos com a aplicação computacional. Neste sentido, o aumento de pontos com observações pode ser muito importante e garantir melhorias consideráveis à solução final apresentada. Este facto está bem patente em todas as hipóteses que avaliam redes de monitorização progressivamente crescentes de modo quase que autónomo do caudal de fuga envolvido.

Em todas as redes de monitorização definidas, de modo quase independente do número de transdutores utilizados, foi possível uma localização mais rigorosa sempre que o caudal da fuga era maior.

5.7 Aplicação a um caso real

A aplicação computacional integrando a metodologia desenvolvida foi testada numa situação real. Neste sentido será apresentada a última RDA real para a análise do potencial da metodologia.

5.7.1 Estudo de caso 4

A rede utilizada situa-se no concelho de Penacova e é abastecida graviticamente a partir de um único reservatório, no qual se monitoriza o nível da superfície livre e o caudal fornecido à rede. Nesta rede são poucos os locais com espaço físico adequado para a montagem de transdutores de pressão em segurança. Nos locais disponíveis foram montados os três transdutores de pressão que recolheram a informação necessária ao estudo apresentado.

A definição da RDA encontra-se nos Anexos (Quadros A.7 e A.8). Esta rede tem um historial de problemas de falta de pressão durante o Verão devido ao aumento sazonal da população. Na noite anterior ao estudo, o CMN foi praticamente nulo, o que indicia que a RDA não tinha fugas.

Na manhã seguinte, um dia útil da semana, quando as solicitações da RDA eram inferiores a 1,0 L/s, procedeu-se à abertura individual e sequencial de três bocas de incêndio (BI), durante cerca de 5 minutos cada. O contador à saída do reservatório registou o incremento das solicitações na RDA, armazenando-as num *data logger*. O cliente com consumo mais relevante no aglomerado, localizado no nó 13, encontrava-se em monitorização contínua, desde o dia anterior, com um contador dedicado que procedeu ao registo dos respetivos consumos e armazenamento num *data logger*, Figura 5.26. Nos transdutores de pressão localizados nos nós 13, 34 e 36 monitorizou-se a pressão, Figura 5.27.

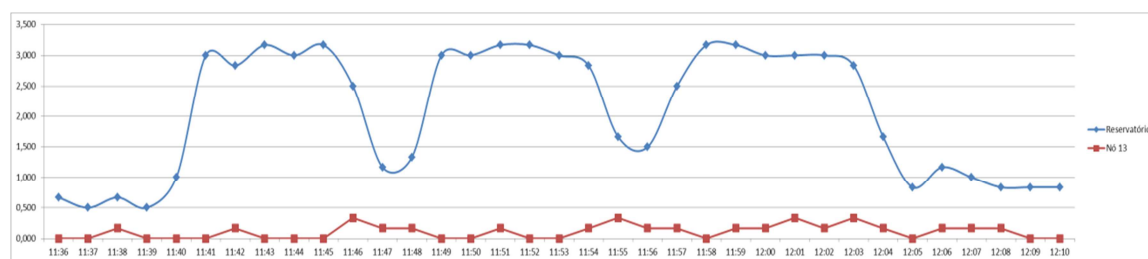


Figura 5.26 Evolução do caudal no aglomerado e no principal consumidor para o estudo de caso 4.

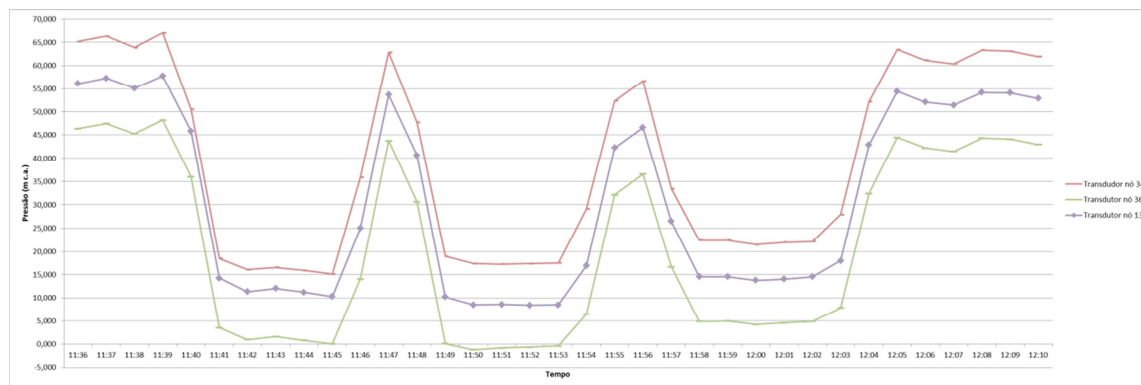


Figura 5.27 Evolução da pressão nos transdutores de pressão para o estudo de caso 4.

Este estudo de caso foi decomposto em três cenários de solicitações independentes, que serão analisados individualmente para confirmar o desempenho da aplicação computacional. Convém realçar que esta RDA foi sujeita a uma calibração genérica, considerando-se que todas as condutas tinham as mesmas propriedades de resistência ao escoamento, uma vez que toda a rede foi construída em simultâneo.

5.7.1.1 Cenário 4.1

O cenário 4.1 corresponde à abertura da BI localizada no nó 33. A diferença entre as solicitações registadas à saída do reservatório e as necessidades monitorizadas no nó 13 corresponde ao caudal saído na BI, acrescido dos consumos da rede. Uma vez que a BI ativada está muito afastada, a diferença de altura piezométrica entre os nós 13 e 36 é justificada pela existência de consumos entre estes nós. Deste modo poderá proceder-se à modelação dos consumos com algum detalhe. O caudal remanescente estará em princípio associado ao caudal saído pela BI a simular uma fuga na RDA.

Com a RDA devidamente caracterizada, com os consumos estimados e com as observações das cotas piezométricas e do caudal à saída do reservatório procedeu-se à localização do caudal da fuga com a aplicação computacional proposta.

Nas cinco avaliações efetuadas, correspondendo aos cinco minutos de duração da abertura da BI, os resultados obtidos com a aplicação computacional proposta identificam a fuga em 3 condutas na vizinhança da BI, tal como é visível na Figura 5.28. A fuga é identificada na conduta diretamente ligada à BI, numa conduta adjacente à mencionada e numa outra conduta afastada cerca de 179 m da conduta diretamente ligada à BI.

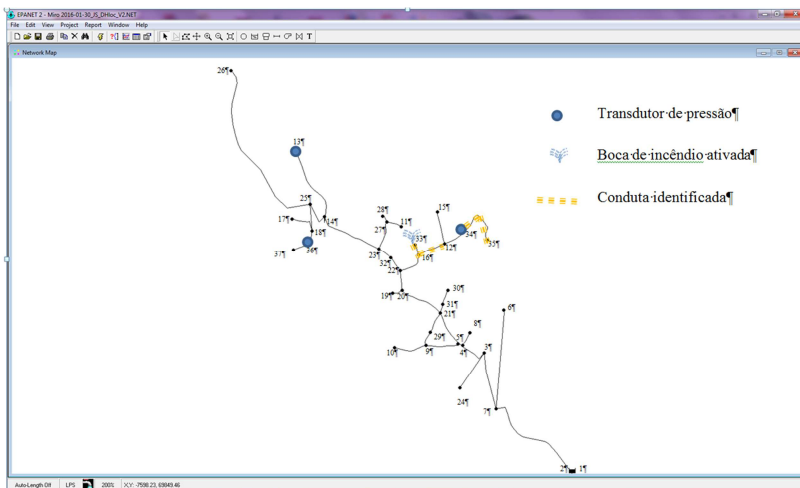


Figura 5.28 Identificação da conduta com fuga na abertura da BI 33.

5.7.1.2 Cenário 4.2

O cenário 4.2 corresponde à abertura da BI localizada no nó 32. Tal como no cenário 4.1, a diferença de cotas piezométricas entre os nós 13 e 36 foram muito úteis para o posicionamento adequado dos consumos na rede. O remanescente, entre as solicitações registadas à saída do reservatório, as necessidades monitorizadas no nó 13 e o consumo da RDA, corresponde ao caudal saído pela BI localizada no nó 32.

Após a introdução dos consumos no modelo matemático, as soluções obtidas apontam a localização da saída da água na proximidade do ponto onde efetivamente ocorre, como é visível na Figura 5.29. A conduta que está diretamente ligada à BI é identificada, bem como as condutas que lhe são adjacentes. Há uma conduta que dista cerca de 50 m da BI que também é identificada como potencial localização da fuga.

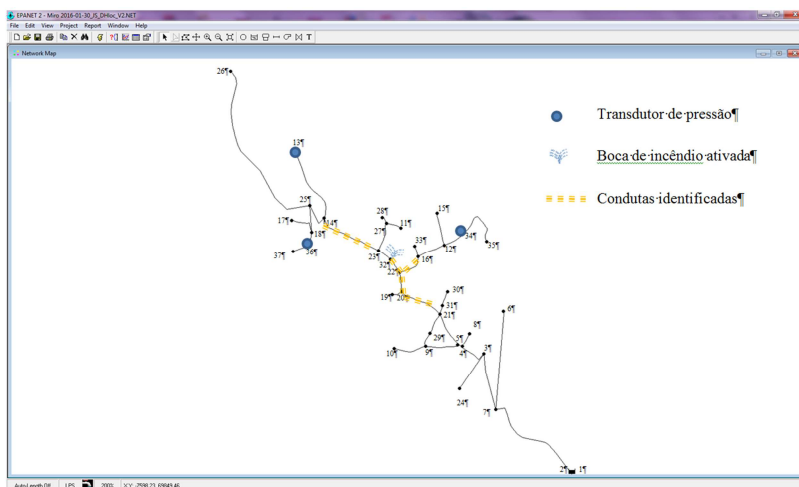


Figura 5.29 Identificação de conduta com fuga na abertura da BI 32.

5.7.1.3 Cenário 4.3

O cenário 4.3 corresponde à abertura da BI localizada no nó 29, uma BI inserida numa malha da rede. Devido ao afastamento da BI, neste cenário foi possível a utilização das três cotas piezométricas medidas para definir o consumo na quase totalidade da rede. Este acréscimo de informação permitiu um melhor posicionamento dos consumos na rede.

A diferença entre o caudal registado à saída do reservatório, as necessidades monitorizadas no nó 13 e os consumos existentes na rede, corresponde ao caudal saído pela BI do nó 29.

A duração desta abertura da BI durou 6 minutos, o que permitiu 6 avaliações. O resultado destas 6 avaliações indicam a localização da fuga de água na conduta que liga diretamente à BI 29 e duas condutas na vizinhança da BI afastadas cerca de 48m.

A identificação da BI ativada e das soluções obtidas como a localização das condutas consideradas com fugas pode ser visualizada na Figura 5.29.

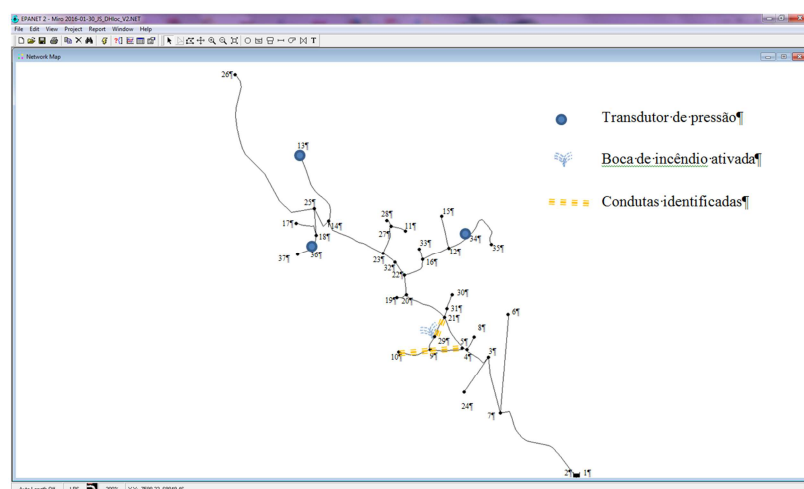


Figura 5.30 Condutas identificadas durante a abertura da BI 29

5.7.2 Interpretação dos resultados do estudo de caso 4

A aplicação da metodologia em contexto real apresentou resultados muito satisfatórios. A caracterização da RDA necessitou de elevado rigor na definição das suas ligações, diâmetros e comprimentos. A RDA foi sujeita a uma calibração sumária dos parâmetros da lei de resistência ao escoamento na fase anterior aos testes. Antes da aplicação da

metodologia foi necessário estabelecer uma distribuição espacial dos consumos compatível com as observações locais.

Simultaneamente, as limitações reais de espaço e segurança obrigaram à colocação dos transdutores nos pontos possíveis, sem nenhuma discussão. A instalação e remoção dos transdutores de pressão foi muito rápida e simples. Seguramente, a inclusão de mais transdutores de pressão teria sido benéfica e produziria soluções ainda melhores.

O medidor de caudal já se encontrava instalado na rede e a instalação de mais medidores de caudal teria sido muito cara, morosa e difícil. O contador existente no grande consumidor necessitou de ser complementado com um *data logger*.

Neste estudo de caso há a certeza de que o caudal saiu na BI. Numa futura aplicação a um caso real, a solução final com a identificação da fuga poderá corresponder a um consumo ilícito, a um evento não descrito ou não esperado.

Por outro lado, pode concluir-se que apesar de esta metodologia ter sido desenvolvida e existirem benefícios na aplicação durante o período noturno, a sua aplicação não é prejudicada quando é aplicada durante os períodos de consumo mínimo diurno em zonas com reduzido caudal, pois os caudais de consumo eram inferiores ao caudal saído pela BI.

5.8 Referências bibliográficas

Kang, D., Lansey, K. (2010). "Optimal meter placement for water distribution system state estimation". *J Water Resour Plan Manag.* 136:337–348.

Kang, D., Lansey, K. (2011). "Demand and roughness estimation in water distribution systems". *J Water Resour Plan Manag.* 137:20–31.

MAOTE. (2014). "Compromisso para o crescimento verde". Ministério do Ambiente, Ordenamento do Território e Energia (MAOTE).

Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., Sá Marques, A. (2012). "WaterNetGen : an EPANET extension for automatic water distribution network models generation and pipe sizing". *Water Sci Technol Water Supply.* 12:117–123.

Muranho, J. (2012). "Gestão de sistemas de abastecimento de água - geração de

modelos, dimensionamento e avaliação de desempenho". Tese de Doutoramento Universidade de Coimbra.

Ormsbee, L., Lingireddy, S. (2000). "Chapter 14 Calibration of hydraulic network models". Em: Mays L, editor. *Water Distrib Syst Handb*. McGraw-Hill; p. 14.1–14.23.

Pudar, R., Liggett, J. (1992). "Leaks in pipe networks". *J Hydraul Eng*. 118:1031–1046.

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012b). "Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: SEREA - XI Semin Ibero-Americano sobre Sist Abast e Dren. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro, L., Muranho, J., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012c). "Identificação de fugas através de modelação matemática de redes de distribuição de água". Em: 15º ENaSB - Encontro Eng Sanitária e Ambient "Reorganização para a Sustentabilidade do Set das Águas e Resíduos. Évora, 10 a 12 de Outubro: APESB.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A., Simões, NE. (2015). "Locating leaks with TrustRank algorithm support". *Water*. 7:1378–1401.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012a). "Desenvolvimento de uma aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água". Em: 11º Congr da Água. Porto, 6 a 8 de Fevereiro.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2012d). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". *Water Util J*. 4:3–12.

Ribeiro, L., Sousa, J., Sá Marques, A. (2013). "Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks". Em: 8th Int Conf Eur Water Resour Assoc. Porto, 26 a 29 de Junho.

Sousa, J., Ribeiro, L., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). "Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory". *Procedia Eng*. 119:63–71.

Wu, Z., Sage, P., Turtle, D. (2010). "Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system". *J Water Resour Plan Manag*. 136:116–128.

6 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

Os SAA são essenciais para o desenvolvimento económico e social. Todos os SAA são sistemas muito complexos. As RDA são a parte enterrada do sistema que acompanha o desenvolvimento do aglomerado com o intuito de possibilitar a distribuição domiciliária de água. Todas as RDA apresentam perdas e fugas de água, uma componente importante da água não faturada que é intenção do Governo reduzir para valores inferiores a 25% em 2020 e 20% em 2030 (MAOTE 2014).

As perdas reais ocorrem em qualquer local de modo aleatório, com ou sem justificação aparente. Elas representam uma inadequada gestão, seja do ponto de vista financeiro, económico e ambiental, com o desperdício de inúmeros recursos materiais e naturais, de energia e com um elevado custo associado. A nível nacional constatam-se que as perdas médias de água são da ordem dos 40%, sendo que as RDA mais pequenas e com menores recursos (capacidade técnica e financeira) tendem a apresentar problemas mais graves.

Para as EG garantirem sustentabilidade necessitam de ganhar maior competência técnica e autonomia financeira. Uma possibilidade é reduzir os custos dos serviços de água através da redução do seu volume total de perdas reais. Esta redução do volume de perdas só reduz custos até à obtenção do nível económico de perdas. A redução do volume de perdas para níveis inferiores ao nível económico está associada a custos superiores ao custo da existência de perdas de água. De entre as várias alternativas para alcançar este nível, a localização das fugas apresenta-se como uma solução definitiva capaz de promover a melhor opção técnica para o caudal envolvido.

A utilização de técnicas de localização exata de fugas de água existe desde a construção das primeiras redes. A duração da atividade, o esforço envolvido e o sucesso obtido com a utilização das mesmas depende de inúmeros fatores incontrolláveis pela EG. Uma tentativa de melhorar a eficiência da utilização das técnicas de localização exata de fugas advém de providenciar zonas onde as perdas reais são mais influentes no comportamento geral da rede e encaminhar para lá as equipas de deteção de fugas. Neste sentido, a setorização da rede, com a criação de ZMC e respetiva monitorização contínua, e o *step testing* têm contribuído para a concentração de esforços nas zonas mais problemáticas.

Algumas EG têm criado ZPC onde a redução da pressão da rede provoca a redução generalizada do volume das perdas reais de água, a redução dos consumos dos utilizadores da rede e dificulta a aplicação de algumas técnicas de localização exata de fugas que dependem da pressão.

Face à consciência social da importância do crescimento económico verde, alicerçado na defesa do ambiente, e à necessidade social de melhorar a eficácia do nível de qualidade do serviço prestado, foi premente o desenvolvimento de uma ferramenta computacional com o fim de contribuir para a resolução do problema.

Para alcançar os objetivos foram desenvolvidas aplicações computacionais que permitem identificar uma localização aproximada de fugas e que permitem selecionar os pontos para a monitorização, não obstante a eventual dificuldade técnica e falta de recursos humanos especializados para o efeito.

A solução apresentada por estas ferramentas computacionais não proporciona a posição da fuga em coordenadas exatas, mas faculta a indicação das zonas que necessitam de uma análise mais detalhada com as técnicas de localização exata e faculta a indicação das zonas onde a aplicação das técnicas de localização exata de fugas será provavelmente infrutífera.

A divulgação de modelos computacionais calibrados para simular o comportamento hidráulico das RDA tem ganho notoriedade desde as últimas décadas do século passado. Destes modelos só tem sido possível extrair respostas válidas quando eles representam bem a realidade, nomeadamente com a descrição correta das características, topologia da rede e de todos os detalhes nas condições de fronteira.

Paralelamente, os sistemas de monitorização e controlo também têm ganho protagonismo e serão num futuro próximo fontes essenciais de informação para a gestão e operação diária da rede e da EG. Do cruzamento destas realidades é proposta uma aplicação computacional para auxiliar na localização aproximada de fugas em redes de distribuição de água, e outra aplicação computacional para apoio à localização dos pontos de medição das pressões.

Todo o equipamento de monitorização deverá ter características metrológicas elevadas para garantir exatidão nos valores observados e potencialmente pequenos desvios. De igual modo, o levantamento topográfico deverá partilhar de igual rigor.

A recolha de observações na RDA demonstrou ser muito importante para o adequado funcionamento da aplicação computacional. Neste sentido, várias redes de monitorização foram selecionadas e utilizadas. Todas as redes de monitorização provaram ser mais eficazes sempre que dispunham de mais nós monitorizados, demonstrando que o aumento da quantidade de observações com qualidade aumenta a probabilidade de sucesso. Em oposição, poucas observações com fraca exatidão tenderão a produzir resultados com pouca utilidade.

A aplicação computacional para a localização dos transdutores de pressão com o apoio do algoritmo *TrustRank* demonstrou ser uma opção válida. Os nós são maioritariamente selecionados na periferia da rede. Estes nós selecionados apresentam elevada perda de carga desde o reservatório até si, o que naturalmente possibilita informação relevante para a pesquisa de boas soluções.

A segunda aplicação computacional proposta e desenvolvida neste trabalho procura identificar a localização aproximada das fugas de água na rede. Esta metodologia interpreta o comportamento observado na RDA isto é, com os valores provenientes da monitorização da pressão nos nós e do caudal fornecido à rede pelo reservatório, determina a cota piezométrica observada nos nós. Num simulador hidráulico em regime permanente previamente calibrado, no qual os consumos estejam bem estimados, avaliam-se cenários fictícios para o posicionamento das fugas que justificariam os factos observados. O simulador hidráulico utiliza a formulação dos nós, resolve o sistema de equações com o método de Newton-Raphson com controlo de passo e apresenta os resultados.

Diferentes hipóteses e cenários foram analisados, com cenários de consumo na rede elevados, consumos noturnos reduzidos, complementados com a ocorrência de operações de manutenção ou com incêndios, bem como caudais de fuga isolados ou múltiplos, com caudais de fuga elevados e reduzidos.

Nesta diversidade de circunstâncias constatou-se que solicitações elevadas na rede permitem a boa identificação do posicionamento das ocorrências de fugas. Um exemplo de solicitações elevadas resulta da acumulação de caudais de fuga elevados com consumos reduzidos. De modo semelhante, a inclusão de outros caudais relevantes, como por exemplo a abertura total de marcos de incêndio ou a execução de operações de manutenção na rede que necessitem de caudais elevados, contribuem positivamente para a localização correta das fugas. Isto significa que o aumento de solicitações na RDA aumenta a perda de carga em cada conduta. Este aumento da perda de carga amplifica os desvios nas observações da pressão devido à redução mais acentuada na linha piezométrica e respetiva altura piezométrica. Este efeito concede uma sensibilidade acrescida à observação, o que agiliza a localização das fugas.

Caso o caudal de fuga e o consumo da rede sejam reduzidos, o rigor exigido à definição dos consumos e das observações tem uma importância acrescida para permitir a localização aproximada das ocorrências de fugas.

Porém, verifica-se que no caso de existir apenas uma fuga de água, a solução apresentada pela aplicação computacional configura uma identificação mais assertiva do que no caso de fugas múltiplas, dado que o espaço solução do modelo de otimização tende a ser reduzido, de forma que agiliza a convergência para soluções de elevada qualidade.

A aplicação computacional apresentada poderá vir a ser uma ferramenta auxiliar ao trabalho desenvolvido pelas equipas de localização de fugas. Nos estudos de caso apresentados, os resultados permitem restringir a um número muito reduzido de condutas a necessidade de aplicar as técnicas de localização exata de fugas. Esta restrição permite o ganho de eficiência nas operações, tanto devido à rápida confirmação, à escolha acertada da técnica para o local e material da conduta, bem como no seu planeamento. Uma vez confirmada a localização exata da fuga de água a decisão técnica e económica de como proceder decorre dos princípios da EG e da

disponibilidade de recursos existentes, isto é, pode ser mais económico manter o custo associado à fuga de água, ou pode ser mais económico eliminar a fuga de água, ou ainda gerir o volume perdido.

Quando se procede à aplicação em contexto real, a rede de monitorização está sujeita a inúmeras limitações. No estudo de caso apresentado, a instalação de medidores de caudal é muito difícil, cara e morosa, todavia fornece informação básica e vital para o correto funcionamento da aplicação computacional. A instalação de transdutores de pressão apesar do preço elevado é substancialmente mais barata do que os medidores de caudal com elevadas características metrológicas. A colocação *in situ* é muito simples e rápida, com mais alternativas para a sua instalação do que os medidores de caudal.

A combinação das aplicações computacionais tende a apresentar algumas soluções alternativas válidas, e é necessário um gestor de rede compreender o processo de pesquisa e resolução associado ao modelo de otimização para a obtenção de resultados úteis.

Publicações do trabalho de investigação

Na seção seguinte apresenta-se as publicações efetuadas durante o trabalho de investigação e programa de doutoramento.

Revistas internacionais ISI

Ribeiro L, Sousa, J, Sá Marques A, Simões NE. 2015. Locating leaks with TrustRank algorithm support. *Water*. 7:1378–1401.

Revistas internacionais

Sousa J, **Ribeiro L**, Muranho J, Sá Marques A. 2015. Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory. *Procedia Eng*. 119:63–71.

Ribeiro L, Sousa J, Sá Marques A. 2012. Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks. *Water Util J*. 4:3–12.

Congressos internacionais

Ribeiro L, Muranho J, Sousa J, Sá Marques A. 2012. Aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água. Em: SEREA - XI Seminário Ibero-Americano sobre Sistemas de Abastecimento e Drenagem. Coimbra - 2 a 4 Julho.

Ribeiro L, Muranho J, Sousa J, Sá Marques A. 2012. Identificação de fugas através de modelação matemática de redes de distribuição de água. Em: 15º ENaSB - Encontro Engenharia Sanitária e Ambiente “Reorganização para a Sustentabilidade do Set das Águas e Resíduos. Évora, 10 a 12 de Outubro: APESB.

Ribeiro L, Sousa J, Sá Marques A. 2013. Improving the efficiency of leak location via optimal pressure sensor placement in water distribution networks. Em: 8th International Conference Eur Water Resour Assoc. Porto, 26 a 29 de Junho.

Sousa J, **Ribeiro, L.**, Muranho J, Sá Marques A. 2015. Locating leaks in water distribution networks with simulated annealing and graph theory. Em: 13th Comput Control Water Ind Conf CCWI 2015. Leicester, Reino Unido, 2 a 4 Setembro.

Congressos nacionais

Ribeiro L, Sousa J, Sá Marques A. 2012. Desenvolvimento de uma aplicação computacional para localização de fugas em redes de distribuição de água. Em: 11º Congresso da Água. Porto, 6 a 8 de Fevereiro.

Sugestões para trabalhos futuros

A investigação prévia e a consulta da bibliografia especializada colocaram um conjunto de questões pertinentes para as quais este trabalho pretendeu contribuir. Para a construção das aplicações computacionais compararam-se os resultados obtidos para as diferentes hipóteses propostas. O trabalho elucidou algumas questões antigas, mas novas questões necessitam de um estudo mais vasto. O resultado deste trabalho está seguramente inacabado e poderá ser readaptável ou atualizável com refinamentos, uma vez que este tema possibilita a integração de muitas novidades tecnológicas.

O objetivo deste trabalho é contribuir para o desenvolvimento de uma aplicação computacional não convencional para a localização aproximada de fugas. A complexidade do problema real obrigou à divisão dos objetivos que estão materializados no desenvolvimento de duas aplicações computacionais autónomas para a localização aproximada e não convencional de fugas de água. Este trabalho possibilita o desenvolvimento de alguns trabalhos no futuro e a sua inclusão noutras aplicações computacionais:

Redução do tempo de execução

Nesta exposição o tempo de execução da metodologia foi pouco mencionado. Não obstante, a aplicação computacional incluiu procedimentos para melhorar e reduzir o seu tempo de cálculo, porque a redução do tempo de resolução é uma mais valia muito importante. Para este efeito a aplicação poderá ser implementada com computação paralela, poderão alterar-se algumas opções no algoritmo de recozimento simulado, desde que se garanta a obtenção de resultados melhores e mais rápidos, ou passar a ser executado em computadores com melhor velocidade de cálculo e capacidade, possibilitando beneficiar de uma redução do tempo de execução

Inclusão da calibração de outros parâmetros

No exemplo em contexto real ficou bem patente a importância da calibração dos parâmetros utilizados na lei de resistência. Assim, poderia ser útil complementar a modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas com a calibração matemática da RDA em estudo e a validação das ligações existentes.

Melhoria na interligação com os sistemas de informação – *Smart Metering*.

As novas tecnologias de comunicação facilitam a troca de informação entre todos e as bases de dados armazenam inúmera informação. A inclusão de um módulo para a receção da informação recebida ou nos sistemas de faturação ou a receção da informação proveniente dos contadores com telemedição poderá melhorar a estimativa do consumo efetuado. Este benefício desempenha um papel preponderante na definição

dos consumos dos utilizadores importantes e advém da redução da característica estocástica do consumo no modelo de simulação.

Melhoria nos equipamentos de monitorização

Uma grande fragilidade da aplicação desta metodologia encontra-se nos equipamentos de monitorização, tanto do caudal como da pressão. A necessidade de desenvolvimentos tecnológicos para a melhoria das características metrológicas bem como a introdução de exatidão¹ e precisão nas observações é uma realidade. Paralelamente, seria útil o desenvolvimento de novos meios de produção que produzam equipamentos de monitorização melhores a um custo menor.

Melhoria na deteção precoce de fugas.

A redução do tempo de execução é fulcral para a diminuição do tempo na deteção das fugas. Se no futuro as alterações climáticas gerarem situações de escassez de água, a sua gestão ganhará importância, nomeadamente na redução de desperdícios. Quanto mais célere for a deteção de uma fuga, mais célere será o envio de equipas dedicadas à localização de fugas para o terreno e o intervalo de tempo até à intervenção para o controle da mesma será provavelmente reduzido. Esta opção só será viável se a aplicação computacional estiver em avaliação contínua das diferentes ZMC e incluir um sistema de alerta.

A inclusão de sistemas para a teleatuação

A inclusão de uma aplicação computacional para a confirmação imediata da verdadeira existência do problema. A rápida confirmação de existência de comportamentos irregulares por meios alternativos. Ou o envio de alertas identificando a zona para o departamento de gestão das operações. Ou a inclusão de uma aplicação computacional para setorizar uma zona com elevada potencialidade de ocorrência de problemas. Ou

¹ Exatidão é a aproximação entre o resultado da medição e o valor verdadeiro. Precisão é a repetibilidade da medição.

ainda a inclusão de uma aplicação computacional para controlar a redução de pressão em zonas identificadas como problemáticas.

Aplicação da metodologia proposta a casos reais

Apesar da metodologia proposta ter sido aplicada a uma rede real, alguns problemas ganharam notoriedade, nomeadamente a importância da exatidão dos valores observados *in situ*. Assim, da aplicação a mais casos reais seria possível detetar mais fragilidades e com isso melhorar a metodologia proposta.

Anexos

Anexo – Estudo de caso 1

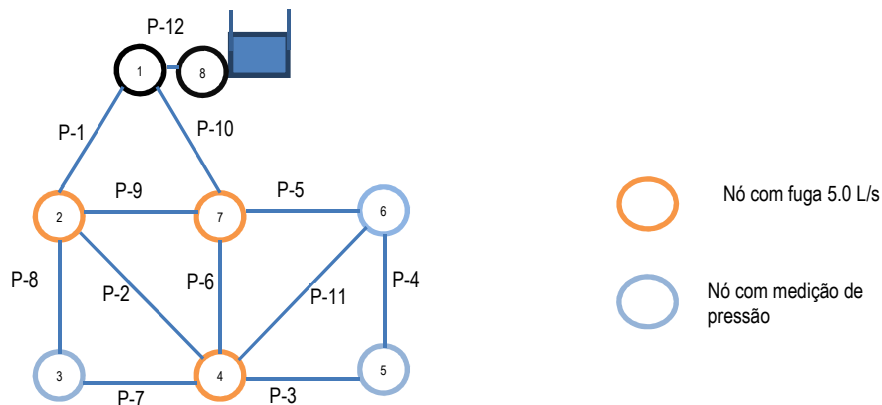


Figura A.1 Representação da RDA do estudo de caso 1.

Quadro A.1 Características dos nós: cota topográfica, consumo, caudal de fuga e pressão observada. Estudo de caso 1

Nó	Cota topográfica (m)	Consumo (L/s)	Fuga (L/s)	Pressão observada (m c.a.)
1	0.0	0.00	-	-
2	0.0	0.00	5.00	-
3	0.0	20.00	-	36.276
4	0.0	0.00	5.00	-
5	0.0	10.00	-	36.360
6	0.0	10.00	-	36.459
7	0.0	0.00	5.00	-
8	40.0	0.00	-	-

Quadro A.2 Características das condutas: diâmetros, os comprimentos e os coeficientes de Hazen-Williams. Estudo de caso 1.

Conduta	Diâmetro (mm)	Comprimento (m)	Coefficiente de Hazen-Williams
p-1	215	1000	130
p-2	215	1000	130
p-3	215	1000	130
p-4	215	1000	130
p-5	215	1000	130
p-6	215	1000	130
p-7	215	1000	130
p-8	215	1000	130
p-9	215	1000	130
p-10	215	1000	130
p-11	215	1000	130
p-12	600	100	130

Anexo – Estudo de caso 2

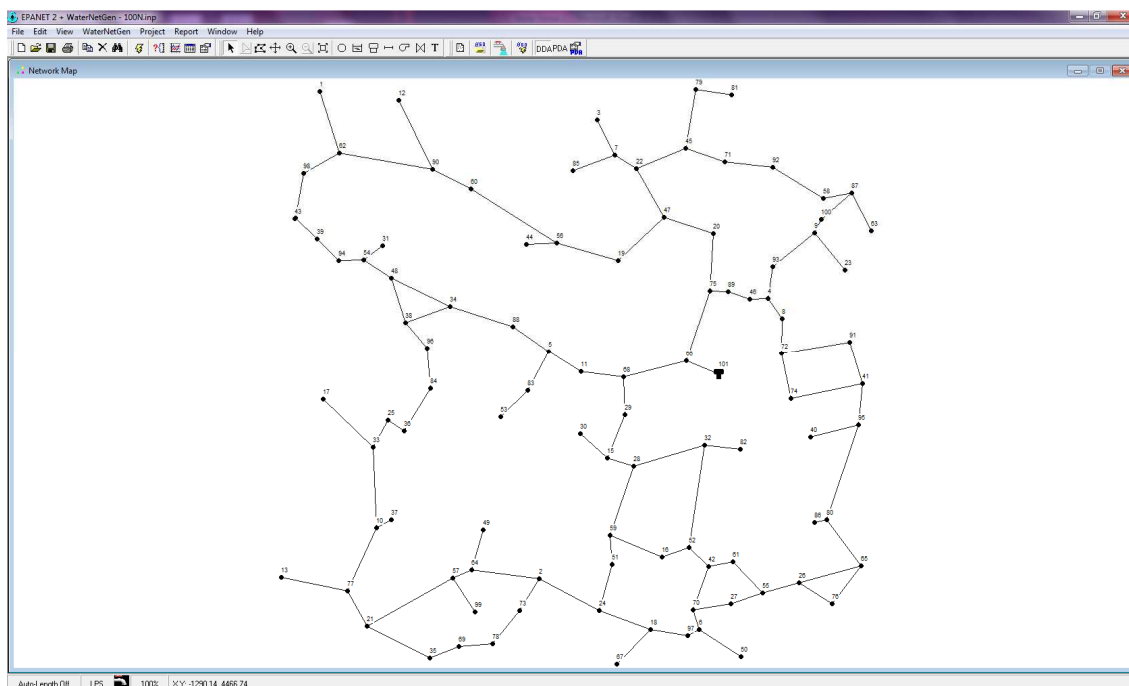


Figura A.2 Representação da RDA do estudo de caso 2

Quadro A.3 Características dos nós: cota topográfica, consumo e pressão observada. Estudo de caso 2.

Nó	Cota topográfica (m)	Caudal consumido (L/s)	Pressão (mc.a.)
1	1000	0,14853	39,93682
2	1000	0,45880	
3	1009	0,08977	30,41519
4	1005	0,17055	
5	995	0,28939	
6	1000	0,19069	
7	1008	0,25051	
8	1005	0,1533	
9	1008	0,26729	
10	1004	0,38135	
11	992	0,18656	
12	993	0,17543	46,87530
13	1006	0,15491	34,39208
14	996	0,17483	
15	1007	0,25404	
16	1007	0,18505	
17	1011	0,15817	29,97113
18	999	0,32183	
19	1003	0,29178	
20	1007	0,25014	

21	1001	0,47985	
22	1010	0,30773	
23	1010	0,10939	28,54005
24	1001	0,45159	
25	1003	0,09216	
26	1011,5	0,32528	
27	1004,5	0,16416	
28	1003	0,39885	
29	1010	0,19455	
30	1003	0,08422	39,69480
31	986	0,05417	55,32932
32	1007	0,48857	
33	1007	0,36728	
34	995	0,40938	
35	1001	0,29225	
36	996	0,09641	
37	999	0,03792	
38	989	0,29157	
39	995	0,13926	
40	1008,5	0,01782	32,40064
41	1004,5	0,3366	
42	1003	0,22369	
43	997	0,00267	
44	998	0,06974	42,03707
45	1008	0,35403	
46	1006	0,09363	
47	1006	0,39144	
48	991	0,33263	
49	999	0,09442	41,47947
50	997	0,11453	43,87332
51	1005	0,17784	
52	1005	0,4565	
53	991	0,08662	52,02765
54	989	0,18765	
55	1002	0,26197	
56	1002	0,44948	
57	1006	0,36556	
58	1008	0,3367	
59	1003	0,20151	
60	1000	0,33061	
61	1004	0,15561	
62	1000	0,45956	
63	1004	0,02075	33,56307
64	1003	0,2981	
65	1012,5	0,38806	
66	1014	0,31836	

67	997	0,11007	43,96405
68	1013	0,33332	
69	999,5	0,13329	
70	1001	0,24092	
71	1003	0,20605	
72	1003	0,30945	
73	1000	0,18002	
74	998	0,19668	
75	1010	0,343	
76	1013,5	0,20005	
77	1004	0,40574	
78	1001	0,0367	
79	1011	0,22066	
80	1008,5	0,38778	
81	1007	0,08321	30,24583
82	1002	0,08324	38,77056
83	993	0,18871	
84	999	0,29843	
85	1009	0,10221	30,41407
86	1008,5	0,02841	32,17641
87	1004	0,18082	
88	998	0,25109	
89	1002	0,09337	
90	996	0,4903	
91	1003	0,25683	
92	999	0,38027	
93	1009	0,19603	
94	992	0,12724	
95	1007,5	0,34144	
96	987	0,34677	
97	1001	0,11475	
98	995	0,19728	
99	998	0,09241	42,42760
100	1009	0,12789	
101	1044	0	

**Quadro A.4 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro, coeficiente de Hazen-Williams e fuga.
Estudo de caso 2.**

Conduta	Nó mon.	Nó jus.	Comprim.(m)	Diâm. (mm)	C _{HW}	Fuga (L/s)
1	62	1	550,58	81	140	-
2	2	73	542,66	81	140	-
3	24	2	578,88	113	140	-
4	2	64	579,14	81	140	-
5	7	3	332,75	81	140	-
6	4	93	270,13	99	140	-
7	46	4	153,21	145	140	-
8	4	8	208,86	113	140	-
9	5	83	378,42	81	140	-
10	11	5	327,76	163	140	-
11	5	88	366,53	145	140	-
12	6	50	424,53	81	140	-
13	97	6	105,12	81	140	-
14	70	6	177,2	81	140	-
15	7	85	378,87	81	140	-
16	22	7	216,98	81	140	-
17	8	72	359,4	113	140	-
18	9	23	405,49	81	140	-
19	9	100	128,8	81	140	-
20	93	9	456,5	99	140	3,0
21	10	37	140,55	81	140	-
22	10	77	588,36	81	140	-
23	33	10	684,66	81	140	-
24	68	11	363,79	163	140	-
25	90	12	650,29	81	140	-
26	77	13	574,23	81	140	-
27	39	14	256,69	81	140	-
28	14	43	9,9	81	140	-
29	14	98	381,48	81	140	-
30	15	30	312,19	81	140	-
31	15	28	232,48	181	140	-
32	29	15	397,02	181	140	-
33	16	52	585,78	81	140	-
34	59	16	100,18	81	140	-
35	33	17	586,29	81	140	-
36	24	18	464,69	81	140	-
37	18	67	408,01	81	140	-
38	18	97	320,25	81	140	-
39	19	56	546,16	99	140	-
40	47	19	535,41	113	140	3,0
41	20	47	440,51	145	140	-
42	75	20	486,69	145	140	-
43	21	77	341,42	81	140	-

44	35	21	600,61	81	140	-
45	57	21	836,67	81	140	-
46	22	45	448,64	81	140	-
47	47	22	475,06	99	140	-
48	51	24	630,39	127	140	-
49	36	25	251,14	99	140	-
50	25	33	90,47	99	140	-
51	26	76	335,93	81	140	-
52	55	26	323,76	81	140	-
53	65	26	546,06	81	140	-
54	70	27	328,31	81	140	-
55	27	55	280,18	81	140	-
56	28	32	628,05	113	140	-
57	28	59	617,92	145	140	-
58	68	29	324,12	181	140	-
59	54	31	200,8	81	140	-
60	32	82	308,56	81	140	3,0
61	32	52	874,42	99	140	-
62	88	34	564,22	145	140	-
63	34	38	399,16	113	140	-
64	34	48	554,12	99	140	-
65	69	35	482,69	81	140	-
66	84	36	106,22	99	140	-
67	38	96	285,39	113	140	-
68	38	48	396,25	81	140	-
69	94	39	259,51	81	140	-
70	95	40	66,07	81	140	-
71	41	95	354,27	99	140	-
72	91	41	367,9	81	140	-
73	74	41	525,52	99	140	-
74	42	61	209,67	81	140	-
75	52	42	231,95	99	140	-
76	42	70	387,54	81	140	-
77	56	44	258,5	81	140	-
78	45	79	509,48	81	140	-
79	45	71	354,18	81	140	-
80	89	46	193,85	145	140	3,0
81	48	54	282,62	81	140	-
82	64	49	350	81	140	-
83	59	51	28,84	127	140	-
84	83	53	321,08	81	140	-
85	54	94	212,15	81	140	-
86	61	55	367,14	81	140	-
87	56	60	861,47	99	140	-
88	64	57	175,87	81	140	-
89	57	99	342,53	81	140	-

90	87	58	248,09	81	140	-
91	60	90	364,03	81	140	-
92	98	62	349,78	81	140	-
93	90	62	803,12	81	140	-
94	87	63	76,92	81	140	-
95	80	65	486,81	81	140	-
96	65	76	405,6	81	140	-
97	66	75	632,46	203	140	-
98	66	68	547,65	226	140	-
99	78	69	11,4	81	140	-
100	71	92	409,59	81	140	3,0
101	72	74	203,54	99	140	-
102	72	91	584,11	81	140	-
103	73	78	124,65	81	140	-
104	75	89	152,27	145	140	-
105	79	81	308,45	81	140	-
106	80	86	105,32	81	140	-
107	95	80	845,3	81	140	-
108	100	87	345,25	81	140	-
109	101	66	33	285	140	-
110	96	84	1000	113	140	-
111	58	92	1000	81	140	-

Anexo – Estudo de caso 3

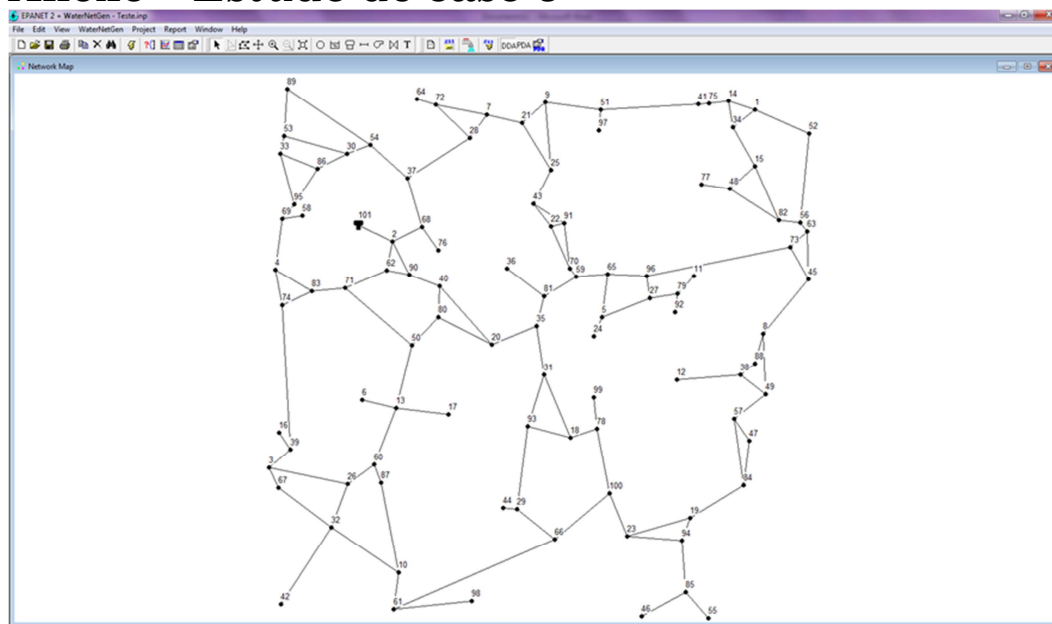


Figura A.3 Representação da RDA do estudo de caso 3

Quadro A.5 Características dos nós: cota topográfica e consumo. Estudo de caso 3.

Nó	Cota topográfica (m)	Caudal consumido (L/s)
1	1000,00	0,25450
2	1014,00	0,00402
3	995,50	0,00513
4	1007,50	0,00523
5	1005,00	0,00450
6	991,00	0,00137
7	1009,00	0,00418
8	988,00	0,00629
9	1006,00	0,00607
10	992,00	0,00817
11	1003,00	0,00094
12	983,50	0,00249
13	988,00	0,00833
14	1004,00	0,30291
15	999,00	0,00537
16	1011,00	0,00081
17	984,00	0,00204
18	993,00	0,00547
19	988,00	0,00593
20	995,00	0,00725
21	1007,00	0,00479

22	1003,00	0,00346
23	990,00	0,00649
24	1007,00	0,00078
25	1003,00	0,00633
26	980,00	0,00623
27	1004,00	0,00398
28	1013,00	0,00593
29	1001,00	0,00570
30	1009,00	0,00471
31	998,00	0,00669
32	993,00	0,01113
33	1007,75	0,00405
34	998,00	0,35391
35	997,00	0,00498
36	1000,00	0,00181
37	1010,00	0,00721
38	988,50	0,00444
39	1013,00	0,00753
40	994,00	0,00550
41	999,00	0,00041
42	991,00	0,00357
43	999,00	0,00402
44	1003,00	0,00055
45	992,00	0,05607
46	990,00	0,00195
47	982,00	0,00281
48	995,00	0,00472
49	991,00	0,00513
50	990,00	0,00743
51	1005,00	0,00721
52	1000,00	0,00579
53	1008,50	0,00502
54	1005,00	0,00684
55	994,00	0,00134
56	997,00	0,00476
57	987,00	0,00522
58	1003,00	0,00030
59	1000,00	0,00309
60	983,00	0,00441
61	992,00	0,01134
62	1013,00	0,00381
63	996,00	0,05321
64	1003,00	0,00076

65	1000,00	0,00444
66	988,00	0,01151
67	990,00	0,00347
68	1011,00	0,00439
69	1008,00	0,00300
70	999,33	0,00399
71	1013,00	0,00648
72	1008,00	0,00471
73	1000,00	0,00806
74	1012,00	0,00830
75	1002,00	0,00541
76	1012,00	0,00111
77	999,00	0,00111
78	995,00	0,00489
79	1001,00	0,00272
80	992,00	0,00502
81	1001,00	0,00446
82	993,00	0,00543
83	1013,00	0,00422
84	990,00	0,00685
85	992,00	0,00531
86	1009,00	0,00453
87	988,50	0,00432
88	990,00	0,00191
89	1006,00	0,00608
90	1010,00	0,00360
91	995,00	0,00375
92	1004,00	0,00070
93	998,00	0,00708
94	988,00	0,00509
95	1004,00	0,00425
96	1002,00	0,00809
97	1003,00	0,00082
98	995,00	0,00305
99	998,00	0,00123
100	993,00	0,00717
101	1044,00	0,00000

Quadro A.6 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro e coeficiente de Hazen-Williams. Estudo de caso 3.

Conduta	Nó mon.	Nó jus.	Comprim (m)	Diâm. (mm)	C _{HW}
1	52	1	1075,89	68	140
2	14	1	510,39	68	140
3	1	34	516,31	68	140
4	2	68	601,51	99	140
5	2	62	536,22	99	140
6	2	90	675,33	99	140
7	39	3	514,07	68	140
8	3	67	416,40	68	140
9	3	26	1467,37	68	140
10	4	74	657,19	68	140
11	83	4	776,40	68	140
12	4	69	1012,68	68	140
13	5	24	365,70	68	140
14	65	5	789,29	68	140
15	5	27	946,86	68	140
16	13	6	640,30	68	140
17	28	7	353,51	81	140
18	7	21	649,40	99	140
19	72	7	952,34	68	140
20	88	8	557,68	68	140
21	8	45	1284,73	68	140
22	49	8	1098,66	68	140
23	9	51	1014,16	68	140
24	21	9	577,33	81	140
25	25	9	1245,94	68	140
26	10	61	679,12	68	140
27	32	10	1473,01	68	140
28	87	10	1668,37	68	140
29	79	11	440,73	68	140
30	38	12	1163,49	68	140
31	13	60	1115,14	68	140
32	13	17	952,46	68	140
33	50	13	1183,57	68	140
34	14	34	492,87	68	140
35	75	14	358,40	68	140
36	48	15	617,12	68	140
37	15	34	817,54	68	140
38	82	15	1076,17	68	140
39	39	16	376,36	68	140
40	93	18	806,29	68	140

41	18	78	505,03	68	140
42	31	18	1246,50	68	140
43	94	19	439,84	68	140
44	19	84	1137,39	68	140
45	23	19	1192,60	68	140
46	80	20	1093,90	68	140
47	20	35	877,63	81	140
48	40	20	1418,06	68	140
49	21	25	1009,87	68	140
50	43	22	516,33	68	140
51	22	91	251,03	68	140
52	22	70	849,04	68	140
53	100	23	847,33	68	140
54	23	94	992,84	68	140
55	25	43	701,25	68	140
56	26	32	852,22	68	140
57	60	26	594,14	68	140
58	27	79	503,89	68	140
59	27	96	407,22	68	140
60	28	72	891,18	68	140
61	37	28	1528,26	99	140
62	29	44	258,50	68	140
63	29	66	884,43	68	140
64	93	29	1520,81	68	140
65	86	30	615,39	68	140
66	30	54	449,44	68	140
67	53	30	1135,57	68	140
68	35	31	896,77	68	140
69	31	93	983,06	68	140
70	32	42	1668,57	68	140
71	67	32	1205,80	68	140
72	33	53	201,84	68	140
73	86	33	726,31	68	140
74	95	33	962,76	68	140
75	35	81	553,47	68	140
76	81	36	846,40	68	140
77	54	37	913,83	68	140
78	68	37	928,05	99	140
79	49	38	577,28	68	140
80	38	88	336,10	68	140
81	74	39	2630,00	68	140
82	90	40	595,05	99	140
83	40	80	557,52	81	140

84	75	41	193,21	68	140
85	43	91	661,35	68	140
86	73	45	676,86	68	140
87	45	63	874,48	68	140
88	85	46	912,30	68	140
89	84	47	828,70	68	140
90	47	57	482,87	68	140
91	82	48	1068,84	68	140
92	48	77	518,88	68	140
93	57	49	720,94	68	140
94	80	50	695,31	68	140
95	71	50	1595,85	68	140
96	51	97	381,00	68	140
97	51	75	1976,74	68	140
98	56	52	1631,48	68	140
99	53	89	1008,24	68	140
100	89	54	1832,19	68	140
101	85	55	624,00	68	140
102	63	56	204,20	68	140
103	56	82	390,96	68	140
104	84	57	1236,03	68	140
105	69	58	140,09	68	140
106	59	65	580,59	81	140
107	70	59	177,41	68	140
108	81	59	685,00	68	140
109	60	87	350,41	68	140
110	61	98	1426,91	68	140
111	61	66	3194,08	68	140
112	62	71	829,47	81	140
113	62	90	413,67	68	140
114	73	63	420,99	68	140
115	72	64	357,46	68	140
116	65	96	707,55	68	140
117	66	100	1299,46	68	140
118	68	76	521,03	68	140
119	69	95	247,81	68	140
120	91	70	839,59	68	140
121	71	83	603,51	68	140
122	96	73	2666,99	68	140
123	83	74	593,25	68	140
124	78	99	573,84	68	140
125	78	100	1204,58	68	140
126	79	92	326,26	68	140

127	94	85	945,45	68	140
128	95	86	776,65	68	140
129	101	2	33,00	145	140

Anexo – Estudo de caso 4

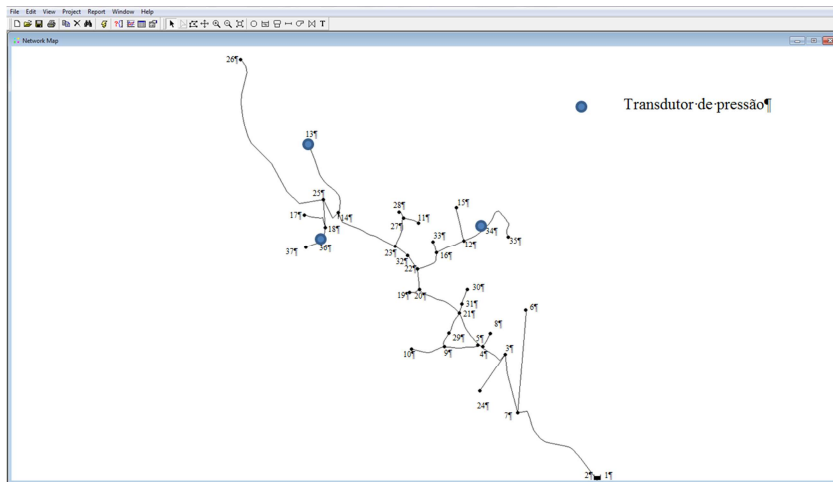


Figura A.4 Representação da RDA do estudo de caso 4.

Quadro A.7 Caracterização dos nós e cota topográficas. Estudo de caso 4.

Nó	Cota topográfica (m)
1	174,36
2	180,00
3	149,80
4	145,60
5	145,10
6	148,48
7	150,44
8	144,00
9	149,59
10	147,60
11	132,20
12	136,56
13	139,83
14	145,68
15	140,00
16	135,95
17	144,65
18	145,10
19	130,00
20	135,68
21	138,15
22	135,56
23	138,40
24	153,20
25	145,00
26	70,00
27	131,20
28	131,40
29	145,82
30	133,20
31	134,93
32	137,11
33	135,95
34	130,67
35	126,26
36	149,62
37	149,28

Quadro A.8 Caracterização das condutas: nós, comprimento, diâmetro e coeficiente de Hazen-William. Estudo de caso 4.

Conduta	Nó mon.	Nó jus.	Comprim.(m)	Diâm. (mm)	C _{HW}
1	1	2	1,00	57	145
2	3	4	115,33	57	145
3	4	5	6,34	57	145
4	7	6	226,77	57	145
5	4	8	54,00	57	145
6	5	9	116,23	57	145
7	9	10	112,71	57	145
8	15	12	111,94	57	145
9	14	13	283,09	57	145
10	16	12	96,74	57	145
11	17	18	73,60	57	145
12	20	19	35,42	57	145
13	5	21	126,81	57	145
14	21	20	153,74	57	145
15	20	22	66,26	57	145
16	23	14	205,41	57	145
17	22	16	94,14	57	145
18	24	3	32,44	57	145
19	14	25	47,48	57	145
20	25	26	681,17	57	145
21	23	27	98,05	57	145
22	25	18	7,54	57	145
23	7	3	19,00	57	145
24	27	28	27,58	57	145
25	11	27	51,22	57	145
26	2	7	1140,00	57	145
27	9	29	48,67	57	145
28	29	21	73,23	57	145
29	31	30	50,48	57	145
30	21	31	31,43	57	145
31	22	32	54,74	57	145
32	32	23	50,87	57	145
33	16	33	36,49	57	145
34	12	34	82,63	57	145
35	34	35	170,55	57	145
36	18	36	140,93	57	145
37	36	37	43,90	57	145