



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Hugo André Cruz Monteiro Vilela Fontes

MODELAÇÃO DE FUGAS E PERDAS: O CASO DA
ZONA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DA
MALAVADA EM COIMBRA

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pelo Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e pelo Professor Doutor Nuno Eduardo Da Cruz Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2022

Faculdade de Ciências e Tecnologia
da Universidade de Coimbra

MODELAÇÃO DE FUGAS E PERDAS: O CASO DA ZONA DE MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DA MALAVADA EM COIMBRA

Hugo André Cruz Monteiro Vilela Fontes

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, orientada pelo
Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e pelo Professor Doutor
Nuno Eduardo Da Cruz Simões e apresentada ao Departamento de Engenharia
Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2022

1 2 9 0



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

A dissertação, não teria sido possível sem a contribuição de muitas pessoas importantes na minha vida, às quais quero desde já agradecer.

Ao professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques por me ter dado a oportunidade de desenvolver esta dissertação com a colaboração da empresa , Águas de Coimbra. Ao professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões, pelo apoio, atenção, partilha do seu saber e pela orientação da dissertação, aos professores, devo um sincero obrigado.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra (FCTUC).

À empresa Águas de Coimbra pela possibilidade que me deu em fazer parte de uma das suas visitas técnicas de deteção de fugas.

Ao Engenheiro Luís Costa e à Engenheira Rita Morais, por me esclarecerem todas as dúvidas e por me acompanharem na visita técnica de deteção de fugas.

Ao professor Doutor João Muranho, por me ter explicado o funcionamento do software Epanet e os seus diversos tipos de análise.

A todos os meus amigos do DEC, pela amizade demonstrada ao longo destes anos e em especial ao Miguel Rochinha, Miguel Malheiro e Beatriz Viana, que foram companheiros e confidentes nesta caminhada.

À minha família, avó, tias e pais, pilares fundamentais da minha educação e sem os quais nada seria possível.

Por fim, a tantos outros que não se encontram aqui, mas não serão esquecidos.

A todos um muito obrigado.

RESUMO

As fugas e perdas de água estão presentes em todas as redes de distribuição de água e este problema tem consequências técnicas, económicas, sociais e ambientais.

Em Portugal, a água não faturada atinge 237,2 milhões de metros cúbicos, representando 28,8 % do total de água entrada nos sistemas (624,5 milhões de metros cúbicos), nas entidades gestoras que prestam serviço de abastecimento em baixa e para entidades gestoras que prestam serviço em alta a água não faturada é de 30,5 milhões de metros cúbicos e representa 4,8 % do total de água entrada nos sistemas (ERSAR,2020).

Desta forma, a redução de perdas de água em sistemas de abastecimento até níveis ótimos, constitui um dos principais objetivos das entidades gestoras responsáveis pelo serviço público de abastecimento de água.

Esta dissertação, tem como objetivo principal, o estudo de uma zona de medição de controlo (ZMC) com problemas de fugas e perdas, com vista a avaliar a dimensão do problema e propor soluções para reduzir os respetivos valores.

Para alcançar o objetivo principal será necessário: fazer o levantamento das diversas técnicas de combate a fugas e perdas em sistemas de distribuição de água; fazer uma avaliação das fugas numa rede real das Águas de Coimbra, através de trabalho de campo. A modelação hidráulica permitirá fazer a localização aproximada das fugas e analisar o efeito da redução da pressão nos valores das fugas e perdas e implementar uma estratégia para as reduzir.

Palavras-chave: Perdas, EPANET, Demand Driven Analysis, Pressure Driven Analysis, Gestão de Pressão

ABSTRACT

Water leaks and losses are present in all water distribution networks and this problem has technical, economic, social and environmental consequences.

In Portugal, unbilled water reaches 237.2 million cubic meters, representing 28.8% of the total water entering the systems (624.5 million cubic meters), in the managing entities that provide supply service in low and for managing entities that provide service in high the unbilled water 30.5 million cubic meters and represents 4.8% of the total water entering the systems (ERSAR,2020).

Thus, the reduction of water losses in water supply systems to optimal levels is one of the main objectives of the managing entities responsible for the public service of water supply. This dissertation has as main objective the study of a control measurement area (CMZ) with leakage and losses problems, in order to evaluate the dimension of the problem and propose solutions to reduce the respective values.

To achieve the main goal, it will be necessary: to survey the different techniques to fight leaks and losses in water supply systems; to make an assessment of the leaks in a real network of Águas de Coimbra, through field work. The hydraulic modelling will allow to make the approximate location of leaks and to analyze the effect of pressure reduction on the values of leaks and losses and to implement a strategy to reduce them.

Keywords: Waterleaks, EPANET, Demand Driven Analysis, Pressure Driven Analysis, Pressure management

ÍNDICE

Agradecimentos	i
Resumo	ii
Abstract.....	iii
Índice	iv
Índice de figuras	vi
Índice de quadros.....	viii
Simbologia.....	ix
Abreviaturas.....	xi
1 Introdução.....	1
1.1 A necessidade de reduzir as perdas de água	1
1.2 Motivação e objetivos	1
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 Revisão bibliográfica.....	4
2.1 Considerações Gerais.....	4
2.2 Perdas de água	4
2.2.1 Perdas de água reais.....	4
2.2.2 Perdas de água aparente.....	6
2.3 Zonas de medição de controlo	7
2.3.1 Conceção e Implementação de Zonas de medição de controlo	7
2.4 Step-Test	8
2.5 Balanço hídrico	9
2.6 Caudal mínimo noturno	11
2.7 Técnicas para deteção de fugas e perdas de água	13
2.7.1 Subzonamento	13
2.7.2 Deteção exata de fugas	13
2.7.3 Equipamento de deteção.....	13
2.8 Indicadores de desempenho	17
2.9 Nível económico de perdas.....	20
2.9.1 Condicionantes	21
2.10 Sistema de SDA	22
2.11 Modelos matemática e simulação hidráulica	22
2.11.1 Modelos estáticos	24
2.11.2 Modelos simulação dinâmicos	24
2.11.3 Demand Driven Analysis (DDA) vs Pressure Driven Analysis. (PDA)	24
2.12 Métodos numéricos	26
2.12.1 Algoritmo do Gradiente Global.....	26

2.13	EPANET.....	28
2.13.1	WaterNetGen.....	29
2.14	Gestão de pressão como método de controlo.....	31
2.14.1	Modo de operação.....	31
2.15	Síntese final.....	33
3	Construção de modelos.....	34
3.1	Introdução.....	34
3.2	Empresa Águas de Coimbra.....	34
3.3	Localização e descrição da ZMC.....	34
3.4	Balanço hídrico.....	35
3.5	Caudal mínimo noturno.....	38
3.5.1	Visita técnica da ZMC.....	39
3.6	Modelo hidráulico.....	40
3.6.1	Desenvolvimento do modelo.....	41
3.6.2	Diagrama de consumos.....	44
3.6.3	Incorporação das perdas.....	46
3.6.4	Componentes físicos.....	48
3.6.5	Validação dos dados.....	48
3.6.6	Step-Test.....	49
4	Caso de estudo.....	53
4.1	Introdução.....	53
4.2	Análise de resultados.....	53
4.3	Verificações regulamentares.....	56
4.4	Indicadores de desempenho.....	57
4.5	Análise crítica da rede.....	60
4.6	Propostas de soluções para o melhoramento da rede e os seus resultados.....	60
4.6.1	Análise de resultados dos melhoramentos.....	60
5	Conclusão e Trabalhos Futuros.....	62
5.1	Conclusão.....	62
5.2	Sugestões para trabalhos futuros.....	63
6	Referências Bibliográficas.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Perdas reais na rede de distribuição, Fonte: Programa nacional de combate ao desperdício de água- (Alves et al,1999.)	5
Figura 2 - Fuga detetada, retirado de Thornton <i>et al.</i> , 2008.....	5
Figura 3 - Fuga não detetada, retirado de Thornton <i>et al.</i> , 2008	6
Figura 4 - Fuga de fundo, retirado de Thornton <i>et al.</i> , 2008	6
Figura 5 - Exemplo gráfico obtido de um “step-test”, adaptado de https://nwwaterservices.ie/water-services/step-testing	8
Figura 6 - Correlacionador de ruído, à esquerda e o seu respetivo funcionamento na imagem à direita imagens retiradas de http://www.sondeq.com.br	14
Figura 7 - Loggers acústicos, imagem retirada do site https://www.envirotech-online.com/	15
Figura 8 - Geofone	15
Figura 9 - Haste eletrónica de escuta retirada do site , http://gaiatecsistemas.com.br/	16
Figura 10 - Utilização do sistema Sahara, imagem retirada de http://www.adoxsolutions.in	17
Figura 11 - Detalhes da extremidade do cabo de equipamento (https://www.xylem.com/) ..	17
Figura 12 - Ilustração do conceito do nível económico de Perdas, Fonte: Gomes (2011).....	21
Figura 13 - Representação esquemática de um SDA, retirado da sebenta da disciplina de Projeto Assistido por Computador em Hidráulica Urbana, Universidade de Coimbra,2021	22
Figura 14 - Rácio de satisfação do consumo em função da pressão. Fonte: Muranho (2012)	30
Figura 15 Localização da ZMC da Malavada obtidas com a utilização do do software Qgis	35
Figura 16 - Água consumida vs água que entra na ZMC	37
Figura 17 – Caudal mínimo noturno da Zona de medição e controlo	39
Figura 18 - Geofone (em cima à esquerda), Detecção da fuga em cima à direita, Caudalímetro em baixo.....	40
Figura 19 - Exemplo de informação contida na tabela de atributos do sistema SIG.....	41
Figura 20 - Cadastro da Rede no software QGIS	44
Figura 21 - Modelo no software Epanet	44
Figura 22 - Diagrama nº1, diagrama genérico.....	46
Figura 23 - Diagrama nº2, diagrama com base nas águas de Coimbra	46
Figura 24 - Diagrama nº3, que representa melhor os consumos existentes	46
Figura 25 - Correlação do caudal instantâneo real e o caudal instantâneo do modelo.....	49
Figura 26 - Caudal da rede para a válvula V0 fechada	50
Figura 27 - Localização das válvulas V0, V1, V2 e V3	51
Figura 28 - Step-test no Epanet Waternetgen.....	51

Figura 29 - Caudal com válvulas abertas vs Caudal com válvula V1, V2 e V3 fechadas	52
Figura 30 - Nós com consumo a vermelho e nó/conduto analisados a verde.....	56
Figura 31 - Distribuição das velocidades e pressões às 2h30.....	57
Figura 32 - Nós com pressões superiores ao máximo regulamentar	57
Figura 33 - Valor de referência para o indicador Op23, de acordo com a ERSAR	58
Figura 34 - Valores de referência do indicador Op24 retirados do Guia da ERSAR.....	59
Figura 35 - Pontos na rede que não respeitam a pressão máxima	61
Figura 36 - Pressão com duas VRPs	61

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Componentes do balanço hídrico.....	10
Quadro 2.2 - Componentes do Caudal mínimo noturno	12
Quadro 2.3 - Indicadores de desempenho	18
Quadro 2.4 - DDA vs PDA adaptado e retirado de Baek et al. (2010)	25
Quadro 3.1 - Balanço hídrico da AC em 2020, adaptado de Relatório e contas , AC 2020. .	36
Quadro 3.2 - Balanço hídrico na ZMC de estudo	37
Quadro 3.3 - Principais grandezas a considerar no modelo	41
Quadro 3.4 - Propriedades essenciais das condutas	42
Quadro 3.5 - Propriedades essenciais dos nós	42
Quadro 3.6 - Propriedades essenciais das válvulas	42
Quadro 3.7 - Cálculo da perda por nó	47
Quadro 3.8 - Coeficientes de Burst e Background.....	47
Quadro 3.9 - Resultados do “step-test” no modelo	52
Quadro 4.1 - Resultados do modelo para o Cenário I.....	53
Quadro 4.2 - Resultados do modelo para o Cenário II.....	54
Quadro 4.3 - Resultados do modelo para o Cenário III	55
Quadro 4.4 - Indicador de desempenho operacional por percentagem do número de ramais	58
Quadro 4.5 - indicador Op24.....	58
Quadro 4.6 - Indicador WR1	59
Quadro 4.7 - Perdas antes e depois do melhoramento	61

SIMBOLOGIA

ΔQ , variação de caudal;

A, área da secção transversal;

A13, consumo autorizado não faturado [m^3], utilizado no cálculo do **Fi47**;

A15, volume em metros cúbicos das perdas de água, utilizado no cálculo dos indicadores operacionais;

A18, Perdas aparentes [m^3], utilizado no cálculo do **Fi47**;

A19, água que entra no sistema, utilizado no cálculo do indicador de ineficiência na utilização dos recursos hídricos [m^3];

A21, água não faturada, utilizada no cálculo do indicador **Fi46**;

A3, volume em metros cúbicos das perdas reais, utilizado no cálculo do indicador de ineficiência na utilização dos recursos hídricos [m^3];

C24, número de condutas;

C25, comprimento médio dos ramais [m];

C8, comprimento das condutas [Km];

D34, pressão média de operação [KPa];

Fi46, **Fi47**- indicadores económico-financeiros;

G5- custos correntes [€], utilizado no cálculo do **Fi47**;

G57- tarifa média para consumidores diretos [€], utilizado no cálculo do **Fi47**;

G58- Custo unitário assumido das perdas reais [€], utilizado no cálculo do **Fi47**;

H14- duração do período de referência, utilizado no cálculo dos indicadores operacionais;

N- Número;

Op23, **Op24**, **Op27** e **Op29**- indicadores operacionais;

P_i^{\min} - Pressão mínima no ponto *i*;

P_i^{ref} - Pressão de referência no ponto *i*;

P_i - pressão no ponto *i*;

q- Solicitação nodal;

q_i^{req} - Caudal requerido no nó *i*;

q_k^{esc} - Caudal escoado através da fuga;

$Q_{entrada}$ - caudal de entrada;

Q_{ij} - é o caudal existente na conduta que liga os nós i e j;

Q_{saida} - caudal de saída;

R_i - constante da expressão para o calculo da perda de carga;

t- período de referencia;

WR1- indicador da ineficiência na utilização dos recursos hídricos;

ABREVIATURAS

AC- Águas de Coimbra;

APA- Agência portuguesa do ambiente;

CMN- Caudal mínimo noturno;

DDA- Demand Driven Analysis;

EM- Empresa municipal;

ERSAR- Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos;

IBNET- International Benchmarking Networking;

IPMA- Instituto Português do Mar e da Atmosfera;

IRAR- Instituto Regulador de Águas Residuais;

IWA- International Water Association;

IWSA- International Water Supply Association;

LNEC- Laboratório nacional de engenharia civil;

NEP- Nível económico de perdas;

PDA- Pressure Driven Analysis;

PEAD- Polietileno de Alta Densidade;

PEBD- Polietileno de Baixa Densidade;

PVC- Policloreto de vinil;

RGSPDAR- Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais;

SDA- Sistema de distribuição de água;

VRP- Válvula redutora de pressão;

ZMC- Zona de monitorização e controlo;

1 INTRODUÇÃO

1.1 A necessidade de reduzir as perdas de água

A água é um recurso vital, independentemente da parte do mundo em que vivamos. A água potável, não é apenas indispensável para a vida e para a sobrevivência humana, também é um produto primário importante para a produção industrial e agrícola.

Posto isto, a disponibilidade de água potável está diretamente ligada ao nosso bem-estar, à nossa sobrevivência e prosperidade enquanto sociedade. No entanto, a água potável é um recurso limitado, em alguns lugares do mundo chega a ser escassa, e mudanças globais, como crescimento populacional, desenvolvimento económico, migração, urbanização e alterações climáticas, colocam os recursos hídricos sobre pressão, assim como as infraestruturas que fornecem água potável aos cidadãos, empresas, indústrias e instituições.

A enorme quantidade de água perdida devido a fugas em algumas redes urbanas de distribuição de água e os volumes de água indevidamente distribuídos podem agravar a situação de abastecimento de água, especialmente nos países em desenvolvimento e em transição.

Na data presente em que esta dissertação se encontra a ser escrita (2022), o Instituto Português do Mar e da Atmosfera(IPMA) classificou 67,9% do território que se encontrava em seca severa, 28,4% em seca moderada e 3,7% em seca extrema, segundo o IPMA, (Salgueira et al, Relatórios Científicos e Técnicos do IPMA-Série Digital, 2022) presenciamos o ano mais seco desde que há registos(desde 1931), numa altura em que se torna necessário mergulhar a fundo na fase de transição energética tentando alterar comportamentos e modelos de negócio para realidades mais sustentáveis, abrandando assim mudanças que ameaçam a subsistência do planeta que conhecemos.

No entanto, não é só um problema a nível nacional, com base num estudo que abrange quarenta empresas de abastecimento de água, no Sudeste Asiático e a base de dados IBNET sobre o desempenho das empresas de abastecimento de água que abrange mais de 900 empresas de abastecimento nos países em desenvolvimento, estimando-se valores globais de perdas de água entre os 40-50%(Li et al,2019).

1.2 Motivação e objetivos

É importante analisar as fugas e perdas de água de um sistema de distribuição de água, pois as mesmas colocam problemas significativos aos serviços públicos. Falhas nas condutas, como mau funcionamento dos acessórios e contribuem para perdas significativas de água potável que, por sua vez, se traduzem em perda de receitas.

As fugas de água podem também resultar no aumento do nível das águas subterrâneas, danos para propriedades adjacentes, e possível contaminação do abastecimento de água.

Os serviços públicos municipais reconhecem estes problemas, no entanto, o tempo e a falta de dinheiro impedem muitas vezes de os resolver. Logo, minimizá-los é do interesse das entidades gestoras a redução das perdas, é do interesse do consumidor, uma vez que implica menores gastos e também é do interesse do ambiente e da qualidade do meio hídrico. A presente dissertação tem como objetivos:

- O levantamento de técnicas e conhecimento no âmbito das fugas e perdas em redes de distribuição;
- A construção de um modelo de simulação da ZMC, utilizando modelos de simulação computacional com base no consumo e na pressão;
- O melhoramento da mesma, avaliando o impacto no volume de fugas para tal;

Esta dissertação conta com a colaboração da AC, EM e com a participação do autor numa visita técnica de deteção de fugas de água. Da colaboração com AC, resultou a análise da ZMC Malvada, estudo que contém pesquisa de fugas no terreno, simulação hidráulica computacional e um estudo de gestão de pressão com vista à redução de perdas de base.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor compreensão da presente dissertação apresenta-se de seguida uma explicação geral dos assuntos tratados em cada capítulo.~

Capítulo 1

Consiste no presente capítulo, que serve como uma introdução geral do problema em causa, bem como apresentação dos objetivos principais desta dissertação.

Capítulo 2

Neste capítulo, procede-se à definição de perdas aparentes e reais de água e fatores que as influenciam bem como as consequências destas numa perspetiva da entidade gestora.

Faz-se um levantamento das técnicas existentes de deteção de perdas de água para uma ZMC, assim como deve ser feito o subzonamento de uma ZMC. Apresenta-se o Balanço Hídrico e explica-se a importância para as perdas de água do caudal mínimo noturno, bem como os principais indicadores a considerar para o mesmo caso. Define-se o nível económico de perdas e as suas condicionantes, o que é um sistema de distribuição de água e que modelos de simulação existem para o mesmo, faz-se uma comparação da análise DDA com a análise PDA e explicitam-se as formulações matemáticas existentes para um dado sistema de abastecimento de água bem com os métodos numéricos necessários para a resolução das mesmas.

Explicam-se as bases de funcionamento do software escolhido para o estudo de caso Epanet e a sua extensão Waternetgen. Finalmente, discute-se como a gestão adequada de pressão pode diminuir as perdas de água numa dada rede.

Capítulo 3

Neste capítulo são apresentados os objetivos específicos no âmbito desta dissertação de modelação e melhoramento do desempenho de uma ZMC. Em primeiro lugar, como resultado da saída técnica, demonstra-se as técnicas utilizadas pela entidade gestora “Águas de Coimbra” na deteção de fugas e perdas de água. É apresentado também, o estudo de caso na ZMC considerada. De seguida, estabelece-se um balanço hídrico de forma a comprovar que existem fugas e finalmente monta-se um modelo hidráulico em que se realiza um diagnóstico da rede e reflete-se que pontos podem ser melhorados.

São ainda apresentados os resultados do modelo com melhoramentos, obtidos com a simulação hidráulica com recurso ao software Epanet e à sua extensão Waternetgen.

Capítulo 4

Neste capítulo são analisados os dados resultantes do modelo para os cenários considerados, também é apresentada uma proposta de melhoramento da rede e analisam-se os seus resultados.

Capítulo 5

Capítulo final, em que se podem encontrar as conclusões do trabalho realizado, principais resultados e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Gerais

Este segundo capítulo, têm como objetivo esclarecer alguns conceitos gerais e particulares de fugas e perdas de água, reais e aparentes em sistemas de abastecimento de água, assim como a conceção, implementação e gestão de ZMC e a sua modelação matemática, passando por técnicas para deteção de fugas e perdas de água, indicadores de desempenho e o conceito de NEP, terminando com métodos de controlo de fugas e perdas.

2.2 Perdas de água

Todos os sistemas de água no mundo, possuem um certo volume de perdas, tais perdas são impossíveis de eliminar completamente, mesmo nos sistemas de distribuição mais recentes. possuem sempre um volume mínimo de perdas. No entanto, é possível gerir tais perdas dentro dos limites económicos.

Podemos definir perdas de água num sistema como a diferença entre o volume de água que entra no sistema e o seu consumo autorizado. Pode ser feito o cálculo de perdas para todo um sistema ou subsistema, quer seja de água não tratada, sistema de adução, sistema de distribuição ou zonas do sistema de distribuição.

A IWA define duas categorias em que as perdas de água podem ser definidas:

- Perdas reais
- Perdas aparentes

2.2.1 Perdas de água reais

As perdas reais são perdas físicas de água que ocorrem devido a fugas nas condutas, ramais e nos reservatórios, este tipo de perda afeta a disponibilidade de caudal da rede e consequentemente afeta os recursos hídricos disponíveis.

Estas perdas podem ocorrer devido a várias causas, tais como: desgaste das tubagens, condições de assentamento, características das tubagens, problemas nos acessórios de ligação, pressões nas redes e uma grande diferença de pressões diurnas para pressões noturnas. Podem também ser visíveis, de fácil deteção ou invisíveis, de difícil deteção.

Na Figura 1, apresenta-se um sistema de distribuição com os diferentes locais onde normalmente se registam as perdas, estes valores na gestão de um sistema de abastecimento devem ser tomados em conta para a sua otimização de eficiência e eficácia.

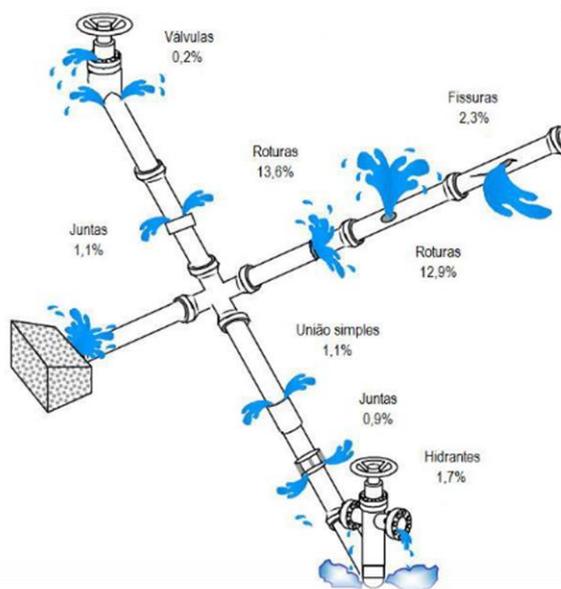


Figura 1 - Perdas reais na rede de distribuição, Fonte: Programa nacional de combate ao desperdício de água- (Alves et al,1999.)

Dados da ERSAR 2020, dados disponíveis à data da elaboração desta dissertação, dizem que por ano acontecem 4% de perdas, em média de sistemas de abastecimento por alta e 30% em média de perdas reais de sistemas de baixa, ou seja, ainda nos dias atuais é impossível eliminar estas perdas.

As perdas reais podem ainda ser subdivididas em três tipos de perdas, de acordo com Thornton:

- Fuga detetada: aparecem frequentemente à superfície, normalmente detetada por trabalhadores ou pelo público em geral.

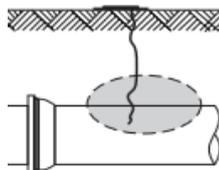


Figura 2 - Fuga detetada, retirado de Thornton *et al.*, 2008

- Fuga não detetada: Não aparece à superfície, mas pode ser detetada usando equipamento acústico.

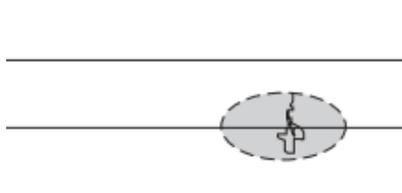


Figura 3 - Fuga não detetada, retirado de Thornton *et al.*, 2008

Fuga de fundo: Não são detetadas e não se conseguem detetar usando equipamentos tradicionais

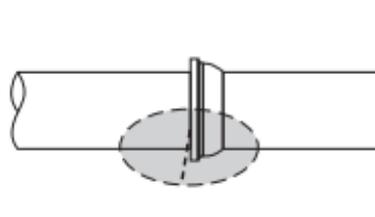


Figura 4 - Fuga de fundo, retirado de Thornton *et al.*, 2008

Fatores que afetam as perdas reais

Um conjunto de fatores são determinantes em termos de aplicação de estratégias alternativas para o controlo das perdas de águas reais, de seguida é apresentada uma lista de possíveis fatores que influenciam as perdas reais:

- O estado das condutas e outros componentes;
- O material das condutas;
- Frequência de fugas e roturas;
- A pressão de serviço média;
- A densidade e comprimento médio de ramais;
- A localização do medidor domiciliário no ramal;
- O comprimento total das condutas;
- O tipo de solo e as condições do terreno, relevantes sobretudo no modo como se torna aparente ou não a ocorrência de fugas;
- A percentagem de tempo em que o sistema está pressurizado.

Fatores discutidos, detalhadamente em IWA (2000).

2.2.2 Perdas de água aparente

De acordo, com Thornton, as perdas de água aparente contabilizam todas as imprecisões associadas às medições de água produzidas e da água consumida, devido quer a qualidade de água, presença de ar nas condutas, ausência de calibração de contadores, existência de reservatório domiciliários, dimensionamento e instalação incorreta de contar, assim como métodos de leitura e faturação ineficientes e ainda o consumo não autorizado, por furto ou uso ilícito.

Fatores que afetam as perdas aparentes:

- Existência de ligações ilícitas;
- Erros de medição dos contadores em condições normais de medição;
- Erros de medição por deficiente dimensionamento ou instalação;
- Erros de leitura ou registo;
- Erros de medição por avaria.

2.3 Zonas de medição de controlo

Uma vez que é necessário a resolução de problemas ao nível de gestão, exploração de sistemas de abastecimento de água, além da otimização dos recursos disponíveis e como tal a redução das perdas de água, é necessário a divisão em captação, tratamento, adução, armazenamento e distribuição, que permite analisar individualmente cada componente do sistema e definir o tipo de intervenção mais adequado, quer a nível preventivo ou interventivo.

Assim, a implementação de Zonas de Medição e Controlo (ZMC), sectorização do sistema em subsistemas de menor dimensão, permite contribuir para esses objetivos e a simplificação do problema em partes.

2.3.1 Conceção e Implementação de Zonas de medição de controlo

Cada ZMC deve ser concebida considerando não só a garantia de pressão mínima de serviço, mas também a pressão máxima e a manutenção de um nível de pressões estáveis.

Devem sempre que possível, reduzir o número de extremidade e ter se em conta as condições de fronteira do sistema, assim como os grupos elevatórios, reservatórios e as válvulas redutoras de pressão.

Deve-se tentar isolar partes de uma rede com comportamento hidráulico semelhante, padrões de consumo iguais, estados de conservação das condutas similares e estabilidade dos parâmetros da qualidade de água.

A implementação consiste no isolamento e monitorização contínua da pressão, dentro e fora da ZMC, utilizando o processo conhecido como Zero Pressure Test, que permite verificar a integridade da ZMC, verificando se ficou alguma conduta por seccionar, ou alguma válvula danificada ou por fechar na zona de fronteira. No fundo este procedimento, consiste em monitorizar a pressão continuamente dentro da ZMC até zero, caso a pressão baixe rapidamente, signifique que a zona considerada está isolada, caso contrário poderá existir uma ligação desconhecida dentro da rede, ou uma perda de água.

2.4 Step-Test

Este método baseia-se no registo contínuo do caudal à entrada do sistema ou ZMC e no fecho progressivo de válvulas de secionamento de jusante para montante, na direção do medidor de caudal. É usado para determinar volumes exatos de perdas de água. Esta técnica requer a utilização de uma série de passos curtos de isolamento de secções de tubagem, fechando as válvulas uma a uma.

A eficácia desta técnica depende do instante/sequência do fecho progressivo de válvulas, sendo que se deve começar sempre pela válvula mais afastada do medidor de caudal. À medida que a área isolada vai sendo incrementada, o registo de caudal à entrada do sistema, tende para zero.

Durante o teste, o caudal através do contador de água ou contador temporário é observado e os tempos em que cada secção da tubagem é isolada são anotados. Uma grande diminuição do caudal, ou "degrau", indica uma fuga na secção da tubagem que acabou de ser isolada.

No entanto, há que ter em consideração as desvantagens associadas a este procedimento, designadamente, o corte do abastecimento de água aos utilizadores a jusante e a possibilidade de infiltração de águas subterrâneas devido à depressurização da rede.

O período noturno, durante o qual os consumos são mais baixos e as pressões na rede mais elevadas, aparenta ser a melhor altura para realizar estas operações. Além disso, o impacto causado à população e à circulação rodoviária também são substancialmente reduzidos durante o período noturno (Gomes,2011). Na Figura 5, encontra-se um exemplo de um "step-test" em que se verifica que quando existe um desnível ou "degrau" no gráfico existe também uma fuga.

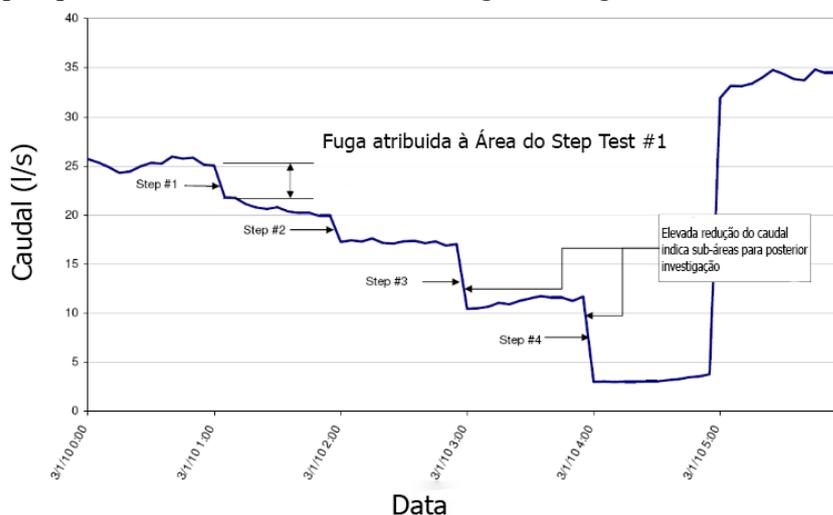


Figura 5 - Exemplo gráfico obtido de um "step-test", adaptado de <https://nwwaterservices.ie/water-services/step-testing>

2.5 Balanço hídrico

Em hidrologia, o balanço entre as entradas e as saídas do sistema é definido como balanço hídrico, pelo que aplicando este conceito a sistemas de distribuição Lambert & Hirner (2000) da IWA, introduziu um meio de estimar perdas de água.

Para este efeito, é necessário contabilizar todos os volumes de água adicionados ou subtraídos do sistema de distribuição até ao ponto de contagem do cliente, logo o volume de entrada do sistema e consumo autorizado devem ser medidos com a maior precisão possível.

O Quadro 2.1, ilustra o procedimento de cálculo para o balanço hídrico, de acordo com a terminologia recomendada pela IWA (Lambert e Hirner,2000; Alegre et al., 2004).

Os passos para o cálculo da água não faturada e as perdas de água são os seguintes(Guia do IRAR):

- **Passo 0**, Definir os limites exatos do sistema a auditar e as datas de referência (para um período de um ano).
- **Passo 1**, Determinar o volume de água entrada no sistema e introduzir na coluna A.
- **Passo 2**, Calcular o consumo faturado medido e o consumo faturado não medido e incluir na coluna D e introduzir o total destes como consumo autorizado faturado, coluna C, e como água faturada, coluna E.
- **Passo 3**, Determinar o volume de água não faturada, coluna E, subtraindo a água faturada à água que entra no sistema , coluna A.
- **Passo 4**, Definir o consumo não faturado medido e o consumo não faturado não medido na coluna D e registar o total em consumo autorizado não faturado na coluna C.
- **Passo 5**: Somar os volumes correspondentes ao consumo autorizado faturado e ao consumo autorizado na Coluna C e introduzir o resultado como consumo autorizado, coluna B.
- **Passo 6**: Calcular as perdas de água, coluna B, como a diferença entre a água que entra no sistema (coluna A) e o consumo autorizado (coluna B.)
- **Passo 7**: Avaliar, usando os melhores métodos disponíveis, as parcelas do uso não autorizado e dos erros de medição (coluna D), somá-las e registar o resultado em perdas aparentes (coluna C).
- **Passo 8**: Calcular as perdas reais, coluna C, subtraindo as perdas aparente às perdas de água , coluna B.
- **Passo 9**: Avaliar as parcelas das perdas reais, coluna D usando os melhores métodos-disponíveis como por exemplo: análise de caudais noturnos, dados de medição zonada, cálculo de frequência/caudal/duração das roturas, modelação de perdas baseados em dados locais sobre o nível base de perdas. Somar essas perdas e comparar com o resultado das perdas reais, coluna C.

Quadro 2.1 - Componentes do balanço hídrico

A	B	C	D	E
Água que entra no sistema [m ³ /ano]	Consumo autorizado [m ³ /ano]	Consumo autorizado faturado [m ³ /ano]	Consumo faturado medido (incl. água exportada) [m ³ /ano]	Água faturada [m ³ /ano]
			Consumo faturado não medido [m ³ /ano]	
		Consumo autorizado não faturado [m ³ /ano]	Consumo não faturado medido [m ³ /ano]	Água não faturada (perdas comerciais) [m ³ /ano]
			Consumo não faturado não medido [m ³ /ano]	
	Perdas de água [m ³ /ano]	Perdas Aparentes [m ³ /ano]	Consumo não autorizado [m ³ /ano]	
			Perdas de água por erros de medição [m ³ /ano]	
		Perdas Reais [m ³ /ano]	Fuga nas condutas de adução e/ou distribuição [m ³ /ano]	
			Fugas e/ou extravasamento nos reservatórios de adução e/ou distribuição [m ³ /ano]	
	Fugas nos ramais de ligação a montante do ponto de ligação [m ³ /ano]			

De acordo com o quadro anteriormente apresentado a água que entra no sistema, consiste no volume total anual que chega ao sistema que está a ser estudado, esse volume pode ser obtido a partir de captações de água bruta e/ou transferida de outros sistemas de adução de outras entidades gestoras (Alegre et al., 2004).

O consumo autorizado, indicado no Quadro 2.1, consiste no volume anual de água faturado ou não faturado, podendo ser medido ou não medido, fornecido como a água exportada para outros sistemas, a consumidores registados, ou a consumidores autorizados. O volume dos “consumos autorizados faturados”, consistem no volume em que a entidade gestora obtém receita, por sua vez “os consumos autorizados não faturados”, correspondem à água que a entidade gestora autoriza o consumo, mas do qual não obtém qualquer receita (Alegre et al., 2004). O volume anual correspondente às perdas de água é obtido a partir da diferença entre o volume total de “água que entra no sistema” e o seu “consumo autorizado”.

No entanto, apesar do balanço hídrico ser um excelente método de avaliação quantitativo sempre que se pretenda comparar a eficiência quer entre partes do mesmo sistema quer entre entidades gestoras este instrumento não deve ser utilizado, uma vez que não considera as características do próprio sistema, como o material, comprimento das condutas, a manutenção, estado de conservação, a topografia, as solicitações do sistema de acordo com (Gomes,2011), assim de acordo com (Marques et al., 2005) para comparar o desempenho entre entidades gestoras, os indicadores de desempenho serão mais adequados .

2.6 Caudal mínimo noturno

O estudo do CMN, depois da implementação de ZMC e subdivisão de redes em zonas discretas com limites identificados, permite também constatar a existência ou não de fugas ou usos indevidos de água, pois durante este período, poucos consumidores se encontram ativos.

Assim, o estudo do caudal mínimo noturno consiste na interpretação do caudal durante o período noturno, uma vez que os consumos existentes são menores (Alegre et al.,2005). Esses consumos normalmente são facilmente medidos e/ou estimados (Gomes, 2011) e facilmente se chega ao principal objetivo do método, conseguir fazer uma estimativa das várias componentes de perdas.

O período noturno em que se estuda CMN, pode-se definir entre a 1 e as 5 horas da manhã, em zonas predominantemente residenciais, a variação dos seus consumos não se mostra significativa. Por sua vez, quando se verifique que existe uma indústria em funcionamento ou reservatórios que reestabelecem os seus níveis durante este período, ou seja tenham consumos é aconselhável definir uma hora como período mínimo de referência e realizar a monitorização para no mínimo 7 dias consecutivos, devido ao facto de cada dia da semana poder apresentar o seu consumo próprio (Gomes, 2011).

Ainda na análise do CMN, um aumento inesperado e excessivo do volume de água medido à entrada do sistema durante este período de baixo consumo, poderá significar a existência de uma ligação clandestina ou rotura, permitindo que seja localizada e reparada com brevidade, tanta quanto possível, também é possível estimar as perdas noturnas para um período diurno.

Sempre que houver informação disponível, caudal medido nos contadores e perdas a montante do ponto de entrega por exemplo, o CMN pode ser desagregado em várias componentes obtendo assim mais informação sobre as perdas no sistema.

As diferentes componentes do CMN estão discriminadas no Quadro 2.2.

Quadro 2.2 - Componentes do Caudal mínimo noturno

Caudal mínimo noturno [m ³ /h]	Caudal medido ou estimado nos contadores/propriedade [m ³ /h]	Consumo médio e/ou estimado [m ³ /h]	Grandes consumos não domésticos [m ³ /h]
		Perdas no ramal de ligação a jusante do ponto de entrega [m ³ /h]	Pequenos não consumos domésticos [m ³ /h]
			Consumos domésticos [m ³ /h]
	Perdas a montante do ponto de entrega [m ³ /h]	Perdas no ramal de ligação a montante do ponto de entrega [m ³ /h]	Perdas reais [m ³ /h]
		Perdas na rede de distribuição [m ³ /h]	
		Serviço de manutenção, lavagem de filtros e limpeza de reservatórios [m ³ /h]	

De acordo com *UK Water Industry* (Gomes,2011):

- **Caudal medido e/ou estimado no ponto de entrega:** consiste no caudal medido e/ou estimado, durante o período de menor consumo, no ponto de entrega;
- **Ponto de entrega,** corresponde aos limites de propriedade e/ou contadores;
- **Perdas a montante do ponto de entrega:** corresponde à diferença entre o caudal mínimo noturno e o caudal medido e/ou estimado no ponto de entrega;
- **Consumo medido e/ou estimado:** somatório do consumo autorizado medido e/ou estimado, no ponto de entrega;
- **Perdas Reais:** correspondem à diferença entre o caudal mínimo noturno e o consumo medido e/ou estimado;
- **Perdas no Ramal de ligação a jusante do ponto de entrega:** diferença entre os caudais medidos e/ou estimados no ponto de entrega e os consumos medidos e/ou estimados.

2.7 Técnicas para deteção de fugas e perdas de água

Uma vez que é detetado a ocorrência de um nível elevado de perdas torna-se necessário proceder a deteção e localização das suas causas. Para identificar o local onde se deve dirigir a equipa de inspeção, pode-se recorrer ao subzonamento e de seguida, localizar o local exato da fuga, utilizando equipamentos específicos.

2.7.1 Subzonamento

Quando são atingidos níveis de perdas acima do esperado, pode se recorrer ao Subzonamento, que consiste no isolamento de subzona de uma ZMC, não sendo assim necessário o uso de equipamentos específicos como o de deteção acústica.

O uso deste método passa pelo fecho de válvulas que delimitem subzonas, mas que também sejam compatíveis com a disposição os medidores, ou seja também é necessário ter medidores nas fronteiras das subzonas possibilitando a medição de caudais na entrada da subzona.

2.7.2 Deteção exata de fugas

Uma vez detetado a subzona ou troço da rede com fuga de caudal, é necessário a sua localização exata de forma a minimizar os trabalhos de intervenção e escavação. Assim, a deteção exata de fugas pode ser obtida por controlo ativo de perdas e por controlo passivo de perdas.

O **controlo ativo de perdas**, consiste em ações de deteção e localização de fugas não visíveis, por métodos acústicos e de pesquisa. São trabalhos bastantes dependentes da perícia, experiência e capacidade de análise do operador.

O **controlo passivo de perdas**, consiste na realização de reparações quando as fuga de água afloram á superfície e são comunicadas à entidade gestora.

Resumidamente, o controlo passivo acaba por ter um volume perdido claramente maior, não só pelo tempo decorrido até ao afloramento, mas também pela existência de pequenas fugas, nas quais não ocorre o afloramento da água, e, assim, a perda de água é contínua.

2.7.3 Equipamento de deteção

Existem vários equipamentos que são essências na localização de fugas, independentemente de elas serem visíveis ou não, destacam-se assim;

- **Traçadores químicos**

A injeção de traçadores é utilizada para localizar com precisão fugas nas condutas. A injeção de gases está mais vulgarizada e requer detetores de gás no pavimento sobre a conduta, os mais usuais são o hélio, hidrogénio industrial ou hexafluoreto de enxofre. A vantagem da injeção de gás é a sua capacidade de detetar pequenas fugas em condutas de qualquer material, qualquer diâmetro e a sua elevada precisão na definição do local da fuga (Farley e Hamilton 2008).

As principais desvantagens prendem-se com o seu elevado custo, a lentidão do processo e a dificuldade de detetar fugas na parte inferior da conduta (Li et al.2015).

- **Correlacionador de ruído**

Um correlacionador, Figura 6, consiste num dispositivo eletrónico projetado para detetar fugas em condutas de pressão, em que a localização da fuga aproximada é desconhecida. Dois sensores ou mais, são colocados em contato com o tubo em ambos os lados da conduta em que se suspeita que haja uma fuga, esses sensores registam e transmitem o som pelo rádio para a unidade de processamento. Depois, os ruídos gerados são usados para calcular a determinação exata de certos locais, onde existam a anomalia, ou seja, a fuga, correlacionando os ruídos que atingem os dois sensores e medindo a diferença de deslocamento de som na conduta para cada sensor.

Assim, o funcionamento do equipamento baseia-se no princípio da velocidade de propagação de som captado em dois pontos distintos da tubulação de acordo com a Figura 6.



Figura 6 - Correlacionador de ruído, à esquerda e o seu respetivo funcionamento na imagem à direita imagens retiradas de <http://www.sondeq.com.br>

- **Câmara de infravermelhos**

Apesar de raramente utilizado, pode ser utilizado uma técnica de termografia com radiação de infravermelhos ou sensores térmicos é um método alternativo que consiste filmar a superfície com uma câmara de infravermelhos, destas filmagens resultam imagens térmicas que realçam a diferença de temperatura no meio envolvente. Logo, quanto maior for a diferença de temperatura melhor será a imagem térmica.

Têm a vantagem de ser aplicado a qualquer diâmetro ou material de conduta, porém é afetado por diversos fatores, como a temperatura (Liemberger et al,2015).

- **Loggers acústicos**

Os Loggers acústicos, ver Figura 7, consistem numa solução de deteção de fugas através de ruído. São aparelhos acústicos que devem ser distribuídos ao longo da rede de forma regular, o seu funcionamento tem por base a medição do nível de ruído e a sua correlação entre si de forma a determinar as possíveis fugas. Colocam-se em pontos de medição ou hidrantes, permitindo a confirmação da existência de fugas nas redondezas, sendo necessário recorrer a outro equipamento para determinar o local exato.



Figura 7 - Loggers acústicos, imagem retirada do site <https://www.envirotech-online.com/>

- **Geofone**

Este equipamento, Figura 8, segue o princípio de deteção de sinal eletroacústico amplificado, consiste num amplificador e num filtro de ruído.

O equipamento ainda pode ser mecânico ou eletrónico, sendo, que a principal diferença é que o mecânico não possui um filtro de ruído, dificultando assim o processo. Deve ser colocado no solo ao longo da zona onde passa a conduta de abastecimento em intervalos regulares de um metro ou dois, até ser identificado o local exato da fuga. O local é identificado escutando as alterações do ruído gerado pela fuga em função da proximidade com a sua localização, ou seja a fuga estará localizada onde a intensidade do som for maior.



Figura 8 - Geofone

- **Haste eletrónica de escuta**

É um equipamento (Figura 9) utilizado para obter um mapeamento inicial indicativo da fuga que será confirmado posteriormente através do uso do geofone e correlacionador de ruídos. Permite a deteção de fugas, com indicação visual e sonora da fuga.

Consiste numa vareta que contacta diretamente com pontos da rede de abastecimento, captando o som e vibrações produzidas pelas fugas e ajudando assim o operador a ouvir o som na rede, que são impercetíveis ao ouvido humano, a sua faixa de operação situa-se entre as frequências de sons de 200 a 1500 Hz. Em geral, deteta com facilidade fugas nas faixas de 600 a 800 Hz.



Figura 9 - Haste eletrónica de escuta retirada do site , <http://gaiatecsistemas.com.br/>

- **Radar de penetração do solo**

Os radares de penetração detetam cavidades no solo utilizando, a emissão de ondas, geralmente provocadas pela livre circulação de água proveniente de fugas á volta das condutas. Este procedimento consiste na emissão de ondas e, quando estas encontram perturbações no solo, refletem um padrão anormal, mostrando assim a informação da dimensão e da cavidade, a profundidade é determinada pelo tempo decorrido entre ondas transmitidas.

Este equipamento tem a vantagem de poder localizar fugas onde a correlação sonora não é uma opção viável, devido a existência de ruídos por bombas ou válvulas redutoras de pressão. No entanto, é uma tecnologia bastante dispendiosa (Gomes,2011).

- **Sistemas Sahara e SmartBall**

Os sistemas Sahara (Figura 10 e Figura 11) e Smartball são equipamentos intrusivos recentemente desenvolvidos que incluem sensores acústicos. Estes sistemas, são introduzidos no interior das condutas para registarem o ruído no interior da massa líquida. Estes sistemas são lançados numa secção e arrastados pela corrente, tendo assim a vantagem de ser irrelevante o material da conduta, o tipo de solo e o diâmetro da conduta. Têm também a vantagem do equipamento ser recuperado uma vez que emite um sinal eletromagnético que permite localizar o equipamento a superfície. No entanto, tem as limitações do material em que necessita de um

diâmetro mínimo de 50 mm, só funciona entre as gamas 1 Hz e 170 Hz, necessita de velocidade de escoamento superiores a 0,30 m/s .

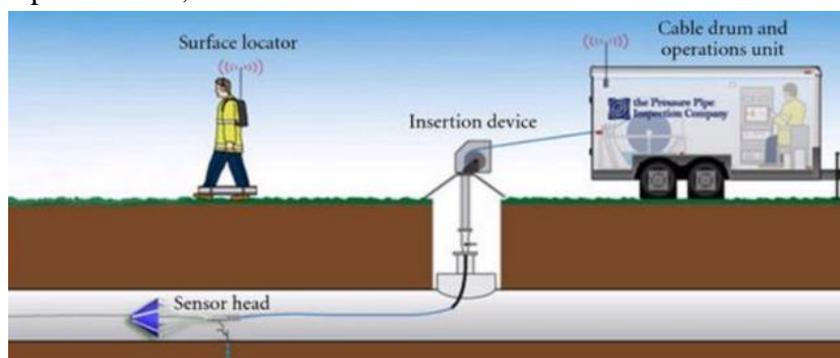


Figura 10 - Utilização do sistema Sahara, imagem retirada de <http://www.adoxsolutions.in>

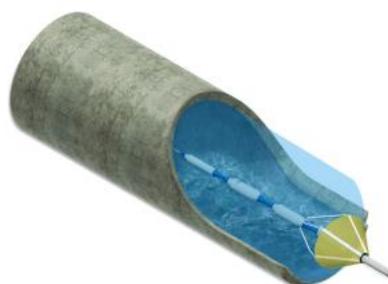


Figura 11 - Detalhes da extremidade do cabo de equipamento (<https://www.xylen.com/>)

2.8 Indicadores de desempenho

A então IWSA atual IWA, defendeu que, a associação deveria definir linhas guia sobre os indicadores a serem adotados no contexto do abastecimento de água e sobre a informação a recolher para a sua avaliação.

A IWA desenvolveu então um sistema de indicadores de desempenho para sistemas de abastecimento de água, que é considerado atualmente uma referência para a indústria da água.

Estes indicadores podem ser um conjunto valioso de instrumentos, a ser utilizados na gestão dos serviços de abastecimento de água, independente da região, das características climáticas, demográficas e culturais. Ainda de acordo com a IWA, os indicadores de desempenho são medidas normalizadas calculadas pela razão entre duas grandezas da mesma natureza, de onde resulta um rácio, ou de natureza distinta. No segundo caso, o denominador tem de ser uma quantidade estável no tempo, para permitir normalizar a medida (por exemplo o comprimento

total da rede e número de ramais), para assim permitir a comparação entre várias situações (Alegre, 2002).

Os indicadores de desempenho da IWA estão divididos em seis categorias (Gomes, 2011): *Indicadores de recursos hídricos; indicadores de recursos humanos; indicadores operacionais; indicadores de qualidade de serviço; indicadores económicos e financeiros.*

No Quadro 2.3, estão os respetivos indicadores e os seus códigos independentemente da estrutura organizacional.

Quadro 2.3 - Indicadores de desempenho

<i>Grupo de indicadores</i>	<i>Código de identificação</i>
Indicadores de recursos hídricos	WR
Indicadores de recursos humanos	Pe
Indicadores infraestruturais	Ph
Indicadores operacionais	Op
Indicadores de qualidade de serviço	QS
Indicadores económico-financeiros	Fi

Os **indicadores de recursos hídricos**, avaliam a eficiência e a eficácia da água captada ou adquirida a terceiros, os **indicadores de recursos humanos** procuram quantificar o desempenho dos trabalhadores e a sua produtividade. Por sua vez, os **indicadores de infraestruturas** caracterizam o desempenho da estrutura física do serviço de abastecimento de água, que quantificam a “folga” das infraestruturas existentes e as características gerais dos clientes servidos e revelam ainda as necessidades de investimento no serviço de abastecimento de água.

Ainda, os **indicadores operacionais** refletem o comportamento e os aspetos de funcionamento do serviço de abastecimento de água, permitindo avaliar o desempenho da sua gestão e as dificuldades a ela inerentes. Os **indicadores de qualidade de serviço**, traduzem a qualidade da água fornecida e a satisfação dos clientes, relativamente ao serviço de abastecimento de água.

Por fim, os **indicadores económicos e financeiros**, permitem quantificar o desempenho económico e financeiro do serviço de abastecimento de água, nomeadamente, as entradas e saídas do capital e os custos por função e tipo.

No caso do melhoramento de um sistema de distribuição relativamente as perdas de água interessa analisar os **indicadores operacionais** (Op,23 Op24 e Op29), os **indicadores de recursos hídricos** (WR1) e os económico-financeiros (Fi46 e Fi47).

O **indicador Op23** serve para fazer uma avaliação da perda de água por cada ramal, ou seja, analisam as perdas de água durante o período de referência em percentagem do número de ramais. (1)

$$\text{Op23} = \frac{\left[\left(\frac{A15}{H14} \right) \times 365 \right]}{C24} \quad (1)$$

Sendo,

A15, as perdas de água [m^3]

H14, duração do período de referência [t]

C24, o número de ramais

O **indicador Op24** avalia as perdas de água por comprimento de conduta (2)

$$\text{Op24} = \frac{A15}{\frac{H14}{C8}} \quad (2)$$

Sendo,

A15, as perdas de água [m^3]

H14, duração do período de referência [t]

C8, Comprimento de condutas [Km]

O indicador **Op29** avalia o índice infraestrutural de fugas. (3)

$$\text{Op29} = \frac{10 \times Op27}{D34 \left[18 \times \frac{C8}{C24} + 0,7 + 0,025 \times C25 \right]} \quad (3)$$

Sendo,

Op27, Indicador de perdas reais por ramal [l/ramal/dia]

C8, Comprimento das condutas [Km]

C24, Número de condutas

C25, Comprimento médio dos ramais [m]

D34, Pressão média de operação [KPa]

O indicador **WR1**, avalia a ineficiência na utilização dos recursos hídricos ao quantifica as perdas reais em percentagem do volume total de entrada no sistema durante o período de referência. (4)

$$\mathbf{WR1} = \frac{A19 \times 100}{A3} \quad (4)$$

Sendo,

A19, Perdas Reais [m^3]

A3, A água que entra no sistema [m^3]

O indicador **Fi46**, avalia a água não faturada em termos de volume, ou seja percentagem de água não faturada que entra no sistema. (5)

$$\mathbf{Fi46} = \frac{A21}{A3} \times 100 \quad (5)$$

Sendo,

A3, A água que entra no sistema [m^3]

A21, Água não faturada [m^3]

O indicador **Fi47** avalia a água não faturada em termos de custo, quantifica o valor de componentes de água sem proveito em percentagem dos custos correntes anuais durante o período de referência.(6).

$$\mathbf{Fi47} = \frac{[A13 + A18] \times G57 + A19 \times G58 \times 100}{G5} \quad (6)$$

Sendo,

A13, Consumo autorizado não faturado [m^3]

A18, Perdas aparentes [m^3]

A19, Perdas reais [m^3]

G57, Tarifa média para consumidores diretos [€]

G58, Custo unitário assumido das perdas reais [€]

G5, Custos correntes [€]

2.9 Nível económico de perdas

Quando uma entidade gestora atinge o valor mínimo da soma do valor de custo da água perdido no sistema de abastecimento e o custo das atividades realizadas, pode-se dizer que atingiu o nível económico de perdas ótimo

Assim, o limite de investimento em redução de perdas é estabelecido quando o mesmo deixa de ser economicamente viável, uma vez que ultrapassa o custo da água que se perde.

Este conceito é aplicado tanto às perdas reais como às aparentes, sendo que o NEP só é alcançado quando ocorrem tanto ao nível das perdas reais como das perdas aparentes.

Na Figura 12, encontra-se representado de forma simplificado o conceito de NEP, em termos de custos total em relação com nível de perdas de água em m³/dia.

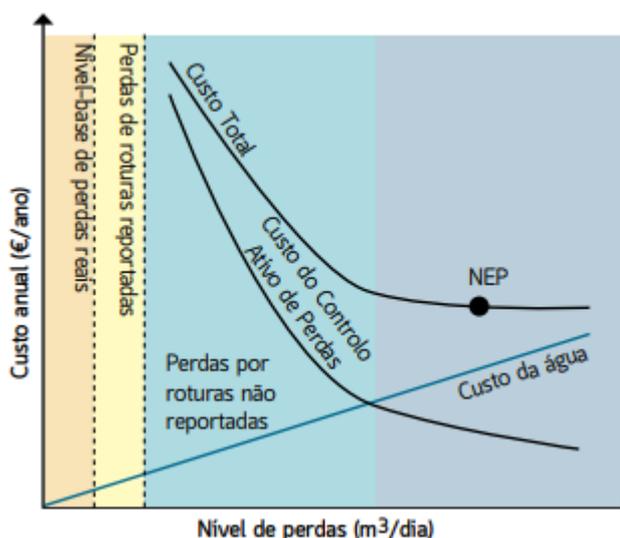


Figura 12 - Ilustração do conceito do nível económico de Perdas, Fonte: Gomes (2011)

Sempre que aumenta o nível de perdas, o custo da água que se perde aumenta linearmente, ao mesmo tempo que o custo do controlo ativo de perdas de água diminui.

Existe um ponto ótimo em que o custo total das atividades de deteção de fugas é igual ao custo da água, este ponto é o ponto do nível económico dos recursos que deverão ser dirigidos à deteção de fugas, ou seja, abaixo deste não é lucrativo e acima deste ponto não estaríamos a otimizar o controlo ativo de perdas.

Resumidamente, o NEP é o valor mínimo económico em que os custos se equiparam aos de controle de perdas. É assim, uma ferramenta útil para companhias e entidades gestora, pois permite justificar investimentos e prioridades estratégicas de gestão de perdas, quando os recursos financeiros são escassos.

2.9.1 Condicionantes

Segundo (Oliveira et al ,2013), o valor deste indicador associado a uma entidade gestora varia ao longo do tempo e depende de variáveis como: taxa de rotura, da rapidez de reparações, qualidade de reparações, estado dos ativos da rede, o esforço desenvolvido pela

entidade gestora para o controlo ativo de fugas. Consequentemente, é recomendável que o cálculo do NEP das entidades gestoras seja reavaliado regularmente.

Ainda sobre a Figura 12, nem sempre obtemos esta forma de curvas sendo que estas podem variar ao longo do tempo assim é necessário quantificar o máximo de variáveis para garantir fiabilidade no cálculo e definição de objetivos base da estratégia de controlo ativo de fugas.

2.10 Sistema de SDA

Entende-se por sistema de distribuição de água, a unidade parcelar do sistema de abastecimento de água constituída pelo conjunto de conduta e pelos elementos especiais, que assegura o transporte e a distribuição da água desde o(s) reservatório(s) de distribuição até aos utilizadores, em quantidade e pressão adequadas. (Sá Marques e José Sousa ,2014).

Um SDA pode ser representado por uma rede formada por um conjunto de nós interligados por ligações. Os nós da rede podem representar: 1) cruzamentos, junções ou derivações de condutas; 2) mudanças de material ou diâmetro das condutas; 3) pontos de medição; 4) pontos de consumo; 5) reservatórios de nível fixo ou variável e pontos de ligação a troços especiais, tal como bombas ou válvulas. Por sua vez, os troços da rede representam elementos tais como válvulas, grupos elevatórios e tramos de conduta, que interligam dois nós. (Muranho,2012), como se pode ver na Figura 13.

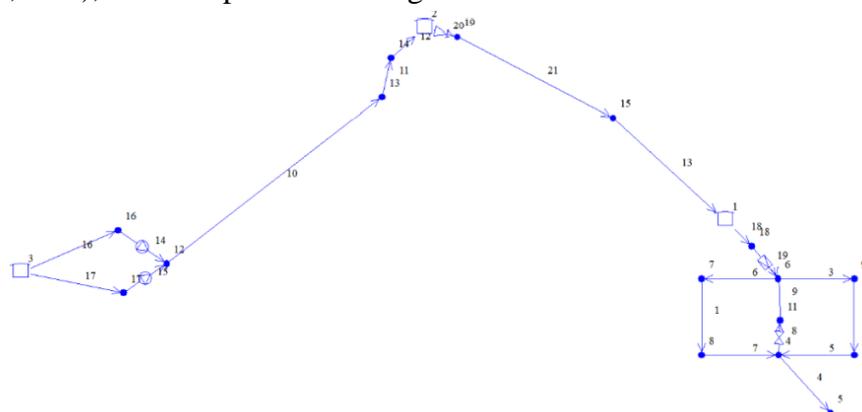


Figura 13 - Representação esquemática de um SDA, retirado da sebenta da disciplina de Projeto Assistido por Computador em Hidráulica Urbana, Universidade de Coimbra,2021

2.11 Modelos matemática e simulação hidráulica

A modelação matemática de simulação hidráulica consiste em estabelecer um modelo que permita reproduzir a realidade do sistema de distribuição de água, independentemente da dimensão e da sua complexidade, usando conceitos teóricos que regem o escoamento dos líquidos no interior das condutas, os padrões de consumo, os níveis operacionais dos

reservatórios, o modo de funcionamento de grupos elevatórios e válvulas de controlo e as perdas de água (Coelho et al, 2006).

De acordo com Sá Marques e Sousa, a modelação matemática de um sistema hidráulico e a sua simulação assume um papel relevante para a entidade gestora de abastecimento de água, uma vez que com esta ferramenta é possível;

- Controlo operacional do sistema em tempo real;
- Comparação das diferentes soluções e alternativas para fornecimento, transporte, armazenamento e distribuição de água;
- Avaliar custos e benefícios para a gestão de um sistema;
- Obter uma sensibilidade refinada referente ao comportamento hidráulico do sistema;
- Estabelecer prioridades em termos de investimento e intervenção do sistema;
- Analisar problemas com pressões elevadas/reduzidas;
- Desenvolver procedimentos operacionais de emergência, devido a situações de emergência, como por exemplo: situações de incêndio, interrupção do abastecimento de água(falha de bombas, roturas e manutenção de reservatórios e válvulas de controlo);

Os modelos matemáticos de simulação hidráulica, permitem também calcular os caudais de ponta nas condutas e as cotas piezométricas na rede. Os simuladores de qualidade de água permitem mesmo calcular para qualquer ponto da rede as concentrações de algumas substâncias contidas na água, quer essas concentrações possam ser dependentes ou não do tempo de retenção dentro das condutas (Alegre, 2005).

Os modelos de simulação podem então ser utilizados na previsão da resposta do sistema a várias condições operacionais sem que seja necessário interromper o sistema, de uma forma rápida e eficaz. O uso de modelos de simulação num sistema de distribuição de água pode antecipar problemas e encontrar as soluções sem grandes encargos, quer em sistemas existentes ou em fase de construção, uma vez que a simulação se traduz no processo de representação matemática do sistema real, ou seja permite reproduzir a sua dinâmica. Estes modelos de simulação são aplicados quando não é exequível a experimentação no sistema real ou nos casos em que o sistema ainda não está construído (Walski et al., 2003).

Neste contexto, um dos programas mais adequados a simulação de sistemas de abastecimento é o software EPANET, desenvolvido pela U.S Environmental Protection Agency(EUA) e traduzido para língua portuguesa pelo LNEC.

Usualmente um sistema de abastecimento de água pode ser simulado por dois tipos de modelos: estáticos e dinâmicos.

2.11.1 Modelos estáticos

Os **modelos estáticos** são usados no estudo do sistema e distribuição de água, a análise é feita para a situação mais desfavorável na rede, por exemplo caudal de ponta instantâneo de horizonte de projeto. Pode-se comparar esta abordagem a uma “fotografia” tirada ao sistema no momento em que este suporta a carga máxima.

Atualmente, é possível estudar o sistema não só para a condição mais desfavorável, mas também, para as várias situações pelas quais o sistema passa como acontece na realidade utilizando modelos de simulação dinâmicos (Sá Marques e Sousa,2011).

2.11.2 Modelos simulação dinâmicos

Os modelos de **simulação dinâmica** têm como objetivo a obtenção das condições hidráulicas do funcionamento do sistema modelado, ao longo de um período de tempo. Com este tipo de modelos é possível criar um filme que retrata a resposta do sistema a diferentes ações. Podem ser classificados em **modelos inerciais** e **modelos não inerciais**.

Os **modelos inerciais** têm em conta a inércia do movimento do fluido através dos elementos do sistema, utilizando um par de equações diferenciais, resultantes da aplicação das equações da continuidade e quantidade de movimento ao escoamento nas condutas. Consoante se considere ou não os efeitos elásticos quer do fluido quer dos componentes do sistema temos o **modelo inercial elástico** e o **modelo inercial rígido** respetivamente.

O **modelo não inercial** não é um verdadeiro modelo de simulação dinâmico, mas sim um modelo em regime quase-permanente no qual são efetuados um conjunto de equilíbrios hidráulicos com condições de fronteira a variarem no tempo, sendo essas condições de fronteira os níveis dos 3 reservatórios e/ou acessórios em que se especifica o seu estado. (Sá Marques e Sousa,2011).

2.11.3 Demand Driven Analysis (DDA) vs Pressure Driven Analysis. (PDA)

Para a simulação hidráulica dos modelos anteriormente referidos, pode-se considerar duas abordagens diferentes, uma orientada pelos consumos outra orientada pela pressão.

A primeira abordagem classifica-se como DDA, Demand Driven Analysis, nesta abordagem considera-se que os consumos são conhecidos e constantes, ou seja, são independentes da pressão do sistema e o modelo é orientado pelos consumos.

Por sua vez, na segunda abordagem considera-se que os consumos variam com a pressão da rede, o modelo é orientado pela pressão, assim chamado Pressure Driven Analysis.

Normalmente é mais utilizado a abordagem DDA, para situações de funcionamento normal, produzindo resultados bastante precisos, no entanto para estados de criticidade, ou seja, para situações de consumos extraordinários, como incêndio ou perdas pode originar resultados irrealistas, já que as exigências da rede podem ser inferiores às exigências predefinidas e como o caudal em cada nó depende da pressão, pressão que essa pode ser demasiado baixa ou negativa.

Na abordagem PDA, as exigências nodais podem ser completamente satisfeitas, se a pressão do nó for maior que a pressão mínima de referência, caso contrário a procura pode ser parcialmente satisfeita, dependendo da pressão disponível no nó. Resumindo, o modelo PDA embora permita simular redes em condições de pressão suficiente e insuficiente, este introduz novos parâmetros ao modelo, dando-lhe mais complexidade.

Assim, PDA revela-se mais exata para simular comportamentos hidráulicos em cenários críticos, sendo a análise DDA para cenários normais em que a pressão de referência é totalmente satisfeita.

O Quadro 2.4 compara os dois tipos de análise de forma resumida.

Quadro 2.4 - DDA vs PDA adaptado e retirado de Baek et al. (2010)

	DDA (Demand Driven Analysis)	PDA (Pressure Driven Analysis)
Premissas	Consumos dos nós estão sempre satisfeitos	os consumos dos nós são dependentes da pressão instalada
Aplicações	Condições normais de funcionamento	Condições anormais de funcionamento, como fugas, falhas, problemas nas bombas e consumos para caudal de incêndio
Fiabilidade para condições operacionais anormais	Baixa	Alta
Defeitos	Pressão nos nós pode ocorrer como negativa, quando as condições não são satisfeitas	Necessita de uma equação que relacione o consumo nodal com a pressão nodal. O cálculo dos consumos nodais e das pressões é bastante complexo.
Método de resolução	Procedimentos iterativos necessários para satisfazer a continuidade das equações	Procedimentos iterativos usados na simulação do DDA

$$\sum Q_{entrada} - \sum Q_{saida} = C_i$$

Lei de conservação de massa aplicada aos nós (7)

2.12 Métodos numéricos

Uma vez que o sistema é não-linear, não é possível uma resolução direta, sendo necessário utilizar uma grande variedade de métodos iterativos para resolução de equações não-lineares.

A escolha do melhor método numérico é um processo complicado que é necessário averiguar as limitações de cada método e o sistema que está a ser analisado. Existem vários métodos no entanto nesta dissertação só será analisado o método do algoritmo do gradiente global.

2.12.1 Algoritmo do Gradiente Global

O Algoritmo do Gradiente Global, proposto por Todini permite obter cotas piezométricas e caudais (Todini,2003) de um sistema de distribuição de água, supondo que o sistema se encontra em equilíbrio.

O método consiste em aplicar, simultaneamente a lei da conservação da massa a cada nó de junção e a lei de conservação de energia a cada troço. Em termos matriciais pode ser traduzido da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A_{10} \cdot H_0 \\ -q \end{bmatrix} \quad (8)$$

Onde A_{11} , (nc x nc), matriz diagonal, depende da expressão usada para perde de carga nas condutas;

$A_{12}=A_{21}^T$ (nc x nn), matriz de incidência para os nós com cota piezométrica desconhecida

$A_{10}=A_{01}^T$, (nc x nf) matriz de incidência para os nós com cota piezométrica conhecida;

Q (1 x nc), caudal em cada conduta;

q (1x nn), solicitação nodal;

H (1 x nn), cota piezométrica nodal desconhecida;

H_0 (1 x nf), cota piezométrica nodal fixa;

Com, nc é o numero de condutas com caudal desconhecido

nn, número de nó com cota piezométrica desconhecida,

nf, número de nós com cota piezométrica conhecida.

A matriz de incidência A_{12} consiste em:

$$A_{12}(i, j) = \begin{cases} 1, & \text{se a conduta } i \text{ leva caudal para o nó } j \\ 0, & \text{se a conduta } i \text{ não está ligada ao nó } j \\ -1, & \text{se a conduta } i \text{ recebe caudal do nó } j \end{cases}$$

A matriz A_{10} é análoga a matriz A_{12} para os nós de cota piezométrica conhecida.

Utilizando uma expressão para o cálculo da perda de carga da forma:

$$h_i = R_i \cdot Q_i \cdot |Q_i|^{n_i-1} \quad (9)$$

Na equação (9), R_i é constante e n_i é o expoente de função para a perda de carga, $i=1, \dots, n_c$, a matriz A_{11} assume a seguinte forma:

$$A_{11} = \begin{bmatrix} R_1 \cdot |Q_1|^{n_1-1} & \dots & \dots \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \dots & \dots & R_{n_c} \cdot |Q_{n_c}|^{n_c-1} \end{bmatrix} \quad (10)$$

O esquema iterativo de Newton-Raphson pode ser obtido derivando ambos os lados da equação (10) relativamente a Q e a H , obtendo-se:

$$\begin{bmatrix} NA_{11} & A_{12} \\ A_{21} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} dQ \\ dH \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} dE \\ dq \end{bmatrix} \quad (11)$$

Onde,

$$dE = A_{11} \cdot Q^k + A_{12} \cdot H^k + A_{10} \cdot H_0; \quad (12)$$

$dq = A_{21} \cdot Q^k - q$, Q^k e H^k são os caudais e as cotas piezométricas da iteração k respetivamente; (13)

$$N = \begin{bmatrix} n_1 & & \\ & \dots & \\ & & n_{n_c} \end{bmatrix}, \text{ matriz diagonal (nc x nc);} \quad (14)$$

$$dQ = Q^k - Q^{k+1} \quad (15)$$

$$dH = H^k - H^{k+1}$$

(Muranho, 2012)

Substituindo a equação (12), a equação (13), a equação (14) e a equação (15) na equação (11) e resolvendo analiticamente obtém-se a formulação iterativa para o Algoritmo do gradiente global:

$$A^k = A_{21} \cdot (D_{11}^k)^{-1} \cdot A_{12}; \quad (16)$$

$$F^k = (A_{21} \cdot Q^k - q) - A_{21} \cdot (D_{11}^k)^{-1} \cdot (A_{10} \cdot H_0 + A_{11}^k Q^k); \quad (17)$$

$$H^{k+1} = (A^k)^{-1} \cdot F^k; \quad (18)$$

$$Q^{k+1} = Q^k - (D_{11}^k)^{-1} \cdot (A_{11}^k Q^k + A_{12} H^{k+1} + A_{10} \cdot H_0); \quad (19)$$

Em que $D_{11}^k = NA_{11}$, a obtenção de novas cotas piezométricas passa pela resolução de um sistema de equações lineares $Ax=b$, em que $A=A^k$, $x=H^{k+1}$ e $b=F^k$

2.13 EPANET

EPANET 2.0, é um software gratuito de código aberto, desenvolvido pela EPA(U.S. Environmental Protection Agency) que executa simulação de comportamento hidráulico e de qualidade dentro de redes de condutas pressurizadas (Mohseni et al,2021)

Este software é caracterizado por um modelo robusto que uma grande comunidade de utilizadores no mundo utiliza (Vieira & Ramos, 2009), oferecendo uma interface de utilizador opcional e sem limitação do número de elementos da rede. Permite a utilização de unidades métricas ou americanas e suporta o cálculo de perda de carga utilizando: Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Chezy-Manning.

Várias aplicações foram desenvolvidas utilizando EPANET, como por exemplo: (1) EPANET Z, exibe mapas/imagens em linha como fundo (Zonum Solutions, 2008b); (2) EpaSens realiza análises de sensibilidade aos parâmetros de rede (Zonum Solutions, 2008c); (3) epa2GIS exporta o mapa de rede e as saídas de EPANET para um ambiente de Sistema de Informação Geográfica (Zonum Solutions, 2008a); (4) A GHydraulics também integra EPANET com GIS e calcula diâmetros económicos para taxas de fluxo específicas (Macke, 2012); (5) GISRed integra EPANET com um ArcView GIS (Grupo REDHISP)

Embora Epanet 2.0 seja na realidade o simulador hidráulico mais utilizado atualmente, existem outros programas informáticos com as mesmas funções, no entanto, com algumas limitações.

- Branch/Loop, em Branch calcula o projeto de menor custo de redes de distribuição de água ramificadas, funciona usando programação linear e Loop, simula o comportamento hidráulico de trabalhos em rede em loop. A principal desvantagem do software Branch/Loop é a limitação da dimensão das redes (Schmid, 2002).
- NeatWork (NeatWork, 2010), que determina conceção ótima das redes de gravidade da água para as zonas rurais.

Assim, o Epanet calcula os valores do caudal e da pressão aplicando a abordagem DDA, assumindo que os valores de consumos são conhecidos e satisfeitos na totalidade independente da pressão instalada, logo estes resultados são aceitáveis para os valores de pressão de suficiente para cumprir as necessidades de consumo.

Para tal, o Epanet resolve a equação da conservação da massa para cada nó e da energia para cada ligação de rede [Equação (7) e Equação (8)] aplicando o algoritmo do gradiente para linearizar as equações de energia, de acordo com o visto no subcapítulo **2.11.4**.

2.13.1 WaterNetGen

Uma vez que o software EPANET só permite a abordagem DDA nas simulações de redes hidráulicas, foi necessário apresentar uma extensão ao software que colmatava o fato de não permitir abordagem PDA. (Muranho,2012)

Assim, em 2012 Muranho apresentou uma extensão do EPANET, que além de permitir modelações na abordagem DDA, tal como o software sem extensão, permite também modelações PDA, de modo que os consumos possam depender da pressão instalada na rede, incorpora também a vantagem de considerar fugas ao longo das condutas, fugas de base e fugas por rotura. Análise que será utilizada nesta dissertação.

Ao longo dos anos têm sido apresentadas diversas expressões que tentam traduzir a relação a pressão-caudal (Muranho,2012). Aqui irá ser abordada apenas a expressão de Wager et al.(1998, citado por Muranho,2012).

A equação (20), traduz a base da extensão do WaterNetGen e permite uma análise em que o caudal depende da pressão ou seja permite uma “Pressure Driven Analysis“. Na equação, percebe-se facilmente que quando a pressão no ponto “i” for maior que a pressão de referência o caudal fornecido é igual ao caudal requerido, no entanto se a pressão no ponto “i” for inferior a mínima o caudal fornecido será igual a zero e finalmente quando a pressão se encontra entre as duas situações anteriormente referidas o caudal é multiplicado por um fator corretivo.

$$q_i^{forn}(P_i) = q_i^{req} \cdot \begin{cases} 1 & \text{se } P_i \geq P_i^{ref} \\ \left(\frac{P_i - P_i^{min}}{P_i^{ref} - P_i^{min}}\right)^\alpha & \text{se } P_i^{min} < P_i < P_i^{ref} \\ 0 & \text{se } P_i \leq P_i^{min} \end{cases} \quad (20)$$

O rácio de satisfação do consumo em função da pressão para diferentes valores de α , está na Figura 14, considerando a pressão mínima 3 m.c.a e a pressão de referência 14 m.c.a (Muranho,2012).

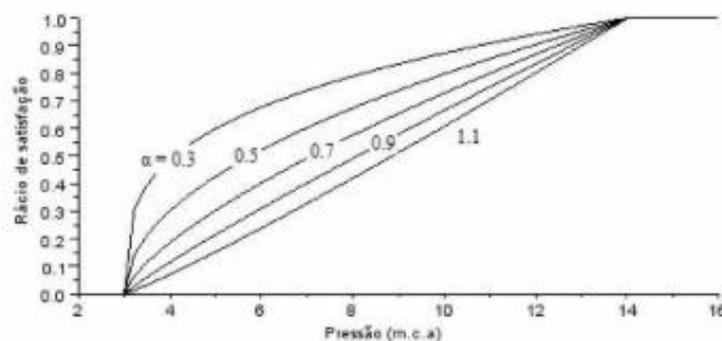


Figura 14 - Rácio de satisfação do consumo em função da pressão. Fonte: Muranho (2012)

Apesar de ser considerada a abordagem PDA, foi necessário modelar as perdas de água, para isso a equação (21) foi desenvolvida por Germanoupoulos (1985, citado por Muranho, 2012). Esta equação permite considerar perdas de água por roturas e por pequenos orifícios, juntas ou fendas.

A equação (21) permite obter o caudal escoado através da fuga, q_k^{fuga} , para uma dada conduta k de comprimento l_k , para uma pressão média, P_k que é obtida pela média da pressão verificada nos nós de extremidade.

Os parâmetros β_k e α_k são parâmetros que dizem respeito as perdas de pequenos orifícios, juntas ou fendas enquanto que, C_k e δk são parâmetros do modelo de perdas para roturas.

$$q_k^{fuga} = \begin{cases} \beta_k l_k (P_k)^{\alpha_k} + C_k (P_k)^{\delta k} & \text{se } P_k \geq 0 \\ 0 & \text{se } P_k \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

O parâmetro δk , toma o valor de 0,5 para orifícios e o parâmetro α_k é associado ao estado de deterioração do material, ou seja em função do material da conduta, este pode tomar valores entre 0,5 e 2,5 (Muranho,2012).

Em cada conduta, são atribuídas as perdas ao nós sendo que é metade para cada nó. Assim, o caudal escoado a partir de cada nó, q_i^{fuga} é descrito pela equação (22):

$$q_i^{fuga} = \frac{1}{2} \sum_k q_k^{fuga} \quad (22)$$

2.14 Gestão de pressão como método de controlo

A gestão da pressão pode ser definida como *a prática de gerir as pressões do sistema para os níveis de serviço ótimo, assegurando simultaneamente um fornecimento suficiente e eficiente para utilizações legítimas* (Thorton e Lambert, 2005).

Assim, a gestão de pressão é encarada com uma medida fundamental em termos de estratégia de gestão de perdas de água em sistemas de abastecimento de água, uma vez que a frequência em que as fugas ocorrem depende da pressão e das suas variações cíclicas. Deste modo, o caudal da água perdida aumenta, com o aumento da pressão (Farley et al,2008).

2.14.1 Modo de operação

Embora existam vários de sistemas de gestão da pressão de funcionamento, as etapas e instalações básicas são sempre semelhantes: uma área de gestão da pressão adequada tem de ser selecionada e separada das zonas vizinhas através do fecho de válvulas de limite.

Uma válvula de redução de pressão (VRP), um sensor de pressão e um caudalímetro têm então de ser instalados no ponto de entrada na área selecionada. Em sistemas avançados de gestão de pressão, um controlador lógico programável regista, processa e arquiva os dados do sensor medido que são necessários para controlar a VRP.

Estes acessórios devem ser instalados em pontos estratégicos da rede de abastecimento, com o objetivo de reduzir a pressão ou mantê-la num determinado nível para o período de menor consumo, com a introdução de uma perda de carga localizada ao escoamento, uma vez que consiste no período em que ocorrem pressões mais críticas (Farley, 2008).

As VRP são acessórios de fácil uso e de implementação, trazem importantes benefícios na ZMC, devido à redução de pressão a níveis adequados que evitam a falta de água nos pontos mais críticos da rede.

Existem quatro formas básicas de operar a VRP e modular a pressão do sistema:

- **Pressão fixa na secção de saída:** consiste no sistema de controlo de pressão mais básico em que a pressão de saída da válvula é mantida a um nível escolhido a todo o instante.

- **Pressão variável no tempo:** a pressão de saída da VRP é modulada de acordo com o tempo, normalmente para reduzir a pressão durante o período noturno quando os caudais são baixos.
- **Pressão modulada por caudal:** podem ser definidas diferentes pressões de saída para diferentes caudais, a fim de manter a pressão mínima requerida na zona durante o caudal de pico ou para abrir a VRP quando um fluxo limite é excedido (por exemplo, caudal de incêndio) (Farley,2001).
- **Gestão da pressão por modulação por ponto crítico:** A modulação por ponto crítico exige um conhecimento mais aprofundado do terreno no qual a ZMC se insere de modo a identificar-se o local onde a pressão pode ser insuficiente. O ponto crítico é o ponto onde se registam as pressões mais baixas da rede. A partir do momento em que as pressões estejam controladas neste ponto garante-se que no resto da rede a pressão é adequada (R S Mckenzie, 2004). A VRP nesta solução é controlada à distância sendo a pressão modulada face ao ponto crítico previamente identificado. Esta solução é mais estável que as restantes pois permite variações mais suaves da pressão.

O custo de inclusão de uma VRP numa ZMC é inicialmente elevado, mas será vantajoso para um horizonte de projeto de médio a longo prazo, onde irá recuperar o investimento inicial.

Para cada uso de água é necessário um valor mínimo de pressão a garantir. Uma vez garantido o valor mínimo da pressão em toda a ZMC, o excedente de pressão pode ser reduzido (Gomes et al. 2011). Para tal, é necessário considerar o disposto no Artigo 21º do Decreto Regulamentar nº23/95, de 23 de Agosto, que refere que a pressão de serviço, em qualquer dispositivo de uso predial para o caudal de ponta, não deve ser em regra inferior a 10 m.c.a. No mesmo artigo é referido, que a pressão máxima de serviço em qualquer ponto de utilização não deve ultrapassar os 60 m.c.a, valor medido ao nível do solo.

Em síntese, com um controlo adequado da gestão de pressão na rede ocorre um controlo indireto das perdas reais de água e, em simultâneo, uma redução dos consumos de água o que reduz também os ganhos e lucros. Note-se também, que as perdas aparentes tal como as perdas reais são reduzidas, dado que, 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).

2.15 Síntese final

O valor elevado de perdas de água, condiciona a implementação de regimes económicos e financeiros adequados nos serviços de águas, o potencial para melhorar as fugas é ainda bastante elevado na maioria dos sistemas. Além do ganho ambiental, social e de saúde pública, o controlo de perdas permite grandes ganhos económicos, que é de extrema importância para as EGs nesta matéria.

Neste capítulo foi possível aprofundar conhecimento no âmbito do tema da dissertação, modelação de fugas e perdas, bem com os meios atuais de deteção das mesmas. Logo de início se percebe a importância de saber o tipo de fugas que se está a tratar, uma vez que fugas de tipo diferentes por vezes requer também equipamento de deteção diferente.

Percebe-se que o primeiro passo na deteção de fugas é o estabelecimento do balanço hídrico, uma vez que é necessário para saber se existe alguma fuga, só depois é feita a localização das fugas, usando métodos de deteção físicos ou modelos matemáticos de simulação hidráulica, acabando em métodos de deteção fina.

O uso de ferramentas como o EPANET, poderá ser determinante para uma tomada de decisão na gestão de sistemas de abastecimento, em especial na gestão de pressão e caudal adequados, no âmbito do combate das perdas de água. No entanto, antes de se executar alguma ação deverá existir uma prévia análise, uma prospeção sobre a tomada de decisão, devendo haver sempre que necessário a intervenção de políticas de mudança, e articulação entre todos os departamentos e diretores/gestores de empresa.

Facilmente se percebe, também que a maneira adequada para lidar e reduzir possíveis fugas é gerindo a pressão na rede, reduzindo a pressão em pontos que tenham alguma “folga” ou seja, que seja possível reduzir sempre dentro dos limites regulamentares.

Finalmente, como é importante este tema para uma EG de água, que deve procurar sempre um estado de excelência de forma a produzir o maior valor de receita possível e para isso deverá ter políticas de gestão orientadas pelos valores e pontos até aqui referidos, dando especial atenção aos seus colaboradores, clientes, deverá ter especial atenção na procura da melhor aplicação de taxaço, servindo água com qualidade e sem perturbações no consumo.

3 CONSTRUÇÃO DE MODELOS

3.1 Introdução

Neste capítulo, de acordo com os objetivos previamente definidos analisa-se a ZMC em causa verificando a existência de fugas, estuda-se a sua tipologia, consumos e por fim realiza-se a construção do modelo da rede utilizando o software EPANET Waternetgen.

Para o referido estudo de caso, foi necessário obter dados, volumes de água, caudais instantâneos, dados esses que foram obtidos pela entidade gestora municipal Águas de Coimbra, é descrito também a visita técnica que a mesma entidade gestora possibilitou ao autor a integração numa das suas equipas de deteção de fugas. Finalmente, com a ajuda do software EPANET Waternetgen é realizado uma análise DDA e PDA para vários cenários com vista a obtenção de soluções para o melhoramento da rede. Neste capítulo é realizado a construção do modelo por parte do autor desta dissertação com os dados fornecidos da EG.

3.2 Empresa Águas de Coimbra

A entidade gestora que colaborou na realização desta dissertação com o fornecimento de dados da ZMC, é designada por Águas de Coimbra, uma empresa de âmbito municipal, dotada de autonomia estatutária, administrativa e financeira, com capital social detido pela Câmara Municipal de Coimbra.

Esta empresa é a responsável pela distribuição de água em baixa, bem como, o saneamento das águas residuais aos munícipes de Coimbra, abrange uma área de 316.5 km² com cerca de 83 300 clientes e taxas de cobertura dos serviços de água e de saneamento de praticamente 100% e 97%, respetivamente, no final do ano de 2014.

3.3 Localização e descrição da ZMC

A ZMC Malavada, do presente estudo, localiza-se em Portugal, no distrito e cidade de Coimbra, estende-se pela zona da Boavista, Instituto Pedro Nunes e pela avenida Mendes Silva, Figura 15, dispõe de 7,3 km de rede, 197 ramais, 726 contadores e 40 hidrantes e é abastecida por um reservatório situado no pinhal de Marrocos a uma cota de 102,5 m.

Analisando em mais detalhe a ZMC percebe-se que tem início no caudalímetro, situado na rotunda da estrada da Beira, e se prolonga pela avenida Mendes Silva, até se dividir em três partes, para o Instituto Pedro Nunes e Itecons pela rua Pedro Hispano, pela Rua do Brasil até à EDP e pela zona da Boavista.

Muitas das condutas instaladas são bastante antigas, sendo a mais antiga, do ano de 1920 enquanto a mais recente foi instalada no ano de 2017.

Estas condutas constituem as tubagens principais e possuem diversos diâmetros nominais, sendo que estes variam de 63 a 400 mm, podendo ser constituídos por PVC ou PEAD.

Os ramais são constituídos maioritariamente de PEAD embora alguns sejam constituídos de PEBD.

Pode-se dizer que é uma rede bastante pequena e de características urbanas que serve algumas empresas como o Instituto Pedro Nunes e o Itecons, serve também uma área residencial de baixa densidade e com poucos serviços municipais de rega.



Figura 15 Localização da ZMC da Malavada obtidas com a utilização do do software Qgis

3.4 Balanço hídrico

A entidade gestora, AC, publica nos seus relatórios e contas informações importantes como o balanço hídrico (Quadro 3.1).

Interpretando o Quadro 3.1, é possível perceber que existem perdas água no sistema de distribuição de água da entidade gestora e tomam o valor percentual de 20,72% , ou seja o problema das perdas e fugas de água como referido anteriormente é algo que não é possível resolver de uma só vez, exigindo uma gestão adequada ao longo do tempo por parte da entidade gestora, como se consegue perceber pela Figura 16 , a mesma empresa municipal tem tido uma gestão de modo a reduzir as perdas para valores mínimos.

Quadro 3.1 - Balanço hídrico da AC em 2020, adaptado de Relatório e contas , AC 2020.

A	B	C	D	E
Água que entra no sistema 12 692 420 [m ³ /ano]	Consumo autorizado 10 082 766 [m ³ /ano]	Consumo autorizado faturado 10 062 472 [m ³ /ano]	Consumo faturado medido 10 048 704 [m ³ /ano]	Consumo faturado 10 062 472 [m ³ /ano]
			Consumo faturado não medido 13 768 [m ³ /ano]	
		Consumo autorizado não faturado 20 294 [m ³ /ano]	Consumo não faturado medido 483 [m ³ /ano]	Água não faturada (perdas comerciais) 2 629 948 [m ³ /ano]
	Perdas de água 2 609 654 [m ³ /ano]	Perdas Aparentes 373 027 [m ³ /ano]	Consumo não autorizado 161 000 [m ³ /ano]	
		Perdas Reais 2 236 627 [m ³ /ano]	Perdas de água por erros de medição 212 028 [m ³ /ano]	
			Fuga nas condutas de adução e/ou distribuição 548 207 [m ³ /ano]	
		Fugas e/ou extravasamento nos reservatórios de adução e/ou distribuição 43 800 [m ³ /ano]		
		Fugas nos ramais de ligação a montante do ponto de ligação 1 644 620 [m ³ /ano]		

Do mesmo modo que foi feito um balanço hídrico geral, também para cada ZMC foi feito pela empresa municipal um balanço hídrico de modo a determinar as zonas mais problemáticas a atuar.

Percebeu-se então que uma das ZMC mais problemática será a tratada na presente dissertação. Para melhor compreensão da razão de escolha da ZMC é também realizado pelo autor da presente dissertação o mesmo procedimento do balanço hídrico.

Assim, tendo sido obtido pela entidade gestora AC os volumes de água que entram na zona e os volumes de água que é consumida na mesma zona, facilmente se verifica que há uma fuga de água, como se verifica pelo Quadro 3.2 e pela Figura 16.

Ainda na Figura 16 é realizada uma comparação gráfica da água que entra na ZMC com a água que é efetivamente consumida, em que o eixo horizontal é a data do dia em que o caudal foi registado e o eixo vertical é o caudal em m³/dia.

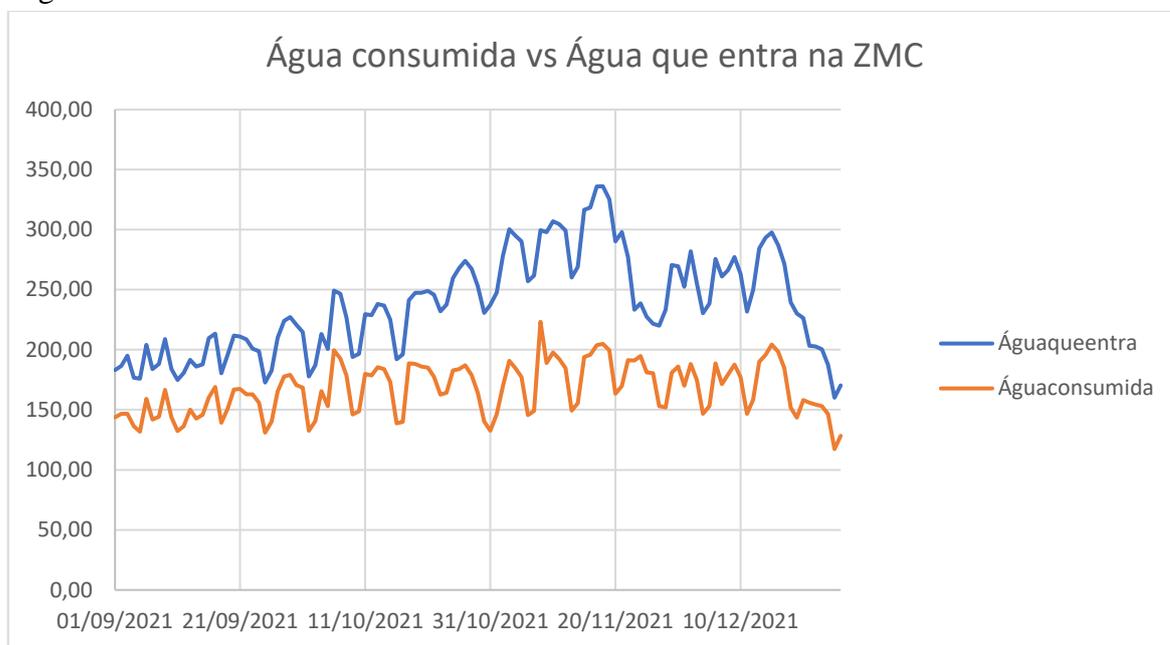


Figura 16 - Água consumida vs água que entra na ZMC

Quadro 3.2 - Balanço hídrico na ZMC de estudo

VOLUME DE ÁGUA QUE ENTRA	27736,5 m ³
VOLUME DE ÁGUA CONSUMIDA	19517,4 m ³
VOLUME DE ÁGUA PERDIDA	8219,1 m ³
PERCENTAGEM DE ÁGUA PERDIDA	29,6 %

De acordo com o guia do ERSAR, referido no capítulo 2, seria necessário conhecer diversas componentes do balanço hídrico como a água faturada, consumo faturado medido e o consumo faturado não medido, no entanto, não é possível desagregar estes dados dos dados medidos no caudalímetro, uma vez que, a água consumida pode ir para serviços municipais de rega e não conta como um consumo faturado medido. No entanto, podem-se realizar as estimativas para o caudal que é de facto autorizado, não possuindo muita relevância para com o objetivo de verificar se efetivamente existe alguma fuga de água ou não.

Sinteticamente, olhando para o Quadro 3.2, percebe-se que de facto existe uma fuga na ZMC e pela percentagem da água perdida, percebe-se que possivelmente é uma das zonas mais problemáticas, motivo pelo qual foi escolhida para uma visita técnica de deteção de fugas e também para o estudo nesta dissertação.

3.5 Caudal mínimo noturno

Já foi referido no capítulo 2 que, o estudo do CMN de uma ZMC permite também constatar a existência ou não de fugas, uma vez que neste período poucos consumidores se encontram ativos e conseqüentemente o CMN será o mais próximo do zero possível, apesar de ser necessário ter em conta o tipo de sistema, pois o CMN varia de sistema para sistema em função do tipo de ocupação (residencial, comercial, serviços públicos, industrial), da dimensão do sistema, do número de clientes, do nível socioeconómico e do estado de conservação das infraestruturas.

Neste caso, uma vez que se trata de uma ZMC numa zona residencial, com baixa densidade populacional e com poucos serviços municipais de rega espera-se que o CMN seja bastante próximo de zero.

Utilizando os dados fornecidos pela empresa municipal, foi possível elaborar um gráfico dos caudais instantâneos (Figura 17) de aproximadamente uma quinzena (13 dias).

Analisando a Figura 17, chega-se à mesma conclusão que se chegou com o balanço hídrico, ou seja existe de facto uma fuga na ZMC, uma vez que o CMN se situa bastante longe do zero, tomando o valores de 1,24 l/s a 6 l/s.

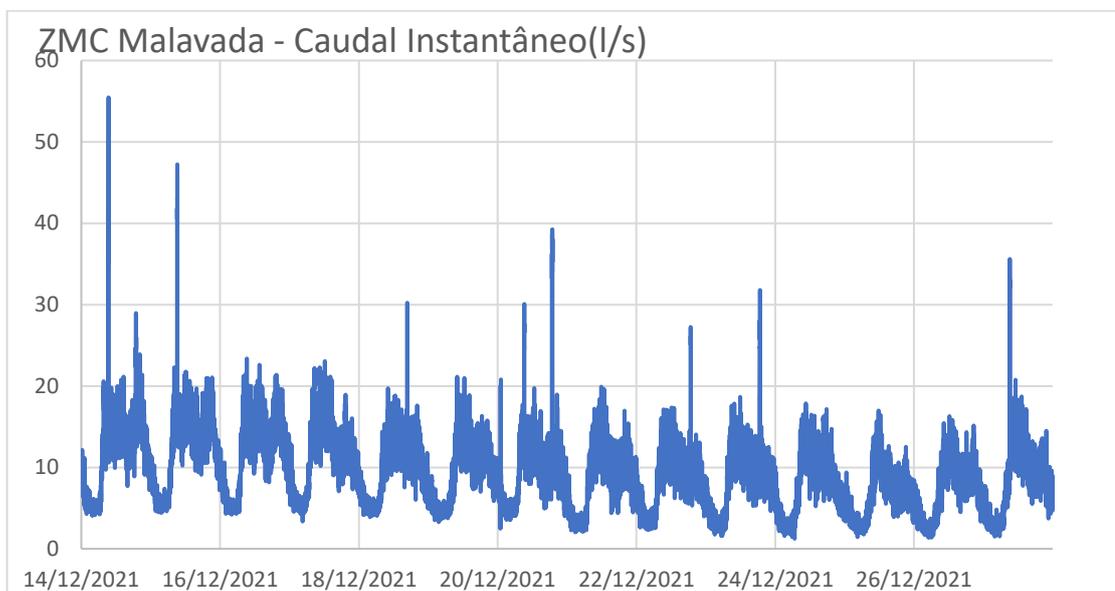


Figura 17 – Caudal mínimo noturno da Zona de medição e controlo

3.5.1 Visita técnica da ZMC

O estudo de caso, como já referido, foi escolhido com base no balanço hídrico da ZMC e do CMN da mesma, que revelava uma grande perda de água. Sabendo disso, foi planeado uma saída de campo, que incluiu o presente autor, para realizar o processo de pesquisa aproximada, recorrendo ao “Step-Test”, isolando partes da rede, através do fecho das válvulas de seccionamento e verificando o caudal instantâneo à saída da ZMC.

Devido às desvantagens associadas ao corte de abastecimento de água aos utilizadores, aliado ao facto que o período noturno, é onde os consumos são mais baixos e as pressões na rede mais elevadas, estas visitas tem de ser realizadas nestes períodos noturnos.

Na visita técnica, inicialmente é realizado um “step-test”, recorrendo ao caudalímetro de entrada da ZMC, Figura 18, ou seja, é realizado um fecho progressivo das válvulas de seccionamento de modo a obter uma localização aproximada, sendo então necessária o envio da equipa móvel, que com o auxílio de equipamento de deteção, como o geofone (Figura 18) e a haste eletrónica de escuta, que localiza exatamente o sítio da fuga. Esta equipa, não realiza reparações de fugas, consequentemente, depois de detetar as fugas, estas são marcadas para outra equipa realizar a sua reparação.



Figura 18 - Geofone (em cima à esquerda), Detecção da fuga em cima à direita, Caudalímetro em baixo

3.6 Modelo hidráulico

A modelação matemática de um SDA permite replicar, de forma mais exata e correta, o comportamento real de todo o sistema físico que representa, com custos bastante reduzidos. Portanto, a modelação matemática pode ser uma boa solução, quando não é prático, nem viável, realizar testes no próprio sistema físico implantado. Poderá também ser útil para otimizar alguns aspetos da exploração, permitindo aumentar as receitas geradas.

3.6.1 Desenvolvimento do modelo

O modelo da ZMC foi desenvolvido e criado de raiz pelo autor desta dissertação, com o objetivo de ser uma representação o mais realista possível da ZMC de Malavada. Para esse efeito, foram necessários pedir os seguintes dados à EG:

- Altimetria, geometria da rede, topologia e características das infraestruturas relevantes, que possam influenciar o comportamento hidráulico, como por exemplo: condutas, reservatórios, tanques, válvulas e outros acessórios;
- Solicitações ao sistema, os consumos e a sua variação temporal e espacial;

Além destes dados, também foi necessário considerar, pela parte do autor, diversos cenários de operação.

O uso de ferramentas de informação geográfica (SIG), como por exemplo o QGIS ou ARCGIS, tiveram um papel fundamental na elaboração do modelo, pois agregam as informações como geometria da rede, topografia e as características das infraestruturas.

A Figura 19, dá um exemplo de algumas informações obtidas no cadastro na tabela de atributos do SIG

Id	aCOND20498
Length	0,422
Diameter	110,000
RoughCoeff	0,1
Material	PVC
InstalDate	NULL
LossCoeff	140,000
IniStatus	OPEN
BulkCoeff	0
WallCoeff	0
Tag	Malavada
Descrip	NULL

Figura 19 - Exemplo de informação contida na tabela de atributos do sistema SIG

Antes de ser feita a passagem dos dados do cadastro para o modelo, é necessário configurar as unidades de medida das diversas grandezas, para que, quando se introduza esses dados se apresentem de acordo com o previsto.

Quadro 3.3 - Principais grandezas a considerar no modelo

<i>Parâmetro</i>	<i>Unidades</i>
Carga hidráulica	m
Caudal	l/s
Comprimento	m
Consumo	l/s
Cota	m

Diâmetro (Reservatórios)	m
Diâmetro (Condutas)	mm
Energia	kwh
Fator de perda de carga	adimensional
Potência	Kw
Pressão (altura piezométrica)	m
Velocidade	m/s
Volume	m ³

Na construção do modelo é considerado como relevante a informação para as várias componentes, que se apresentam no Quadro 3.4, Quadro 3.5 e Quadro 3.6.

Quadro 3.4 - Propriedades essenciais das condutas

<i>Propriedade</i>	<i>Descrição</i>
ID da conduta	identificação da conduta
Nó inicial	Nó onde começa a conduta
Nó final	Nó onde termina a conduta
Comprimento	Comprimento em metros da conduta
Diâmetro	Diâmetro interno da conduta
Rugosidade	Coefficiente de rugosidade da conduta

Quadro 3.5 - Propriedades essenciais dos nós

<i>Propriedade do nó</i>	<i>Descrição</i>
ID do nó	Identificação do nó
Cota	Cota do nó
Consumo base	Valor médio ou nominal da categoria principal de consumo no nó
Diagrama de consumo	Identificação do padrão temporal para caracterizar a variação de consumo com o tempo

Quadro 3.6 - Propriedades essenciais das válvulas

<i>Propriedades</i>	<i>Descrição</i>
ID	Identificação da válvula
Nó inicial	Nó da entrada de escoamento na válvula
Nó final	Nó de saída de escoamento da válvula
Diâmetro	Diâmetro da válvula
Tipo	tipo de válvula
Parâmetro de controlo	Parâmetro para descrever as condições de operação da válvula

No presente caso de estudo, esta informação não se encontrava inserida no modelo Epanet, portanto foi necessário adaptar os dados do cadastro, ajustando-os para o programa Epanet WaterNetGen, para tal foi utilizando um plugin QGISRED do programa de SIGS QGIS.

Na passagem de dados da rede do cadastro para o programa EPANET, foi necessário realizar algumas simplificações da rede de forma a não deixar o modelo demasiado complicado e de difícil execução.

Assim, optou-se por:

- Retirar-se os ramais, pois não eram necessários para o modelo;
- Retirar-se as válvulas de secionamento, apesar de provocarem alguma perda de carga, o seu valor não seria muito significativo;
- Retirar-se os contadores, todas as informações relacionadas com o consumo, uma vez que já se encontram no nó, os contadores seriam assim desnecessários;
- Simplificou-se os nós, agregaram-se vários nós, que se encontravam bastante perto;
- À entrada da ZMC foi colocada um tanque com uma válvula redutora de pressão, para simular as condições de entrada na mesma.

Obtendo-se assim o modelo do Epanet (Figura 21), retirado do cadastro (Figura 20).

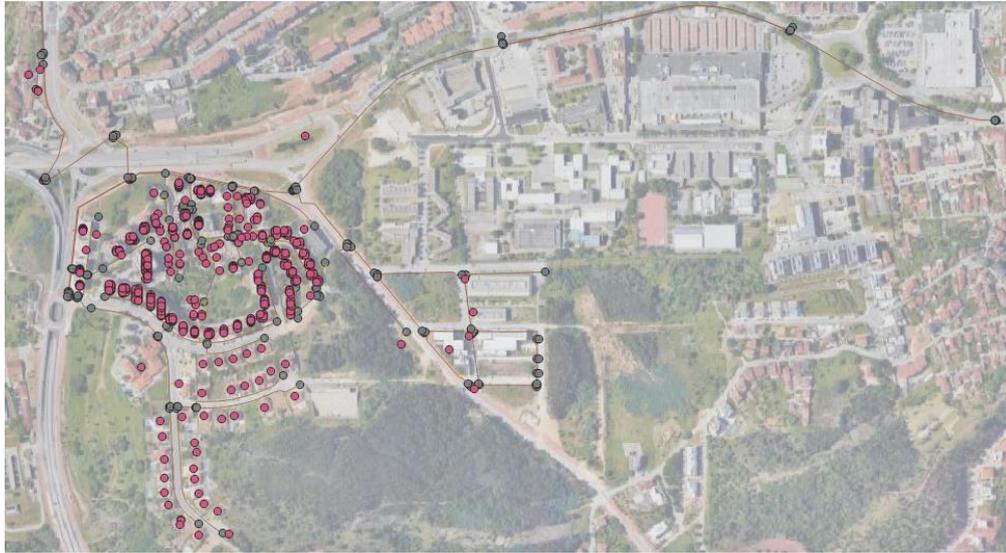


Figura 20 - Cadastro da Rede no software QGIS

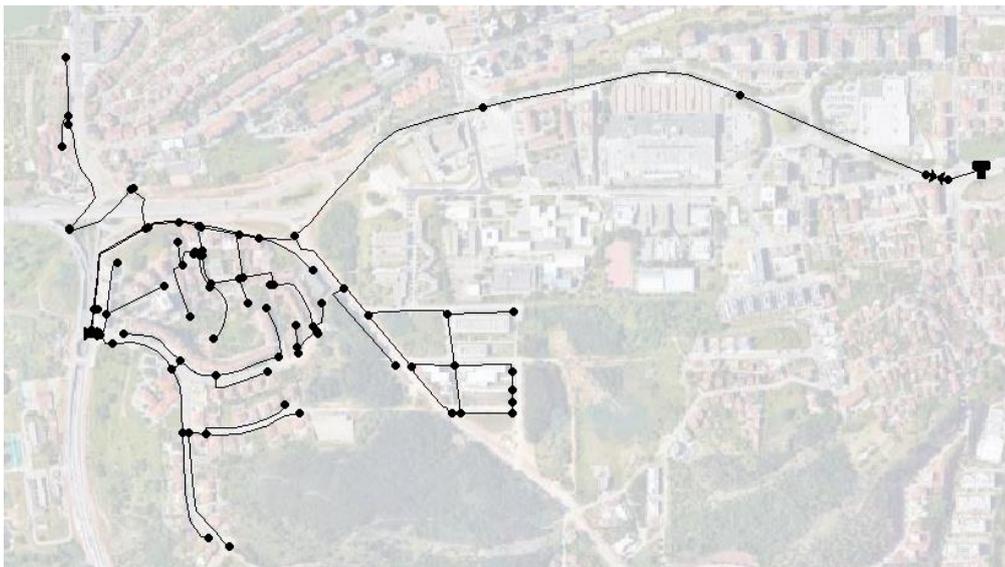


Figura 21 - Modelo no software Epanet

3.6.2 Diagrama de consumos

Em termos de solicitações do sistema de abastecimento de água, pode-se dizer que estas se caracterizam pelos consumos de água por parte dos utilizadores e pelas perdas físicas de água no sistema.

Dado que o consumo se caracteriza por uma grande incerteza, uma vez que não é constante em termos temporais e espaciais, a sua estimativa é sempre um processo incerto e complicado.

Apesar de, numa rede de distribuição os consumos estarem distribuídos ao longo das condutas, são modelados como estando concentrados só nos nós.

É então atribuído a cada nó um caudal de consumo, designado por consumo-base, cujo valor é igual à soma dos consumos de percurso dos semi-comprimentos das condutas concorrentes no nó.

Porém, é necessário ter em conta a variação temporal destes consumos e incorporá-los no modelo. Isso é conseguido, com o recurso à criação de diagramas de consumos, que simplificados são sequências de fatores multiplicativos, um por cada incremento temporal (time-step) da simulação hidráulica a realizar, que resulta em diferentes valores de consumo para cada hora do dia.

No presente estudo de caso, foram experimentados três diagramas de consumos diferentes, o primeiro, (Figura 22) um diagrama genérico com um fator de ponta de 1.5, o segundo, (Figura 23) consiste num diagrama de consumos genéricos para toda a rede de abastecimento do concelho de Coimbra (retirado do relatório da AC) e o terceiro diagrama (Figura 24) obtido com os dados dos consumos de caudais fornecidos previamente pela Águas de Coimbra.

É de salientar, que todos estes diagramas possuem consumos mais carregados durante as 7:00 até as 12h e das 20:00 as 22:00, tendo consumos muito reduzidos durante o resto da noite. Verificou-se que, o diagrama que se ajustava melhor para os consumos da rede, era o diagrama obtido com os dados da ZMC (Figura 24). Este diagrama, consegue-se dividindo o caudal real da ZMC, em cada intervalo de tempo por um fator de ponta em que resulta um fator multiplicativo.

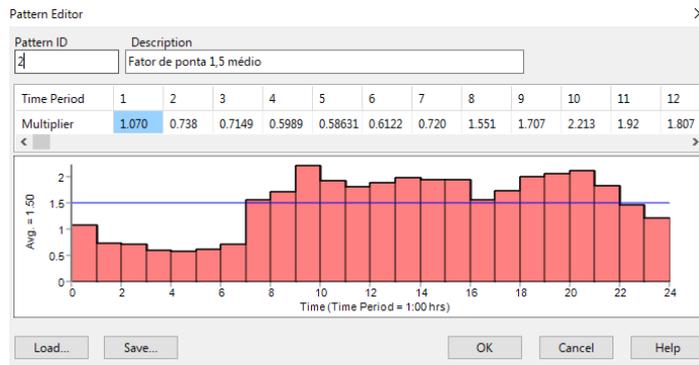


Figura 22 - Diagrama nº1, diagrama genérico

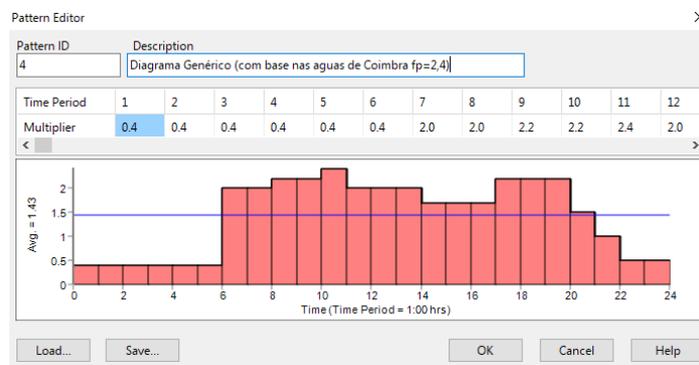


Figura 23 - Diagrama nº2, diagrama com base nas águas de Coimbra



Figura 24 - Diagrama nº3, que representa melhor os consumos existentes

3.6.3 Incorporação das perdas

A simulação das perdas e a sua incorporação no modelo, é algo de supra-importância, pois permite testar várias soluções sem os custos associados que ocorrem na realidade e permite também prever os resultados dessas soluções, como por exemplo: falta de pressão em certas zonas ou o incumprimento de velocidades máximas da água nas condutas.

De seguida apresenta-se o modo como se simulou as perdas nos diferentes tipos de análise:

- **DDA**

Nesta análise foram testadas duas formas para representar as perdas: proporcionalidade das perdas de igual forma por todos os nós e distribuição das perdas consoante o comprimento das condutas.

A primeira forma consiste em dividir o caudal de perdas por o número de nós, de acordo com Quadro 3.7 e de seguida arranjar um diagrama de consumos, com um certo fator de ponta, que seja considerado adequado.

Quadro 3.7 - Cálculo da perda por nó

45	Nós
0,0128	Perda por nó (l/s)

Na segunda forma, consiste em atribuir um “peso” a cada conduta consoante o seu comprimento e multiplicar a perda total, que é conhecida anteriormente, pelo peso de cada conduta, obtendo assim as perdas distribuídas por condutas consoante o seu comprimento

Ambas as formas estão aquém da realidade e não podem ser utilizadas para detetar as fugas, apenas para testar resultados do modelo hidráulico como pressões, caudais e consumo. Deste modo, apesar de serem testados as duas formas, optou-se por usar a primeira forma devido à sua simplificação para a obtenção dos resultados do modelo DDA.

- **PDA**

Na análise PDA as fugas são distribuídas uniformemente com a percentagem de perdas da ZMC, 29,6 %. De acordo, com a literatura revista no capítulo 2, também são incorporados os coeficientes de perdas por rotura (Burst) e perdas por pequenos orifícios (Background) de forma simplificada.

Quadro 3.8 - Coeficientes de Burst e Background.

Background Leaks	β_k	1E-07
	α_k	1,5
Burst Leaks	C_k	0,001
	δ_k	0,5

Como já referido anteriormente, os parâmetros β_k e α_k são parâmetros que dizem respeito as perdas de pequenos orifícios que tomam o valor de 10^{-7} e α_k que pode variar entre 0,5 e 2,5, neste caso é assumido um valor médio de forma simplificada.

O parâmetro δk , toma o valor de 0,5 para orifícios e C_k é determinado segundo a equação (23) e equação (24) (Muranho, 2012).

$$Q = C_k * H^\alpha \quad (23)$$

Apesar de o C_k obtido não é o verdadeiro coeficiente de vazão mas sim afetado de uma área e comprimento, assim para obter o verdadeiro coeficiente, C'_k , utiliza-se a seguinte equação em que L é o comprimento da fenda, admitindo simplifcadamente 4 mm e o β , que é um coeficiente que se relaciona com a área da abertura que por simplificação se admite 1,5, com isto se consegue obter o valor do coeficiente genérico de vazão (Ferreira, 2015):

$$C_k = C'_k * L^\beta \quad (24)$$

3.6.4 Componentes físicos

Uma rede de distribuição possui diversos componentes físicos que precisam de ser incorporados no modelo:

- Não foram consideradas, as válvulas de secionamento bem como contadores e ramais para cada habitação dado que aumentava a complexidade do modelo;
- Nós, a rede possui 45 nós com consumos base;
- Conduatas, o modelo hidráulico possui 7,2 km de conduta, de diâmetro interno que varia entre os 90 e os 400 mm, de rugosidade 0,01 mm, que podem ser de PVC ou PEAD, e as mesmas as são incorporadas no modelo hidráulico por linhas que unem os nós;
- Válvulas, encontram-se incorporadas no modelo duas válvulas VRP, uma para garantir a pressão média no ponto de entrada da ZMC e outra que também esta presente “in situ” para reduzir a pressão máxima, ambas com “settings” de 55,5 m.c.a.;
- Reservatório, uma vez que no cadastro fornecido pela EG não se encontrava o reservatório, dado que se situa fora da ZMC, foi criado para o modelo um reservatório virtual com a cota do reservatório real, assim como o nível de água médio do mesmo.

3.6.5 Validação dos dados

A validação do modelo de simulação incidiu essencialmente sobre a entrada da ZMC junto ao caudalímetro, foi efetuada com dados da telegestão de medições de caudais instantâneos.

Foi realizada uma comparação (Figura 25) do caudal instantâneo, medido para o dia de maior consumo, com o caudal instantâneo no modelo em DDA, usando um diagrama de consumos previamente obtido com os dados da telegestão e comparou-se a sua correlação. O diagrama de consumos utilizado já incorpora as perdas.

O gráfico, tem no eixo das abcissas as horas e no eixo das ordenadas o caudal em litros por segundo e verifica-se que existe uma boa correlação entre o caudal medido à entrada da zona e o caudal obtido no modelo. Está assim a validação feita dos dados com o caudal de entrada.

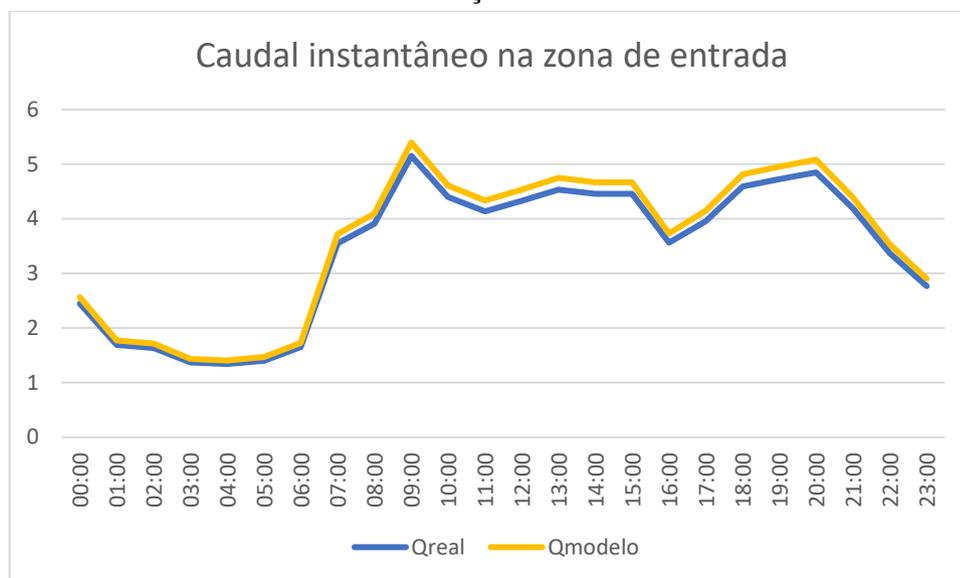


Figura 25 - Correlação do caudal instantâneo real e o caudal instantâneo do modelo

3.6.6 Step-Test

Uma vez já referido na revisão bibliográfica desta dissertação, o “step-test” é um método para localizar fugas numa rede de abastecimento e distribuição. Assim para analisar os resultados do modelo, optou-se por simular um “step-test” e as suas fugas no programa Epanet Waternetgen, de modo a quantificar a fuga e mais uma vez verificar a validade do modelo. As fugas foram simuladas no modelo com informação retirada da visita técnica, colocou-se caudais em certos nós e simulou-se em DDA.

O “step-test” pode ser resumido:

1. Teste por fases à noite durante o período de procura baixa;
2. Definir a área do “degrau” com suspeita de fuga elevada;
3. Fechar todas as válvulas de limite (para estabelecer uma área apertada);
4. Fechar todas as válvulas de circulação para remover os laços e criar uma rede de árvores, ou seja sem circuitos fechados;
5. Fixar o registador de dados ao caudalímetro instalado na área principal de fornecimento da área de teste por fases;
6. Começar no tubo/válvula mais afastado do medidor de caudal;
7. Fechar das válvulas de “degrau” em sucessão de modo a que cada vez menos da “área de degrau” seja fornecida através do medidor de caudal e registre os valores de caudal medidos;

8. Sequência de fecho das válvulas (conforme determinado pelo modelo de rede) de volta para o medidor, quando a leitura for zero;
9. Manter cada “degrau” suficientemente longo para notar um impacto de leitura no medidor;
10. Reabrir as válvulas de “degrau” em ordem inversa.

Assim, estabeleceram-se quatro válvulas de secionamento no modelo: V0, V1, V2, V3. Inicialmente, optou-se por fechar a válvula V0 (Figura 27) e de seguida correndo a “simulação”, tal como um verdadeiro step test, para um horário de baixo consumo obtém-se o gráfico de caudal da Figura 26.

O gráfico a laranja, representa o caudal do modelo sem válvulas fechadas e o a azul com a válvula V0 fechada. Analisando o gráfico percebe-se que o “degrau” entre eles é muito pouco significativo, ou seja, a fuga não se encontra nesta zona.

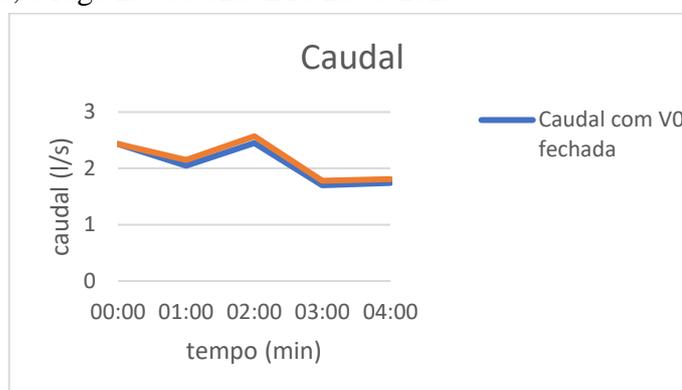


Figura 26 - Caudal da rede para a válvula V0 fechada

Passando para outra zona da rede, opta-se por fechar primeiro a válvula V1 à 01:00 am, às 02:00 am, abre-se a V1 e fecha-se a V2 e pelas 04:00 am fecha-se a válvula V3 e todas as restantes.

Analisando mais uma vez, o gráfico de caudal obtido pela simulação, verifica-se que existem vários “degraus” na zona escolhida que podem corresponder a uma fuga ou várias. (Figura 28)

Posteriormente a esta fase, seria necessário enviar uma equipa de deteção de fugas para o terreno para verificar a existência concreta de fugas utilizando método de deteção como o geofone ou varetas eletrónicas.

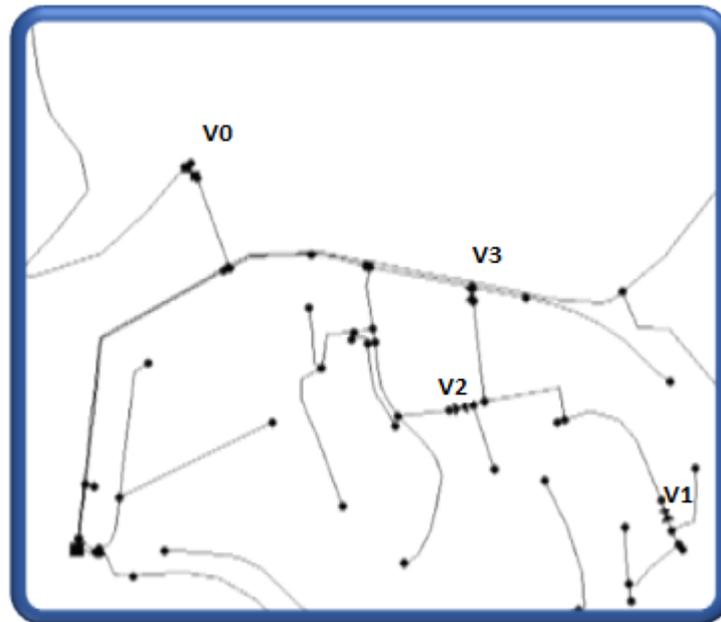


Figura 27 - Localização das válvulas V0, V1, V2 e V3

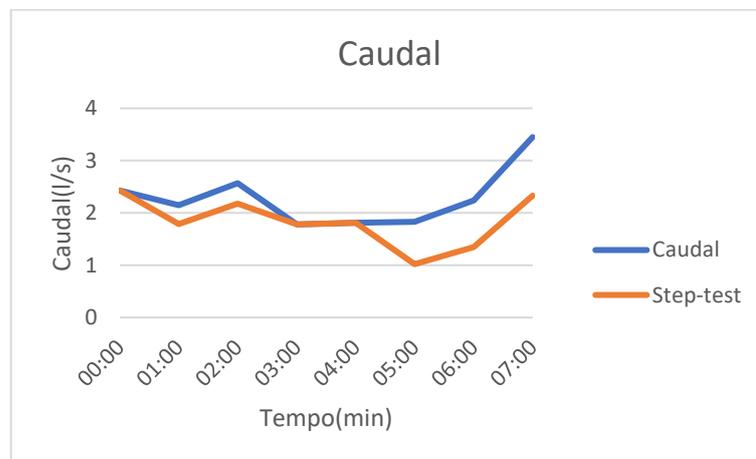
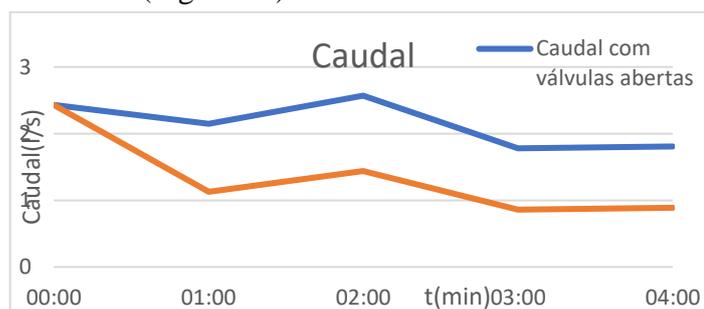


Figura 28 - Step-test no Epanet Waternetgen

Quadro 3.9 - Resultados do “step-test” no modelo

Horas	Caudal(l/s)
00:00	2,43
01:00	1,79
02:00	2,18
03:00	1,78
04:00	1,81
05:00	1,02
06:00	1,35
07:00	2,33

Finalmente, utiliza-se os resultados do modelo para comparar o caudal da rede sem válvulas fechadas com a mesma rede com as válvulas V1, V2 e V3 fechada. O que se verifica, no fundo é uma constatação da existência de uma fuga na rede, dado que existe um desnível de caudal entre os dois gráficos obtidos (Figura 29).

**Figura 29** - Caudal com válvulas abertas vs Caudal com válvula V1, V2 e V3 fechadas

4 CASO DE ESTUDO

4.1 Introdução

Neste capítulo, continua-se a estudar o modelo previamente criado analisando os resultados obtidos, comparando as diferentes análises, bem como, os diferentes cenários e por fim analisando as propostas de melhorias que podem ser implementadas.

4.2 Análise de resultados

Foram analisados três cenários: dia de maior consumo sem fuga, dia de maior consumo com fuga distribuída e dia de maior consumo com fuga localizada segundo os dados da visita técnica. O cenário da fuga localizada é estabelecido com consumos adicionais da fuga nos nós J153, J72 e J92 (Figura 30).

De seguida, apresenta-se os dados para o mesmo nó e conduta, respetivamente J129 e 109 (Figura 30). A escolha da conduta e do nó, a mostrar nos dados, recai na proximidade destes com a fuga.

Analisando os quadros seguintes, percebe-se que no dia de maior fuga o caudal é ligeiramente superior na análise DDA e como a pressão é inferior à pressão requerida na análise PDA, não existem consumos, ou seja, não existe caudal na análise PDA. Observando a pressão, nas análises PDA nota-se que é sempre constante, ou seja, é sempre satisfeita, de acordo com a literatura revista no capítulo 2.

- **Cenário I-dia de maior consumo sem fuga**

Quadro 4.1 - Resultados do modelo para o Cenário I

Horas	Caudal (l/s)		Pressão (m.c.a)	
	DDA	PDA	DDA	PDA
00:00	0,02	0	63,63	63,71
01:00	0,02	0	63,65	63,71
02:00	0,02	0	63,61	63,71
03:00	0,01	0	63,67	63,71
04:00	0,01	0	63,67	63,71
05:00	0,02	0	63,66	63,71
06:00	0,02	0	63,64	63,71
07:00	0,03	0	63,53	63,71
08:00	0,04	0	63,5	63,71
09:00	0,05	0	63,39	63,71

10:00	0,04	0	63,46	63,71
11:00	0,04	0	63,46	63,71
12:00	0,05	0	63,43	63,71
13:00	0,04	0	63,44	63,71
14:00	0,04	0	63,48	63,71
15:00	0,04	0	63,5	63,71
16:00	0,03	0	63,54	63,71
17:00	0,04	0	63,52	63,71
18:00	0,04	0	63,5	63,71
19:00	0,04	0	63,46	63,71
20:00	0,05	0	63,43	63,71
21:00	0,04	0	63,43	63,71
22:00	0,03	0	63,54	63,71
23:00	0,03	0	63,59	63,71

- **Cenário II-dia de maior consumo com fugas distribuídas pelos nós**

Quadro 4.2 - Resultados do modelo para o Cenário II

Horas	Caudal (l/s)		Pressão (m.c.a)	
	DDA	PDA	DDA	PDA
00:00	0,03	0	63,58	63,68
01:00	0,03	0	63,61	63,68
02:00	0,04	0	63,57	63,68
03:00	0,03	0	63,63	63,68
04:00	0,03	0	63,63	63,68
05:00	0,03	0	63,63	63,68
06:00	0,03	0	63,6	63,68
07:00	0,05	0	63,47	63,68
08:00	0,05	0	63,44	63,68
09:00	0,06	0	63,31	63,68
10:00	0,06	0	63,39	63,68
11:00	0,05	0	63,41	63,68
12:00	0,06	0	63,35	63,68
13:00	0,06	0	63,37	63,68
14:00	0,05	0	63,41	63,68
15:00	0,05	0	63,43	63,68
16:00	0,05	0	63,48	63,68
17:00	0,05	0	63,45	63,68
18:00	0,05	0	63,44	63,68
19:00	0,06	0	63,39	63,68
20:00	0,06	0	63,36	63,68

21:00	0,06	0	63,37	63,68
22:00	0,05	0	63,48	63,68
23:00	0,04	0	63,53	63,68

- **Cenário III-dia de maior consumo com fugas localizadas**

Quadro 4.3 - Resultados do modelo para o Cenário III

Horas	Caudal (l/s)		Pressão (m.c.a)	
	DDA	PDA	DDA	PDA
00:00	0,02	0	63,55	63,71
01:00	0,02	0	63,57	63,71
02:00	0,02	0	63,53	63,71
03:00	0,01	0	63,6	63,71
04:00	0,01	0	63,6	63,71
05:00	0,02	0	63,6	63,71
06:00	0,02	0	63,56	63,71
07:00	0,03	0	63,44	63,71
08:00	0,04	0	63,4	63,71
09:00	0,05	0	63,27	63,71
10:00	0,04	0	63,35	63,71
11:00	0,04	0	63,38	63,71
12:00	0,05	0	63,31	63,71
13:00	0,04	0	63,33	63,71
14:00	0,04	0	63,37	63,71
15:00	0,04	0	63,39	63,71
16:00	0,03	0	63,44	63,71
17:00	0,04	0	63,42	63,71
18:00	0,04	0	63,4	63,71
19:00	0,04	0	63,35	63,71
20:00	0,05	0	63,32	63,71
21:00	0,04	0	63,33	63,71
22:00	0,03	0	63,45	63,71
23:00	0,03	0	63,45	63,71

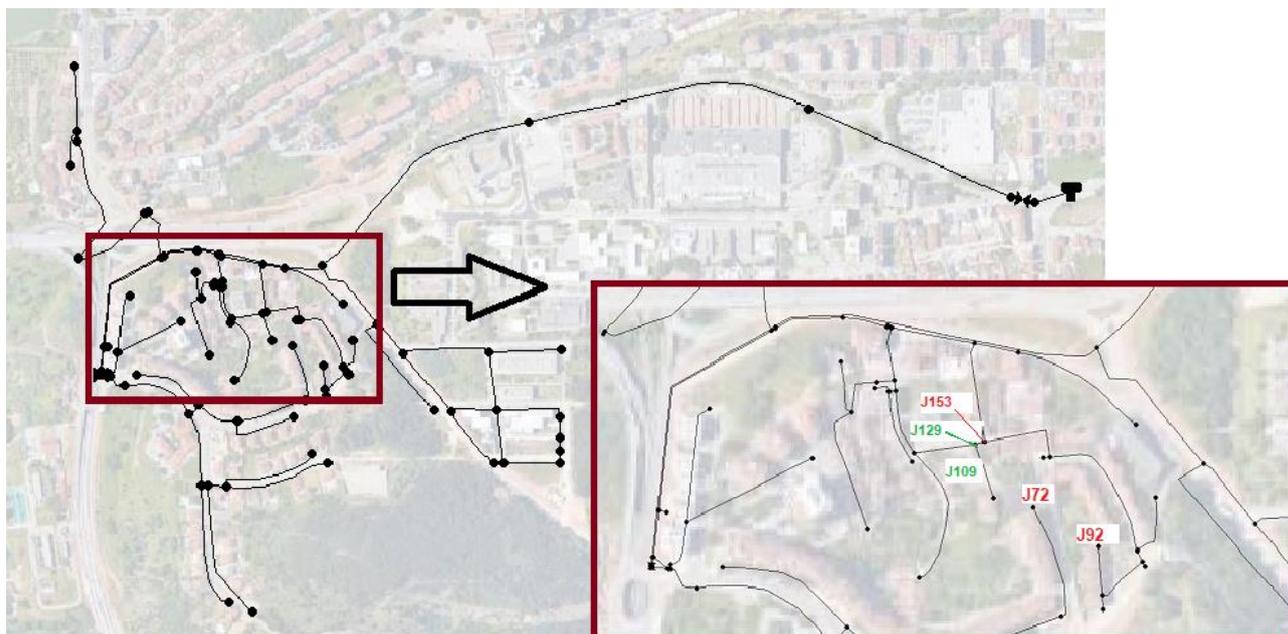


Figura 30 - Nós com consumo a vermelho e nó/conduto analisados a verde

4.3 Verificações regulamentares

De acordo com, o RGSPPDADAR, é necessário verificar se a rede cumpre os requisitos regulamentares, nomeadamente de velocidades (Figura 31) e de pressões (Figura 32).

- **Velocidades**

a) A velocidade de escoamento para o caudal de ponta no horizonte de projeto não deve exceder o valor calculado pela expressão: $V = 0,127 D^{0,4}$

b) A velocidade de escoamento para o caudal de ponta no ano de início de exploração do sistema não deve ser inferior a 0,30 m/s e nas condutas onde não seja possível verificar este limite devem prever-se dispositivos adequados para descarga periódica;

Analisando o modelo no cenário ideal, sem fugas, conclui-se que as velocidades máximas são cumpridas, no entanto não são respeitadas as velocidades mínimas, contudo, como não é o ano de início de exploração, é aceitável, pois é assumido a existência de dispositivos de descarga periódica.

- **Pressões**

c) A pressão máxima, estática ou de serviço, em qualquer ponto de utilização não deve ultrapassar a 600 KPa medida ao nível do solo;

d) Não é aceitável grande flutuação de pressões em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima ao longo do dia de 300 KPa;

e) A pressão de serviço em qualquer dispositivo de utilização predial para o caudal de ponta não deve ser, em regra, inferior a 100 KPa o que, na rede pública e ao nível do arruamento, corresponde aproximadamente a:

$$H = 100 + 40n$$

Uma vez mais, analisando os resultados do modelo percebe-se que a pressão mínima é sempre verificada, no entanto a pressão máxima não é verificada em alguns nós (Figura 32).

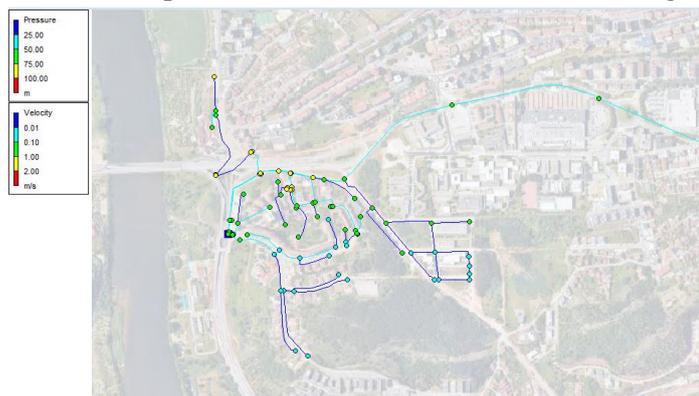


Figura 31 - Distribuição das velocidades e pressões às 2h30



Figura 32 - Nós com pressões superiores ao máximo regulamentar

4.4 Indicadores de desempenho

De modo a analisar o desempenho da ZMC em questão foram utilizados alguns indicadores de desempenho propostos pela IWA para avaliar a eficiência e eficácia em termos de abastecimento e distribuição de água, no cenário II em DDA.

Começando pelo indicador operacional, **Op23** que como já referido no capítulo 2, serve para analisar as perdas de água durante o período de referência por percentagem do número de ramais.

Quadro 4.4 - Indicador de desempenho operacional por percentagem do número de ramais

A15	8219,13
H15	365 t
C24	197 nº de ramais
Op23	41,72 (m3 /km rede/ano)

$$Op23 = \frac{\left(\frac{A15}{H15}\right) \times 365}{C24}$$

Uma vez para efeitos de comparação consultando a Figura 33 retirada do guia da ERSAR, verificamos que possui uma qualidade de serviço boa.

AA12b – Perdas reais de água [l/(ramal · dia)]	
Volume de perdas reais por ramal.	
AA12b = (dAA55b / dAA18b) × (1000 / 365)	
dAA18b – Ramais de ligação (n.º)	
dAA55b – Perdas reais (m³/ano)	
Valores de referência para sistemas em	baixa
Qualidade do serviço boa	[0; 100]
Qualidade do serviço mediana]100; 150]
Qualidade do serviço insatisfatória]150; +∞ [
Este indicador aplica-se a entidades em baixa se a densidade de ramais for igual ou superior a 20/km de rede.	
Código IWA: Op23	Código ERSAR anterior: AA13b

Figura 33 - Valor de referência para o indicador Op23, de acordo com a ERSAR

O **indicador Op24** avalia as perdas de água por comprimento de conduta.

Quadro 4.5 - indicador Op24

A15	49,06 m3
H14	1 t
C8	7,2 km
Op24	6,8 m3/km/dia

$$Op24 = \frac{A15}{\frac{H1}{C8}}$$

Na figura seguinte, podem ser encontrados os valores de referência do indicador operacional em questão, em que se conclui que a qualidade de serviço é insatisfatória.

AA12a – Perdas reais de água [m³/(km . dia)]		
Volume de perdas reais por unidade de comprimento de conduta.		
AA12a = dAA55a / (dAA15a × 365)		
dAA15a – Comprimento total de condutas (km)		
dAA55a – Perdas reais (m³/ano)		
Valores de referência para sistemas em	alta	baixa
Qualidade do serviço boa]0,0; 5,0]]0; 3,0]
Qualidade do serviço mediana]5,0; 7,5]]3,0; 5,0]
Qualidade do serviço insatisfatória]7,5; +∞ []5,0; +∞ [
Este indicador aplica-se às entidades em alta e às entidades em baixa quando a densidade de ramais for inferior a 20/km de rede.		
Código IWA: Op24		Código ERSAR anterior:AA13a

Figura 34 - Valores de referência do indicador Op24 retirados do Guia da ERSAR

O indicador **Op29** avalia o índice infraestrutural de fugas (Equação (3)) e relaciona as perdas reais (Op27) com as perdas reais mínimas

$$Op29 = \frac{10 \times Op27}{D34 \left[18 \times \frac{C8}{C24} + 0,7 + 0,025 \times C25 \right]}$$

D34	53,94	m.c.a
C25	77,5	m
C24	197	nº
C8	7,2	km
Op27	681,4	l/km/dia
Op29	3,8	

Assim, verifica-se que a relação das perdas reais com as perdas mínimas inevitáveis são de aproximadamente 4 vezes, o valor que pode ser bem mais reduzido.

O indicador **WR1**, avalia as perdas reais em percentagem do volume total de entrada no sistema durante o período de referência. (Equação(4)). De acordo com o Quadro 4.6, verifica-se que este indicador está, como esperado, de acordo com o balanço hídrico realizado no início.

$$WR1 = \frac{A19 \times 100}{A3}$$

Quadro 4.6 - Indicador WR1

A19	8219,1
A3	27736,5
WR1	29,6

O indicador **Fi46**, consiste no fundo na percentagem de água não faturada que entra no sistema, uma vez que nesta dissertação se considera a água não faturada como uma perda real, é idêntico ao indicador anterior.

Por fim, o indicador **Fi47** não poderá ser utilizado, uma vez que, com os dados presentes, não se consegue desagregar as parcelas dos consumos autorizados ou não autorizados.

4.5 Análise crítica da rede

O modelo da rede permite também fazer uma análise crítica das condições existentes atuais. Neste momento, como a rede possui fugas, três de acordo com a visita técnica, possui pontos em que excede as pressões máximas regulamentares e condutas que não cumprem as velocidades mínimas e possui condutas bastante envelhecidas.

Utilizando os indicadores calculados no ponto 4.4, nota-se que apesar do desempenho operacional ser de qualidade “boa”, a qualidade de serviço em termos de perdas de água é “baixo” e ainda tem bastante “espaço” para melhorar.

4.6 Propostas de soluções para o melhoramento da rede e os seus resultados

O melhoramento da rede incide em:

- Reparar as fugas;
- Substituir as condutas por mais recentes, uma vez que as atuais encontram-se bastante envelhecidas;
- Introduzir uma válvula extra VRP para controlar os valores de pressão máximo e como medida preventiva de futuras fugas, uma vez que diminuído a pressão mais facilmente se controla as fugas da rede;
- Colocar dispositivos de descarga, devido as velocidades baixas.;

4.6.1 Análise de resultados dos melhoramentos

Uma vez que, a gestão de pressão é um método para o controlo das perdas e sabendo , que a rede excede as pressões máximas, foi estabelecido um cenário IV, em que, se adiciona duas válvulas VRP com settings de 55,5 m.c.a na conduta 4 ao cenário II(Figura 35).

Porém, como se reduz a pressão na rede nos quatro pontos mais afastados é impossível manter uma pressão adequada (Figura 36). Uma solução para tal problema será usar acessórios do tipo PSV, “Pressure sustain valve”, que mantenha a pressão suficiente nesses quatro nós.

Por fim, utilizando análise PDA, é possível observar que a título de exemplo que as perdas das condutas que conduzem ao nó J19, diminuem (Quadro 4.7) de um 0,033 l/s para 0,012 às 00:30h, sendo que o total de perdas diário diminuiu de **0,47 l/s** para **0,32 l/s**.

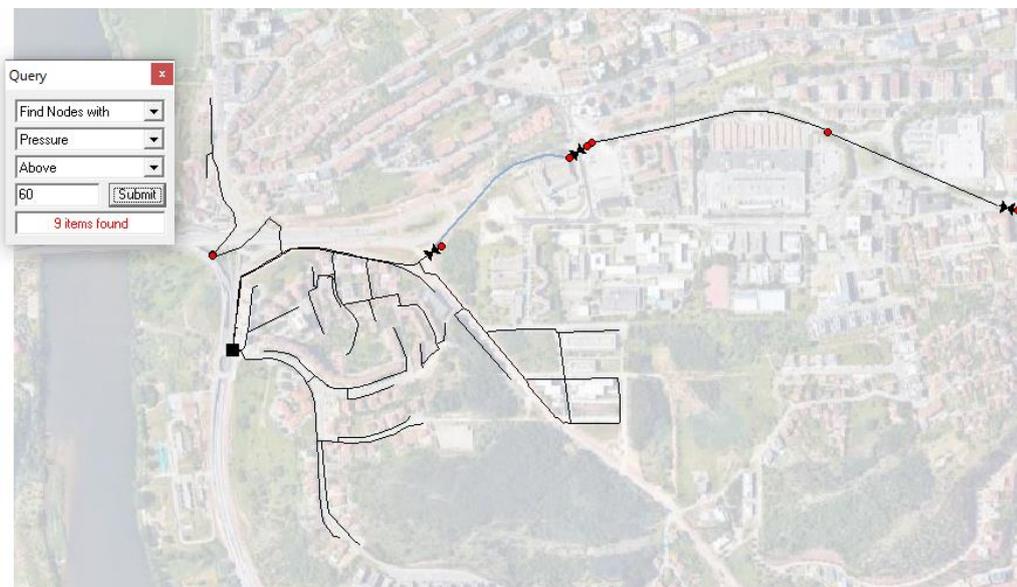


Figura 35 - Pontos na rede que não respeitam a pressão máxima

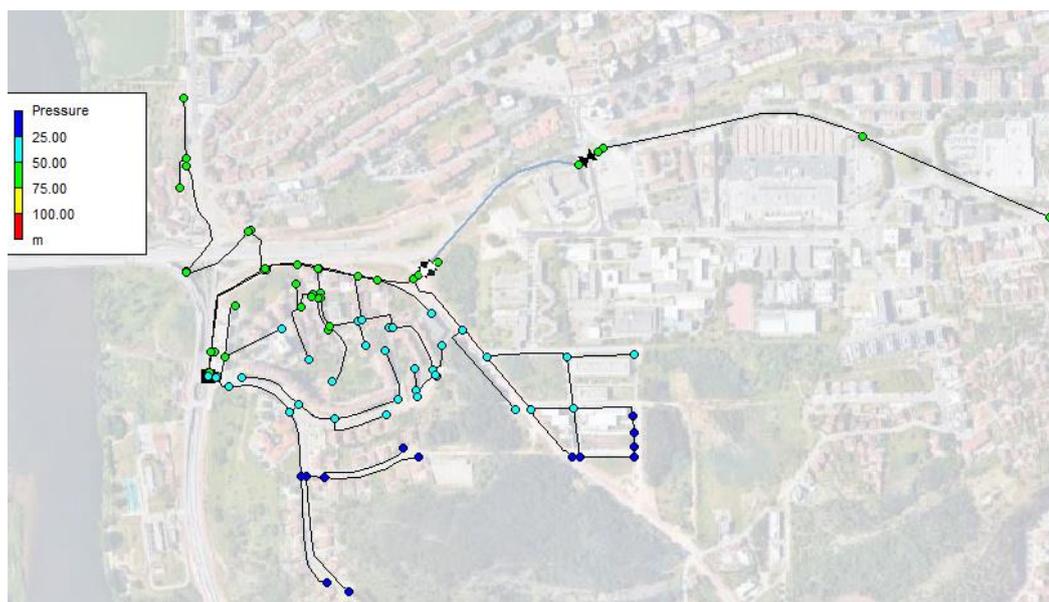


Figura 36 - Pressão com duas VRPs

Quadro 4.7 - Perdas antes e depois do melhoramento

Nó	Perda antes do melhoramento da rede(l/s)	Perda depois do melhoramento da rede(l/s)
J32	0,03314	0,01215
Total	0,47	0,32

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusão

Neste trabalho, foram revistos conceitos e conhecimentos da bibliografia do tema em questão. Começa por distinguir os diferentes tipos de perdas de água e fatores que as influenciam. Explica como uma EG consegue perceber a existência de uma fuga antes do envio da equipa técnica, através de métodos como o balanço hídrico e o caudal mínimo noturno. Descreve algumas das técnicas para deteção de fugas, como o step-test, que o autor teve a oportunidade de observar. Aborda os diferentes modelos matemáticos e de simulação hidráulica, passando pelas duas diferentes análises DDA e PDA utilizadas pelo software EPANET Waternetgen. A importância da pressão no sistema é salientada, dado que a correta gestão e regulação da mesma é uma técnica eficiente de combate às perdas. Realça-se a importância da simulação hidráulica, para analisar a velocidade e pressões da rede, que permite testar novas soluções e os seus efeitos antes destes serem implementados.

A segunda parte, recai sobre a construção do modelo que foi feita desde raiz, utilizando apenas dados de consumo, da topografia e tipologia da rede fornecidos pela AC. Realiza-se a construção de vários diagramas de consumos e ajusta-se os mesmos com os dados da rede real. No modelo contabiliza-se também as perdas, na análise DDA por consumos e na análise PDA por consumos distribuídos e por toda a rede

Finalmente, analisa-se os resultados obtidos, dos diferentes três cenários, dos quais se retira que o cenário II (com fuga distribuída) tem um caudal ligeiramente superior e uma pressão inferior ao cenário I (sem fuga) e que o cenário III (com fuga localizada) tem um caudal semelhante ao cenário I, devido a localização da fuga ser num ramal. Entende-se a necessidade do uso de indicadores desempenho, uma vez que permite caracterizar a rede e a sua eficiência. Verifica-se que a rede apresenta alguns problemas a nível de pressão e velocidades, pelo que é considerado um cenário IV em que se introduz em duas válvulas VRP, na conduta 4, de modo a melhorar a pressão e reduzir as fugas.

O principal subproduto deste trabalho é a construção e análise de um modelo de simulação simplificado, que permite a manipulação e experimentação da rede e das suas diversas soluções de melhoramento.

Concluo, que apesar dos modelos simulação de redes serem representações da realidade e não apresentarem resultados exatos, estes podem ser instrumentos preciosos na gestão e melhoramento da rede em que facilmente se testa novos cenários e soluções sem custos de materialização associados.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Outros estudos poderão ser realizados nesta área, pelo que se deixa aqui algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Proceder a uma análise comparativa de custos entre as soluções de melhoramento;
- Analisar custos de energia com a pressurização da rede;
- Estudar a viabilidade e sustentabilidade das ZMC, de forma a incluir parâmetros da qualidade de água.;
- Analisar o funcionamento de um conjunto de contadores com o objetivo de criar uma curva de erro ponderado que possa auxiliar o estudo económico da viabilidade de uma campanha de substituição de contadores de modo a obter resultados mais reais para EG na avaliação de fugas e perdas.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alegre, H., Coelho, S. T., Almeida, M., Vieira, P. (2005). “Guia Técnico 3: Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição”. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Instituto da Água (INAG) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

Alegre, H., Coelho, S., Almeida, M., Vieira, P. (2005). Guia Técnico 3: Controlo de perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Instituto da Água (INAG) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa

Alegre, H., Hirner, W., Baptista, J. M., Parena, R. (2004). “Guia Técnico 1: Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. Manual de Boas Práticas da IWA”. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR) e Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa.

Alves, W.C (1999) Macromedição, Ministério do Planeamento e Orçamento, Programa Nacional de Combate ao Desperdício de Água, Brasília.

Amado, J. M., Marques, J. A. A. S. (2004). Modelação Hidráulica de Escoamentos Permanentes e Variáveis em Pressão. In Método das Características" Adaptado", Anais do 7º Congresso da Água, Lisboa, Portugal.

Baek, C., Jun, H., Kim, J. (2010). “Development of a PDA Model for Water Distribution Systems Using Harmony Search Algorithm”. KSCE Journal of Civil Engineering, 14, 613 625. doi: 10.1007/s12205-010-0613-7.

Cardoso, F. Oliveira, F. Lacerda e J. Poças-Martins (2013). “Reduction of real water losses in Water Supply Systems: Pressure Optimization”, Documento de apresentação da 8ª Jornada de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

Chaveiro P, Isidoro J (2018) Modelação e calibração hidráulica da rede de abastecimento de água de Reguengos de Monsaraz. Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia (ISE), Universidade do Algarve.

Coelho, S., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). *Modelação e Análise de Sistemas de Abastecimento de Água*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Portugal.

Cortês, A. S. B. (2015). "Fugas e perdas em sistemas de abastecimento de água". Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra

Duarte, A. A., Rodrigues, G., Ramos, R. A., e Bentes, I. (2010). *Definição de índices de qualidade de serviço em sistemas de abastecimento de água*, Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos (APRH), Braga.

Ernst, H. S., Minamyer, K. S., Fox, K. R. (2011). *Epa drinking water security research program*. In *Handbook of Water and Wastewater Systems Protection* (pp. 47-64). Springer, Nova York.

ERSAR. (2020). *Relatório Anual do Setor de Águas e Resíduos em Portugal, Volume 1 – Caracterização Geral do Setor*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

Farley, M., & Liemberger, R. (2005). *Developing a non-revenue water reduction strategy: planning and implementing the strategy*, Water Science and Technology: Water Supply, IWA Publishing.

Farley, M., Wyeth, G., Md Ghazali, Z., Istandar, A., Singh, S. (2008). *The Manager's Non-Revenue Water Handbook – A Guide to Understanding Water Losses*, United States Agency for International Development, Bangucoque, Tailândia.

Formiga, K. T. M., Chaudhry, F. H. (2008). *Water distribution networks analysis considering leakage and pressure driven demand modeling*, Artigo técnico, Escola de Engenharia civil, Universidade Federal de Goiás, Brasil.

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

Henriques, Duarte, Bugalho, L., Marreiros, C., Cruz, J., Salgueiro, E., Antunes, S, Rodrigues, (2022). *Relatórios Científicos e Técnicos do IPMA-Série Digital*, IPMA - Instituto Português do Mar e da Atmosfera, Lisboa, Portugal.

Liemberger, and P. Marin. "The Challenge of Reducing Non-Revenue Water (NRW) in Developing Countries—How the Private Sector Can Help: A Look at Performance-Based

Service Contracting.” WSS Sector Board Discussion Paper Series—Washington, DC:World Bank, 2006.

Liemberger, R., Brothers, K., Lambert, A., Mckenzie, R., Rizzo, A., Waldron, T. (2007). "Water loss performance indicators". In Water Loss 2007, Specialized Conference Proceedings, IWA, 23-26 September, Bucharest, Romania.

Liu, Y., Ma, X., Li, Y., Tie, Y., Zhang, Y., e Gao, J. (2019). Water pipeline leakage detection based on machine learning and wireless sensor networks. Sensors, Basel, Suíça.

Martins, C. P. F. (2009). Balanço Hídrico e Indicadores de Desempenho no Subsistema de Abastecimento de Água de São João de Lobrigos-Santa Marta de Penaguião, Tese de mestrado, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Vila Real.

McKenzie, R., and Lambert, A. O.(2007), Best Practice Performance Indicators for Non-Revenue Water and Water Loss Components: A Practical Approach., International Water Association: Londres, Reino Unido.

Mohseni, U., Pathan, A. I., Agnihotri, P. G., Patidar, N., Zareer, S. A., Kalyan, D. e Prieto, C. (2021, December). Design and Analysis of Water Distribution Network Using Epanet 2.0 and Loop 4.0—A Case Study of Narangi Village. In International Conference on Intelligent Computing & Optimization (pp. 671-684). ICCAP 2021, Chennai, India

Moura, A. F. C. D. A. (2017). Fugas e perdas em redes de distribuição de água: Estudo de Caso: ZMC-Carvalhosas/Palheiros Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra

Muranho, J. M. (2012). Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água - Geração de Modelos, Dimensionamento e Avaliação de Desempenho, Tese de Doutoramento. Universidade de Coimbra, Coimbra.

Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., Sá Marques, A. (2014). "Pressure – Dependent Demand and Leakage Modeling With an EPANET Extension – WaterNetGen". Procedia Engineering, 89, 632-639

Olaia, A. I. S. (2012). Gestão de sistemas de abastecimento de água através de modelação hidráulica, Tese de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova, Lisboa.

Oliveira, R. P. D. E., Veiga, L., e Cunha, D. A. (2013). *The Portuguese Climate Change Adaptation Strategy for Water Resources Management*, APA, Lisboa, Portugal.

PEAASAR, I. (2007). *Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais 2007-2013*. Ministério do ambiente, do ordenamento do território e do desenvolvimento regional, Lisboa.

RGSPDADAR (1995) - “Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais”. Ministério das Obras Públicas Transportes e comunicações. Decreto-Lei n.º 207/94, de 6 de Agosto.

Ribeiro, L. M. P. N. L. (2016). *Modelação matemática como apoio à localização aproximada de fugas em redes de distribuição de água*, Tese de doutoramento, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra

Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2: user’s manual*, USEPA, Cincinnati, OH.

Sá Marques, A., Sousa, J. (2011). “Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de água e de Drenagem de Águas Residuais” (3.ª ed.). Imprensa da Universidade de Coimbra.

Santos, L. F. (2010). *Impactos das Alterações Climáticas em Portugal*, Artigo técnico, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa.

Schmid, R. (2002). *Review of modelling software for piped distribution networks (2nd ed.)*, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management, Suíça.

Silva, C. O. D. (2014). *Modelagem de rede de distribuição de água com ênfase no controle de perdas*, Tese de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba, Brasil.

Silva, M. F. R. D. (2018). *Análise do Sistema de Drenagem da bacia do rio Cértoma*, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Coimbra.

Thornton, J.; Sturm, R.; Kunkel, G. (2008). “Water Loss Control”. 2º Edition. McGraw-Hill, Estados Unidos.

Todini, E. (2003). A more realistic approach to the “extended period simulation” of water distribution networks. In: Maksimovic C, Butler D, Memon FA (eds) *Advances in water supply management*. Swets & Zeitlinger, Lisse, Países Baixos.

Vieira, F., & Ramos, H. (2009). Optimization of operational planning for wind/hydro hybrid water supply systems. Volume 34, Issue 3, Renewable Energy, Chipre.

Vieira, J. M. Políticas Nacionais para os Sectores das Águas e dos Resíduos, Artigo publicado na Revista Engenharia Civil UM nº33, , pp. 30-105, Universidade do Minho, Braga, Portugal.

Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., e Koelle, E. (2003). Advanced water distribution modeling and management, Haestad Press, Waterbury, Estados Unidos.

@Sondec (2021) <http://www.sondeq.com.br/> , São Paulo

@Águas de Coimbra (2007) www.aguasdecoimbra.pt Página oficial da empresa municipal águas de Coimbra, Coimbra.

@Portal da água portaldagua.pt, Página oficial do Portal da água, Portugal.

@Ersar (2022) www.ersar.pt, Página da Ersar, Portugal.

@Envirotech (2022) www.envirotech-online.com, Environmental Technology (Publications) Limited, England.

@Gaiatec (2004) gaiatecsistemas.com.br, Página oficial da empresa Gaiatec, São Paulo

@Adoxsolutions (2010) www.adoxsolutions.in

@NWwaterservices (2022) <https://nwwaterservices.ie>

@Network (2010) <http://neatwork.ordecys.com>