



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Jéssica de Oliveira Abreu

FUGAS E PERDAS NUM SISTEMA DE
ABASTECIMENTO DE ÁGUA. O CASO DO
PÓLO II DA UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia do Ambiente, na área de
Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor
Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e pelo Professor Doutor Nuno Eduardo
da Cruz Simões apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de
Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Novembro de 2021



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

Jéssica de Oliveira Abreu

Fugas e perdas num sistema de abastecimento de água. O caso do Pólo II da Universidade de Coimbra

Leaks and losses in a water supply system. The Campus II of the University of Coimbra case.

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Ambiente, na área de Especialização em Território e Gestão do Ambiente, orientada pelo Professor Doutor José Alfeu Almeida de Sá Marques e pelo Professor Doutor Nuno Eduardo da Cruz Simões.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor.
O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, declina qualquer
responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões
que possam surgir

Coimbra, 22 de Outubro de 2021

AGRADECIMENTOS

Esta dissertação é dedicada aos meus avôs António e João e avós Ermelinda e Maria.

Agradeço aos meus orientadores, Professor Doutor Alfeu Sá Marques e Professor Doutor Nuno Eduardo Simões, por toda a disponibilidade desde o início ao fim.

Agradeço à Águas de Coimbra, por me ter disponibilizado toda a informação necessária para a elaboração desta Dissertação.

Agradeço à minha mãe por estar sempre ao meu lado em todas as decisões importantes, e ao meu pai por me ensinar a lutar pelos meus objetivos. Agradeço ao mano do meu coração por me ensinar a ser uma pessoa mais relaxada e a viver um dia de cada vez.

Agradeço ao meu Diogo, por todo o amor, carinho e paciência.

Um muito obrigado aos meus tios António, João e Vitor e as minhas tias Ana e Alda, por todo o apoio e incentivo, e à minha madrinha Sandy por ser um apoio incondicional.

Agradeço às melhores colegas de casa do mundo, Diana, Sabrina, Patrícia, Ana Filipa e Catarina, por todos os momentos partilhados.

Agradeço aos meus amigos Alex, João, Titi e Charana pela nossa amizade e por serem um porto seguro.

Agradeço a toda a Carroça de Ambiente pela partilha do mais belo caminho que percorri. FRA.

Quero também agradecer ao Pedro Filipe, Gouveia, Mariana M. Machado, Inês, André, Marta, Hugo e Beatriz por fazerem parte de alguns bons momentos.

A todos, muito obrigada.

RESUMO

Em Portugal existem problemas ao nível de perdas de água nos sistemas de abastecimento, que todos os anos resulta em desperdício de grandes volumes. Portanto, a deteção de perdas e fugas de água nas redes de distribuição, é hoje um assunto de grande interesse, sendo primordial a realização de uma boa gestão e planeamento nos sistemas de distribuição, de forma que a percentagem de perdas possa vir a ser reduzida.

Os objetivos gerais deste trabalho consistem no levantamento de técnicas de combate a perdas e fugas em sistemas de distribuição de água; a determinação do volume de perdas da rede; a construção, validação e calibração do modelo hidráulico computacional e, por último, a análise de consumo e dos dados obtidos na modelação. Assim, nesta dissertação estudou-se uma rede real, nomeadamente no Pólo II da Universidade de Coimbra.

A modelação hidráulica foi feita com recurso ao programa EPANET 2.0. Na simulação, a rede foi modelada com consumos horários dos demais ramais, consultados por códigos do contador na plataforma das Águas de Coimbra. De forma a analisar também o comportamento das pressões, uma vez que no programa a pressão é resultante dos consumos, fez-se a instalação de equipamentos de medição nos Departamentos de Engenharia Civil, Informática e Mecânica, e nos Serviços Centrais da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra. Para validar a rede na modelação ajustou-se a cota de terreno, de maneira a corresponder à cota onde foi instalado o sensor de pressão. Deste modo, a pressão máxima no modelo hidráulico é ajustada consoante a pressão máxima registada no equipamento.

Palavras-chave: Perdas, Modelação hidráulica, EPANET, Consumo, Caudal, Pressão

ABSTRACT

In Portugal there are problems in regards of water losses in the supplying systems, which every year results in large volumes being wasted. Therefore, the detection of water losses and leaks in the distribution networks is today a matter of great interest, and it is essential to carry out a good management and planning in the distribution systems, so that the percentage of losses can be reduced.

The general goals of this work consists of surveying techniques to combat losses and leaks in the water distribution systems; determining the volume of network losses; the construction, validation, and calibration of the computational hydraulic model and, lastly; the analysis of consumption and data obtained in the modeling. In this context, the dissertation aimed to study a real network, namely in Pole II of the University of Coimbra.

The hydraulic modeling was carried out using the EPANET 2.0 program. In the simulation, the network was modeled with hourly consumptions from the other extensions, consulted by meter codes on the Águas de Coimbra platform. To also analyze the behavior of pressures, since the program the pressure is the result of consumption, measurement equipment was installed in the Civil Engineering, Informatics and Mechanics' Departments, and in the Central Services of the Faculty of Science and Technology of the University of Coimbra. To validate the network in this modeling, the ground level was adjusted, so that it corresponded to the level where the pressure sensor was installed. In that way, the maximum pressure was adjusted in the hydraulic model to be equaled to the maximum pressure recorded in the equipment.

Keywords: Losses, Hydraulic Modeling, EPANET, Consumption, Flow, Pressure

ÍNDICE

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	ii
Abstract	iii
Índice.....	iv
Índice de Figuras	vi
Índice de Quadros	ix
Abreviaturas	x
Simbologia	xii
1 Introdução	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Motivação e objetivos	2
1.3 Organização da dissertação	3
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Considerações iniciais.....	4
2.2 Perdas de água.....	5
2.3 Fatores que influenciam as perdas de água	6
2.4 Métodos de avaliação de perdas.....	8
2.4.1 Balanço hídrico	8
2.4.2 Consumo mínimo noturno.....	11
2.4.3 Conceitos BABE	12
2.5 Controlo de perdas de água	13
2.5.1 Gestão de perdas	14
2.5.2 Detecção de perdas.....	18
2.5.3 Localização de perdas	20
2.5.4 Gestão da pressão.....	21
2.6 Modelação hidráulica em SDA	25
2.6.1 EPANET	26

2.6.2	WaterNetGen.....	27
2.7	Síntese da revisão bibliográfica.....	28
3	Metodologia	29
3.1	Enquadramento	29
3.2	Caso de Estudo – Pólo II da Universidade de Coimbra	29
3.3	Consumos da rede – Pólo II da Universidade de Coimbra	31
3.4	Cadastro da rede de água do Pólo II da Universidade de Coimbra.....	32
3.5	Equipamentos de medição de pressão	33
3.6	Modelação Hidráulica	37
4	Resultados.....	42
4.1	Análise de consumos da rede	42
4.2	Modelação Hidráulica - Análise.....	53
5	Conclusões e Trabalhos Futuros	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Trabalhos futuros	61
	Referências Bibliográficas	62
Anexo A	– Características dos nós da rede.....	1
Anexo B	– Características das condutas da rede	1
Anexo C	– Nós de junção e condutas da rede	1

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de um sistema de abastecimento e locais de possíveis perdas. (Fonte: Ferreira, 2017).....	4
Figura 2.2 – Problemas em condutas associado a formação de camadas de CaCO ₃ (a) e por corrosão (b).	6
Figura 2.3 – Fluxograma das principais influências num sistema de abastecimento (Fonte: EPAL,2017).	10
Figura 2.4 – Representação gráfica dos consumos domésticos durante 24 horas (Fonte: EPAL,2017)	12
Figura 2.5 – Abordagens Top-Down e Bottom-Up (Fonte: EPAL,2017).....	12
Figura 2.6 – Fases de abordagem no controlo de perdas reais (Fonte: Alegre et al.,2005).	14
Figura 2.7 – Ilustração do conceito de nível de perdas económicas (Fonte: EPAL,2017)	15
Figura 2.8 – Relação entre o nível económico de perdas e o nível de intervenção da rede (Fonte: Gomes, 2011)	16
Figura 2.9 – Os quatro pilares para a abordagem de controlo de perdas aparentes (Fonte: Gomes, 2011, adaptado de Thornton et al.,2008).....	16
Figura 2.10 – Os quatro componentes para a abordagem de controlo de perdas reais (Fonte: Gomes, 2011, adaptado de Thornton et al.,2008)	17
Figura 2.11 – Um sistema de medição zonada, com 3 zonas principais, estando a ZMC 2 subdividida em duas subzonas (Fonte:Alegre et al., 2005).....	19
Figura 2.12 – Relação entre a pressão e o caudal através de fugas para diferentes materiais das condutas. Adaptado de Lambert (2000).	23
Figura 2.13 – Metodologias BABE e FAVAD (Fonte: Thornton et al., 2008).....	24
Figura 2.14 – Fases de simulação usando o software EPANET (Fonte: Muranho,2012).....	27
Figura 3.1 – Localização da rede em estudo.	30
Figura 3.2 – Localização dos ramais de consumo: 1 – Serviços centrais; 2 – DEM; 3 – Casa Costa Alemão; 4 – Residência II; 5 – DEC; 6 – Casa da Pedra; 7 – DEQ; 8 – DEEC; 9 – DEI; 10 – Cantina; 11 – Residência I; 12 – VRP; 13 – VRP.....	31
Figura 3.3 – Plataforma cujo acesso foi cedido pelas Águas de Coimbra para consulta de consumos na rede do Pólo II da Universidade de Coimbra.	32
Figura 3.4 – Fotografia do equipamento de medição de pressão que se instalou.	33
Figura 3.5 – Medidor de pressão: (a) – DEQ; (b) – Residência II; (c) – Casa Costa Alemão.	34
Figura 3.6 – Instalação de sensor de pressão: (a) – DEC; (b) – SCFCTUC; (c) – DEI.	35
Figura 3.7 – Instalação do sensor de pressão no DEM: (a) – troço inicial; (b) – troço em T com redução; (c) – remoção do troço.....	36
Figura 3.8 – Instalação do sensor no totalizador pelas Águas de Coimbra.....	37

Figura 3.9 – Consumo horário em cada ramal de 23 de junho às 11 horas até 24 de junho às 10 horas em l/s.	38
Figura 3.10 – Padrão para o nível do reservatório, resultante do somatório da cota do terreno com a pressão média horária em m c.a.....	38
Figura 3.11 – Exemplo de introdução de dados no programa EPANET: (a) – características das condutas; (b) – características dos nós, identificação do padrão de consumo relativo ao ramal e base de consumo 1 l/s; (c) – identificação do padrão que corresponde ao somatório da cota do terreno do totalizador com a pressão horária.	39
Figura 3.12 – (a) – Exemplo de um padrão horário de um ramal de consumo em l/s; (b) – padrão resultante do somatório da cota do terreno com a pressão horária em m c.a.	40
Figura 3.13 – Exemplo do quadro no EPANET para consultar as pressões simuladas nos Departamentos em estudo.	40
Figura 4.2 – Consumo do total os contadores parciais e totalizador em m ³ /dia, de 24 de maio e 7 de julho de 2020.	43
Figura 4.3 – Perdas de água diárias em m ³ /dia, de 24 de maio e 7 de julho de 2020.	44
Figura 4.4 – Consumo horário do DEI em m ³ /h, 21 de setembro a 18 de outubro de 2020. ...	44
Figura 4.5 – Consumo horário do DEEC em m ³ /h, 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.	45
Figura 4.6 – Consumo horário do DEI e DEEC em m ³ /h, no dia 21 de setembro de 2020.	45
Figura 4.7 – Consumo horário do DEM em m ³ /h, 21 de setembro a 18 de outubro de 2020. .	46
Figura 4.8 – Consumo horário do DEM em m ³ /h, no dia 24 e 24 de setembro de 2020.	46
Figura 4.9 – Caudal mínimo, máximo e médio de cada ramal de consumo em m ³ /dia, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	47
Figura 4.10 – Consumo horário dos SCFTUC em m ³ /h, de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.	47
Figura 4.11 – Consumo diário dos SCFCTUC em m ³ /dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	48
Figura 4.12 – Consumo horários do SCFCTUC de 6 de dezembro a 10 de dezembro, para verificação do momento em que começou a fuga em m ³ /h.	49
Figura 4.13 – Consumo diário da casa da Pedra em m ³ /dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	49
Figura 4.14 – Consumo diário do DEEC em m ³ /dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	50
Figura 4.15 – Consumo diário do DEM em m ³ /dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	51
Figura 4.16 – Consumo diário do DEQ em m ³ /dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	51
Figura 4.17 – Consumo do total os contadores parciais e totalizador em m ³ /dia, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.	52

Figura 4.18 – Perdas de água diárias em m ³ /dia, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.....	53
Figura 4.19 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEC.	54
Figura 4.20 – Caudais e pressões do DEC e SCFCTUC no programa EPANET, no horário das 2:00 do dia 24 de junho.....	54
Figura 4.21 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET nos Serviços Centrais FCTUC.....	55
Figura 4.22 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEI.....	56
Figura 4.23 – Caudais e pressões do DEI no programa EPANET, no horário das 17:00 do dia 23 de junho.....	56
Figura 4.24 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEM.....	57
Figura 4.25 – Caudais e pressões do DEM no programa EPANET, no horário das 3:00 do dia 24 de junho.....	58

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Componentes do balanço hídrico [m³/ano] (adaptado de Alegre et al., 2005)... 9

ABREVIATURAS

BABE	Burst And Background Concept
CMN	Caudal Mínimo Noturno
DDA	Demand-Driven-Analysis
DEC	Departamento De Engenharia Civil
DEEC	Departamento De Engenharia Eletrotécnica E Computadores
DEI	Departamento De Engenharia Informática
DEM	Departamento De Engenharia Mecânica
DEQ	Departamento De Engenharia Química
EG	Entidade Gestora
EPAL	Empresa Portuguesa De Águas Livres S.A
EPANET GUI	Epanet Graphical User Interface
ERSAR	Entidade Reguladora Dos Serviços De Águas E Resíduos
FAVAD	Fixed And Variable Area Discharges
IRAR	Instituto Regulador De Águas E Resíduos
IWA	International Water Association
LNEC	Laboratório Nacional De Engenharia Civil
NEP	Nível Económico De Perdas
OFWAT	Office Of Water Services
OWA	Open Water Analytics

PDA	Pressure-Driven-Analysis
PEAD	Polietileno De Alta Densidade
PENSAAR	Plano Estratégico De Abastecimento De Água E De Saneamento De Águas Residuais
PVC	Policloreto De Vinilo
RASARP	Relatório Anual Dos Serviços De Águas E Resíduos Em Portugal
RGSPDADAR	Regulamento Geral Dos Sistemas Públicos E Prediais De Distribuição De Água E De Drenagem De Águas Residuais
SAA	Sistemas De Abastecimento De Água
SCFCTUC	Serviços Centrais Da Faculdade De Ciências E Tecnologias Da Universidade De Coimbra
SDA	Sistema De Distribuição De Água
US EPA	United States Environmental Protection Agency
VRP	Válvulas Redutoras De Pressão
ZGP	Zonas De Gestão Da Pressão
ZMC	Zonas De Medição E Controlo

SIMBOLOGIA

Q_1	Caudal após a variação da pressão
Q_0	Caudal antes da variação da pressão
P_1	Pressão após a variação da pressão
P_0	Pressão antes da variação da pressão
N_1	Expoente antes da variação da pressão

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

Nas últimas décadas, o planeta passou por um processo rápido de urbanização, tendo a população urbana excedido a população rural global. Estima-se que em 2050, apenas um terço resida em áreas rurais e dois terços em áreas urbanas, o que é aproximadamente o oposto da distribuição populacional da década de 50 (United Nations, 2014). A expansão urbana, acompanhada de crescentes desigualdades económicas e sociais, atingiu proporções sem precedentes e muitas vezes difíceis de controlar (Gomes, 2011). No entanto, com este crescimento populacional, põe-se em causa o desenvolvimento e sustentabilidade das comunidades (EPAL, 2017) que gera um dos grandes problemas da sociedade atual: a escassez de água doce. Toda a evolução dos seres vivos está ligada e inteiramente dependente do precioso líquido, água, que se encontra espalhado um pouco por todo o planeta (Sá Marques e Sousa, 2011).

O planeta Terra, é muitas vezes chamado por “Planeta Azul”, uma vez que o elemento mais abundante é a água. Estima-se que 99% da água disponível da Terra se encontra em oceanos, mares, calotes polares e glaciares; e apenas 1% da água do mundo está repartida em rios, lagos, lençóis freáticos, nos seres vivos e na atmosfera e como humidade do solo (Gomes, 2011). Contudo, existe uma percentagem significativa de água doce retida nos lençóis freáticos, pelo que a água para uso humano é indubitavelmente um recurso escasso. “A humanidade tem o seu desenvolvimento associado aos usos da água e durante milénios o Homem considerou-a um recurso inesgotável” (Sá Marques e Sousa, 2011).

Neste contexto, é crucial uma adequada gestão dos recursos hídricos que se encontram disponíveis. A maior preocupação das Entidades Gestoras (EG) está nas etapas de captação e adução, mas principalmente, na distribuição do abastecimento de água. De acordo com o Programa Nacional para o Uso Eficiente de Água (PNUEA) de 2012, nem toda a água captada é devidamente aproveitada, uma vez que existe uma parcela associada aos desperdícios no sistema de armazenamento, transporte e distribuição, bem como ao uso ineficiente de água para os fins previstos.

O Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP 2020), referente ao setor no ano de 2019, avalia que o nível de perdas económicas correspondente à água que não chega a ser faturada, apesar de ser captada, tratada, transportada, armazenada e distribuída (ERSAR, 2020), ronda os 34% do volume de água, podendo chegar aos 80% em zonas rurais.

Na atualidade, o problema das perdas de água e controlo nos sistemas de distribuição da mesma assume um papel cada vez mais importante na tendência de privilegiar a sustentabilidade de consumos e proteção ambiental, sobretudo quando ocorrem períodos de escassez de recursos hídricos ou quando o abastecimento de água não é suficiente em áreas de rápido crescimento populacional (Araújo *et al.*, 2006).

Reduzir as perdas e fugas nos sistemas de abastecimento de água é de extrema necessidade, além de promover a equidade entre os consumidores caso haja fontes de consumo ilegal. Mais ainda, a identificação e eliminação de outras perdas permite que as entidades gestoras possam ter um impacto positivo no balanço económico para um investimento em saneamento, infraestrutura, etc.

1.2 Motivação e objetivos

O desenvolvimento da sociedade é voltado para a proteção do ambiente e sustentabilidade. Neste contexto, Portugal assegura estes dois vetores estabelecendo regras de acesso á água potável para consumidores públicos e, tendo em conta boas práticas ambientais, sustentabilidade do setor, uso eficiente da água e gestão económica e integrada dos recursos hídricos. Para garantir o cumprimento tem-se por base a Lei da Água (Lei nº 58/2005, de 29 de dezembro), a Lei da Titularidade dos Recursos Hídricos (Lei nº 54/2005, de 15 de novembro), o Plano Nacional da Água (Decreto-Lei nº 76/2016, de 9 de novembro), o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais (PENSAAR 2020) e o Programa Nacional para o Uso Eficiente da Água (PNUEA) (Gomes, 2011). Não obstante, Portugal tem problemas ao nível de perdas de água nos sistemas de abastecimento, que todos os anos resulta em desperdício de grandes volumes. Assim, a deteção de perdas e fugas de água nas redes de distribuição, é hoje um assunto de grande interesse, sendo primordial a realização de uma boa gestão e planeamento nos sistemas de distribuição, de forma que a percentagem de perdas possa vir a ser reduzida.

Portanto, os objetivos desta dissertação encontram-se conforme os seguintes pontos:

- Levantamento de diversas técnicas de combate a perdas e fugas em sistemas de distribuição de água;
- Analisar uma rede real de abastecimento de água e determinar o nível de perdas e fugas;
- Construção de um modelo hidráulico computacional da rede no programa EPANET;
- Calibrar e validar o modelo construído;

- Analisar os dados obtidos através das novas tecnologias disponíveis, nomeadamente a teleleitura;
- Analisar a qualidade e utilidade dos dados medidos, para uso na modelação hidráulica.

1.3 Organização da dissertação

Este documento está dividido em cinco capítulos de acordo com o que é descrito de seguida, sendo que estes se encontram repartidos em subcapítulos.

No primeiro capítulo descreve-se a importância do problema, considerando a evolução da população em termos de migração do rural para o urbano com a sustentabilidade e disponibilidade dos recursos hídricos. Neste, é também feita referência à motivação do trabalho, assim como os objetivos a alcançar e a estrutura do documento.

O segundo capítulo contém uma revisão bibliográfica de conceitos associados a perdas e fugas nos sistemas de abastecimento de água, onde se identifica o trabalho e pesquisa já realizados sobre a matéria até ao momento. Este capítulo é de extrema importância para que se consiga ter o conhecimento científico prévio para a realização dos capítulos seguintes.

O terceiro capítulo diz respeito à metodologia, em que primeiramente se descreve a localização da rede de abastecimento em estudo, assim como os ramais de consumo no Pólo II da Universidade de Coimbra. De seguida, faz-se referência ao cadastro da rede, sendo este um ficheiro crucial uma vez que contém informação das condutas, nós e cotas de terreno. Para o estudo dos consumos, analisou-se os dados disponibilizados através de uma plataforma das Águas de Coimbra. Por último, a modelação hidráulica que teve por base a informação registada através dos medidores de pressão.

O quarto capítulo contém os resultados da análise dos consumos da rede de abastecimento em estudo e também a análise da modelação hidráulica.

No quinto capítulo apresenta-se as conclusões do trabalho desenvolvido, tal como sugestões de possíveis trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações iniciais

A sociedade atual é caracterizada por padrões de qualidade de vida elevados e exigentes, pelo que a água é um recurso indispensável em diversas áreas, tais como saúde pública, indústria e comércio. Investiu-se fortemente na construção de sistemas de abastecimento de água, SAA, devido à generalizada expansão dos centros urbanos e à evolução dos hábitos de consumo no século XX. Com o aparecimento do conceito de sustentabilidade e consciência ambiental aliado à escassez de recursos, sejam eles água com qualidade ou económicos, começaram a dirigir-se esforços no sentido da manutenção, conservação e gestão de infraestruturas. (Sá Marques, J.A., 2013).

Nas redes de distribuição, mesmo sendo estas recentes, ocorrem fugas e roturas ocasionais nas condutas, o que leva a perdas. Se as anomalias não forem visíveis ou reportadas no serviço pelos consumidores, podem ser muito difíceis de localizar. As perdas de água, podem ocorrer desde a sua captação até à chegada ao consumidor final, podendo-se observar os possíveis locais de perdas no esquema da Figura 2.1 (Ribeiro *et al.*, 2015).

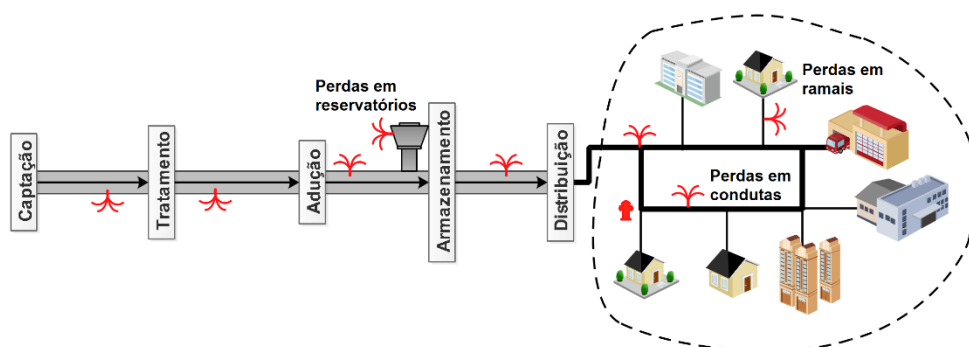


Figura 2.1 – Esquema de um sistema de abastecimento e locais de possíveis perdas. (Fonte: Ferreira, 2017)

O capítulo da revisão bibliográfica tem como objetivo clarificar conceitos de fugas e perdas, os principais fatores que influenciam e abordagens de avaliação das últimas, assim como a metodologia aplicada na sua deteção e localização.

No final deste, mostra-se como o modelo hidráulico de distribuição de água é crucial para o controlo de fugas e perdas, fazendo referência ao software EPANET com extensão *WaterNetGen*.

2.2 Perdas de água

A perda de água ou água não lucrativa (NRW), pode ser expressa como água que entra no sistema, mas que não sendo faturada, ameaça a viabilidade financeira das entidades gestoras, a gestão sustentável dos recursos hídricos naturais (Lambert e Hirner, 2000) e que segundo Ribeiro *et al.* (2015) são agravadas com o aumento da sua procura e com alterações climáticas.

Para que os conceitos desta matéria sejam universais e a comunicação seja clara e correta, a International Water Association (IWA) (Lambert e Hirner, 2000) recomenda que as perdas de água se distingam entre perdas reais e perdas aparentes.

Segundo Thornton *et al.* (2008) e Ribeiro *et al.* (2015), as perdas reais designam-se pela perda de água física no sistema de abastecimento sob pressão por fugas nos tubos, juntas e ligações, roturas/fissuras nas condutas; fugas no reservatório e tanques; extravasamentos no reservatório e ainda na abertura de drenos no sistema de distribuição de maneira inadequada. Estas ocorrem em todos os sistemas de abastecimento de água até chegar ao consumidor final, sendo que variam largamente no seu grau e dimensão e em função da situação de cada local. Existem outras definições de perdas de água, as quais estão diretamente interligadas aos diferentes tipos de fugas que as provocam, tais como perdas base, perdas por roturas e perdas por fugas não comunicadas (EPAL, 2017). Thornton *et al.* (2008), apresenta os conceitos anteriores da seguinte forma:

- Perdas por roturas – apresentam normalmente caudais elevados, que são facilmente identificáveis por causar incomodo ao consumidor (i.e., baixa pressão), de durações curtas e pequenos volumes;
- Perdas por fugas não comunicadas – apresentam caudais de fluxo moderado e a sua duração e volume depende de como a entidade gestora procura este tipo de perdas;
- Perdas de base – caracterizam-se por ocorrerem nas juntas das condutas ou noutros acessórios, o caudal é muito baixo para ser detetado por equipamento de deteção acústico, o que poderá levar a perdas de grandes volumes e de longa duração.

As perdas aparentes, por sua vez, dizem respeito a água que não é fisicamente perdida, uma vez que não são causadas por fugas ou roturas no sistema, e também porque a água já atingiu o consumidor final. Estas perdas apresentam um impacto negativo nas receitas das entidades gestoras, por não serem contabilizadas devido a algum tipo de erro. As causas mencionadas para este tipo de perdas passam por imprecisões no medidor do cliente, erros na manipulação de dados e consumos não autorizados, como os resultantes de furto ou uso ilegal da rede (Thornton *et al.*, 2008; Sá Marques e Sousa, 2011; AL-Washali *et al.*, 2020, Ribeiro *et al.*, 2015).

Lambert, em 1994, apresentou um outro conceito de perdas, designado de Burst and Background Concept (BABE). Este tem como objetivo quantificar as perdas anuais no sistema de distribuição de água, considerando as condições específicas do mesmo (comprimento das condutas, pressão, frequência de roturas, entre outras). Assim, para Lambert existem 2 tipos de fugas: Burst e Background. Este tema é abordado com mais detalhe no subcapítulo 2.4.3.

2.3 Fatores que influenciam as perdas de água

Em todas as redes de abastecimento surgem perdas de água reais, difíceis de eliminar por completo, visto que pequenas fugas podem levar anos a ser detetadas. A ocorrência destas perdas dependem de fatores locais e a sua identificação é crucial para a escolha de indicadores de desempenho técnico. Além disso, são influenciadas por variados motivos, tais como, o comprimento total de condutas, o seu estado e componentes, o seu material, a frequência de fugas e roturas, a densidade e comprimento médio dos ramais, a pressão média de serviço, a localização do medidor no ramal e as condições do terreno e tipo de solo. (Alegre *et al.*, 2005; Thornton *et al.*, 2008; Gomes *et al.*, 2015).

Na literatura referem-se vários fatores que influenciam as perdas de água de forma mais aprofundada (Gomes, 2005; Gomes, 2011; Farley, 2001)

A. Estado de conservação e idade de condutas

Com o passar dos anos, os sistemas vão envelhecendo, os componentes da rede degradam-se ficando mais sensíveis a flutuações de pressão (resultantes das variações de consumo) e mais propícias a ocorrência de roturas de água. A conservação das infraestruturas depende das características do solo, da forma que o sistema funciona, das flutuações da pressão e essencialmente do material da conduta. Quando as condutas são metálicas a problemática centra-se nos efeitos da corrosão, já quando as condutas são de PVC, pode ocorrer formação de camadas de carbonato de cálcio (ver figura 2.2).

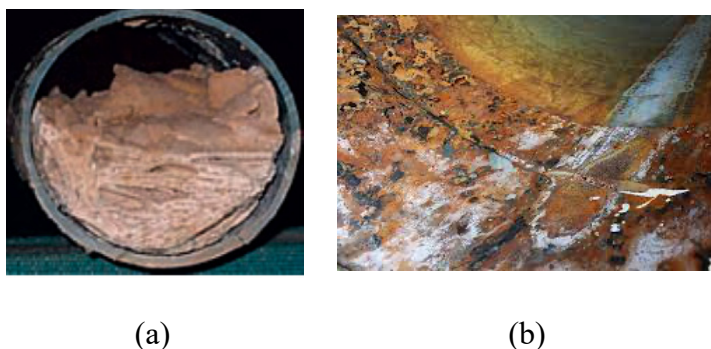


Figura 2.2 – Problemas em condutas associado a formação de camadas de CaCO_3 (a) e por corrosão (b).

B. Frequência de fugas ou roturas

Nas redes de distribuição de água, as roturas estão por norma associadas ao transitório hidráulico (resposta do fluído a qualquer mudança que ocorra nas condições operacionais da instalação), onde pode acontecer o desencaixe dos tubos pelas juntas. Por outro lado, na maioria das vezes a ocorrência de roturas acontece nas ligações dos ramais, uma vez que a ligação é executada de uma forma menos eficiente. A rutura pode também dever-se a movimentos de solos, por falta de cadastro na rede e/ou por descuido do operador.

C. Pressão média de serviço

Um problema bastante comum em sistemas de distribuição de água, é a gestão da pressão na rede. Quanto maior for a pressão de serviço, maiores tendem a ser os consumos e o volume de perdas de água. Então, para um uso eficiente da água é necessário que as pressões de serviço não excedam os valores regulamentares de pressão máxima. De notar que, o aumento brusco da pressão na rede, pode ser causado por arranques repentinos de bombas ou válvulas que são abertas e fechadas rapidamente, que provocam os danos das condutas e acessórios aumentando a probabilidade de fugas de água. No entanto, um aumento da pressão do sistema por tempo determinado poderá facilitar a localização de uma fuga, através de métodos sonoros que captam o ruído produzido

D. Movimentos e tipo de solo

No movimento de solo, fatores como oscilações na temperatura (secas ou geadas), mudanças no teor de humidade (principalmente no caso de solos argilosos) e situações extremas como terremotos, podem fazer com que as juntas da conduta se movam ou causem roturas devido a tensões localizadas. Por outro lado, os movimentos de terra podem dever-se a trabalhos de construção Civil - escavações no solo – e à circulação de veículos pesados que influencia vibrações no terreno. O tipo de solo é também um fator muito importante, pois a sua característica de permeabilidade afeta o tempo de deteção e localização da fuga. No caso de solos argilosos, a água subterrânea devido à fuga pode aparecer na superfície com mais facilidade e rapidez, ao contrário do que acontece em solos arenoso o que dificulta a sua deteção.

No que diz respeito a perdas aparentes, estas podem distinguir-se entre consumos não autorizados e erros de medição. Relativamente a consumos não autorizados, estes contemplam as ligações ilícitas e a utilização fraudulenta de marcos e bocas de incêndio, que se encontram localizadas quer em locais públicos quer em particulares. As perdas aparentes relativas a erros de medição consistem em erros de medição dos contadores em condições normais de medição, erros de medição por deficiência de instalação ou dimensionamento, erros de leitura ou registo,

erros de medição por avaria e leituras em falta por dificuldade de acesso aos contadores, quando no interior de habitações (Alegre *et al.*, 2005; Farley, 2001).

2.4 Métodos de avaliação de perdas

A quantidade de água perdida através de sistemas de distribuição tem de ser estimada ou calculada, pelo que é necessário fazer uma avaliação de perdas. Para a valorização das suas componentes, nomeadamente as perdas reais e aparentes, devem ser feitas abordagens complementares de forma que os resultados apurados sejam mais credíveis (EPAL,2017). Puust *et al.* (2010) descreve estas duas abordagens por: *top-down* e *bottom-up*, isto é, “de cima para baixo” ou “de baixo para cima”, respetivamente.

2.4.1 Balanço hídrico

A primeira abordagem, *top-down*, é a principal ferramenta para quantificar as perdas num sistema de abastecimento através de uma avaliação de vários componentes que constituem o balanço hídrico, a partir de informação já existente. A abordagem avalia as necessidades de intervenção, iniciando em escalas maiores e evoluindo para uma escala menor, de forma a determinar o tipo de estratégia a adotar. Nesta abordagem as perdas são calculadas a partir da medição das diversas entradas do sistema, deduzindo os valores faturados pelo sistema ao cliente (EPAL,2017). Em Portugal, entidades gestoras de menor dimensão, tem tendência a não controlar os volumes que saem da rede e a não medir os caudais ao longo da mesma (Marques *et al.*, 2005), o que faz com que o cálculo do balanço hídrico não seja tão exato, e consequentemente incorreto.

Quanto ao balanço hídrico, existem várias metodologias que podem ser aplicadas nomeadamente as formuladas por OFWAT, do Reino Unido e pela IWA (Lambert e Hirner, 2000). Segundo Alegre *et al.* (2005) o balanço hídrico é calculado por norma para um período de 12 meses, representando a média anual de todos os componentes, de maneira a minimizar os efeitos de desfasamentos entre intervalos de leituras de diversos medidores de caudais. A metodologia proposta pela IWA, e também recomendada por Alegre *et al.* (2005), encontra-se no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Componentes do balanço hídrico [m³/ano] (adaptado de Alegre et al., 2005).

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

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

Passo 0: Definir os limites exatos do sistema (ou sector de rede) a auditar; definir as datas de referência (definindo um período de um ano).

Passo 1: Determinar o volume de *água entrada no sistema*.

Passo 2: Determinar o *consumo faturado medido* e o *consumo faturado não medido*; introduzir o total destes como *consumo autorizado faturado* e como *água faturada*.

Passo 3: Calcular o volume de *água não faturada* subtraindo a *água faturada* à *água entrada no sistema*.

Passo 4: Definir o *consumo não faturado medido* e o *consumo não faturado não medido*; registar o total em *consumo autorizado não faturado*.

Passo 5: Somar os volumes correspondentes ao *consumo autorizado faturado* e ao *consumo autorizado não faturado*; introduzir o resultado como *consumo autorizado*.

Passo 6: Calcular as *perdas de água* como a diferença entre a *água entrada no sistema* e o *consumo autorizado*.

Passo 7: Avaliar, usando os melhores métodos disponíveis, as parcelas do *uso não autorizado* e dos *erros de medição*, somá-las e registar o resultado em *perdas aparentes*.

Passo 8: Calcular as *perdas reais* subtraindo as *perdas aparentes* às *perdas de água*.

Passo 9: Avaliar as parcelas das *perdas reais* usando os melhores métodos disponíveis (análise de caudais noturnos, dados de medição zonada, cálculos de frequência/caudal/duração das roturas, modelação de perdas baseada em dados locais sobre o nível-base de perdas, etc.), somá-las e comparar com o resultado das *perdas reais*.

A implementação de uma política de controlo ativo de perdas requer o uso de uma linguagem comum entre todos os agentes do processo (Alegre *et al.*, 2005), pelo que os seguintes conceitos apresentados são preconizados pela International Water Association (IWA) e a noção de perdas é ilustrada na figura 2.3

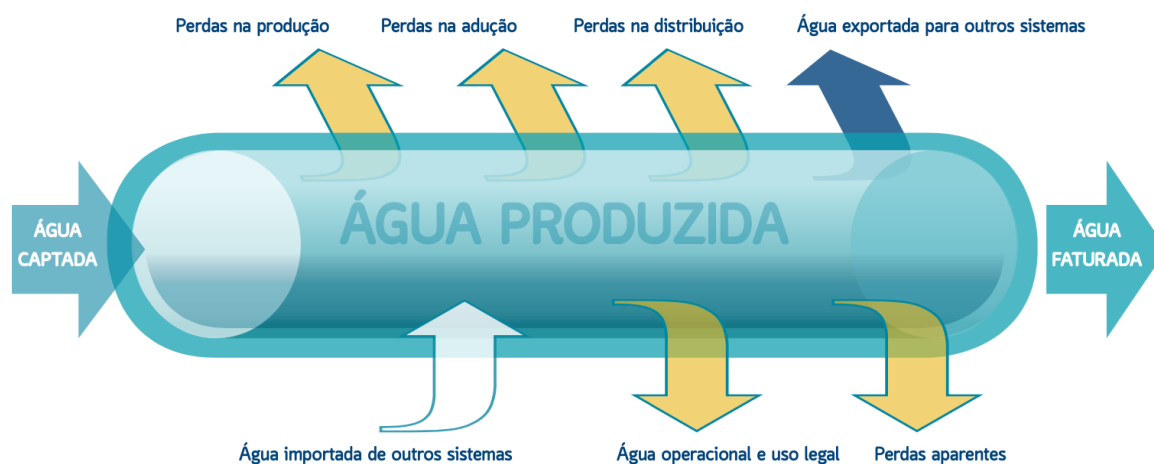


Figura 2.3 – Fluxograma das principais influências num sistema de abastecimento (Fonte: EPAL,2017).

A *água captada* diz respeito ao volume anual obtido a partir de captações brutas para entrada em estações de tratamento, em que a *água bruta, importada ou exportada* é o volume anual bruto transferido de ou para outros sistemas de adução e distribuição. A *água fornecida ao tratamento* refere-se ao volume anual bruto que aflui às instalações de tratamento, e a *água produzida* é o volume anual tratado que é fornecido às condutas de adução ou diretamente ao sistema de distribuição. A *água tratada, importada ou exportada* consiste no volume anual tratado e transferido de ou para o sistema. A *água fornecida à adução* é o volume anual tratado que aflui ao sistema de adução, enquanto a *água fornecida para distribuição* representa o volume anual tratado que aflui ao sistema de distribuição. A *água fornecida para distribuição direta* diz respeito ao volume correspondente à diferença entre a água fornecida para distribuição e à tratada exportada. A *água entrada no sistema* refere-se ao volume anual introduzido na parte do sistema de abastecimento de água que é objeto do cálculo do balanço

hídrico, pelo que o *consumo autorizado* corresponde ao volume anual de água, quer seja ou não, medido ou faturado e que é fornecido a consumidores registados, a outros que estejam implícita ou explicitamente autorizados a fazê-lo para usos domésticos, comerciais ou industriais e à própria entidade gestora. As *perdas de água* consistem no volume correspondente à diferença entre a água entrada no sistema e o consumo autorizado, em que se podem dividir em *perdas reais* ou *aparentes*. Por último, a *água não faturada* é o volume da diferença entre os totais anuais da entrada no sistema e do consumo autorizado faturado, incluindo não só as perdas reais e aparentes, mas também o consumo autorizado não faturado.

2.4.2 Consumo mínimo noturno

A abordagem *bottom-up* é usualmente aplicado em sistemas setorizados com medições contínuas em zonas mais problemáticas determinadas através de critérios empíricos, em que é possível calcular o volume das perdas reais a partir de valores de caudais mínimos noturnos (CMN) (EPAL,2017).

Esta análise passa por um processo contínuo de monitorização ao longo do ano, o que permite uma determinação de perdas algo rigorosa, uma vez que é feita num período noturno, em que o consumo é menor devido ao facto da população se encontrar menos ativa, ocorrendo normalmente entre as 2 e as 4 horas da madrugada (AL-Washali et al.,2020) (ver figura 2.4). É perceptível que durante esse período, a grande parte do consumo seja devido às perdas reais existentes da rede de distribuição de água, ou pode ter também por base uma ligação clandestina. De notar que devem ser tidas em conta atividades comerciais, industriais e de serviços públicos que possam existir nessa zona da rede durante o período referido (Gomes, 2011). Para uma melhor eficiência do processo, os caudais devem ser determinados em cada hora, pois em cada dia os consumos horários apresentam-se diferentes, e se possível, de forma a não influenciar os caudais noturnos, fechar-se temporariamente as ligações das atividades acima referidas, para minimizar os erros de medição (Gomes, 2011).



Figura 2.4 – Representação gráfica dos consumos domésticos durante 24 horas (Fonte: EPAL,2017)

Na figura 2.5 ilustram-se as duas abordagens mencionadas, em que a convergência das duas abordagens dará a credibilidade aos resultados do balanço (EPAL,2017).



Figura 2.5 – Abordagens Top-Down e Bottom-Up (Fonte: EPAL,2017)

2.4.3 Conceitos BABE

A UK Nacional Leakage Control Initiative desenvolveu uma abordagem sistemática para o cálculo de componentes individuais de perdas nos sistemas de distribuição e condutas do cliente, seja para um balanço anual de água ou para a análise de consumo noturno (Farley, 2001).

Os conceitos Burst and Background Estimates (BABE), publicado por Lambert em 1994, foram desenvolvidos a partir de uma revisão da literatura internacional e da consideração de vários parâmetros que influenciam as perdas. Referem que o volume de perdas reais consiste em inúmeros eventos de fugas, em que cada volume de perda individual é influenciado pelo caudal e duração do tempo da fuga antes de ser reparada. O conceito Burst refere-se às perdas por rotura são pontuais, pouco sensíveis à variação de pressão e considera-se um grande caudal de água que depende do diâmetro da conduta. O tempo de deteção, localização e reparação variar entre algumas horas a dias. Relativamente a Background, as perdas por pequenas fendas, juntas ou orifícios, ocorrem por um período mais extenso - dias/meses - e são sensíveis à variação de pressão, em que embora o caudal possa ser mínimo, o volume de água poderá ser muito significativo se não for detetado, localizado e reparado no imediato (Gomes, 2011; Farley, 2001).

Ao examinar estas perdas, ganha-se informação muito útil para o balanço hídrico porque fornece estimativas dos volumes de perdas reais em vários pontos da rede de distribuição de água. Assim, deduzindo as perdas reais com base nesta análise e com base no balanço hídricos é possível determinar o volume de perdas ocultas (Thornton *et al.*, 2008).

Perdas ocultas = perdas reais do balanço hídrico – perdas reais da análise de componentes

Posto isto, para além do balanço hídrico, é uma boa prática analisar componentes de perdas reais de forma a avaliar o volume de perdas ocultas e obter informação mais detalhada sobre a eficiência de reparo de fugas.

2.5 Controlo de perdas de água

Para que haja uma redução de perdas de água, tanto reais como aparentes, espera-se da entidade gestora um desempenho competente da administração e dos demais setores operativos. É fundamental que os trabalhos sejam articulados entre os vários setores, de forma que o resultado seja organizado e de sucesso. Para isso, é necessário estabelecer um ciclo periódico e correto da avaliação do problema, clarificar os objetivos e ainda estabelecer uma estratégia global de atuação e avaliação de resultados obtidos.

Inicialmente, deve ser contemplada uma primeira fase que diz respeito à tomada de decisão estratégica, onde se efetuam balanços hídricos para a avaliação da dimensão do problema. Posteriormente, estabelece-se uma estratégia de controlo de perdas face ao resultado desta avaliação. Numa segunda fase, implementa-se uma estratégia de controlo, tendo duas linhas de ação paralelas, uma relativa às perdas aparentes e outra às perdas reais.

Ao analisar os conceitos anteriormente referidos no documento, verifica-se que para a minimização de erros de medição e de consumos não contabilizados, as intervenções são distintas do procedimento de minimização de perdas físicas. Assim, em termos técnicos, o controlo de perdas reais é mais complexo que o das perdas aparentes, uma vez que no caso das primeiras, a estratégia consiste essencialmente na análise do balanço custo – benefício entre o investimento para reduzi-las e o benefício financeiro posterior.

A segunda fase consiste nas intervenções para controlo de perdas reais, em que a medição zonada é o principal componente e, seguidamente se subdivide paralelamente em gestão de pressões e localização de fugas. Em muitos casos, é viável a implementação de medidas para a gestão de pressões, que gera efeitos positivos em todas as perdas reais dependentes da pressão do sistema. No entanto, é também necessário atuar em termos de localização de fugas, de maneira a reparar as causas das perdas reais.

Por último, a terceira fase balanceia o processo de avaliação de resultados, e em função deste poderá ser necessário ajustar a estratégia inicial se os resultados obtidos forem de ineficiência, ou por outro lado pode verificar-se que a estratégia adotada é eficiente (Alegre *et al.*, 2005).

As fases de abordagem encontram-se esquematizadas na figura 2.6.

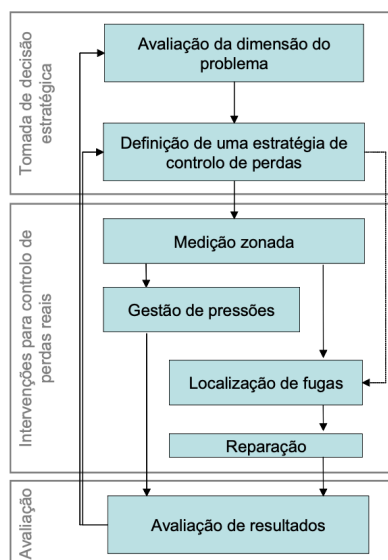


Figura 2.6 – Fases de abordagem no controlo de perdas reais (Fonte: Alegre *et al.*, 2005).

2.5.1 Gestão de perdas

As perdas de água, como já referido, correspondem a água que não é faturada, nem empregue em fins autorizados, mas que é captada, tratada, transportada em infra-estruturas de elevado

valor e com custos de operação e manutenção significativos. O fator económico é considerado por muitas metodologias internacionais, o principal interveniente na escolha das medidas de controlo de perdas (Alegre et al, 2005). Assim, deve ser sempre realizada uma análise custo-benefício, não apenas com o custo de intervenção, mas também considerando as condições locais e a sustentabilidade da realização do projeto.

Thornton et al. (2008) referia que, “As perdas de água não desaparecem: elas voltam sempre. O controlo das perdas de água não é um projeto único; é uma solução contínua e em adaptação, para dar resposta a um problema em constante mudança”.

2.5.1.1 Nível económico de perdas

Ao definir uma estratégia de controlo de perdas, é necessário abordar o cálculo do nível económico de perdas (NEP). O NEP diz respeito à situação em que o custo de redução de perdas numa unidade de volume é igual ao custo de produção dessa mesma unidade de volume de água, ou seja, o custo marginal do controlo ativo de perdas equilibra com o custo marginal de água perdida.

A Figura 2.7, apresenta o conceito NEP, numa relação de custo total anual e nível de perdas. Ao analisar o gráfico, percebe-se que o aumento do nível de perdas é diretamente proporcional ao custo de água perdida. No entanto, o custo de controlo ativo de perdas diminui medida que aumentam os níveis permitidos de perdas. O nível ótimo de custo total de operação dos sistemas atinge-se quando o custo marginal das atividades de deteção de fugas é igual ao custo marginal da água. Este ponto ótimo permite identificar o nível económico dos recursos que deverão ser atingidos à deteção de fugas (EPAL,2017).

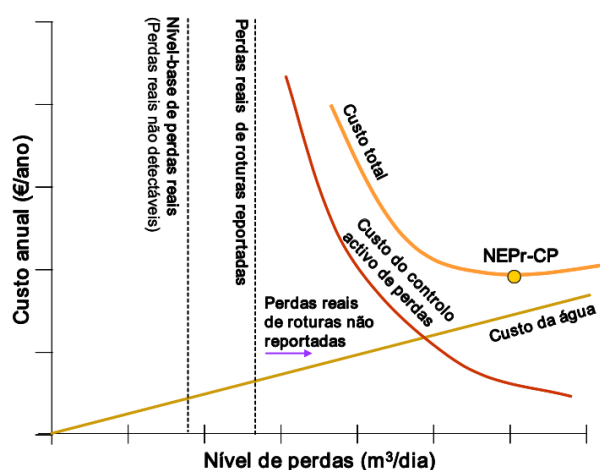


Figura 2.7 – Ilustração do conceito de nível de perdas económicas (Fonte: Alegre et al.,2005)

Quando alcançado o NEP, este deve permanecer em níveis tecnicamente viáveis e aceitáveis economicamente. Sempre que seja detetado um nível de perdas económicas acima do desejado, deverá proceder-se à identificação das causas e posteriormente localizar e reparar as fugas, figura 2.8 (Gomes,2011).

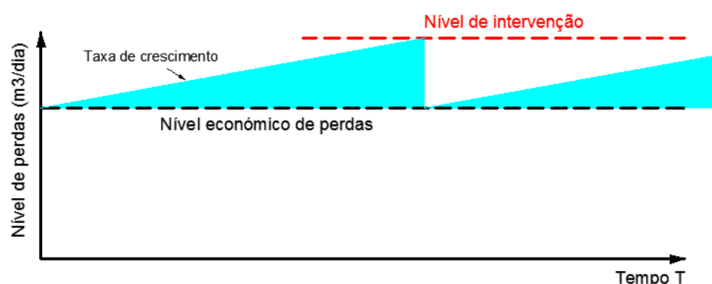


Figura 2.8 – Relação entre o nível económico de perdas e o nível de intervenção da rede (Fonte: Gomes, 2011)

2.5.1.2 Método de gestão de perdas

Redução de perdas aparentes

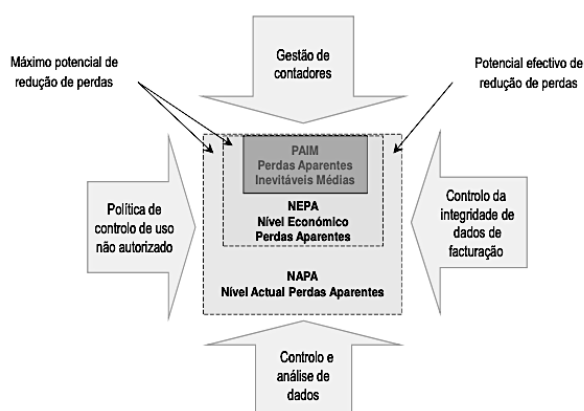


Figura 2.9 – Os quatro pilares para a abordagem de controlo de perdas aparentes (Fonte: Gomes, 2011, adaptado de Thornton et al.,2008)

Para o controlo de perdas aparentes, a intervenção foca-se em quatro áreas distintas observáveis na figura 2.9: no controlo de uso não autorizado, na análise de dados, na integridade de dados de faturação e nos equipamentos de medição (contadores).

No que respeita à política de controlo de consumo não autorizado, este pode ser combatido através do controlo rigoroso de caudais da rede, limitação da pressão, ações legais, aplicação de política pré-pagamento e através da educação (Thornton et al.,2008). Relativamente à redução de erros na análise de dados estes são feitos através de atualização de equipamentos, assim como auditorias ou inspeções. Para a integridade de dados de faturação, ou seja, a nível de recursos humanos, os erros são reduzidos através da passagem de conhecimento aos trabalhadores na gestão dos dados de faturação. Por último, a maior fonte de erros está nos equipamentos de medição, os contadores. Estes devem ser testados regularmente de forma a averiguar a fiabilidade, caso se verifique o contrário deverão ser substituídos por outros equipamentos mais adequados para medir os volumes de água consumidos. Outro problema deste ponto, está nos diferentes tipos de contadores e caudalímetros, que podem medir diferentes gamas de volumes e caudal, o que pode trazer erros de medição.

Redução de perdas reais

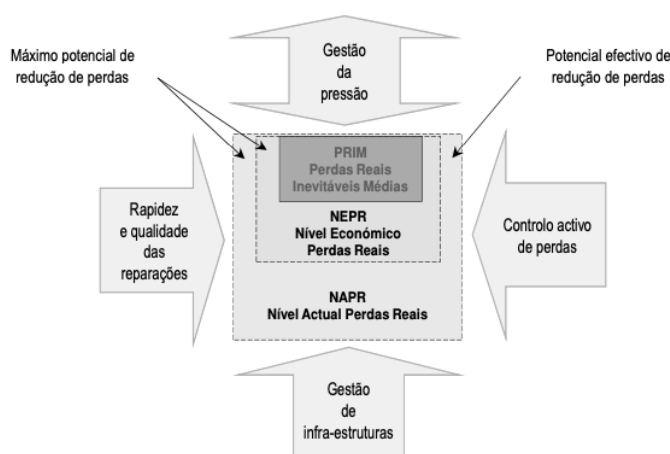


Figura 2.10 – Os quatro componentes para a abordagem de controlo de perdas reais (Fonte: Gomes, 2011, adaptado de Thornton et al.,2008)

A redução de perdas reais, deve ter em conta o envelhecimento do sistema de distribuição de água, pois existe uma tendência do aumento de fugas e/ou roturas com o envelhecimento da infraestrutura, o que leva a que por vezes as entidades gestoras não lhes tenham conhecimento. Para combater as perdas físicas, as EG devem centrar-se em quatro componentes principais: a gestão da pressão, o controlo ativo de perdas, a rapidez de reparações e a gestão de infraestruturas (Lambert, 2002).

Como se pode observar na figura 2.10, um dos componentes consiste na gestão de infraestruturas que requer uma metodologia integrada que permita às entidades gestoras a reabilitação da rede de forma mais económica com vista em reduzir a manutenção. No controlo ativo de perdas é necessária uma monitorização da pressão da rede assim como dos caudais de água, usando sensores inteligentes de forma a identificar a ocorrência das fugas para que possam ser detetadas e reparadas o mais cedo possível. Importa referir que a ocorrência de uma fuga requer mais energia para manter os níveis desejados no serviço (Colombo e Karney, 2002; Colombo e Karney, 2005), o que por sua vez aumenta os custos de energia no bombeamento de água devido a essas perdas (Shabangu et al., 2020). A gestão de pressão envolve um controlo da mesma na rede, e dada a sua importância será abordada mais detalhadamente no subcapítulo 2.5.4.

2.5.2 Detecção de perdas

Para que haja uma redução do volume de perdas de água, é necessário atuar na duração de uma fuga, que acontece em três fases. Em primeiro lugar, a deteção, que é o ato de identificar a fuga, pode ser muitas vezes a fase mais longa do processo caso estas sejam levando a perdas de água significativas uma vez que pode ficar indetetável por largos períodos de tempo. No entanto, pode ser uma rotura de grande caudal que é detetada rapidamente. De seguida, tem-se a fase de localização e reparação que será abordado no subcapítulo 2.5.3.

Até ao momento são muitos os esforços para conseguir detetar uma fuga em sistemas de distribuição de água (Fabbiano et al., 2020), e na literatura realça-se a importância no estabelecimento de medição zonada.

2.5.2.1 Medição zonada

A implementação das zonas de medição e controlo é conhecida como um dos métodos mais bem-sucedidos e económicos para a otimização das redes de distribuição de água (Kanakousis e Gonelas, 2014). É considerado um pré-requisito para outras técnicas de redução de perdas e utilizada por várias entidades gestoras de todo o mundo, pelo facto de oferecer um maior controlo do sistema de distribuição de água e contribuir para a mitigação de perdas (Korkana et al., 2016).

O conceito de medição zonada nas redes de distribuição de água foi introduzido na década de 1980, proposto pelo Reino Unido com o objetivo de reduzir fugas. Como referido a implementação é bem-sucedida, no entanto, as limitações das zonas é uma tarefa complexa por diversas razões, tais como a elaboração da tipologia do sistema, o número elevado de variáveis e a necessidade de respeitar as restrições de pressão nos nós. A complexidade aumenta nos casos de grandes áreas metrópoles onde existem várias soluções viáveis (Savić e Ferrari, 2014). Nestes casos, existe uma subdivisão da área em zonas mais pequenas, permitindo analisar os

caudais que “entram” e “saem” em cada uma. Gomes (2011) refere que na componente de distribuição este processo seja mais benéfico, não só pela dimensão, mas também pela complexidade das ligações da rede. Ainda assim pode ser aplicado o método desde a captação, adução, armazenamento até à distribuição. Em zonas rurais, o projeto de medição zonada é baseado no comprimento da rede, já em zonas urbanas o projeto baseia-se no número de conexões de serviço (geralmente entre 500 a 3.000). Além disto, outros fatores como a elevação do solo, diâmetro do tubo, custo de controlo ativo de fugas, entre outras podem influenciar o tamanho das Zonas de Medição e Controlo (Gomes et al, 2015).

Em primeiro, deve certificar-se que a introdução das Zonas de Medição e Controlo (ZMC), não prejudicam o desempenho na rede, por forma a garantir os níveis máximos e mínimos de serviço e que não coloquem em causa a boa eficiência da rede. Seguidamente, é crucial analisar e comparar várias possibilidades de fronteira e dimensão, seguindo maioritariamente as condições naturais de fronteira da rede (Savić e Ferrari, 2014). Assim que os limites estiverem bem definidos, os caudais de entrada e saída, assim como o controlo dos consumos realizados dentro das ZMC, devem ser constantemente monitorizados.

A dimensão de uma Zona de Medição e Controlo, depende de vários condicionalismos, o que faz com que a zona seja muito variável. Os fatores predominantes são, a tipologia da rede, a densidade de ramais e a densidade populacional, que influenciarão o número de pontos de entrada de caudal. Embora se ponderem todos os pontos por questões económicas e de simplificação de operação com uma configuração de válvulas de forma a reduzir estes números de entradas (Alegre et al., 2005). A exemplificação de um sistema de medição zonada encontra-se na figura 2.11.

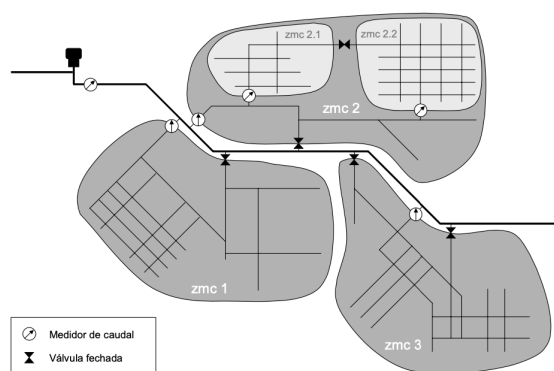


Figura 2.11 – Um sistema de medição zonada, com 3 zonas principais, estando a ZMC 2 subdividida em duas subzonas (Fonte:Alegre et al., 2005).

A Inglaterra e o País de Gales utilizam a medição zonada para quantificar as perdas nos sistemas de distribuição de água por dois métodos: o método dos caudais totais e o método dos caudais noturnos, baseando-se no balanço hídrico e no comportamento dos consumos. O método dos caudais totais centra-se na contabilização do volume do balanço hídrico dentro de cada ZMC, tendo por base os volumes de água medidos, usualmente de uma semana, e subtraindo dos volumes de água afluentes todos os volumes de água saídos, incluído uma estimativa de consumo. O resultado deste método, será o volume das perdas reais e aparentes em conjunto. Por outro lado, o método dos caudais noturnos utiliza a observação do comportamento do caudal noturno, ou seja, nas horas de menor consumo, e durante as quais é legítimo afirmar que grande parte do caudal total escoado se deva a perdas reais (Latchoomun et al., 2015). Os dois métodos são úteis e complementares, embora o primeiro seja mais vantajoso nas intervenções entre ZMC (Alegre et al., 2005). Posto isto, as Zonas de Medição e Controlo são uma mais valia no controlo de caudais na rede, mas também tem benefícios no que diz respeito à otimização de pressão dentro da rede, garantindo uma melhor qualidade de água, pois a deteção da fuga com mais rapidez reduz a sua (Farley et al., 2008).

2.5.3 Localização de perdas

A localização das perdas é a identificação de uma perda antes da escavação e reparo, no entanto encontrar o local exato pode não ser garantido (Farley,2001). As técnicas para a localização podem ser distinguidas em duas categorias: exatas ou aproximadas (Puust et al., 2010). Relativamente as técnicas de localização aproximada, estas passam por: Subzonamento, ou subdivisão interna da área ZMC; Teste de fecho sequencial com suspensão do abastecimento; Mapeamento das pressões em linhas de abastecimento. Já as técnicas de localização exata podem ser: Sondagem acústica (loggers acústicos, varetas de escuta e geofones); Correlação acústica (correladores matemáticos do ruído da fuga); Injeção de traçadores; Ensaio de estanquidade aplicados a reservatórios e condutas com perfil longitudinal ascendente (EPAL,2017) e Sensores térmicos. Dentro destas técnicas de localização exata, o método de sensores acústicos, baseado em sinais sonoros, é certamente o mais utilizado (Fabbiano et al., 2020). No entanto Hunaidi e Chu (1999) refere que pode haver problemas com interferências no sinal devido ao tráfego ou outras fontes, atenuação excessiva do sinal e sensibilidade insuficiente dos sensores acústicos.

2.5.3.1 Técnicas para localização exata

Na técnica de **sondagem acústica** deve ser seguida uma metodologia de aproximação sucessiva à origem do som provocado por uma fuga, com recurso a equipamentos específicos, nomeadamente loggers acústicos, correladores, vareta de escuta ou o microfone de terra. Estes

métodos acústicos baseiam-se na emissão do ruído específico permanente da fuga numa conduta sob pressão, com uma dada gama de frequências definida. Cada fuga tem uma frequência específica, que depende do tipo e tamanho do orifício, pressão, material, diâmetro da tubagem ou tipo de solo. A principal vantagem da aplicação deste método é a possibilidade de realizar a técnica sem a necessidade de suspender o abastecimento, sendo que a existência de abastecimento com pressão é uma mais valia para a deteção do ruído (EPAL,2017). O método, **ensaio de estanquidade**, é utilizado na deteção de fugas em reservatórios, embora possa também ser aplicado em condutas com perfil longitudinal ascendente. A **injeção de traçadores** não é recorrente, devido ao risco de contaminação, ainda que em tempos passados tenha sido bastante utilizado. Esta injeção é recomendada quando as condutas são pequenas e o ruído emitido pela perda é insuficiente para ser detetado com a técnica de sondagem acústica. Neste método, a fuga constitui um ponto de saída do traçador que é detetável através de sensores ou visualmente. Por último, e ainda pouco vulgar, existem os **sensores térmicos** que têm a particularidade de permitir identificar zonas na rede onde existem fugas, pelas alterações das características do solo envolvente devido à saturação. As desigualdades térmicas no solo podem ser captadas por câmaras infravermelhos (Gomes,2011).

2.5.4 Gestão da pressão

O RGSPDADAR impõe os requisitos mínimos e máximos de pressão que os sistemas de abastecimento de água têm de satisfazer quando são projetados. No entanto em várias situações as pressões na rede são superiores às necessárias, nomeadamente no período da noite, podendo ser reduzidas (Gomes, 2011). A gestão da pressão é uma das técnicas mais influentes e económicas na redução de volumes de perdas de água (Samir et al., 2017).

2.5.4.1 Técnicas de gestão de pressão

As técnicas mais utilizadas para controlo de pressão consistem, na setorização, em válvulas reductoras de pressão (VPR), no controlo do nível e dos extravasamentos em reservatórios (Lambert,2002).

Setorização

Alegre et al. (2005) refere que uma das formas de controlar a pressão num sistema passa por proceder a uma setorização, recorrendo a válvulas de forma a estabelecer patamares de pressão. A setorização esta ligada ao estabelecimento de ZMC de forma a compatibilizar os seus limites, com o objetivo do controlo da pressão - Zonas de Gestão da Pressão (ZGP).

Para que sejam conseguidas estas ZGP, devem, ter-se em conta alguns critérios como a minimização do fecho de válvulas, tomando partido de fronteiras existentes; garantir níveis de serviço relacionados com funcionamento hidráulico e de qualidade da água (em cenários

normais e de emergência); definir as zonas vulneráveis com recurso a análise dos registos de roturas e definir também as zonas homogêneas em termos de características hidráulicas, estado de conservação da rede e tipologias de consumo.

Válvulas redutoras de pressão (VRP)

As VRP permitem obter a pressão pretendida a jusante da sua instalação e podem atuar de forma mecânica, elétrica ou hidráulica, dividindo-se em quatro principais (Farley, 2001, Alegre et al., 2005).

A VRP com **pressão de saída fixa** é utilizada quando se pretende um valor de pressão fixo na entrada de uma zona, onde se verificam pequenas variações no consumo e perdas de carga insignificativas. Já a VRP com **pressão de saída modulada por tempo** é mais apropriada para casos em que as perdas de carga sejam mais significativas. Estas últimas VRP, permitem de uma forma simples controlar a pressão, e particularmente adaptáveis para situações de pressão noturna excessiva. No entanto, apresentam um ponto desfavorável no caso de combate a incêndios, uma vez que a regulação é fixa. A VRP de **pressão de saída modulada pelo caudal**, está associada a um medidor de caudal e a pressão é estabelecida tendo em conta a procura. É recomendada nas situações em que existem grandes perdas de carga no sistema e mudanças no perfil de consumo, que podem ser causadas pela população, como é o caso do efeito da sazonalidade. No caso das VRP com **pressão de saída modulada por pressão em ponto crítico**, o controlo é feito via rádio ou telefone, em função de um ponto crítico da zona e ajustada de forma a não se ocorrer excesso de pressão.

Reservatórios

Os níveis de operacionalização nos reservatórios devem ser estabelecidos de modo a minimizar as pressões elevadas e evitar extravasamentos, que podem levar a perdas significativas de água. A monitorização permite tanto uma gestão na pressão assim como potência a redução de extravasamentos. No que se refere a bombeamento devem ser evitados períodos que possam causar um aumento significativo na rede.

2.5.4.2 Metodologia FAVAD

O conceito Fixed and Variable Area Discharges (FAVAD), apresentado em 1994 por May, aplica-se a redes reais através da definição de um coeficiente que relaciona a pressão, o caudal da fuga e o tipo de material da conduta. Tendo em conta este tipo de material da conduta, os valores dos coeficientes podem encontrar-se balizados entre 0,5 e 2,5. O coeficiente $N_1=0,5$, era considerado antigamente para todo o tipo de fugas, no entanto, hoje em dia é atribuído para condutas pouco sensíveis à variação da pressão como condutas em aço, uma vez que as fugas neste tipo de material têm um comportamento fixo. As fugas com comportamento variável

ocorrem por norma, em condutas com material expansível, ou seja, em PVC ou PEAD, ou em zonas de junção e nesse caso o expoente N_1 pode tomar o valor de 2,5 (Gomes,2011, Thornton et al.,2008). Este expoente mais alto deve-se principalmente à área do orifício da fuga ser alterada com a variação da pressão no sistema (Piller e van Zyl, 2014). A equação (2.1), relaciona o caudal, a pressão e a flexibilidade dos materiais, permitindo estimar a variação do caudal através do orifício. (Lambert, 2000):

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^{N_1} \quad (2.1)$$

em que:

- Q_1 – caudal após a variação da pressão;
- Q_0 – caudal antes da variação da pressão;
- P_1 – pressão após a variação da pressão;
- P_0 – pressão antes da variação da pressão;
- N_1 – expoente antes da variação da pressão.

A figura 2.12, indica os valores N_1 que devem ser tomados, consoante os diferentes materiais das condutas e as características dos orifícios.

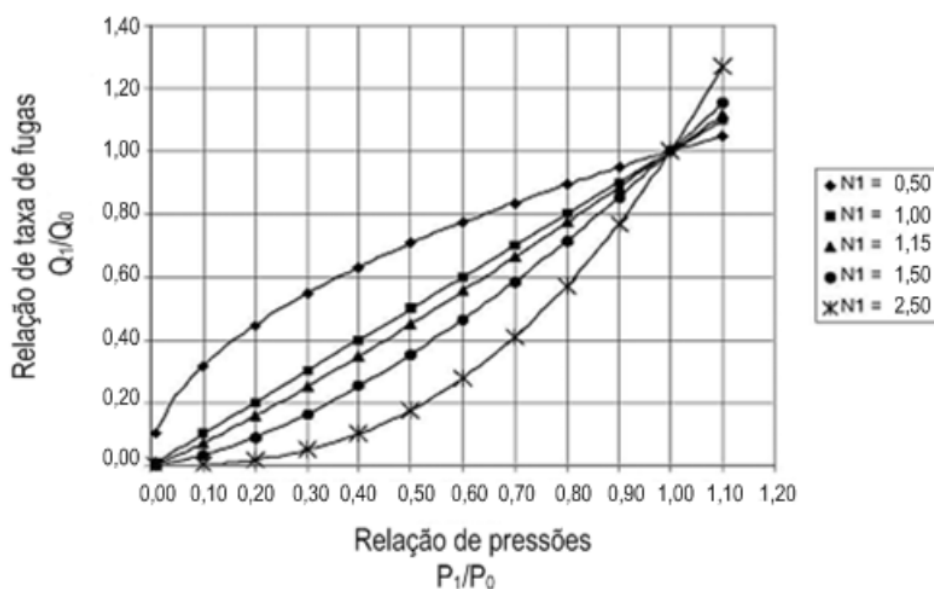


Figura 2.12 – Relação entre a pressão e o caudal através de fugas para diferentes materiais das condutas. Adaptado de Lambert (2000).

Relativamente aos valores de N_1 indicados, pode referir-se o seguinte (Gomes,2011):

$N_1 = 0,5$ – Usado quando a área do orifício não se altera com a variação da pressão, ou seja, o caudal através da fuga é praticamente independente da pressão (comportamento fixo). Este coeficiente é característico em condutas de ferro fundido dúctil e/ou aço.

$N_1 = 1,0$ – Utilizado em troços de distribuição de água de grande dimensão ou quando se pretende simplificar o problema. Neste caso, é razoável considerar linear a relação entre o caudal e a pressão.

$N_1 = 1,15$ – Aplica-se para sistemas para os quais seja difícil estimar o valor de N_1 ou onde se misturam diversos tipos de materiais.

$N_1 = 1,5$ – Coeficiente recomendado para redes de distribuição de água composta por material flexível, tais como o PVC e o PEAD (comportamento variável).

$N_1 = 2,5$ – Valor máximo do coeficiente predominante em redes de distribuição de água constituídas por condutas de plástico, onde ocorrem na maioria roturas longitudinais. Neste caso, a área do orifício é bastante sensível à variação de pressão na rede.

Os conceitos FAVAD e BABE, já referenciado, podem ser usados para a avaliar a relação entre pressão e caudal, ao nível da rede ou de uma conduta, assim como estabelecer vários indicadores para uma melhor gestão e exploração da rede de distribuição de água de forma eficiente, figura 2.13.

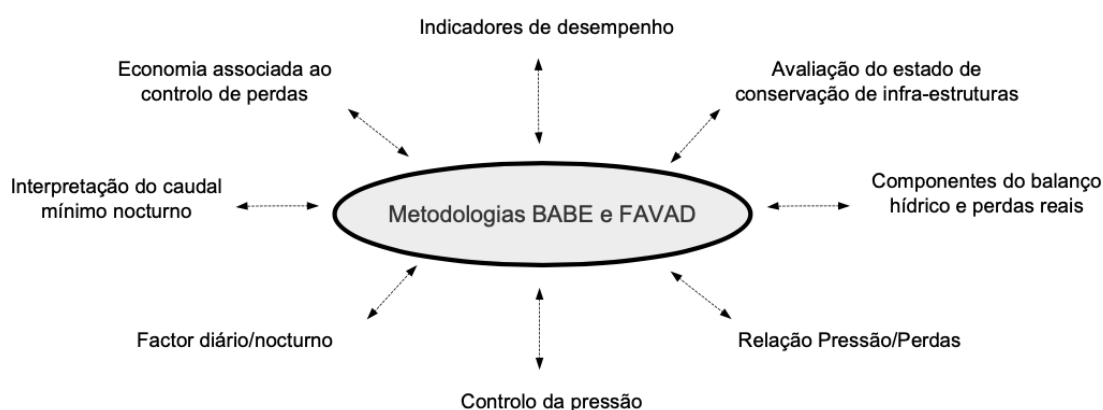


Figura 2.13 – Metodologias BABE e FAVAD (Fonte: Thornton et al., 2008)

2.6 Modelação hidráulica em SDA

Para a análise de um sistema de distribuição de água, é necessário conhecer as características das condutas (diâmetro interno, comprimento e rugosidade), assim como níveis iniciais de água nos reservatórios, consumos e cota piezométrica em pelo menos um dos nós do sistema, bem como os caudais que circulam nas condutas.

O estabelecimento das condições de equilíbrio é baseado nas leis da conservação de massa e energia. Estes são fundamentais para a criação de um modelo matemático de um sistema de distribuição de água, assim como é também a lei da resistência ao escoamento para conseguir calcular a perda de carga nas condutas tendo em conta o caudal transportado e as características da mesma (Marques e Sousa, 2011).

A simulação hidráulica permite a reprodução, tanto possível, do comportamento real do sistema, tendo em conta todas as características referidas acima. É de realçar a importância, desta ferramenta, na medida em que permite (Gomes,2011):

- Análise de problemas relacionados com pressões;
- Desenvolvimento de procedimentos em casos de emergência, como situações de incêndio ou interrupção da distribuição de água;
- Estabelecimento de prioridades no que diz respeito a investimento e intervenção na rede;
- Avaliação do comportamento hidráulico do sistema de forma a prever variações no consumo;
- Equiparar alternativas para fornecer, transportar, armazenar e distribuir água;
- Avaliar o impacto causado caso haja necessidade de expansão das infra-estruturas de adução, armazenamento e distribuição;
- E ainda, controlo do sistema em tempo real, o que permite a deteção de anomalias no sistema.

Existem vários softwares que permitem fazer a modelação hidráulica de SAA, contudo para simulação do comportamento hidráulico e de qualidade da água em sistemas sob pressão, muitos profissionais do setor, como investigadores e entidades gestoras, consideram o EPANET o software mais indicado para realizar os seus estudos (Muranho,2012).

2.6.1 EPANET

O EPANET é uma ferramenta de modelação hidráulica da US EPA (United States Environmental Protection Agency), criado em 1993 para avaliar o desempenho de sistemas de distribuição de água. O software de código aberto, é usado em todo o mundo para analisar SDA e a qualidade de água para fins comerciais e de pesquisa de forma gratuita (Muranho,2012). Em 2016, a Open Water Analytics (OWA) lançou a versão 2.1 no Open Source Project, que fornece algumas melhorias no desempenho e correção de bugs (Sela et al.,2019). Dada a importância deste software, foi feita a sua tradução para várias línguas, incluindo português, pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O software EPANET define os valores de pressão e caudal aplicando uma abordagem demand-driven, pelo que assume que os valores do consumo são conhecidos e satisfeitos independentemente dos requisitos de pressão na rede. Ou seja, os resultados produzidos são cenários irrealistas no caso de pressão insuficiente (por exemplo, por fuga na conduta). No entanto, a abordagem pressure-driven, permite ultrapassar esta dificuldade, uma vez que o consumo satisfeito depende da pressão disponível. Assim, é possível simular quer os cenários de pressão insuficiente quer o de pressão normal. Como inconveniente o programa apresenta dificuldades de convergência ao introduzir novos parâmetros no modelo (Muranho,2012).

No EPANET representa-se graficamente o esquema da rede, com valores pré-estabelecidos, como diâmetros, comprimentos, rugosidade, etc, ou com valores calculados, como o caudal, a velocidade e a perda de carga unitária em cada nó do sistema. O programa permite também, verificar o fluxo de água em cada tubo, a altura em cada tanque e pode indicar a concentração química da água (US EPA. 2021).

O software é composto por duas componentes. A primeira é no sentido da ótica do utilizador, designado de EPANET GUI – EPANET *Graphical User Interface* (codificado em linguagem Borland Delphi), no qual se define os valores supra referidos. A segunda é uma interface de cálculo, o EPANET *Solver* codificado em linguagem C (Muranho et al.,2014). No entanto, foram desenvolvidos outros mecanismos de simulação de outras linguagens, tais como Visual Basic e Pascal. Recentemente foram feitas ligações para Matlab e Python (Arandia e Eck, 2018). A figura 2.14, ilustra como o EPANET funciona.

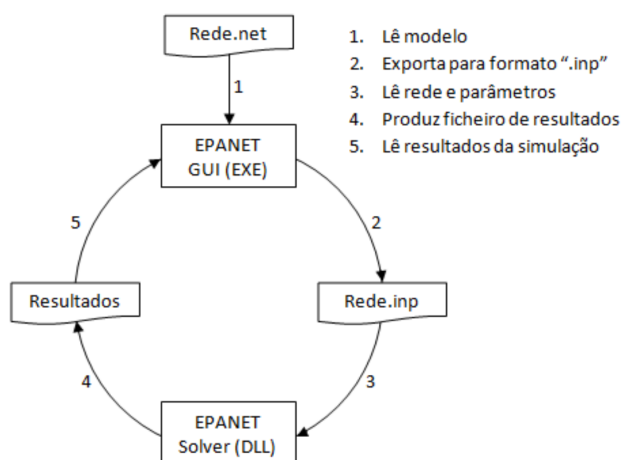


Figura 2.14 – Fases de simulação usando o software EPANET (Fonte: Muranho,2012)

A simulação passa primeiramente por fazer uma distribuição inicial de caudais, sendo posteriormente corrigida com a obtenção de novas cotas piezométricas e novos caudais, num processo iterativo devido à relação entre a perda de carga e o caudal, em que as equações são formulações não-lineares. Este processo é feito até encontrar a solução, de forma a garantir as equações de equilíbrio, que só é aceite se a soma dos incrementos de caudal a dividir pela soma total do caudal dos troços, for inferior ao valor do erro máximo de convergência. O EPANET usa o método do algoritmo gradiente para linearizar as equações do sistema, mas para calcular as cotas piezométricas utiliza a factorização de Cholesky, que substitui o método do gradiente conjugado (Muranho, 2012).

2.6.2 WaterNetGen

O WaterNetGen é uma extensão do EPANET, apresentada por Muranho et al. em 2012, para geração automática e dimensionamento de modelos de sistemas de distribuição de água sintética. O WaterNetGen permite modelações *demand-driven-analysis* (DDA), tal como o EPANET sem extensão, mas também modelações *pressure-driven-analysis* (PDA). A modelação PDA é mais realista, uma vez que os consumos dependem da pressão imposta na rede. Tem como vantagem considerar fugas (fugas por rotura, fugas por base, etc.) ao longo das condutas, e recentemente foi adaptado para um modelo de operação capaz de minimizar as fugas e os custos de eletricidade (Sousa et al., 2014). O WaterNetGen é portanto, mais focado na simulação dirigida pela pressão e aborda a necessidade de relatar mais dados sobre o estado interno do sistema. Principalmente quando a pressão é positiva, mas insuficiente para satisfazer a procura (Muranho et al.,2014), em que o cálculo dos consumos é feito em função da pressão instalada na rede e pode calcular-se o caudal de perdas de base e por rotura.

2.7 Síntese da revisão bibliográfica

A revisão bibliográfica apresentada tem como objetivo introduzir algumas noções básicas sobre perdas e fugas em sistemas de abastecimento de água, pelo que é importante reter: que por muitos esforços que sejam realizados, é impossível eliminar por completo as fugas na rede de abastecimento; para quantificar o nível de perdas, deve-se fazer um balanço hídrico o mais detalhado possível ; para controlo de perdas reais é crucial tomar em atenção a pressão na rede e a localização de fugas/roturas, uma vez que é condicionante para o volume de água perdida; e a modelação hidráulica é usada para analisar vários parâmetros num sistema de abastecimento, sendo uma ferramenta utilizada por todo o mundo e é essencial para uma Entidade Gestora.

3 METODOLOGIA

3.1 Enquadramento

A modelação hidráulica é uma ferramenta utilizada pelas Entidades Gestoras no que diz respeito à operação e gestão das redes sendo um auxílio no combate de perdas de água. Permite, entre outros, avaliar o comportamento hidráulico do sistema de forma a prever variações de consumo, desenvolver procedimentos em situações de interrupção de água ou casos de incêndio e analisar problemas relacionados com altas e baixas pressões.

Posto isto, o objetivo geral deste trabalho consta em estudar uma rede real de abastecimento de água, através da análise de caudais e pressões da mesma. Pelo que os objetivos específicos consistem em:

- Analisar uma rede de abastecimento de água e determinar o nível de perdas e fugas;
- Construção de um modelo hidráulico computacional da rede;
- Calibração e validação do modelo;
- Analisar os dados obtidos das novas tecnologias disponíveis, nomeadamente a teleleitura;
- Analisar a qualidade e utilidade dos dados medidos na modelação hidráulica.

3.2 Caso de Estudo – Pólo II da Universidade de Coimbra

A rede de abastecimento, do caso em estudo, localiza-se na freguesia Santo António dos Olivais e diz respeito à zona do Pólo II da Universidade de Coimbra (Figura 3.1). O sistema em estudo implementou-se no ano 1997, e tem uma extensão cerca de 2.710,3 m, tendo 11 ramais de consumo. À entrada existe um caudalímetro totalizador, mais precisamente na Rua Rebolim, que contabiliza a água que abastece o sistema.

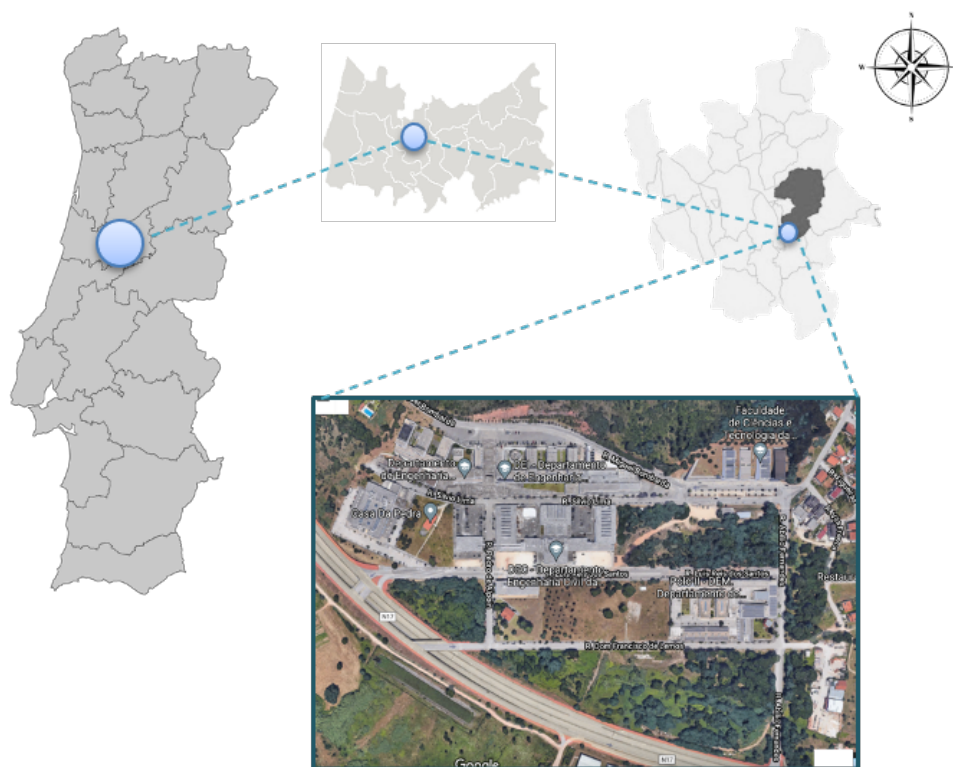


Figura 3.1 – Localização da rede em estudo.

A rede abastece ramais de consumo tais como: Cantina, Casa da Pedra, Casa Costa Alemão, Departamento de Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores, Departamento de Engenharia Informática, Departamento de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Química, Residência I, Residência II e Serviços Centrais. As localizações dos ramais de consumo encontram-se na figura 3.2, assim como as Válvulas Redutoras de Pressão.



Figura 3.2 – Localização dos ramais de consumo: 1 – Serviços centrais; 2 – DEM; 3 – Casa Costa Alemão; 4 – Residência II; 5 – DEC; 6 – Casa da Pedra; 7 – DEQ; 8 – DEEC; 9 – DEI; 10 – Cantina; 11 – Residência I; 12 – VRP; 13 – VRP.

3.3 Consumos da rede – Pólo II da Universidade de Coimbra

A análise dos consumos da rede de abastecimento é crucial para o estudo das perdas físicas do sistema. Numa fase inicial estudou-se os caudais diários em m^3/dia , durante os meses de abril a julho 2020, que foram disponibilizados num ficheiro Excel. Posteriormente, as Águas de Coimbra cederam acesso a uma plataforma de telegestão (Figura 3.3), onde os consumos médios horários puderam ser consultados por código do contador de cada ramal de consumo, e também do totalizador.

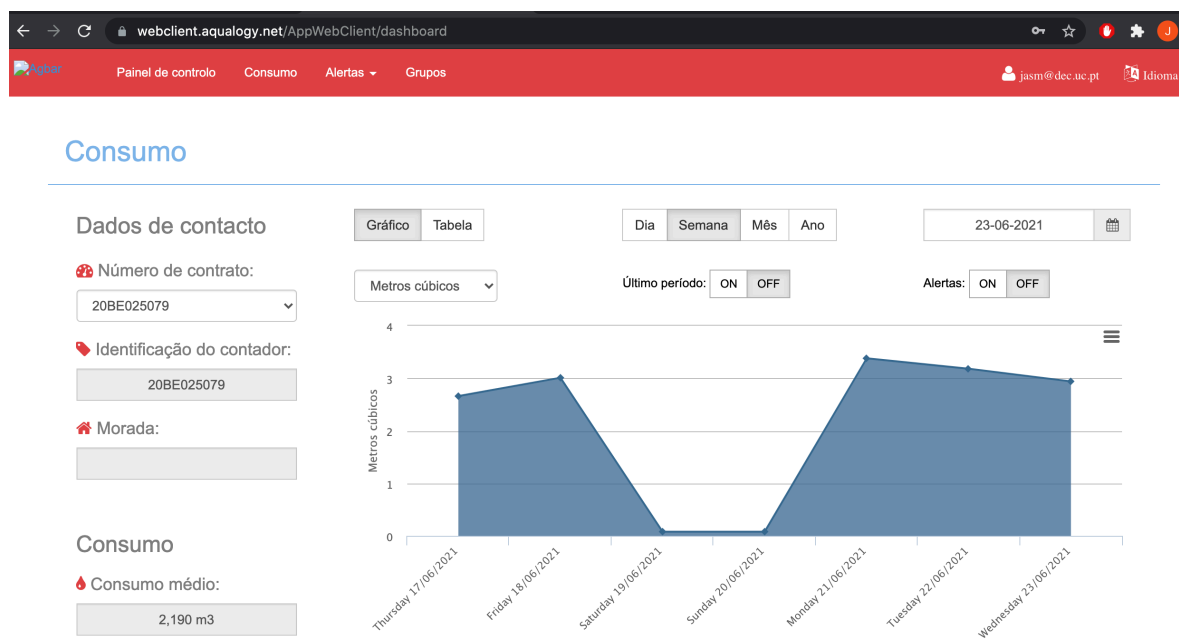


Figura 3.3 – Plataforma cujo acesso foi cedido pelas Águas de Coimbra para consulta de consumos na rede do Pólo II da Universidade de Coimbra.

Tendo em conta o estudo dos caudais de abril a julho de 2020 e, uma vez que as Águas de Coimbra mudaram o contador no Departamento de Engenharia Mecânica no final de Agosto, a segunda análise foi feita, agora em caudais horários, no período de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020. Optou-se também por este intervalo de tempo, devido à atividade letiva já ter iniciado.

Por último, procedeu-se ao estudo dos caudais diários em m^3/dia desde 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

3.4 Cadastro da rede de água do Pólo II da Universidade de Coimbra

O cadastro do Pólo II disponibilizado em AutoCAD possuía a informação da tipologia da rede. As características dos nós e das condutas da rede, encontram-se no Anexo A e B, respetivamente. A rede tem um formato idêntico ao apresentado na Figura 3.2, e pode ser analisada com mais detalhe no Anexo C.

De forma a confirmar a informação recolhida no cadastro, fez-se uma visita no dia 31 de maio de 2021 aos vários Departamentos, com um técnico das Águas de Coimbra. Nesta verificou-se que existem válvulas redutoras de pressão (VRP) nos Departamentos de Engenharia Química e Mecânica, assim como na Residência II. O cadastro indicava que havia duas VRP e averiguou-se também na visita que uma não estava instalada e outra não se encontrava em funcionamento. O último esclarecimento foi no ramal do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e

Computadores, pois no cadastro mostrava que era abastecido em dois pontos, no entanto pode-se verificar que era apenas feito por um.

3.5 Equipamentos de medição de pressão

O equipamento de medição de pressão utilizado para este trabalho consta num conjunto sensores de pressão/temperatura (Figura 3.4) que é alimentado por uma bateria autónoma capaz de registar até 64.000 amostras. O equipamento é configurado através do software Track-It™, e apenas de tem de se ligar o cabo USB ao registador e a uma porta USB do computador, para conseguir gravar a informação registada. A taxa de armazenamento de amostras de pressão pode ser definida para obter 1 amostra a cada 2 segundos até 1 amostra a cada 24 horas. Portanto, para este trabalho optou-se por uma taxa de armazenamento com uma resolução configurada de 1 minuto. O aparelho tem gamas de pressão de 0 a 380 e 0 a 760 Torr, uma precisão de $\pm 0,25$ e uma resolução de 0,01%. De forma que o material elétrico não se degrade, o registador é envolvido por uma carcaça robusta de aço inoxidável (MI@, 2021).



Figura 3.4 – Fotografia do equipamento de medição de pressão que se instalou.

A instalação de equipamentos de medição de pressão foi feita de forma a conseguir analisar o comportamento de pressões na rede, e averiguar possíveis anomalias.

No dia 8 de junho de 2021, fez-se o levantamento de possíveis localizações na tubagem para a instalação de manómetros (sensor de pressão). Averiguou-se também, que no Departamento de Engenharia Química, Casa Costa Alemão e Residência II já se encontram instalados manómetros (Figura 3.5).

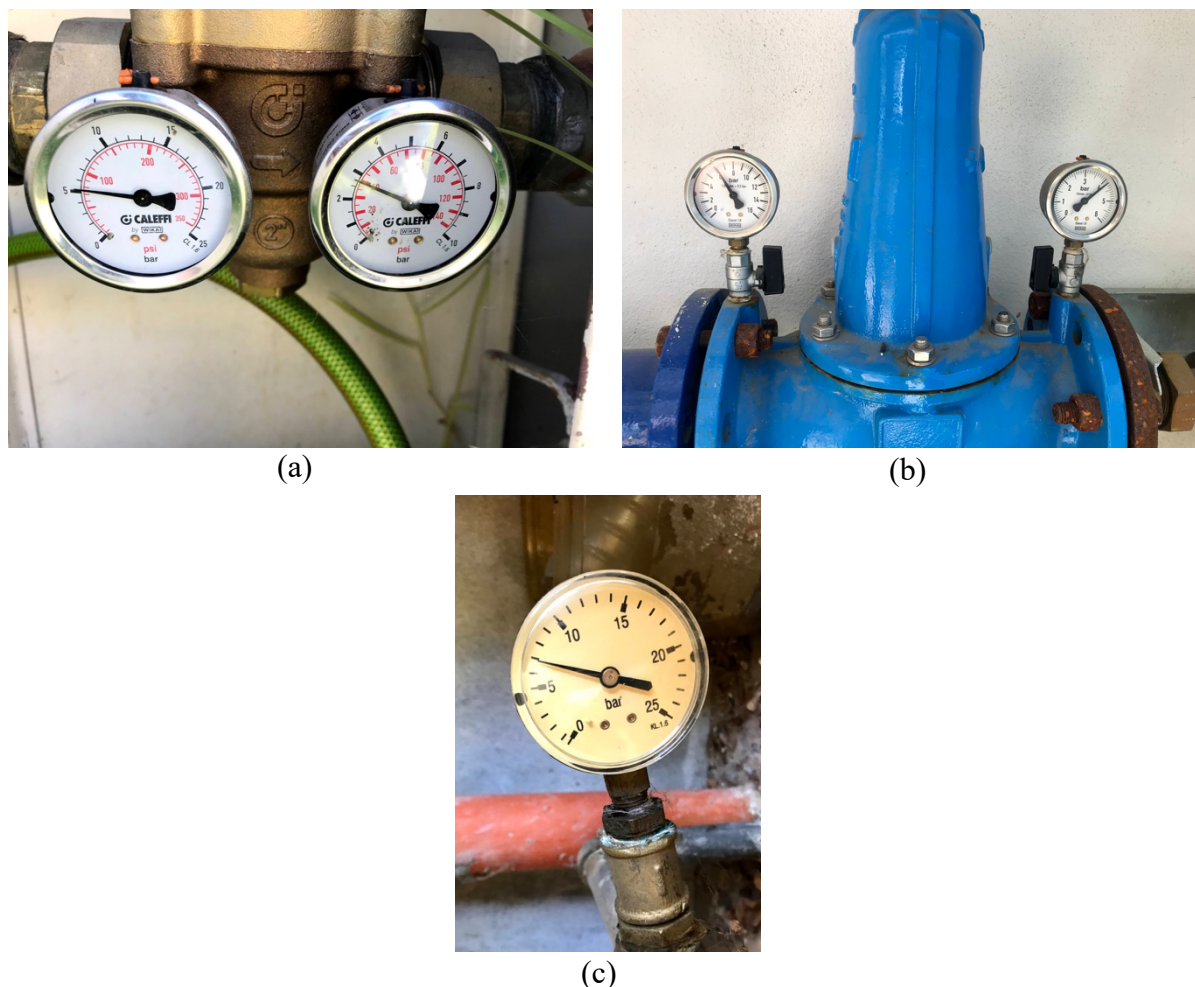


Figura 3.5 – Medidor de pressão: (a) – DEQ; (b) – Residência II; (c) – Casa Costa Alemão.

O processo de instalação dos sensores de pressão ocorreu no dia 22 de junho de 2021, nos Departamentos de Engenharia Informática, Civil e nos Serviços Centrais da FCTUC (Figura 3.6), pelo facto de alguns já se encontrarem equipados com manómetros e por falta de material disponível para os restantes ramais.

Nos SCFCTUC, o equipamento foi inserido diretamente numa torneira que se encontra no ramal que leva a água a todo o edifício, a jusante do contador. No DEI a instalação necessitou de uma tomada de carga para fixar o equipamento que se inseriu num tubo de serviço de incêndio. Seguidamente, realizou-se uma perfuração de forma a conseguir fixar o registador. Executou-se o mesmo procedimento no DEC, no entanto o sensor ficou no ramal a jusante do contador, no interior do edifício. A localização dos sensores foi também cuidada, de forma que não ocorresse vandalismo.

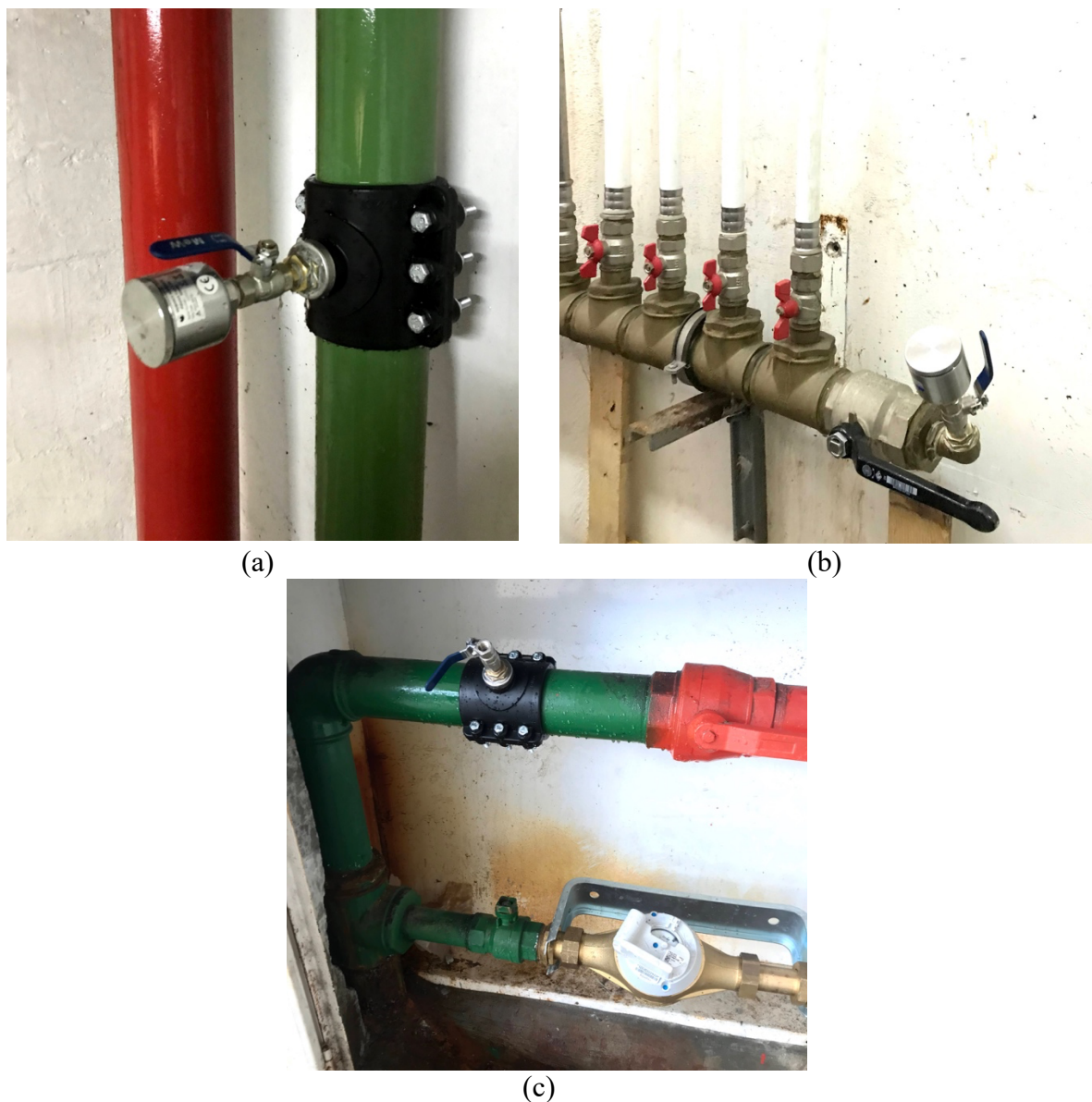


Figura 3.6 – Instalação de sensor de pressão: (a) – DEC; (b) – SCFCTUC; (c) – DEI.

No dia seguinte procedeu-se à instalação do manómetro no Departamento de Engenharia Mecânica. Neste processo foi preciso retirar uma parte do troço a jusante do contador, e substituir-se por um troço em T com redução para se adaptar o sensor de pressão. Este procedimento pode ser verificado na figura 3.7.

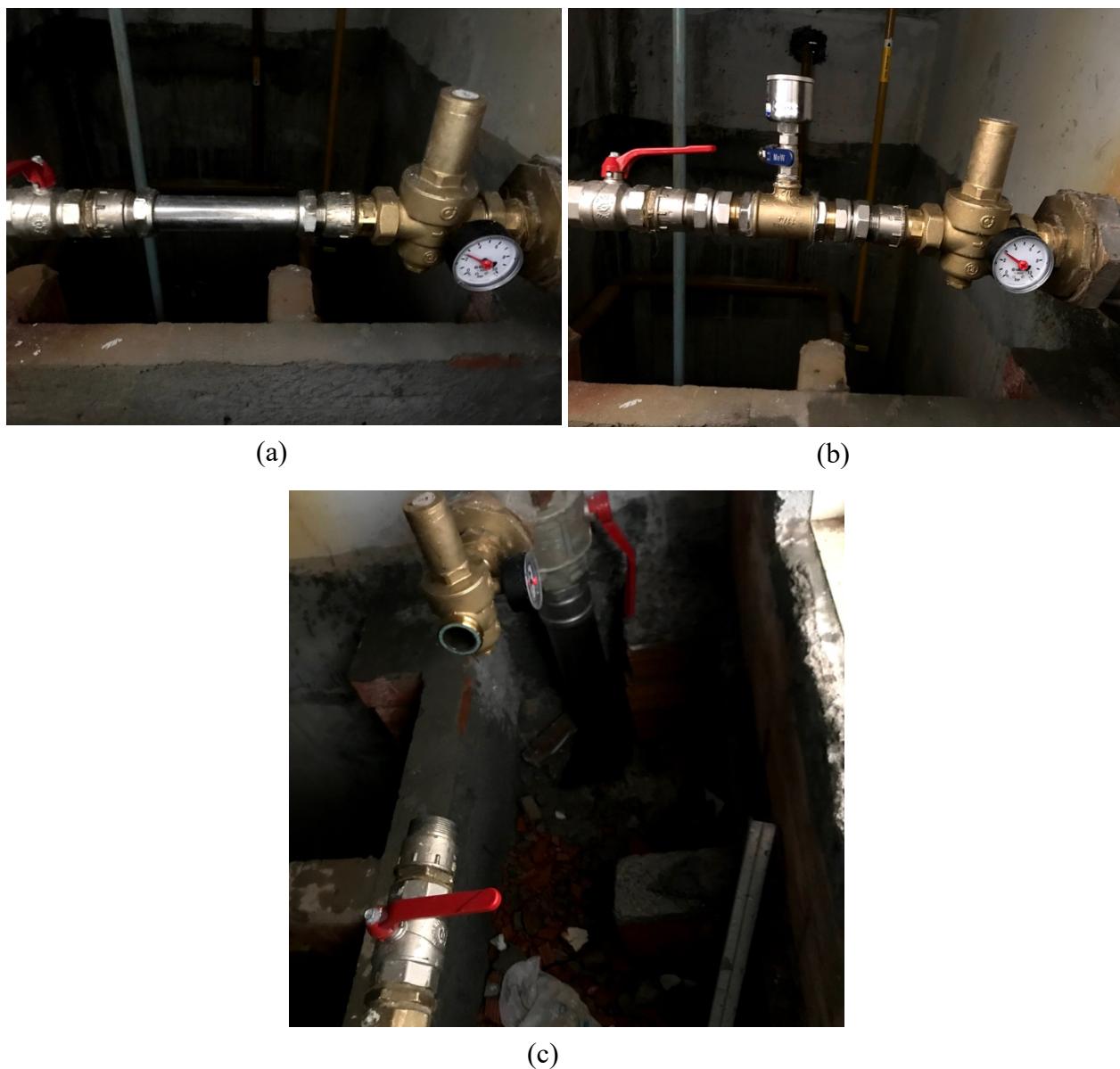


Figura 3.7 – Instalação do sensor de pressão no DEM: (a) – troço inicial; (b) – troço em T com redução; (c) – remoção do troço.

No totalizador à entrada da rede também foi instalado um medidor de pressão, no entanto foi feito pelas Águas de Coimbra (Figura 3.8). Estes dados foram medidos de minuto a minuto, e disponibilizados através de um ficheiro Excel.



Figura 3.8 – Instalação do sensor no totalizador pelas Águas de Coimbra.

Os manómetros foram numerados de forma a se identificar posteriormente o Departamento a que corresponde cada registo de pressões. A informação foi recolhida passado uma semana, ou seja, dia 30 de junho de 2021, no entanto os sensores continuam a fazer leituras de pressões. O registo de pressões do totalizador foi feito para uma semana, 17 a 24 de junho de 2021. Posto isto, pode-se verificar que apenas se tem um dia comum nas leituras de pressão, de 23 de junho às 11 horas até 24 de junho às 10 horas.

3.6 Modelação Hidráulica

Para criar um modelo hidráulico recorreu-se ao auxílio do cadastro da rede, criando uma imagem em PDF da mesma de forma a conseguir desenhar por cima, no programa EPANET. Seguidamente, introduziu-se a informação relativa às condutas e nós do sistema em estudo (Anexo A e B). Relativamente às propriedades hidráulicas, o caudal tem as unidades em litro por segundo e a fórmula para a perda de carga é de Hazen-Williams (H-W).

Nos ramais de consumo foi atribuído um coeficiente base de consumo igual a 1 l/s. Posteriormente, retiraram-se os consumos da plataforma das Águas de Coimbra de 23 de junho às 11 horas até 24 de junho às 10 horas, e geraram-se padrões de consumo horários. Os consumos horários de cada ramal, em l/s, encontram-se a figura 3.9.

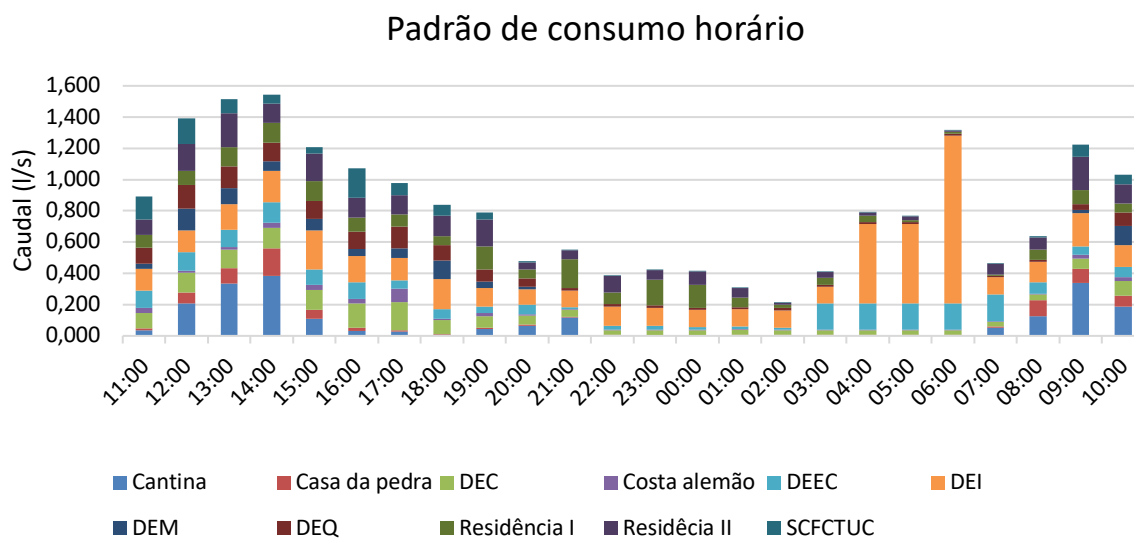


Figura 3.9 – Consumo horário em cada ramal de 23 de junho às 11 horas até 24 de junho às 10 horas em l/s.

Relativamente ao totalizador, este é início da rede e por isso é modelado como um reservatório em que o nível da água corresponde à pressão média horária da rede nesse ponto, em somatório com a cota do terreno. O padrão para o nível do reservatório encontra-se na figura 3.10.

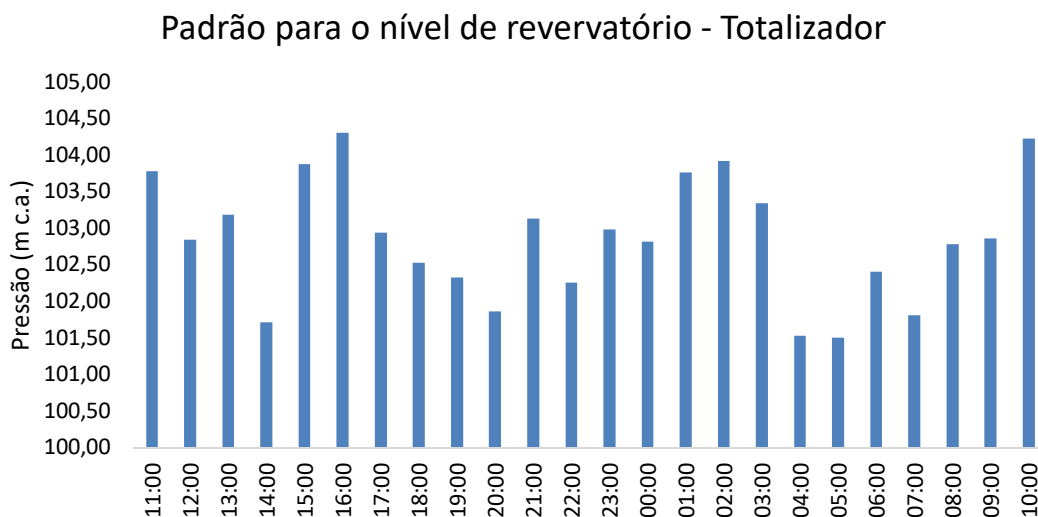


Figura 3.10 – Padrão para o nível do reservatório, resultante do somatório da cota do terreno com a pressão média horária em m.c.a.

Procedeu-se à simulação da rede no EPANET, após a introdução dos dados referidos acima. Nas figuras de 3.11 e 3.12 exemplificam o procedimento da introdução de dados no programa.

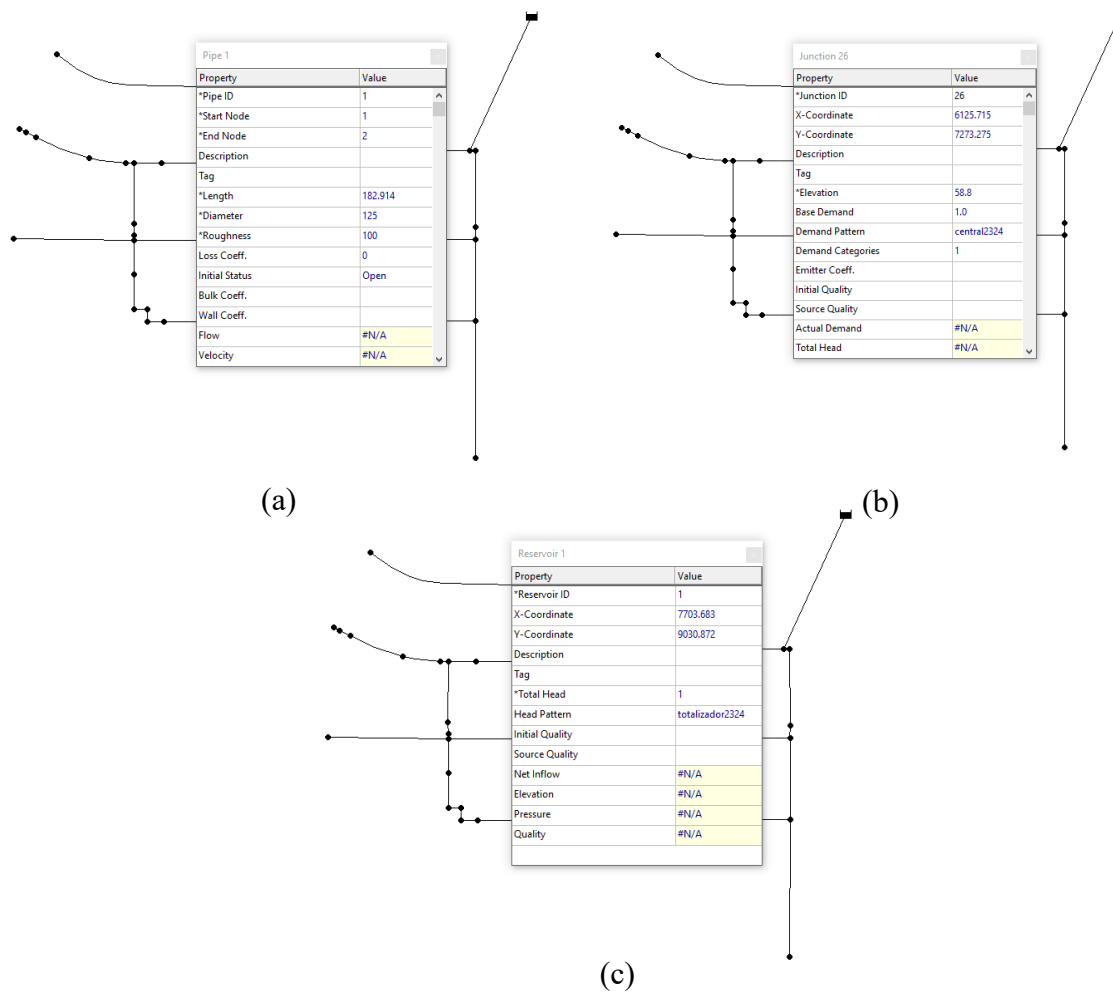


Figura 3.11 – Exemplo de introdução de dados no programa EPANET: (a) – características das condutas; (b) – características dos nós, identificação do padrão de consumo relativo ao ramal e base de consumo 1 l/s; (c) – identificação do padrão que corresponde ao somatório da cota do terreno do totalizador com a pressão horária.

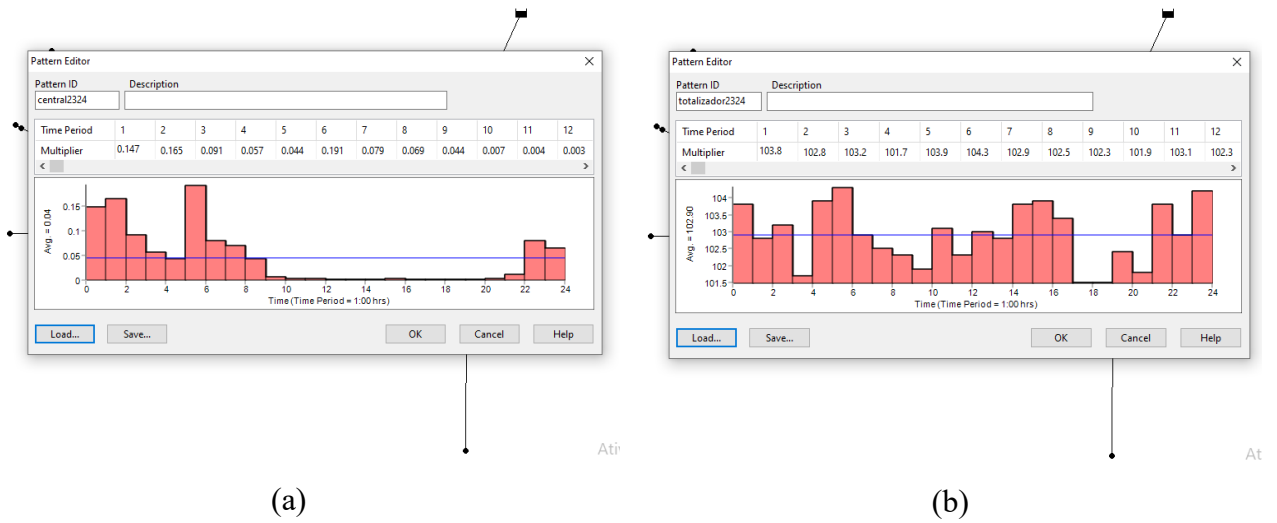


Figura 3.12 – (a) – Exemplo de um padrão horário de um ramal de consumo em l/s; (b) – padrão resultante do somatório da cota do terreno com a pressão horária em m c.a.

Ao analisar os resultados da modelação nos Departamentos em estudo – DEI, DEM, DEC e SCFCTUC, verificou-se uma ligeira discrepância nas pressões comparativamente ao lido pelos manómetros. Assim, realizou-se uma comparação entre a pressão simulada, a pressão média horária e a pressão com a resolução de 1 min do equipamento de medição. As pressões simuladas em cada Departamento foram consultadas nos quadros de cada nó, como se pode verificar na figura 3.13.

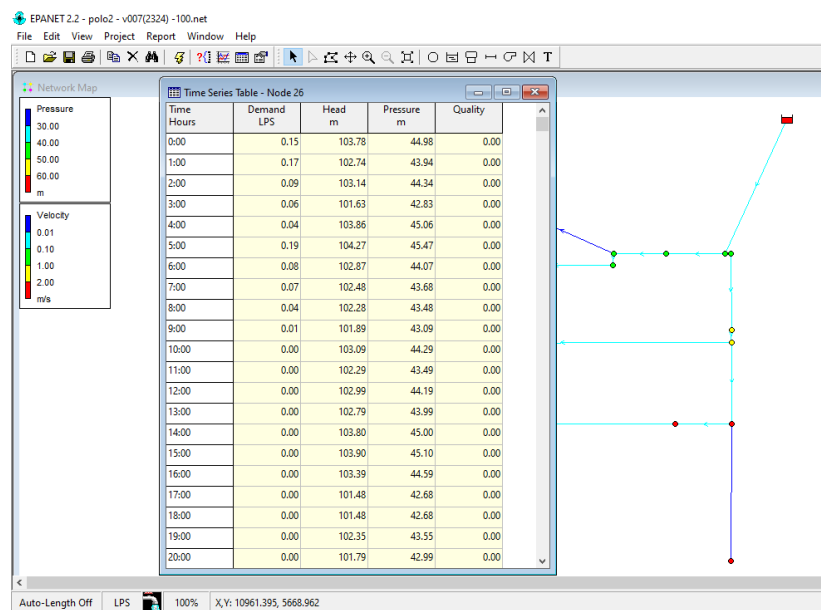


Figura 3.13 – Exemplo do quadro no EPANET para consultar as pressões simuladas nos Departamentos em estudo.

A validação do modelo fez-se devido a algumas discrepâncias constantes das pressões fruto da incerteza de alguns dados, nomeadamente na cota em que o sensor é colocado e na rugosidade das condutas.

Numa primeira fase, para a calibração do modelo compararam-se duas simulações hidráulicas. Uma com coeficiente de Hazen-williams (H-W) de 100, sendo este recomendado para as condutas mais recentes e, outra simulação com um coeficiente de 50, de forma a comparar com um limite elevado para uma conduta deteriorada. Porém, verificou-se que as diferenças nas perdas de carga eram não significativas, na casa das centésimas, e espectáveis uma vez que todas as condutas têm um diâmetro de 125 mm e velocidades muito baixas.

Posteriormente, devido a dúvidas na cota exata dos sensores de pressão fez-se um pequeno ajuste na cota do terreno no modelo hidráulico, de forma a calibrá-lo. As incertezas devem-se aos dados disponibilizados através do cadastro, uma vez que cotas de terreno são anteriores à construção do Pólo II. Assim, ajustou-se a cota no EPANET quando o caudal se apresenta praticamente nulo, de maneira que a pressão máxima simulada seja de igual valor à pressão máxima lida no equipamento, naquele dia.

4 RESULTADOS

4.1 Análise de consumos da rede

De acordo com os dados disponibilizados no ficheiro Excel, de abril a julho de 2020, analisaram-se os consumos diários em m³/dia.

O caudal máximo e mínimo de cada ramal de consumo foi analisado, assim como o caudal médio no intervalo de tempo referenciado. Os caudais mencionados encontram-se na figura 4.1.

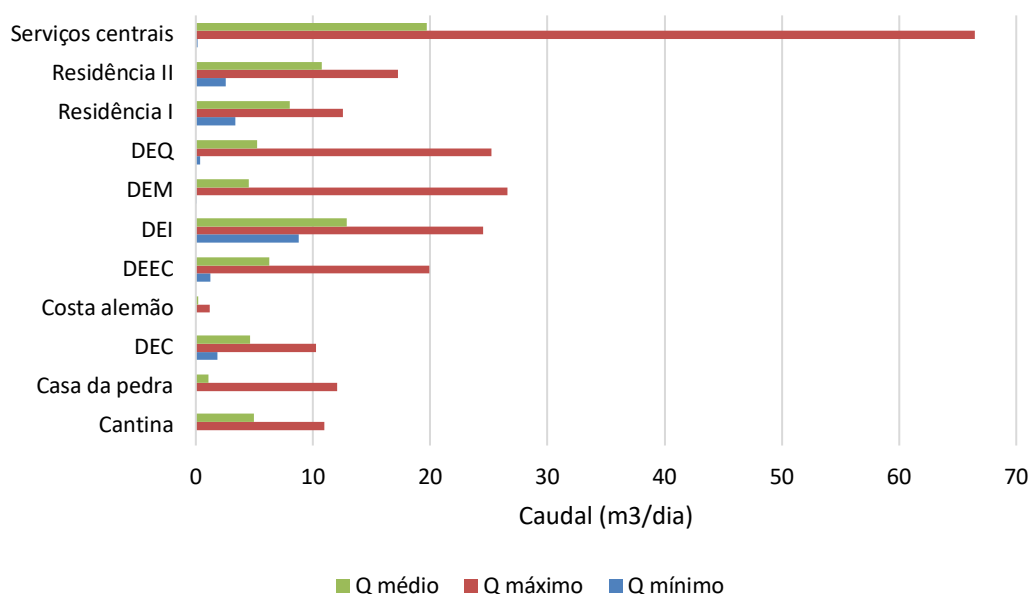


Figura 4.1 – Caudal mínimo, máximo e médio de cada ramal de consumo em m³/dia, de abril a julho de 2020.

Observando a figura 4.2, pode afirmar-se que o dia 24 de maio e 7 de julho de 2020, correspondem, respetivamente, ao dia de menor e maior consumo, com caudais de 40,9 m³/dia e 89,3 m³/dia para o total dos contadores parciais, que diz respeito ao somatório dos contadores parciais, e 41,3 m³/dia e 97,1 m³/dia para o caudalímetro totalizador. Neste período houve um total de perdas correspondente a 8,63%.

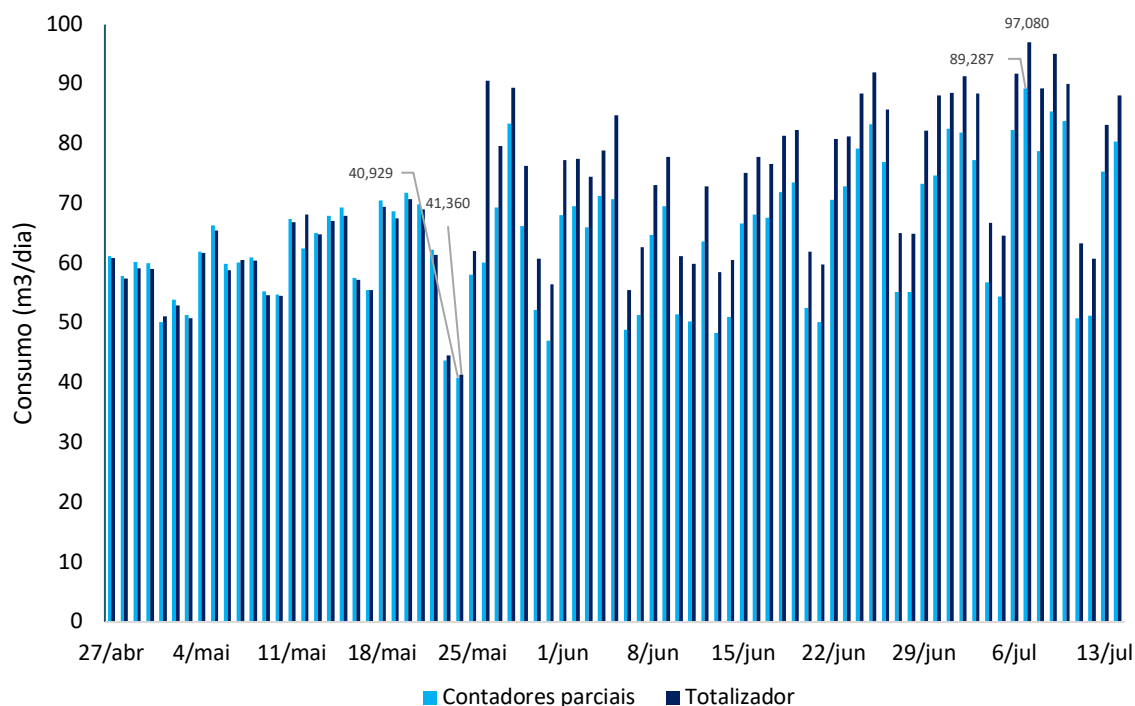


Figura 4.1 – Consumo do total os contadores parciais e totalizador em m³/dia, de 24 de maio e 7 de julho de 2020.

Na figura 4.3. é observável as perdas de água diárias, no intervalo de tempo referenciado, de 27 de abril a 22 de maio. É de notar, na figura 4.2, que o consumo dos contadores parciais foi superior ao registado no totalizador no período de tempo inicial, dando um sinal negativo as perdas. A partir do dia 26 de maio de 2020 houve alterações na rede, possivelmente por pequenas roturas, visto que nos dias que se seguiram ocorreram sempre perdas de água. Nesta data, a diferença entre o totalizador e o total dos contadores parciais foi de 30,5 m³, registando-se como o maior dia de perdas de água.

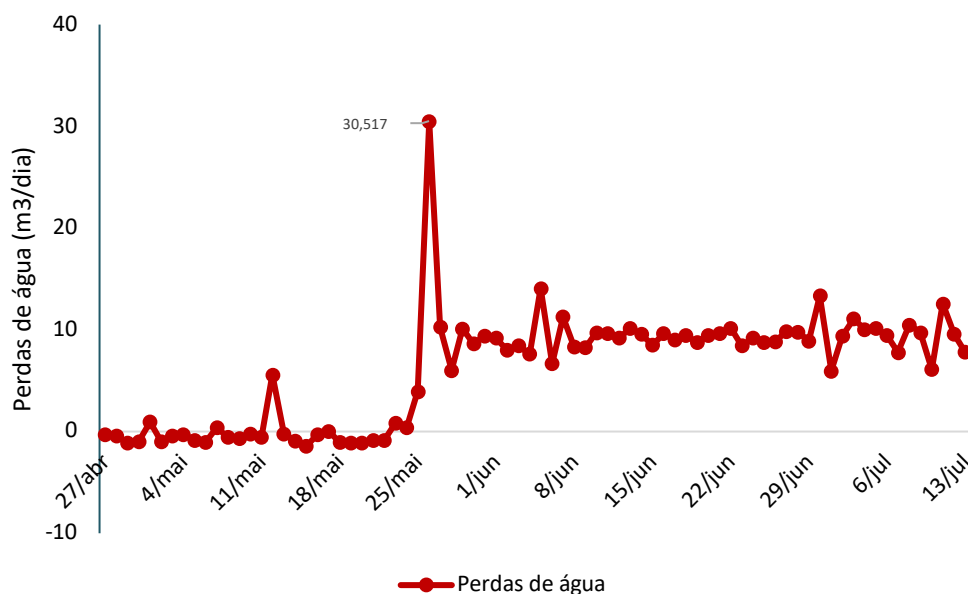


Figura 4.2 – Perdas de água diárias em m³/dia, de 24 de maio e 7 de julho de 2020.

Posteriormente, os dados que se analisou foram consultados na plataforma das Águas de Coimbra. Numa primeira fase, estudou-se dos caudais horários de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020. A visão geral é que os consumos dos ramais são regulares, ou seja, maior caudal durante o dia e menor na fase noturna. No entanto, em alguns Departamentos observou-se uns picos de caudal durante a noite, nomeadamente no DEI, DEEC e DEM como se pode observar na figura 4.4, 4.5 e 4.7, respetivamente.

Departamento de Engenharia Informática

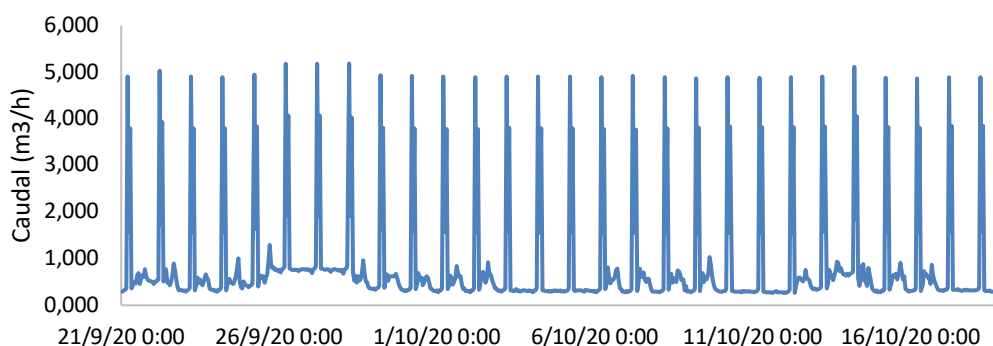


Figura 4.3 – Consumo horário do DEI em m³/h, 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.

A figura 4.4 diz respeito ao caudal em cada hora, no espaço de tempo indicado acima, no Departamento de Engenharia Informática. Pode-se verificar que ocorrem consumos mais

acentuados no horário das 4h59 às 6h59 (Figura 4.6). Após esta análise, obteve-se a informação que neste horário ocorrem as regas de jardim.

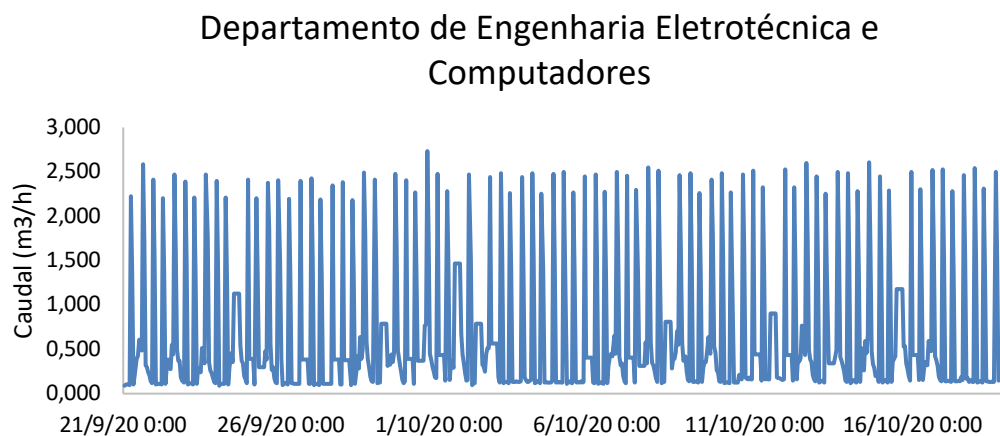


Figura 4.4 – Consumo horário do DEEC em m^3/h , 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.

Na figura 4.5, relativa ao consumo do Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores, pode-se observar que ocorrem 3 picos num espaço de 24 horas. Estes surgem 5h59, 14h59 e 22h59, e pode-se observar com mais pormenor na figura 4.6.

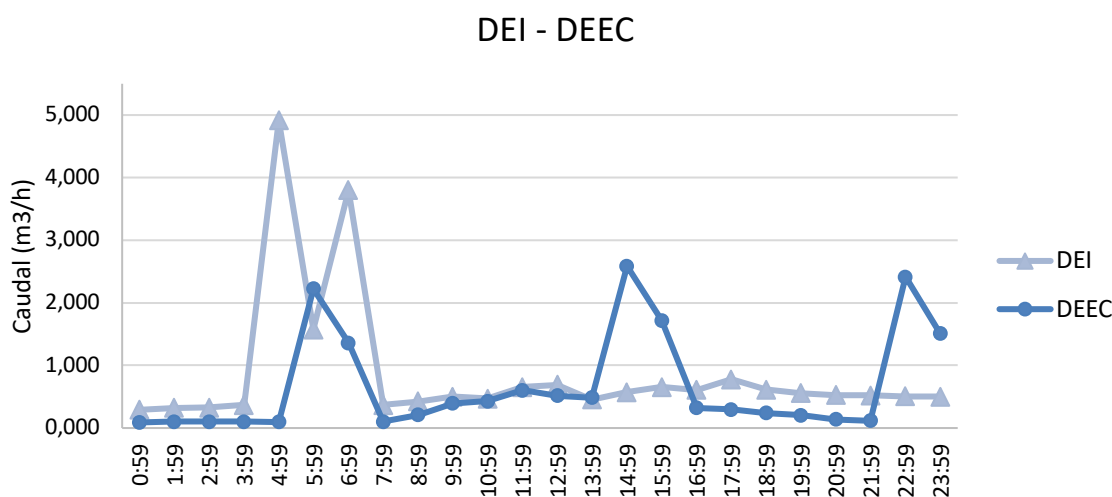


Figura 4.5 – Consumo horário do DEI e DEEC em m^3/h , no dia 21 de setembro de 2020.

Em última análise desta parte, pode-se observar na figura 4.7, os consumos do Departamento de Engenharia Mecânica, de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.

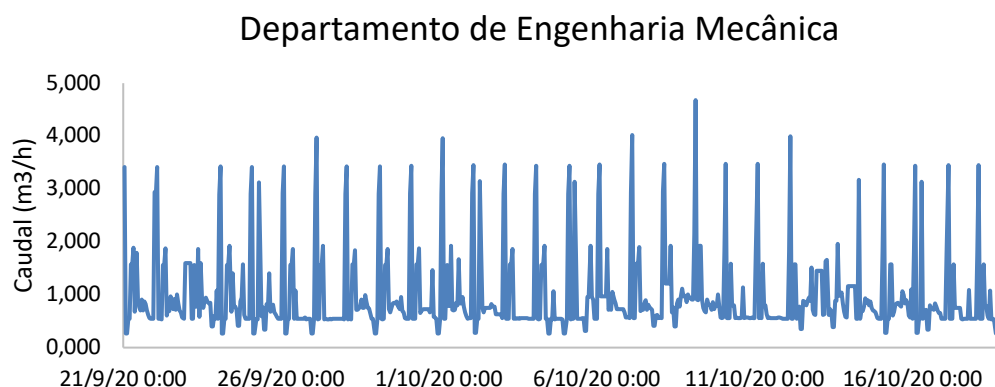


Figura 4.6 – Consumo horário do DEM em m³/h, 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.

Na figura 4.8. é observável com mais pormenor os picos, e verifica-se que os maiores consumos ocorrem no período noturno, no entanto, não são num horário fixo como no DEI e DEEC. Pode-se afirmar que os caudais mais elevados se sucedem entre as 0h59 e 6h59.

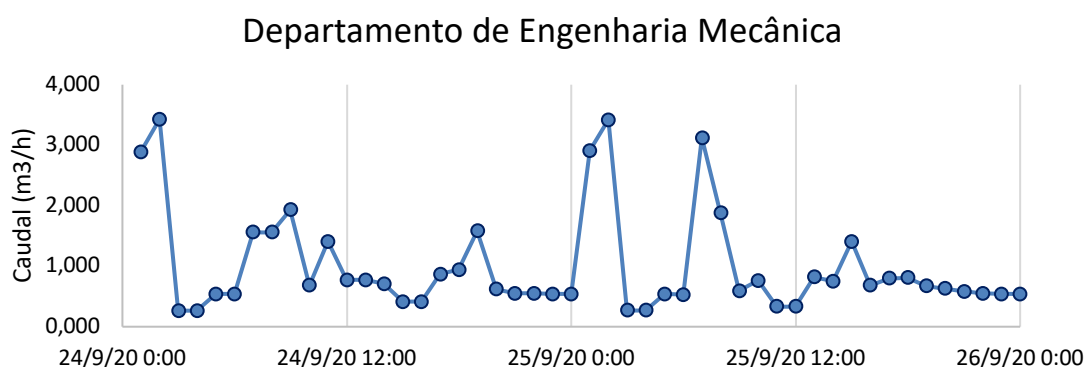


Figura 4.7 – Consumo horário do DEM em m³/h, no dia 24 e 25 de setembro de 2020.

Numa segunda fase, estudou-se os caudais diários em m³/dia, desde 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021, consultados também por teleleitura. Os caudais mínimos, máximos e médios, em m³/dia, de cada ramal de consumo encontram-se na figura 4.9.

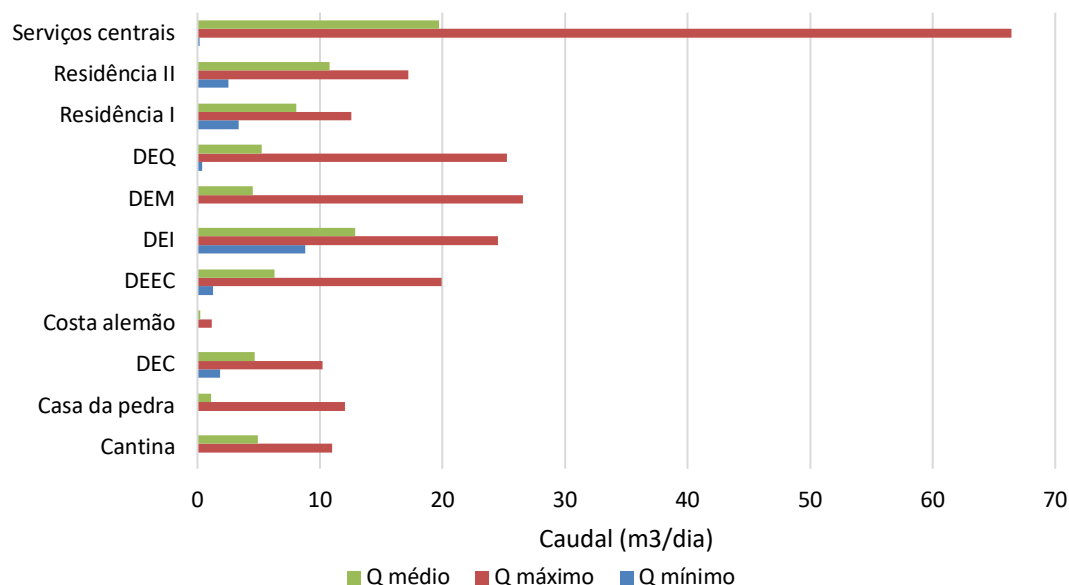


Figura 4.8 – Caudal mínimo, máximo e médio de cada ramal de consumo em m^3/dia , de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

Analisando os caudais da figura 4.9, é perceptível que no ramal dos SCFCTUC o caudal máximo é elevado. Assim, estudaram-se os caudais dos Serviços Centrais no período de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020, pode-se verificar que os caudais neste edifício são bastante baixos. (Figura 4.10).

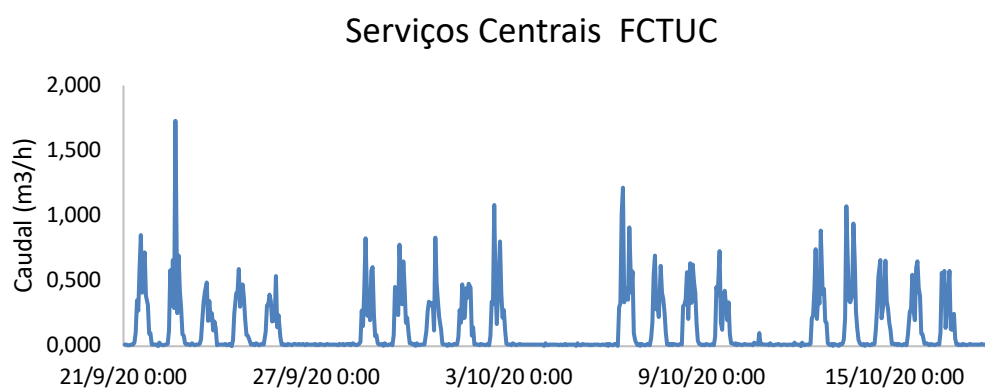


Figura 4.9 – Consumo horário dos SCFCTUC em m^3/h , de 21 de setembro a 18 de outubro de 2020.

Portanto, pode-se constatar a ocorrência de uma fuga, a qual foi contabilizada para o cálculo do caudal médio, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021. Este evento ocorreu desde 6 de dezembro de 2020 a 25 de janeiro de 2021 (~50 dias), em que o volume médio da fuga é de $50,5 \text{ m}^3$ e atingiu um volume máximo diário de $66,4 \text{ m}^3$. Se se calcular o volume médio, sem considerar esta perda de água, o valor seria apenas de $2,6 \text{ m}^3$. Na figura 4.11, pode-se verificar

a ocorrência desta fuga, e mais detalhadamente na figura 4.12, uma vez que se identificou o momento através dos caudais horários do início da mesma.

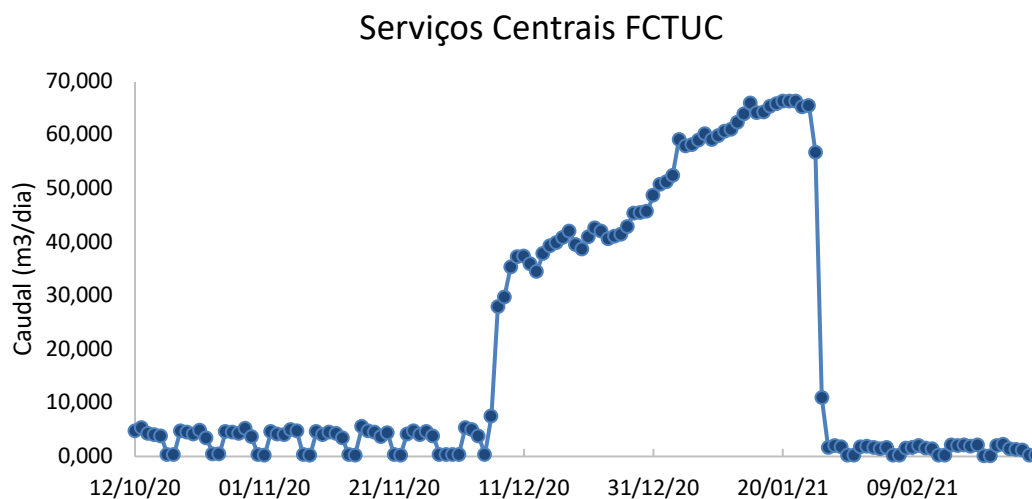


Figura 4.10 – Consumo diário dos SCFCTUC em m³/dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

Na figura 4.12, que representa os caudais horários de 6 de dezembro a 10 de dezembro, é possível verificar o exato momento em que começou a fuga. No dia 6 de dezembro, pelas 15h59 o volume de 0,03 m³ era semelhante aos caudais horários anteriores, no entanto na hora seguinte teve um aumento com um fator multiplicativo de 8,87. É perceptível pela figura, que não foi um pico pontual de caudal, uma vez que este continua a aumentar substancialmente.

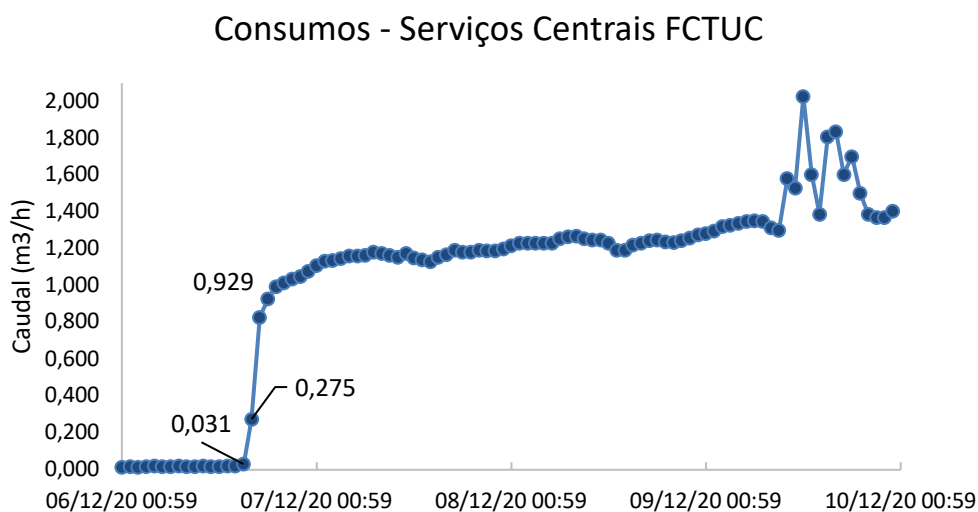


Figura 4.11 – Consumo horários do SCFCTUC de 6 de dezembro a 10 de dezembro, para verificação do momento em que começou a fuga em m³/h.

Relativamente aos restantes ramais, o padrão de consumo é idêntico aos da primeira análise (abril a julho de 2020) com a nuance de ser período de aulas, excepto a Casa da Pedra, o Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores, Departamento de Engenharia Mecânica e Departamento de Engenharia Química.

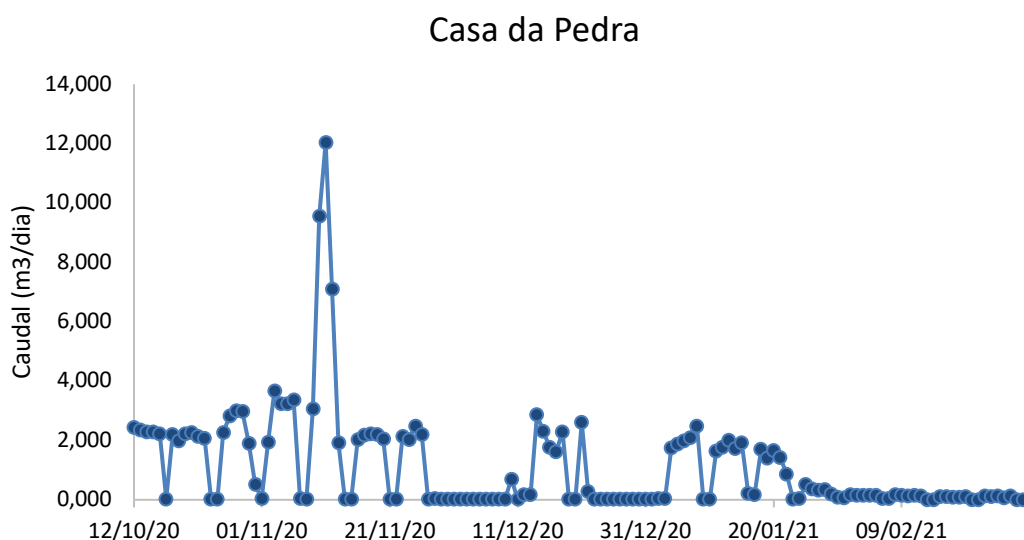


Figura 4.12 – Consumo diário da Casa da Pedra em m³/dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

Na figura 4.13 pode observar-se os consumos diários da Casa da Pedra, que no período de tempo em análise tem um caudal médio diário de 1,1 m³/dia. No entanto, de 10 a 12 de

novembro de 2020 ocorreu um evento em que os consumos de água aumentaram significativamente, atingindo um pico no dia 11 com um volume de 12,0 m³.

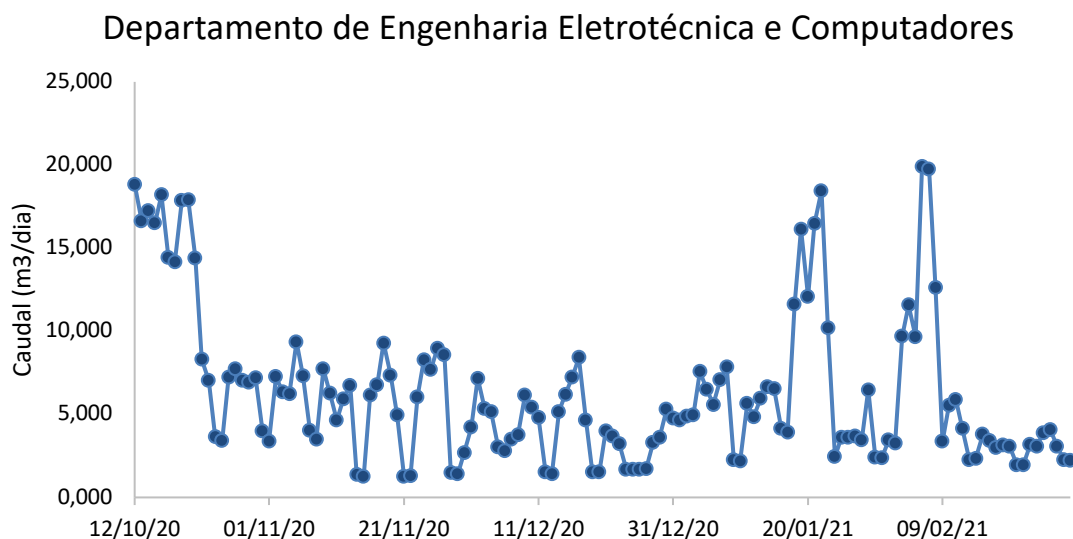


Figura 4.13 – Consumo diário do DEEC em m³/dia, 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

A figura 4.14 diz respeito aos caudais diários do DEEC, em que é observável um caudal considerável nos primeiros 10 dias, com um caudal médio de 16,6 m³/dia. No espaço de tempo seguinte os consumos encontram-se em conformidade com o caudal médio indicado na figura 4.8, no entanto ocorrem 2 eventos com uso de água superiores ao regular. O primeiro evento ocorreu durante 5 dias, de 18 a 23 de janeiro com consumos médios de 14,2 m³/dia e o segundo de 6 a 8 de fevereiro com uma média de 17,4 m³/dia.

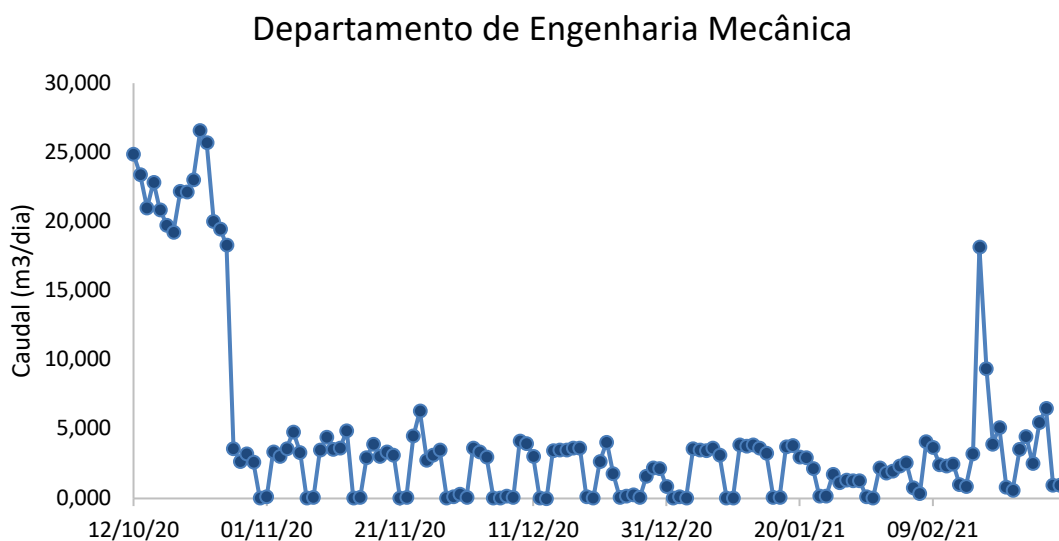


Figura 4.14 – Consumo diário do DEM em m^3/dia , 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021

Analisando a figura 4.15, referente ao DEM, é perceptível de imediato um caudal significativo durante os primeiros 15 dias com consumos médios de $22,0 \text{ m}^3/\text{dia}$. De seguida surge uma queda substancial no consumo, no entanto teve um evento pontual no dia 16 de fevereiro com $18,2 \text{ m}^3$ de volume.

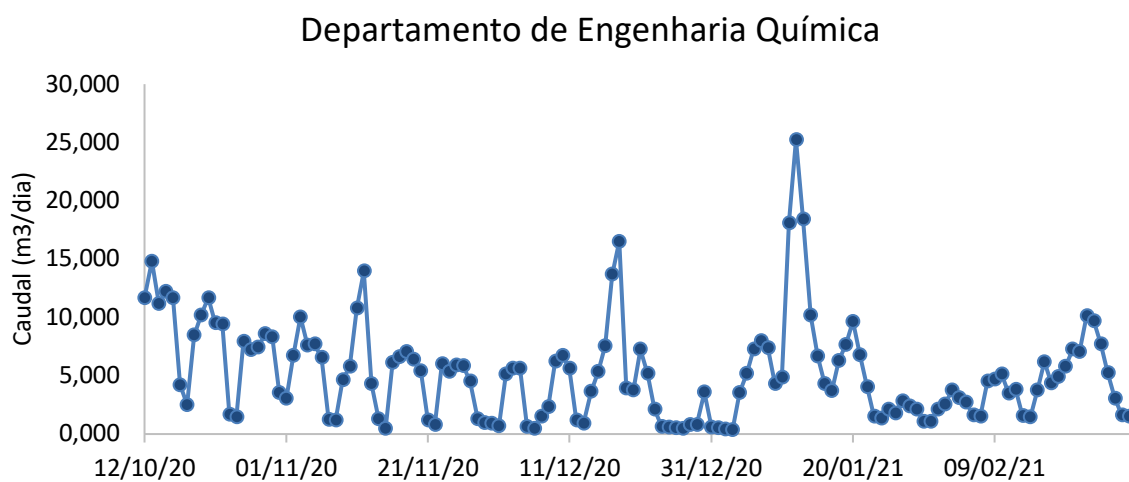


Figura 4.15 – Consumo diário do DEQ em m^3/dia , 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021

Na figura 4.16, são observáveis os caudais diários referentes ao DEQ. Consultando a figura 4.9, verifica-se que a média de consumos tem um valor de $5,2 \text{ m}^3/\text{dia}$. Não obstante, apresenta 3 picos de caudal, sendo o primeiro a 11 e 12 de novembro e o segundo a 17 e 18 de dezembro de 2020. Por último, o terceiro pico foi por um período de 4 dias (11 a 14 de janeiro de 2021) com um caudal médio de $18,0 \text{ m}^3/\text{dia}$.

A figura 4.17 é referente ao período de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021, e pode verificar-se que o dia 19 de janeiro de 2021 corresponde ao dia de maior consumo, com caudais de 151,0 m³/dia e 171,7 m³/dia para o total dos contadores parciais e totalizador, respetivamente. Nesta data ainda ocorria a fuga dos serviços centrais, justificando estes caudais significativos. Por outro lado, o menor consumo surge no dia 27 de fevereiro de 2021 para o total dos contadores parciais com um caudal de 27,3 m³/dia e no dia 15 de novembro de 2021 com um caudal de 33,0 m³/dia para o totalizador.

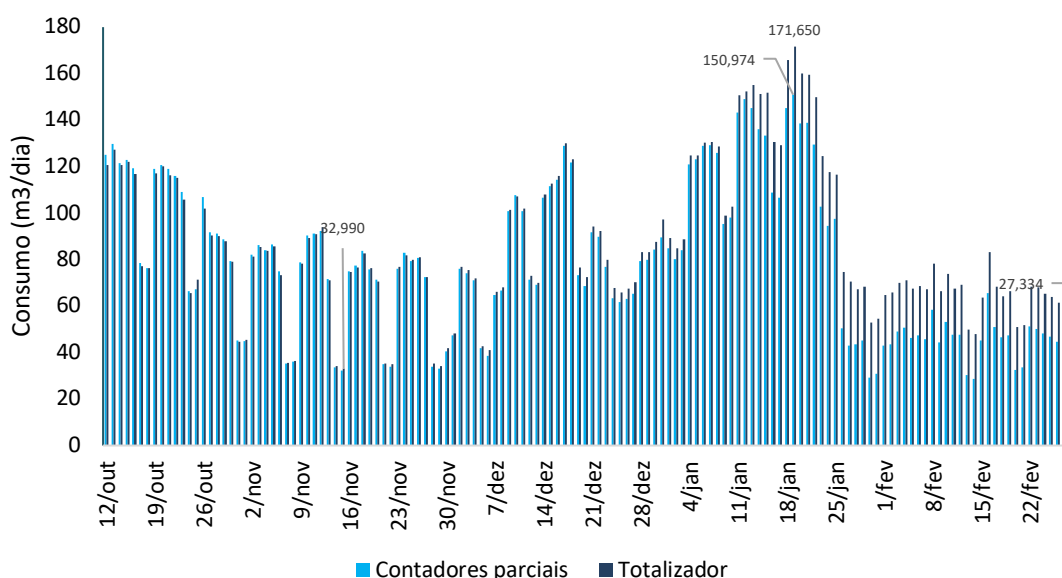


Figura 4.16 – Consumo do total os contadores parciais e totalizador em m³/dia, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

Na figura 4.18 é possível analisar as perdas de água diárias no período de tempo referenciado. De 12 de outubro a 24 de novembro os caudais totais dos contadores parciais foi superior ao registado no totalizador, dando um sinal negativo as perdas, e pode-se justificar devido ao caudalímetro ter uma precisão diferente no totalizador e nos ramais de consumo. No dia 27 de janeiro a diferença entre o totalizador e o total dos contadores parciais foi de 27,7 m³, sendo assim o maior dia de perdas físicas. Esta perda, ocorre numa altura em que os consumos dos ramais são relativamente baixos, mais precisamente com um caudal de 42,9 m³/dia no total dos contadores parciais. Após a maior perda contabilizada, verifica-se que os consumos foram sempre baixos, pelo que pressuposto é terem pressões mais elevadas, e assim maiores volumes de perdas.

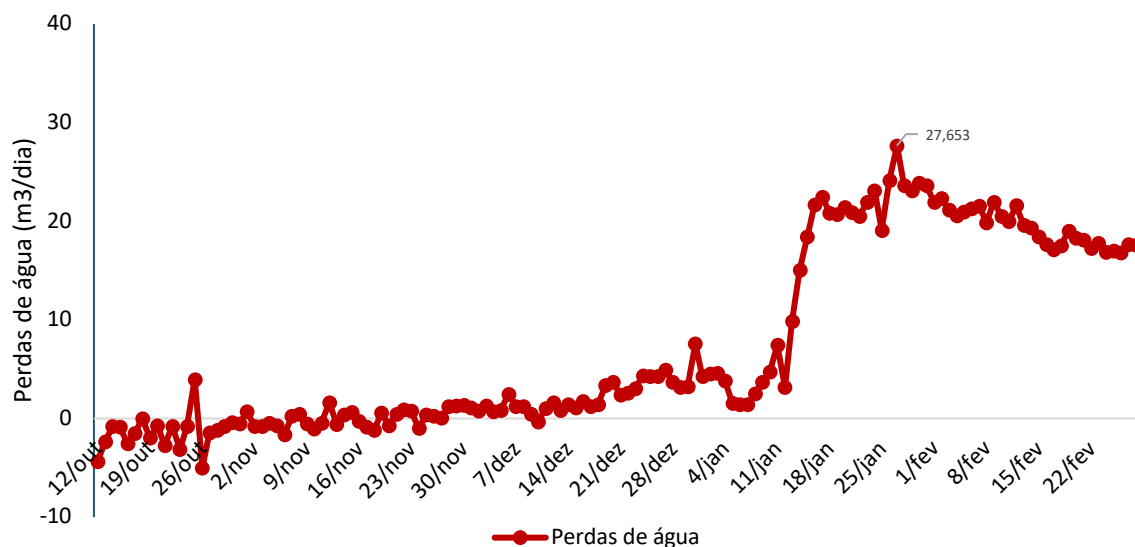


Figura 4.17 – Perdas de água diárias em m³/dia, de 12 de outubro de 2020 até 28 de fevereiro de 2021.

4.2 Modelação Hidráulica - Análise

A modelação matemática tem como objetivo a análise da rede do Pólo II da Universidade de Coimbra. Portanto, para validar esta modelação estudou-se as pressões nos locais nos quais foram instalados os dispositivos de medição e registo das pressões a saber, Departamento de Engenharia Civil, Serviços Centrais FCUC, Departamento de Engenharia Informática e Departamento de Engenharia Mecânica. De forma a comparar os gráficos, ajustou-se a cota do sensor quando o consumo nos ramais é praticamente zero, tendo assim as pressões hidrostáticas. Os gráficos apresentados contêm informação da pressão em cada minuto ao longo do período em estudo, a pressão média horária, a pressão que é fornecida pela simulação no EPANET e o consumo em cada ramal.

O Departamento de Engenharia Civil, como se pode observar na figura 4.18, tem pressões praticamente constantes quando não existem oscilações de caudal. É também perceptível que a pressão média horária é mais elevada quando o consumo no ramal é mais baixo, como por exemplo acontece com a pressão máxima naquele dia, às 2:00 horas da manhã, com um caudal de 0,03 l/s. Faz-se também notar que no horário das 11h00 às 17h00, as pressões são mais baixas e oscilantes e o caudal mais elevado.

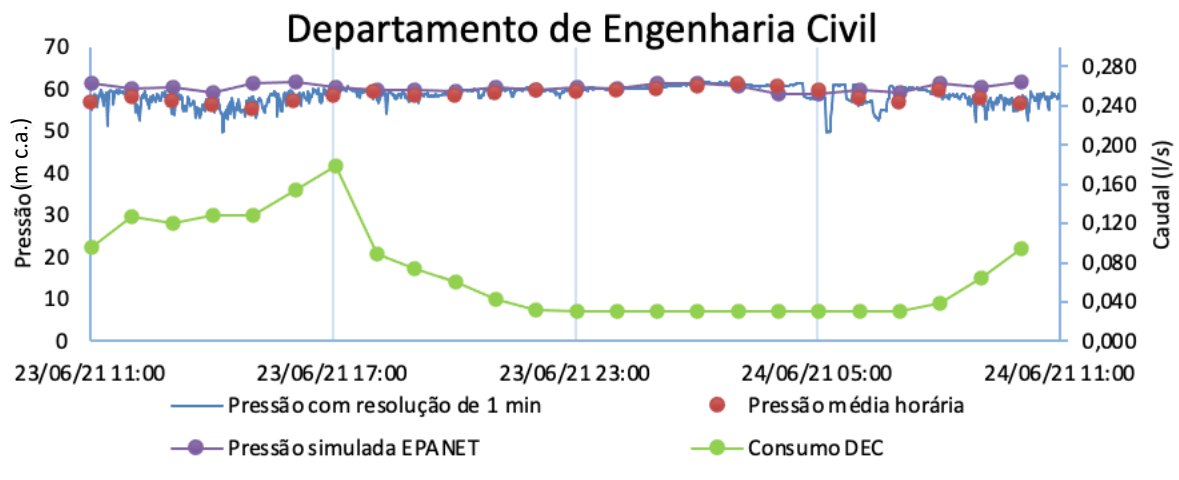


Figura 4.18 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEC.

Na figura 4.19 encontra-se a simulação no EPANET da rede em estudo do Pólo II, na hora em que o Departamento de Engenharia Civil atinge a pressão máxima horária de 61,3 m c.a.– 2:00 horas do dia 24 de junho.

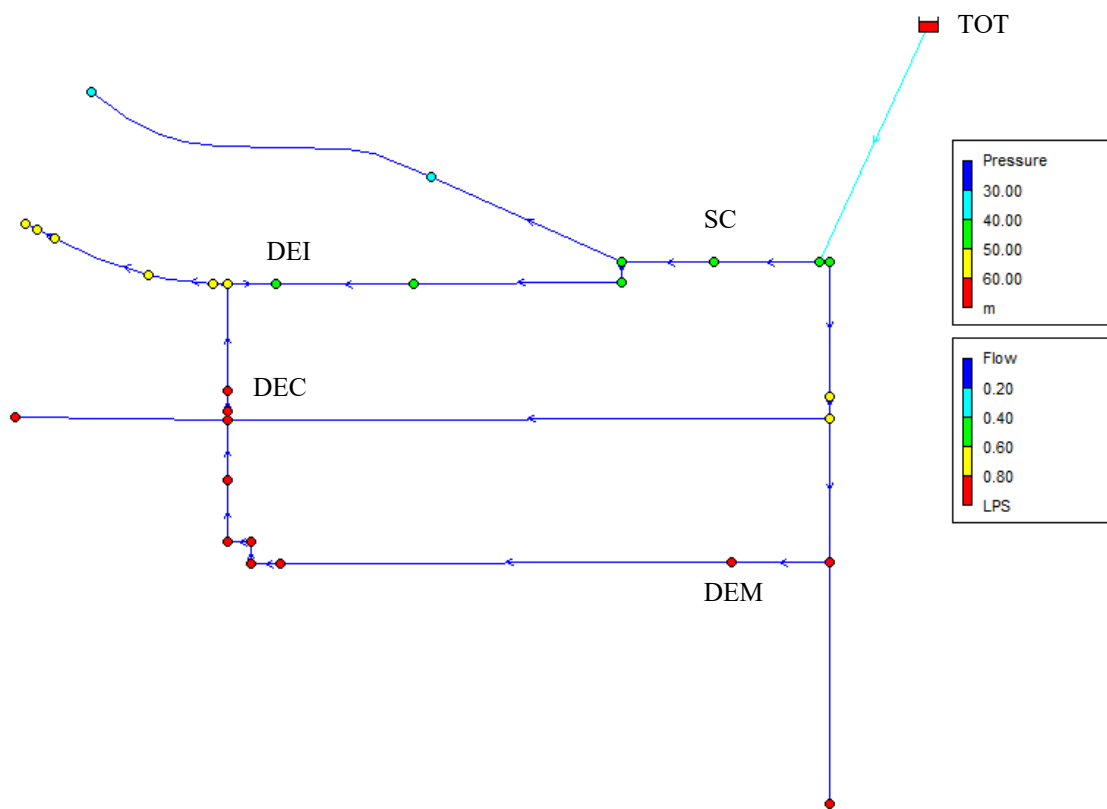


Figura 4.19 – Caudais e pressões do DEC e SCFCTUC no programa EPANET, no horário das 2:00 do dia 24 de junho.

Nos Serviços Centrais da FCTUC, a pressão é também máxima às 2:00 da manhã do dia 24 de junho com um valor de 45,08 m c.a., pelo que a simulação da rede é a mesma da figura 4.19.

A figura 4.20. demonstra que as pressões são mais elevadas quando os caudais são mínimos. Verifica-se também, que ocorrem picos de caudal às 12h00 e 16h00, no entanto, as pressões não oscilam de forma acentuada. Isto pode ser justificado, uma vez que as pressões foram estudadas em cada minuto do dia, mas os caudais apenas foram analisados de hora e hora, conforme o disponibilizado.

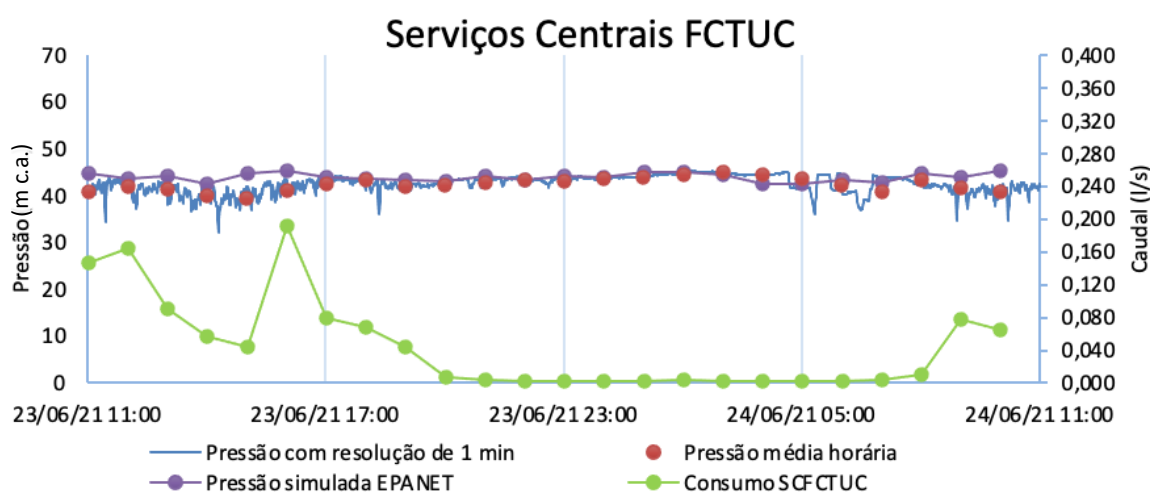


Figura 4.20 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET nos Serviços Centrais FCTUC.

No Departamento de Engenharia Informática, os registos das pressões com resolução de 1 min são praticamente constantes, devido à instalação ter sido feita num ramal de serviço de incêndio. Assim, na figura 4.21, verifica-se que a pressão simulada no EPANET toma valores mínimos conforme os caudais são mais elevados.

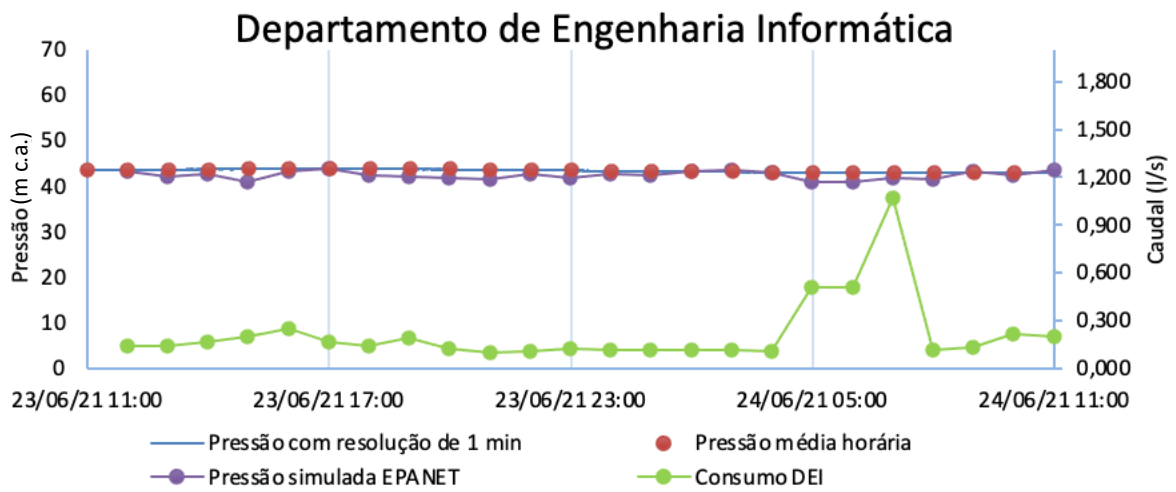


Figura 4.21 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEI.

Na figura 4.22. encontra-se a simulação no EPANET da rede de abastecimento em análise, na hora em que o Departamento de Engenharia Informática atinge a pressão máxima horária de 43,8 m c.a.– 17:00 horas do dia 23 de junho.

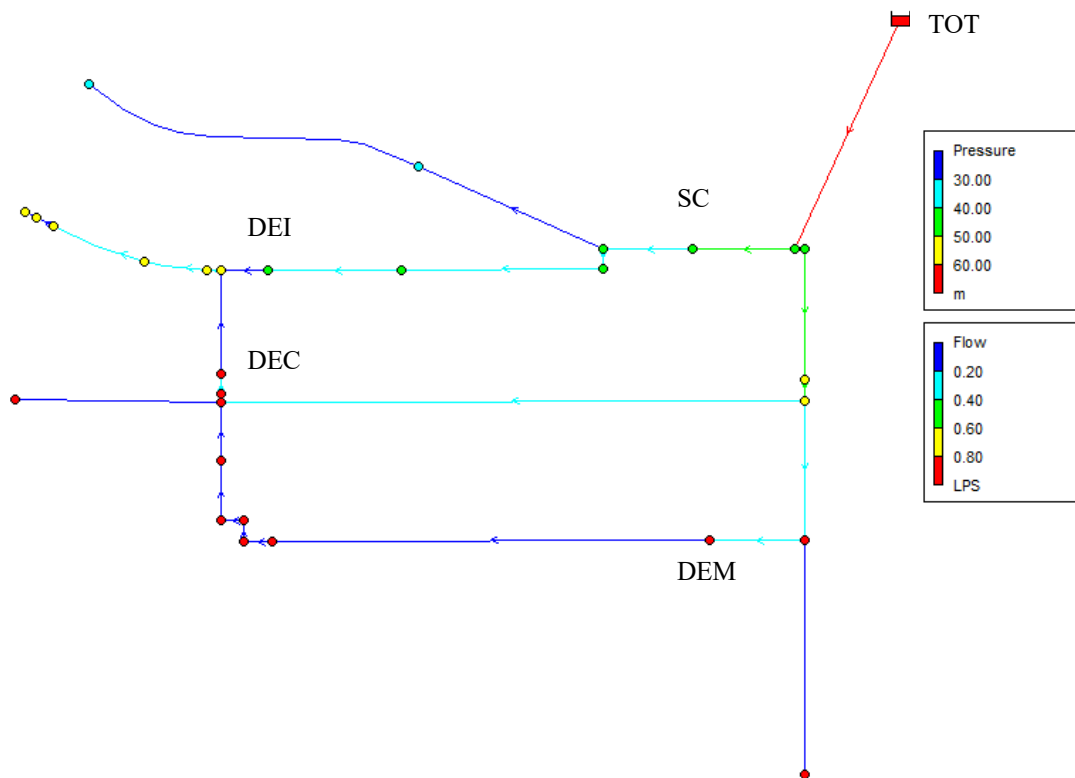


Figura 4.22 – Caudais e pressões do DEI no programa EPANET, no horário das 17:00 do dia 23 de junho.

No Departamento de Engenharia Mecânica, a pressão horária máxima averiguada ocorreu pelas 3h00 do dia 24 de junho. Pode-se constatar que neste Departamento as pressões são mais elevadas, uma vez que a localização do sensor se fez a uma cota mais baixa, e pelos consumos serem reduzidos. No entanto, como a pressão foi analisada minuto a minuto, e os caudais de hora a hora, não é possível verificar as oscilações de caudal, conforme deveria ocorrer, tendo em conta a pressão com resolução de 1 minuto representada na figura 4.23.

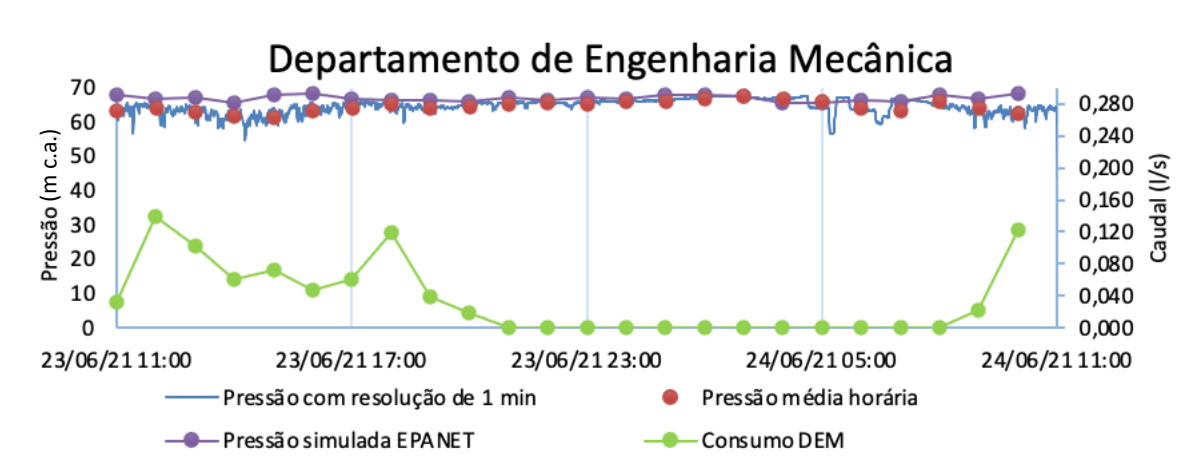


Figura 4.23 – Distribuição de pressões com resolução de 1 minuto, médias horárias e simuladas no EPANET no DEM.

Na figura 4.24 encontra-se a simulação no programa EPANET da rede em estudo, na hora em que o Departamento de Engenharia Mecânica atinge a pressão máxima horária de 67,5 m c.a.– 3:00 horas do dia 24 de junho.

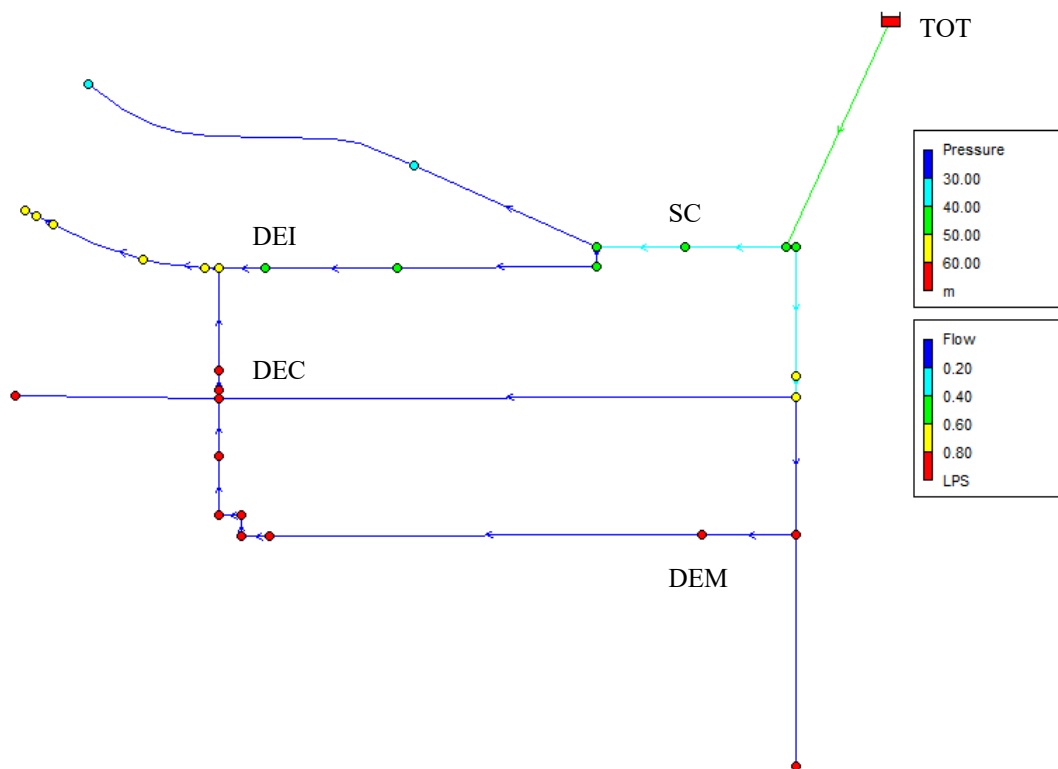


Figura 4.24 – Caudais e pressões do DEM no programa EPANET, no horário das 3:00 do dia 24 de junho.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Em algumas zonas do país o nível de perdas de água nos sistemas de abastecimento ainda é muito elevado o que se traduz em custos de manutenção muito elevados. Assim, a deteção de perdas e fugas de água nas redes de distribuição, é hoje um assunto de grande interesse, sendo primordial a realização de uma boa gestão e planeamento nos sistemas de distribuição, de forma que a percentagem de perdas possa vir a ser reduzida.

Na revisão bibliográfica apresentaram-se noções básicas sobre as perdas e fugas nos sistemas de distribuição de água. Para compreensão da temática, abordou-se entre as demais noções, o controlo de perdas reais. No controlo destas perdas, faz-se salientar a regulação das pressões na rede, que é uma técnica bastante eficiente no que diz respeito ao combate de perdas.

Como mencionado também na revisão bibliográfica, a modelação hidráulica é uma ferramenta ainda pouco utilizada pelas Entidades Gestoras no que diz respeito ao combate de perdas de água. Permite também, entre outros, avaliar o comportamento hidráulico do sistema de forma a prever variações de consumo, desenvolver procedimentos em situações de interrupção de água ou casos de incêndio e analisar problemas relacionadas com altas e baixas pressões

Esta Dissertação teve como caso de estudo o Pólo II da Universidade de Coimbra, no distrito de Coimbra. A entidade gestora das Águas de Coimbra cedeu acesso ao cadastro da rede, assim como aos consumos medidos no totalizador e nos edifícios, com recurso a telegestão.

Os objetivos deste trabalho consistiram em analisar a rede de abastecimento de água e determinar o nível de perdas e fugas, construir um modelo hidráulico computacional, calibrar e validar o modelo, analisar os caudais obtidos por telemedida e, por último, analisar a qualidade e utilidade dos dados medidos na modelação hidráulica.

No que diz respeito à análise de consumos da rede do Pólo II da Universidade de Coimbra, esta foi feita com consumos horários e com consumos diários. Feito o balanço entre o total dos contadores e do totalizador, e é possível afirmar que o volume de perdas ronda os 8,6% de abril a julho de 2020. Neste estudo, com os consumos horários é mais perceptível os picos de caudal durante um dia. Relativamente à análise dos consumos diários é possível verificar mais facilmente anomalias na utilização de água.

Pode-se concluir que a telegestão é uma mais-valia para as Entidades Gestoras, uma vez que têm a possibilidade de controlar o sistema em tempo real, tal como, consultar os consumos e verificar ocorrências de fugas a nível dos edifícios. Por sua vez, esta Dissertação pretende avaliar as perdas ao nível das condutas no sistema de abastecimento. Assim, a informação da telemetria não é a suficiente para a modelação, pois era necessária uma resolução de caudais de 1 minuto.

Numa segunda fase do trabalho, construiu-se o modelo hidráulico computacional no programa EPANET. Este foi desenhado com o auxílio de uma imagem AutoCAD do cadastro da rede do Pólo II da UC. No entanto, havia incertezas nas válvulas reductoras de pressão (VRP) e no ramal em que abastece o Departamento de Engenharia Eletrotécnica e Computadores. Ultrapassadas estas dificuldades, procedeu-se à instalação de equipamentos de medição de pressão, de forma a conseguir analisar os comportamentos da rede e, posteriormente validar o modelo hidráulico feito.

Com os dados do registador, verificou-se algumas discrepâncias constantes nas pressões fruto de incertezas, nomeadamente na cota em que o sensor é colocado e a rugosidade das condutas. Portanto, para a calibração do modelo teve-se como base as rugosidades e o ajuste da cota. Ao comparar-se simulações hidráulicas com duas rugosidades diferentes nas condutas, com coeficiente Hazen-Williams (H-W) de 100 e 50, verificou-se que as diferenças nas perdas de carga eram não significativas, uma vez que todas as condutas têm um diâmetro de 125 mm e que os consumos dos utilizadores eram baixos. Seguidamente, o modelo foi calibrado tendo em conta o ajuste da cota de terreno, de maneira que a pressão máxima simulada seja de igual valor à pressão máxima lida no equipamento, naquele dia.

Como o medidor de pressão no totalizador foi instalado pelas Águas de Coimbra, apenas se conseguiu uma janela para simular a rede, de 23 de junho às 11 horas até 24 de junho às 10 horas. Concluiu-se desta simulação que, no DEC, DEM e SCFCTUC, existiam ainda pequenas discrepâncias entre as pressões reais e simuladas, uma vez que as pressões simuladas resultam da informação do consumo horário que é inserido em cada ramal. É possível concluir-se também, que para um melhor estudo da rede o registo do caudal deveria ter a mesma resolução, de 1 minuto, dos medidores de pressão. Já no Departamento de Engenharia Informática as pressões reais e simuladas foram de longe semelhantes. Como demonstrado nos resultados, as pressões registadas pelo sensor neste Departamento são praticamente constantes, fruto da instalação do medidor de pressão no ramal de serviço de incêndio.

5.2 Trabalhos futuros

Ao realizar esta dissertação surgiram pontos pertinentes a explorar, contudo dada a escassez de tempo, não foi possível. Ficam aqui alguns trabalhos futuros:

- Comparação da modelação com análise DDA e PDA em WaterNetGen;
- Setorização da rede para detetar fugas;
- Deteção das fugas por meios acústicos;
- Realizar medição contínuo de caudal nos ramais onde já existem sensor de pressão;
- E maior período de análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AL-Washali, T., Sharma, S., Lupoja, R., Al-Nozaily, F., Haidera, M., Kennedy, M. (2020). Assessment of water losses in distribution networks: Methods, applications, uncertainties, and implications in intermittent supply, *Resources. Conservation & Recycling*, 152, 104515.
- 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
- Arandia, E., Eck, B.J. (2018). An R package for EPANET simulations, *Environmental Modelling & Software*. 107, 59-63.
- Araujo, L.S., Ramos, H. & Coelho, S.T.(2006) Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resour Manage* 20, 133-149.
- Colombo, A.F. , Karney, B.W. , 2002. Energy and costs of leaky pipes: Toward comprehensive picture. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 128, 441–450 .
- Colombo, A.F. , Karney, B.W. , 2005. Impacts of leaks on energy consumption in pumped systems with storage. *J. Water Resour. Plan. Manag.* 131, 146–155 .
- EPAL, Empresa Portuguesa de Águas Livres S.A. (2017). Controlo Ativo de Perdas de Água. EPAL Technical Editions.
- ERSAR, Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (2020). Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal – Caracterização do Setor de Águas e Resíduos, Volume 1. p.203.
- Fabbiano, L., Vacca, G., Dinardo, G. (2020). Smart water grid: A smart methodology to detect leaks in water distribution networks, *Measurement*. 115, 107260.
- Farley, M. (2001). “Leakage Management and Control: A Best Practice Training Manual”. World Health Organization.
- Farley, M., Wyeth, G., Ghazali, Z. B., Istandar, A., Singh, S. (2008). *The Manager’s Non-Revenue Water Handbook: A Guide to Understanding Water Losses*.
- Ferreira, Ana Raquel (2017). “Deteção e avaliação de fugas e perdas em sistemas de abastecimento de água.” Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.

-
- Gomes, R. J. (2005), “Controlo de Perdas em Sistemas de Abastecimento de Água”. Relatórios de estágio para a Ordem dos Engenheiros, Instituto Politécnico de Leiria, Leiria (Portugal).
- Gomes, R., Sousa, J., Muranho, J., Sá Marques, A. (2015). Different design criteria for district metered areas in water distribution networks, *Procedia Engineering*. 119, 1221 – 1230.
- Gomes, Ricardo de Jesus. (2011). “Modelação Matemática Como Ferramenta de Gestão e Exploração de Sistemas de Distribuição de Água.” Tese de Doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Hunaidi, O., Chu, W.T. (1999). Acoustical characteristics of leak signals in plastic water distribution pipes. *Applied acoustics*, 58, 235-254.
- Kanakoudis, V., Gonelas, K. (2014). Applying pressure management to reduce water losses in two Greek cities’ WDSs: Expectations, Problems, Results and Revisions, *Procedia Engineering*. 89, 318-325.
- Korkana, P., Kanakoudis, V., Makrysopoulos, A., Patelis, M., Gonelas, K. (2016). Developing an optimization algorithm to form district metered areas in a water distribution system, *Procedia Engineering*. 162, 530-536.
- Lambert, A. (2002). International report: Water losses management and techniques. *Water Science and Technology: Water Supply*, 2(4), 1–20.
- Lambert, A., & Hirner, W. (2000). Losses from water supply systems: standard terminology and recommended performance measures. *International Water Association*, October(3), 1–13.
- Latchoomun, L., Ah King, R.T.F., Busawon, K. (2015). A new approach to model development of water distribution networks with high leakage and burst rates. *Procedia Engineering*, 119, 690-699.
- Marques, A. S., e Sousa, J. (2011). *Hidráulica Urbana: Sistemas de Abastecimento de Água e Drenagem de Águas Residuais (3a Edição)*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Marques, A. S., Gomes, R., & Monteiro, A. J. (2005). Benchmarking the Water Losses in Portugal. In *Leakage 2005 Specialized Conference Proceedings*. Halifax, Canada.
- 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. (2012). WaterNetGen – An EPANET extension for automatic water distribution networks models generation and pipe sizing, *Water Science and Technology: Water Supply*. 12, 117-121.
-

-
- Muranho, J., Ferreira, A., Sousa, J., Gomes, A., Sá Marques, A. (2014). Pressure-depend demand and leakage modelling with na EPANET extension – WaterNetGen, *Procedia Engineering*. 89, 632-639.
- OFWAT (2001). Leakage and the efficient use of water, 2000-01 Report, Office of Water Services, Reino Unido.
- Piller, O., van Zyl, J.E. (2014). Incorporating the FAVAD Leakage Equation into Water Distribution System Analysis, *Procedia Engineering*. 89, 613 – 617.
- Puust, R., Kapelan, Z., Savic, D. a., & Koppel, T. (2010). “A review of methods for leakage management in pipe networks”. *Urban Water Journal*, Vol. 7, Issue 1, pp. 25 – 45.
- 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., Sousa, J., Sá Marques, A., Simões, E. (2015). Location Leaks with TrustRank Algorithm Support. *Watter*, 7(4), 1378-14021.
- Sá Marques, J.A. (2013). Passado E Futuro Dos Sistemas Públicos De Distribuição De Água. O Caso Português. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais*, 1(1), 21-44.
- Samir, N., Kansoh, R., Elbarki, W., Fleifle. A. (2017). Pressure control for minimizing leakage in water distribution systems. *Alexandria Engineering Journal*, 56, 601-612.
- Savić, D., Ferrari, G. (2014). Design and performance of district metering areas in water distribution systems, *Procedia Engineering*. 89, 1136–1143.
- Sela, L., Salomons, E., Housh, M. (2019). Plugin prototypinf for the EPANET software, *Environmental Modelling & Software*. 119, 49 – 56.
- Shabangu, T.H., Hamam, Y., Adedeji, K.B. (2020). Decision support systems for leaks control in urban water supply systems: A literature synopsis, *Procedia CIRP*. 90, 579-583.
- Sousa, J., Muranho, J., Sá Marques, A., Gomes, R. (2014). WaterNetGen HELPS C-Town, *Procedia Engineering*. 89, 103-110.
- Thornton, J., Sturm, R., Kunkel, G. (2008). *Water Loss Control Manual*. (2.o ed.)USA: McGraw- Hill.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights (ST/ESA/SER.A/352)*.
- US EPA. 2021.EPANET | US EPA. [online] disponível em: <<https://www.epa.gov/water-research/epanet>> [Accessed 28 Março 2021].a.
-

SITES CONSULTADOS

MI@ (2021) <https://monarchinstrument.com/collections/track-it-pressure-temp-data-loggers/products/track-it-pressure-temp-data-logger> Monarch Instrument (página internet oficial), Amherst – EUA.

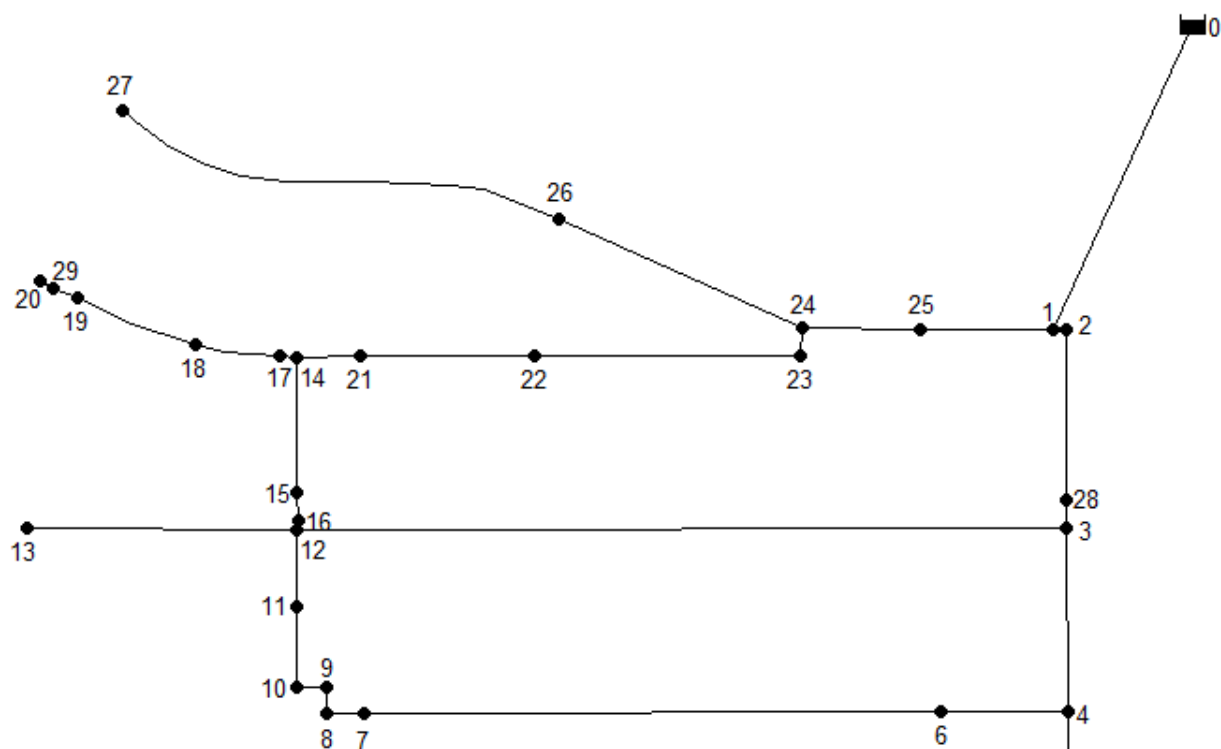
ANEXO A – CARACTERÍSTICAS DOS NÓS DA REDE

Nó	Cota (m)	Nó	Cota (m)
0	74,0	15	43,5
1	59,2	16	40,7
2	59,2	17	49,6
3	49,5	18	47,4
4	39,7	19	45,8
5	24,1	20	45,2
6	38,0	21	51,5
7	30,7	22	55,8
8	30,3	23	58,6
9	31,6	24	59,0
10	29,6	25	59,6
11	34,5	26	70,1
12	40,5	27	72,5
13	27,8	28	51,2
14	50,9	29	45,2

ANEXO B – CARACTERÍSTICAS DAS CONDUTAS DA REDE

Troço	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
0 – 1	182,9	125
1 – 2	6,8	125
2 – 28	108,5	125
28 – 3	23,7	125
3 – 4	99,4	125
4 – 5	172,9	125
4 – 6	68,7	125
6 – 7	312,9	125
7 – 8	20,7	125
8 – 9	14,9	125
9 – 10	15,7	125
10 – 11	43,3	125
11 – 12	41,5	125
12 – 13	146,4	125
12 – 16	5,0	125

Troço	Comprimento (m)	Diâmetro (mm)
14 – 15	66,2	125
15 – 16	23,4	125
14 – 17	12,7	125
17 – 18	42,9	125
18 – 19	69,9	125
19 – 29	13,9	125
29 – 20	3,8	125
14 – 21	34,1	125
21 – 22	95,6	125
22 – 23	142,7	125
23 – 24	14,9	125
24 – 25	64,4	125
25 – 1	72,2	125
24 – 26	144,9	125
26 – 27	248,5	125

ANEXO C – NÓS DE JUNÇÃO E CONDUTAS DA REDE**LEGENDA:**

6 – DEM	21 – DEI
7 – CASA COSTA ALEMÃO	22 – CANTINA
11 – RESIDÊNCIA II	25 – SERVIÇOS CENTRAIS FCTUC
15 – DEC	26 – RESIDÊNCIA I
18 – CASA DA PEDRA	29 - DEEC
19 – DEQ	