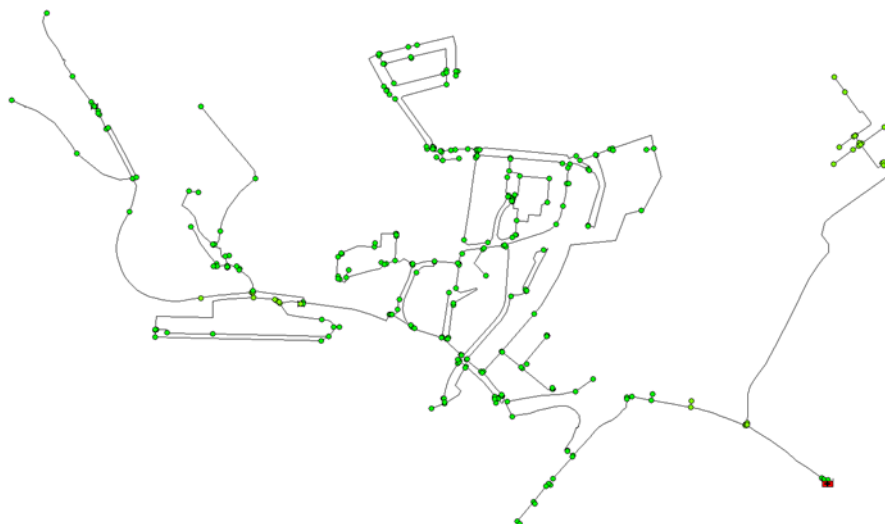




ISEL



Análise do funcionamento hidráulico e de qualidade da água da ZMC de Cacilhas

ANDRÉ GUSTAVO CARDOSO MAIA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização:
Hidráulica

Orientador:

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço

Júri:

Presidente: Doutora Maria do Carmo Cachão Conde

Vogais:

Doutora Dídya Isabel Cameira Covas

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço

Dezembro de 2024

Análise do funcionamento hidráulico e de qualidade de água da ZMC de Cacilhas

ANDRÉ GUSTAVO CARDOSO MAIA
(Licenciado em Engenharia Civil)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Especialização:
Hidráulica

Orientador:

Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço, ISEL – DEC / IPS –
ESTB

Júri:

Presidente: Doutora Maria do Carmo Cachão Conde, ISEL – DEC

Vogais:

Doutora Dília Isabel Cameira Covas, IST – DECivil – UL
Doutor Nelson Jorge Gaudêncio Carriço, ISEL – DEC / IPS –
ESTB

Agradecimentos

Apesar da realização de uma Dissertação ser um trabalho individual de finalidade académica, existem contributos de diversas naturezas que devem ser realçados. Por esse motivo, gostaria de expressar os meus sinceros agradecimentos a todos os que me apoiaram e incentivaram ao longo da realização desta Dissertação e da minha vida.

Ao Professor Nelson Carriço, pela sua disponibilidade em orientar esta Dissertação, assim como, pela sua competência científica e suas críticas, sugestões e correções relevantes efetuadas ao longo da sua orientação. Devo-lhe um agradecimento muito especial por acreditar nas minhas competências e por ter contribuído para a realização desta Dissertação.

Ao Engenheiro Pedro Alves e ao Engenheiro André Pina por me motivarem e apoiarem a escrever sobre este tema e, pelos contributos e partilha de conhecimentos que deram para a realização deste trabalho.

A todos os meus colegas de trabalho do SIMAS de Oeiras e Amadora, que me ajudam e contribuem diariamente na realização de uma manutenção, melhoramento e otimização da rede de distribuição de Oeiras, assim como, me ajudaram e motivaram na realização desta Dissertação, um muito obrigado a todos.

À minha família e amigos pela paciência e apoio demonstrado ao longo deste percurso.

A todos os que já partiram da minha vida, mas em especial à minha mãe por ter existido e me ter dado todo o seu carinho e amor aos longo dos anos. Apesar de já não estares cá fisicamente, estarás sempre nos meus pensamentos, nunca me esquecerei de ti, amo-te muito.

Um agradecimento muito especial aos amores da minha vida, à minha filha Clara e à minha esposa e companheira Filipa, que me enchem de carinho e afeto todos os dias. Agradeço a compreensão pelo tempo que não lhes pude dedicar durante esta etapa difícil da minha vida e que espero vir a compensar a partir de agora. Sem elas esta Dissertação não seria possível.

Declaração de integridade

Declaro que esta dissertação é o resultado da minha investigação pessoal e independente. O seu conteúdo é original e todas as fontes listadas nas referências bibliográficas foram consultadas e estão devidamente mencionadas no texto. Mais declaro que todas as referências científicas e técnicas relevantes para o desenvolvimento do trabalho estão devidamente citadas e constam das referências bibliográficas.

O autor

Lisboa, 18 de dezembro de 2024

Resumo

A presente dissertação de mestrado tem como objetivo principal estudar o comportamento hidráulico da Zona de Medição e Controlo (ZMC) de Cacilhas, em Oeiras, para identificar as principais falhas de funcionamento e propor as respetivas medidas de correção. O abastecimento desta ZMC é efetuado pelo reservatório do Torneiro, sendo a gestão do sistema da responsabilidade do Serviço Intermunicipal de Águas e Saneamento (SIMAS) de Oeiras e Amadora.

A ZMC vinha a apresentar problemas relativos a pressões excessivas, roturas, ausência de válvulas de seccionamento na rede e ramais, pelo que o presente trabalho surge com o objetivo de realizar um diagnóstico aprofundado ao funcionamento da ZMC, e estudar o comportamento antes e depois de efetuadas intervenções para resolução dos problemas identificados. O diagnóstico realizado detetou pressões excessivas numa zona da rede de distribuição, extremos de rede com baixos valores de cloro (qualidade da água), e, para além disso, a presença de condutas em fibrocimento e ferro galvanizado.

Para a resolução dos problemas anteriormente descritos identificaram-se três alternativas de intervenção, sendo a primeira no âmbito de redução das pressões excessivas e anulação das condutas em fibrocimento e ferro galvanizado, onde se prevê a instalação de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) e instalação de novas condutas em PEAD, a segunda semelhante, mas com o acréscimo da substituição de uma zona da rede de distribuição onde existia anomalias e ausência de válvulas de seccionamento e outros acessórios de rede e ramais e a terceira idêntica à anterior, mas com o acréscimo de melhoramento da qualidade da água, através do fechamento de algumas malhas e anulação de alguns extremos de rede.

Propõe-se a implementação da segunda solução de otimização, porque, apesar do custo de investimento ser um pouco mais elevado é a que permite a maior redução da pressão média da ZMC. Os modelos desta ZMC apresentaram resultados interessantes que permitem definir a melhor política de gestão de pressões a ser adotada, assim como, é efetuada uma simples análise socioeconómica relativamente à sustentabilidade do sistema.

Palavras-Chave: Decaimento do cloro; Diagnóstico; EPANET 2.2; Gestão de pressões; Modelação hidráulica.

Abstract

The primary goal of this master's thesis is to study the hydraulic behaviour of the Cacilhas District Metering Area (DMA), in Oeiras, to identify the main malfunctions and propose the respective corrective measures. This DMA is supplied by the Torneiro reservoir, and the Intermunicipal Water and Sanitation Service (SIMAS) of Oeiras and Amadora is responsible for managing the system.

The DMA came to present problems related to excessive pressures, breakages and the absence of shut-off valves in the network and branches, which is why the aim of this study was to carry out an in-depth diagnosis of the DMA's operation and to study its behaviour before and after interventions were carried out to resolve the problems identified. The diagnosis detected excessive pressure in one area of the distribution network, extremes of the network with low chlorine values (water quality), and the presence of fibre cement and galvanised iron pipes.

In order to solve the problems described above, three alternative interventions were identified: the first involves reducing excessive pressures and eliminating asbestos-cement and galvanized iron pipes, proposing the installation of a Pressure Reducing Valve (PRV) and new High-Density Polyethylene (HDPE) pipes ;the second was similar, but with the addition of replacing an area of the distribution network where there were anomalies and the absence of shut-off valves and other network and branch accessories, and the third identical to the previous one, but with the addition of improving water quality by closing some loops and cancelling some network ends.

The implementation of the second optimisation solution is proposed, as despite the slightly higher investment cost, it allows for the greatest reduction in average pressure in the DMA. The models for this DMA have presented interesting results that enable the definition of the best pressure management policy to be adopted, as well as a simple socio-economic analysis regarding the system's sustainability.

Keywords: Chlorine decay; Diagnosis; EPANET 2.2; Pressure management; Hydraulic modelling.

Índice

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	ENQUADRAMENTO.....	1
1.2	OBJETIVOS E METODOLOGIA	2
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
2	SÍNTESE DE CONHECIMENTOS.....	5
2.1	INTRODUÇÃO.....	5
2.2	SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA	5
2.3	MODELAÇÃO HIDRÁULICA	11
2.3.1	<i>O que é um modelo?.....</i>	<i>11</i>
2.3.2	<i>Qualidade dos modelos.....</i>	<i>11</i>
2.3.3	<i>Modelos de apoio ao projeto</i>	<i>12</i>
2.3.4	<i>Modelos de apoio ao planeamento</i>	<i>12</i>
2.3.5	<i>Modelos de apoio à operação.....</i>	<i>12</i>
2.3.6	<i>Modelos de apoio à manutenção</i>	<i>12</i>
2.3.7	<i>Programa de cálculo EPANET.....</i>	<i>13</i>
2.4	METODOLOGIA PARA DESENVOLVIMENTO DE MODELOS	14
2.5	PLANEAMENTO DO MODELO.....	15
2.5.1	<i>Monitorização e equipamento de medição.....</i>	<i>16</i>
2.5.2	<i>Convenções a adotar.....</i>	<i>17</i>
2.5.3	<i>Gestão no desenvolvimento do modelo</i>	<i>18</i>
2.6	TÉCNICAS DE SIMPLIFICAÇÃO DE MODELOS	19
2.6.1	<i>Grau de detalhe de um modelo.....</i>	<i>19</i>
2.6.2	<i>Estrutura de um modelo</i>	<i>19</i>
2.7	CALIBRAÇÃO DE MODELOS	20
2.8	DEFINIÇÃO DE MODOS DE OPERAÇÃO DE REDES	33
2.8.1	<i>Válvulas.....</i>	<i>33</i>
2.8.2	<i>Controlos.....</i>	<i>35</i>
2.9	GESTÃO DE PRESSÕES	37
2.10	QUALIDADE DA ÁGUA	41
2.10.1	<i>Introdução.....</i>	<i>41</i>
2.10.2	<i>Modelos de qualidade da água.....</i>	<i>42</i>
2.10.3	<i>Processos modelados</i>	<i>43</i>
2.10.4	<i>Simplificação dos modelos.....</i>	<i>44</i>

2.10.5	<i>Modelação de qualidade da água no EPANET</i>	44
2.11	SÍNTESE	50
3	CASO DE ESTUDO	51
3.1	INTRODUÇÃO	51
3.2	ENQUADRAMENTO GEOGRÁFICO	52
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO	53
4	CONSTRUÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO	59
4.1	INTRODUÇÃO	59
4.2	CONSTRUÇÃO DO MODELO	59
4.3	VALIDAÇÃO DE PARÂMETROS DO MODELO	68
4.3.1	<i>Descrição física do sistema</i>	68
4.3.2	<i>Consumos</i>	69
4.3.3	<i>Configuração de VRP</i>	69
4.3.4	<i>Dimensionamento da VRP implementada</i>	70
4.4	IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO BASE	71
4.5	CALIBRAÇÃO DO MODELO	78
4.5.1	<i>Calibração da pressão</i>	78
4.5.2	<i>Calibração de qualidade da água (cloro)</i>	87
5	ANÁLISE HIDRÁULICA E DIAGNÓSTICO DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA	93
5.1	INTRODUÇÃO	93
5.2	EXPLORAÇÃO E COMPARAÇÃO DOS MODELOS HIDRÁULICOS	93
5.2.1	<i>Padrões de consumo residenciais e dos grandes consumidores</i>	98
5.2.2	<i>Caudais</i>	100
5.2.3	<i>Velocidades</i>	101
5.2.4	<i>Teste de caudal de incêndio</i>	102
5.2.5	<i>Perdas de Carga</i>	104
5.2.6	<i>Pressões</i>	105
5.2.7	<i>Qualidade da água</i>	107
5.2.8	<i>Segunda solução de otimização de pressões</i>	109
5.2.9	<i>Terceira solução de otimização de pressões</i>	112
5.3	ANÁLISE ECONÓMICA	115
6	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉCNICO E DIAGNÓSTICO DA ZMC DE CACILHAS	117
6.1	INTRODUÇÃO	117
6.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO TÉCNICO DA ZMC DE CACILHAS	117
6.2.1	<i>Avaliação do desempenho das pressões</i>	119

6.2.2	<i>Avaliação do desempenho das velocidades</i>	124
6.3	DIAGNÓSTICO DA ZMC DE CACILHAS.....	126
7	CONCLUSÕES E PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	129
7.1	CONCLUSÕES	129
7.2	PERSPETIVAS DE TRABALHOS FUTUROS	130
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	131

Índice de Figuras

Figura 2.1 – Cadeia de valor do ciclo do abastecimento de água (ERSAR, 2023).	5
Figura 2.2 – Esquematização de uma rede ramificada com uma origem de alimentação (Silva, 2016).6	6
Figura 2.3 – Esquematização de uma rede emalhada com uma origem de alimentação (Silva, 2016). 7	7
Figura 2.4 – Esquematização de uma rede mista com uma origem de alimentação (Silva, 2016).....	7
Figura 2.5 – Válvula de seccionamento (Fucoli-Somepal, 2024).....	8
Figura 2.6 – Válvula de retenção (Fucoli-Somepal, 2024).....	9
Figura 2.7 – Descarga de fundo.....	9
Figura 2.8 – Ventosa (Fucoli-Somepal, 2024).....	9
Figura 2.9 – Junta de ligação (Fucoli-Somepal, 2024).	10
Figura 2.10 – Boca de rega ou lavagem (Fucoli-Somepal, 2024).....	10
Figura 2.11 – Marco de água (Fucoli-Somepal, 2024).....	10
Figura 2.12 – Representação de um modelo.	11
Figura 2.13 – Faseamento recomendado do desenvolvimento de um modelo. (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	14
Figura 2.14 – Estrutura de um modelo (Carriço, 2023).....	20
Figura 2.15 – (a) transdutor; (b) manómetro analógico, montado em marco de incêndio.....	23
Figura 2.16 – À esquerda um manómetro digital e à direita dois manómetros analógicos montados numa VRP.....	23
Figura 2.17 – (a) VRP ligada à telemedição (entrada de ZMC); (b) Datalogger instalado numa válvula de descarga da rede.....	24
Figura 2.18 – Transmissores de dados (a) por GSM; (b) por internet.	24
Figura 2.19 – Medidor de caudal mecânico do tipo turbina.	25
Figura 2.20 – Medidores de caudal eletromagnéticos à saída de reservatório.	25
Figura 2.21 – Medidor de caudal ultrassónico ligado a sistema de telemedição.....	26
Figura 2.22 – Exemplo de medição de pressão e caudal.	26

Figura 2.23 – Testes de perda de carga, com medição de caudal na conduta (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	28
Figura 2.24 – Testes de perda de carga, com medição de caudal em hidrante (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	28
Figura 2.25 – Testes de caudal de incêndio (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	29
Figura 2.26 – Teste de bomba (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	30
Figura 2.27 – Bloco de notas – medição de pressão ao longo do tempo.....	32
Figura 2.28 – Registo dos dados de calibração no EPANET (Extraído do EPANET 2.2).....	33
Figura 2.29 – Visualizar o relatório de calibração (Extraído do EPANET 2.2).....	33
Figura 2.30 – Escolha do tipo de válvula no EPANET (Extraído do EPANET 2.2).....	34
Figura 2.31 – Controlos simples ou condições múltiplas (Extraído do EPANET 2.2).....	36
Figura 2.32 – Navegador do EPANET (Extraído do EPANET 2.2).....	36
Figura 2.33 – Gráfico de variação do valor do expoente n (Carriço, 2023).....	38
Figura 2.34 – Coeficiente de fuga e expoente da pressão no EPANET.....	40
Figura 2.35 – Condutas j, ligadas ao nó i (Carriço, 2023).....	41
Figura 2.36 – Advecção ou transporte com o escoamento (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	42
Figura 2.37 – Mistura completa nos nós (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).....	43
Figura 2.38 – Variação de concentração no interior da conduta (Carriço, 2023).....	43
Figura 2.39 – Reações químicas no interior das condutas (Carriço, 2023).....	43
Figura 2.40 – Matéria orgânica natural da água no seio do escoamento e sedimentos e biofilme nas paredes das condutas (Carriço, 2023).....	44
Figura 2.41 – Opções no EPANET 2.2 relativas à qualidade da água (Extraído do EPANET 2.2).....	46
Figura 2.42 – Opções no EPANET 2.2 relativas às reações (Extraído do EPANET 2.2).....	47
Figura 2.43 – Opções no EPANET 2.2 relativas à origem da qualidade (Extraído do EPANET 2.2).....	48
Figura 2.44 – Opções no EPANET 2.2 relativas à calibração do modelo (Extraído do EPANET 2.2).....	49
Figura 3.1 – Localização de Cacilhas, em Oeiras (imagem obtida via Wikipédia).....	52
Figura 3.2 – Fotografia aérea de Cacilhas, em Oeiras (imagem obtida via Google Maps).....	53
Figura 3.3 – Representação do Subsistema Torneiro no concelho de Oeiras.....	53

Figura 3.4 – Gama de diâmetros e material da tubagem que constitui a rede de distribuição do subsistema TO – Torneiro (dados de cadastro).	54
Figura 3.5 – Curva de consumos do subsistema TO – Torneiro (dados de cadastro).....	55
Figura 3.6 – Gama de diâmetros da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).	56
Figura 3.7 – Gama de material da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).	56
Figura 3.8 – Imagem SIG de um mapa da rede de abastecimento de água do caso de estudo (Extraído do WebSIG).	57
Figura 4.1 – Criar GeoWorkspace (Obtido do G/InterAqua).	60
Figura 4.2 – Selecionar elemento (Obtido do G/InterAqua).	60
Figura 4.3 – Selecionar ZMC (Obtido do G/InterAqua).	61
Figura 4.4 – Escrever nome da Query (Obtido do G/InterAqua).	61
Figura 4.5 – “Esqueleto” da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).	62
Figura 4.6 – Sistema de abastecimento da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).	62
Figura 4.7 – Distribuição dos consumos pelos nós (Obtido do G/InterAqua).	63
Figura 4.8 – Desenhar área à volta do sistema de distribuição (Obtido do G/InterAqua).	63
Figura 4.9 – Gerar o modelo da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).	64
Figura 4.10 – Selecionar ferramentas e modelos de rede (Obtido do Baseform).	64
Figura 4.11 – Selecionar Torn Cacilhas.inp (Obtido do Baseform).	64
Figura 4.12 – Exportar ficheiro INP (Obtido do Baseform).	65
Figura 4.13 – Exemplo de alteração de cadastro efetuado (Extraído do WebSIG).	65
Figura 4.14 – Exemplo de alteração de cadastro efetuado (Extraído do WebSIG).	66
Figura 4.15 – Exemplo de verificação de consumo de um determinado cliente (Extraído do WebSIG).	66
Figura 4.16 – Indicação de válvula fechada de patamares de pressão independentes (Extraído do WebSIG).	67
Figura 4.17 – Localização de reservatório (Extraído do WebSIG).	67
Figura 4.18 – Opções no EPANET 2.2 relativas à hidráulica, mapa e preferências (Extraído do EPANET 2.2).	68

Figura 4.19 – Exemplo de condutas, nós, reservatório e válvula (Extraído do EPANET 2.2).	68
Figura 4.20 – Consumo-Base e Padrão de Consumo num Nó (Extraído do EPANET 2.2).	69
Figura 4.21 – Controlo operacional de uma VRP (Extraído do EPANET 2.2).	70
Figura 4.22 – Indicação de válvula fechada de patamares de pressão independentes (Extraído do EPANET 2.2 e do WebSIG).	70
Figura 4.23 – Dimensionamento da válvula redutora de pressão (Extraído do CLA-VAL sizing software 2.2).	71
Figura 4.24 – Modelo da ZMC de Cacilhas com o reservatório do Torneiro no local original (Extraído do EPANET 2.2).	72
Figura 4.25 – Modelo base da ZMC de Cacilhas com a simulação do reservatório do Torneiro no caudalímetro da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).	72
Figura 4.26 – Modelo base da ZMC de Cacilhas, com representação da pressão nos nós através de cores (Extraído do EPANET 2.2).	73
Figura 4.27 – Gráfico de isolinhas de pressão da solução-base do modelo da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).	73
Figura 4.28 – Modelo base da ZMC de Cacilhas, com representação da quantidade de cloro por litro de água através de cores (Extraído do EPANET 2.2).	74
Figura 4.29 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água da solução-base do modelo da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).	74
Figura 4.30 – Projeto inicial da ZMC de Cacilhas.	75
Figura 4.31 – Projeto da ZMC de Cacilhas.	76
Figura 4.32 – Exemplo de um fechamento de malha executado (Extraído do EPANET 2.2 e WebSIG).	76
Figura 4.33 – Exemplo de uma conduta sem ramais que foi anulada (Extraído do WebSIG).	77
Figura 4.34 – VRP a ser retirada (retirada em 2023).	77
Figura 4.35 – VRP retirada (retirada em 2023).	77
Figura 4.36 – Entrada da ZMC (Extraído do WebSIG).	78
Figura 4.37 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).	78
Figura 4.38 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).	79
Figura 4.39 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).	79

Figura 4.40 – A montante da VRP instalada (Extraído do WebSIG).....	79
Figura 4.41 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).....	80
Figura 4.42 – Medição de pressão em marco de incêndio.	80
Figura 4.43 – Instalação de data logger de pressão em caixa de contador.	80
Figura 4.44 – Gráfico de medição de pressão através de telemedição do ponto 1 (Dados extraídos do LERNE).....	81
Figura 4.45 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 2 (Extraído do Primayer).	81
Figura 4.46 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 3 (Extraído do Primayer).	81
Figura 4.47 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 4 (Extraído do Primayer).	82
Figura 4.48 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 5 (Extraído do Primayer).	82
Figura 4.49 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 6 (Extraído do Primayer).	82
Figura 4.50 – Localização dos pontos de medição de pressão no modelo (Extraído do EPANET 2.2).	83
Figura 4.51 – Relatório de calibração do ponto 1 (Extraído do EPANET 2.2).	84
Figura 4.52 – Relatório de calibração do ponto 2 (Extraído do EPANET 2.2).	84
Figura 4.53 – Relatório de calibração do ponto 3 (Extraído do EPANET 2.2).	84
Figura 4.54 – Relatório de calibração do ponto 4 (Extraído do EPANET 2.2).	85
Figura 4.55 – Relatório de calibração do ponto 5 (Extraído do EPANET 2.2).	85
Figura 4.56 – Relatório de calibração do ponto 6 (Extraído do EPANET 2.2).	85
Figura 4.57 – Dados estatísticos da calibração de pressão (Extraído do EPANET 2.2).	86
Figura 4.58 – Gráfico de correlação dos valores de pressão (Extraído do EPANET 2.2).	86
Figura 4.59 – Comparação dos valores médios de pressão (Extraído do EPANET 2.2).	86
Figura 4.60 – Entrada da ZMC (Extraído do WebSIG).	87
Figura 4.61 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).....	87
Figura 4.62 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).	87

Figura 4.63 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).....	88
Figura 4.64 – Instalação de sonda multiparâmetros para medição de cloro.	88
Figura 4.65 – Medição de cloro.	88
Figura 4.66 – Localização dos pontos de medição de cloro no modelo (Extraído do EPANET 2.2). ...	89
Figura 4.67 – Relatório de calibração do ponto 1 (Extraído do EPANET 2.2).	90
Figura 4.68 – Relatório de calibração do ponto 2 (Extraído do EPANET 2.2).	90
Figura 4.69 – Relatório de calibração do ponto 3 (Extraído do EPANET 2.2).	90
Figura 4.70 – Relatório de calibração do ponto 4 (Extraído do EPANET 2.2).	90
Figura 4.71 – Dados estatísticos da calibração de cloro (Extraído do EPANET 2.2).	91
Figura 4.72 – Gráfico de correlação dos valores de cloro (Extraído do EPANET 2.2).	91
Figura 4.73 – Comparação dos valores médios de cloro (Extraído do EPANET 2.2).	91
Figura 5.1 – Modelo de 2019 da ZMC de Cacilhas, antes da intervenção (Extraído do EPANET 2.2).94	
Figura 5.2 – Modelo de 2022 da ZMC de Cacilhas, depois da intervenção (Extraído do EPANET 2.2).	94
Figura 5.3 – Gráfico de isolinhas de cotas topográficas da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).	95
Figura 5.4 – Gráfico da distribuição de elevação da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).	95
Figura 5.5 – Localização dos grandes consumidores na fotografia aérea de Cacilhas, em Oeiras; 1) Oeiras Parque; 2) Fonte (imagem obtida via Google Maps).....	96
Figura 5.6 – Representação dos diâmetros das condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	97
Figura 5.7 – Representação dos diâmetros das condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	97
Figura 5.8 – Padrão de consumo residencial, utilizado em toda a ZMC (Extraído do EPANET 2.2). ..	98
Figura 5.9 – Padrão de consumo do grande consumidor (fonte), utilizado apenas no nó do grande consumidor (Extraído do EPANET 2.2).	98
Figura 5.10 – Padrão de consumo do grande consumidor (centro comercial), utilizado apenas no nó do grande consumidor (Extraído do EPANET 2.2).	99
Figura 5.11 – Gráfico temporal do consumo total da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2). ...	99

Figura 5.12 – Representação do caudal nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	100
Figura 5.13 – Representação do caudal nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	100
Figura 5.14 – Representação da velocidade nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	101
Figura 5.15 – Representação da velocidade nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).	101
Figura 5.16 – Teste de caudal de incêndio na ZMC de Cacilhas, através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).....	102
Figura 5.17 – Comportamento da pressão na rede de abastecimento a montante de marco de incêndio a ser aberto (Extraído do EPANET 2.2).	102
Figura 5.18 – À esquerda temos o marco de incêndio do extremo da rede aberto e à direita temos um manómetro digital montado em marco de incêndio situado a montante (tiradas em 2024).	103
Figura 5.19 – À esquerda temos a leitura da pressão em bar antes da abertura do marco de incêndio e à direita temos a leitura da pressão em bar depois da abertura do marco de incêndio (tiradas em 2024).	103
Figura 5.20 – Padrão de consumo de marco de incêndio. Abertura de M.I. pelas 12:30 (Extraído do EPANET 2.2).	103
Figura 5.21 – Representação da perda de carga unitária nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).....	104
Figura 5.22 – Representação da perda de carga unitária nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).....	104
Figura 5.23 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).....	105
Figura 5.24 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019) (Extraído do EPANET 2.2).	105
Figura 5.25 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo 2022), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).....	106
Figura 5.26 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022) (Extraído do EPANET 2.2).	106

Figura 5.27 – Representação da concentração de cloro por unidade de volume na ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).	107
Figura 5.28 – Representação da concentração de cloro por unidade de volume na ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).	107
Figura 5.29 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022) (Extraído do EPANET 2.2).	108
Figura 5.30 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas, através de cores. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	109
Figura 5.31 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	109
Figura 5.32 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Primeira solução de otimização de pressões, modelo de 2022 (Extraído do EPANET 2.2).	110
Figura 5.33 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	110
Figura 5.34 – Representação da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas, através de cores. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	111
Figura 5.35 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	111
Figura 5.36 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas, através de cores. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	112
Figura 5.37 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	112
Figura 5.38 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Primeira solução de otimização de pressões, modelo de 2022 (Extraído do EPANET 2.2).	113
Figura 5.39 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	113
Figura 5.40 – Representação da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas, através de cores. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	114
Figura 5.41 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).	114
Figura 6.1 – Curvas de desempenho adotadas para as pressões (pressões e flutuação de pressões).	118
Figura 6.2 – Curvas de desempenho adotadas para as pressões (pressões máxima e mínima).	118

Figura 6.3 – Curva de desempenho adotadas para as velocidades.....	118
Figura 6.4 – Curvas de desempenho adotadas para as velocidades (velocidades máximas e mínimas).	119
Figura 6.5 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).	120
Figura 6.6 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).	120
Figura 6.7 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).....	120
Figura 6.8 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).	121
Figura 6.9 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).....	121
Figura 6.10 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).....	121
Figura 6.11 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).	122
Figura 6.12 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).....	122
Figura 6.13 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).....	122
Figura 6.14 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).	123
Figura 6.15 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).....	123
Figura 6.16 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).	123
Figura 6.17 – Gráfico de desempenho das velocidades da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).	124
Figura 6.18 – Gráfico de desempenho das velocidades da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).	124
Figura 6.19 – Gráfico de desempenho das velocidades máximas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).....	125

Figura 6.20 – Gráfico de desempenho das velocidades máximas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).....	125
Figura 6.21 – Gráfico de desempenho das velocidades mínimas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).....	125
Figura 6.22 – Gráfico de desempenho das velocidades mínimas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).....	126

Índice de Quadros

Quadro 2.1 – Tipos de ficheiros utilizados no EPANET 2.2 (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).	18
Quadro 2.2 – Equações de perda de carga (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).	27
Quadro 2.3 – Descrição de cada tipo de válvulas.	34
Quadro 2.4 – Parâmetros de controlo.	35
Quadro 2.5 – Descrição da variação dos valores do expoente n (Lambert, 2001).	38
Quadro 3.1 – Gama de diâmetros da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).	55
Quadro 3.2 – Gama de material da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).	56
Quadro 3.3 – Tipo de avarias na ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).	57
Quadro 4.1 – Características da rede de abastecimento nos pontos de medição de pressão.	83
Quadro 4.2 – Características da rede de abastecimento nos pontos de medição de cloro.	89
Quadro 5.1 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2019 com o 2022).	115
Quadro 5.2 – Retorno de investimento na ZMC de Cacilhas.	115
Quadro 5.3 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2022).	115
Quadro 5.4 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2022).	116
Quadro 6.1 – Objetivos estratégicos e táticos.	126
Quadro 6.2 – Objetivos táticos, critérios de avaliação, métricas e valores de referência.	127
Quadro 6.3 – Diagnóstico de 2019 e 2022 da ZMC Cacilhas (comparação entre o antes e o depois da intervenção).	128

Lista de símbolos, siglas e abreviaturas

Símbolo ou Sigla ou Abreviatura	Significado
%	Porcentagem
km	Quilómetro
m ³	Metro cúbico
m ³ /ano	Metro cúbico por ano
m.c.a.	Metro de coluna de água
mm	Milímetro
s	Segundo
A5	Autoestrada 5
DN	Diâmetro Nominal
DR	Decreto regulamentar
EE	Estação elevatória
EPAL	Empresa Portuguesa de Águas Livres
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos
FC	Fibrocimento
FFD	Ferro fundido dúctil
FG	Ferro galvanizado
GSM	Global System for Mobile Communications (Sistema Global para Comunicações Móveis)
PEAD	Poliétileno de alta densidade
PVC	Policloreto de vinilo
RNV	Reservatório de nível variável
SIG	Sistema de informação geográfica

SIMAS	Serviços intermunicipalizados de água e saneamento de Oeiras e Amadora
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency (Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos)
VR	Válvula de retenção de caudal
VRC	Válvula reguladora de caudal
VRP	Válvula redutora de pressão ou válvula de controlo da pressão a jusante
ZMC	Zona de medição e controlo

1 Introdução

1.1 Enquadramento

A água potável é um recurso essencial para a vida, e é cada vez mais escassa, com períodos cada vez maiores de seca. As entidades gestoras de sistemas de abastecimento de água procuram cada vez mais minimizar as perdas de água. Para isso, é indispensável implementar soluções ao longo do sistema de abastecimento de água que minimizem as avarias (e.g., roturas), otimizem o desempenho, a qualidade do serviço prestado e minimizem as perturbações causadas aos clientes afetados. Estas soluções podem ser feitas, por exemplo, através de mudanças de diâmetros da rede existente, fechamento de malhas e instalação de válvulas (e.g., de seccionamento, de redução de pressão ou de regulação de caudal).

O envelhecimento das redes de distribuição de água é um processo natural e inevitável, no qual estes sistemas apresentam múltiplos sintomas de deterioração, como elevados níveis de perdas de água e ocorrências frequentes de roturas e problemas de qualidade da água, que podem comprometer, seriamente, o funcionamento, a eficiência e a fiabilidade dos sistemas como um todo (Carriço, et al., 2020).

As soluções de intervenção nos sistemas de abastecimento de água devem ser alvo de estudos aprofundados do seu comportamento hidráulico. Neste âmbito, o software EPANET é uma ferramenta indispensável para a modelação dos sistemas de abastecimento de água, dado que permite realizar uma análise do funcionamento hidráulico dos seus sistemas, permitindo assegurar de forma consistente e contínua, um abastecimento seguro da água para consumo humano e de contribuir para ganhos de eficiência no seu desempenho (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O software EPANET, para além ser gratuito, apresenta inúmeras vantagens, nomeadamente, o de ser aplicável a todos os tipos e dimensões de sistemas de abastecimento de água, independentemente de serem simples ou complexos. O EPANET também permite a modelação do decaimento do cloro, consistindo numa análise dos perigos para a saúde pública existentes num determinado sistema de abastecimento e os processos de gestão necessários ao seu efetivo controlo, fazendo a mudança de abordagem de um processo de monitorização de conformidade de “fim-de-linha” para um processo de gestão da segurança (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O recurso à computação pode ajudar as entidades gestoras a aumentar sua produtividade, reduzindo substancialmente o tempo de análise das redes de abastecimento (Alonso, et al.,

2000). Um modelo de distribuição de água é uma descrição matemática de um sistema do mundo real. Antes de construir um modelo, é necessário reunir informações que descrevem a rede (Walski, et al., 2003).

Para sistemas de abastecimento de água existentes é necessário proceder à calibração do modelo, sendo que para tal a monitorização do sistema, como por exemplo, dos caudais assume uma importância vital na garantia da fiabilidade do modelo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A modelação hidráulica tornou-se uma ferramenta auxiliar bastante importante aos gestores de sistemas de abastecimento de água, pois permite a simulação de cenários para diferentes situações gerais e específicas, por forma a obterem-se respostas que auxiliem a tomar decisões nas manobras operacionais dos sistemas, sem pôr em causa o serviço prestado aos consumidores (Araújo, Murinello, Ramos, & Coelho, 2004).

A implementação da abordagem associada à modelação através do EPANET permitirá às entidades gestoras direccionar a sua estratégia e recursos para os pontos críticos do sistema, mantendo assim um controlo global de todo o sistema de abastecimento de água (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A modelação do sistema permitirá realizar o diagnóstico hidráulico, que consiste na análise do sistema de abastecimento de água em estudo permitindo desta forma identificar as disfunções que denunciem a existência de anomalias que afetam ou que poderão vir a afetar o correto funcionamento do sistema. Permite também prever a evolução a médio e a longo prazo das solicitações de serviço e da degradação por envelhecimento dos componentes (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Desta forma, a modelação hidráulica utilizando o EPANET é fundamental para a realização do diagnóstico do funcionamento hidráulico de sistemas de abastecimento de água (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

1.2 Objetivos e metodologia

O principal objetivo desta dissertação é o de estudar o comportamento hidráulico da Zona de Medição e Controlo (ZMC) de Cacilhas, em Oeiras, para identificar as principais falhas de funcionamento e propor as respetivas medidas de correção. Para tal, é necessário aprofundar os conhecimentos na área de hidráulica mais especificamente no âmbito da modelação de sistemas de abastecimento de água, com recurso ao software EPANET.

A metodologia preconizada para alcançar o objetivo proposto é constituída por quatro passos fundamentais, nomeadamente:

- 1) Síntese de conhecimentos: Passo fundamental à realização da presente dissertação e que incidirá sobre uma análise aprofundada de estudos relevantes sobre modelação hidráulica de sistemas de abastecimento de água, com enfoque no software EPANET;
- 2) Recolha de dados necessários para a construção e calibração do modelo hidráulico: Para construir o modelo, é necessário proceder à recolha de informação existente (e.g. cadastro) e efetuar um levantamento local (para correção do cadastro da ZMC de Cacilhas), recolhas de amostras e medição (para análise do decaimento de cloro na água), e medição de caudais e pressões;
- 3) Construção e calibração do modelo hidráulico: Este passo consiste em construir um modelo hidráulico do sistema em questão, e calibrá-lo de modo a alcançar os resultados que representem o mais corretamente possível o sistema real;
- 4) Análise dos resultados obtidos e proposta de soluções de correção das falhas de funcionamento: Neste passo, faz-se a avaliação dos resultados obtidos, que permitirão identificar os problemas do sistema de abastecimento (i.e., diagnóstico), definir as alternativas de intervenção e analisar o impacto destas sobre o sistema, de modo a identificar-se se ainda existem possíveis correções a serem feitas no sistema.

1.3 Estrutura da dissertação

A dissertação está estruturada em sete capítulos, designadamente:

- Capítulo 1: Introdução, o capítulo em que se faz o enquadramento da dissertação, objetivos e metodologia e, por último, a estrutura da dissertação;
- Capítulo 2: Síntese de conhecimentos, onde se apresenta o estado da arte da modelação hidráulica, definições sobre perdas de água que podem ocorrer em sistemas e, respetivos métodos para minimização das perdas e outros tópicos relevantes para a dissertação;
- Capítulo 3: Caracterização do caso de estudo, onde se caracteriza a rede de abastecimento de água, descrevendo-se os seus elementos constituintes;
- Capítulo 4: Construção e Calibração do Modelo, onde se descreve a aplicação dos métodos necessários para a construção dos modelos do sistema, utilizando o programa EPANET 2.2, em conjunto com o software de informação geográfica SIG, a inserção dos componentes físicos, padrões de consumo e a respetiva calibração do modelo;
- Capítulo 5: Análise hidráulica e diagnóstico do comportamento do sistema, onde se compara e analisa os resultados das simulações do sistema em termos hidráulicos e de qualidade de água antes (modelo de 2019) e depois (modelo de 2022) de uma intervenção efetuada ao caso de estudo;

- Capítulo 6: Avaliação do desempenho técnico e diagnóstico da ZMC de Cacilhas, onde se efetua uma avaliação e diagnóstico aprofundado ao caso de estudo, com a comparação dos resultados do antes (2019) e depois (2022) da intervenção efetuada à ZMC de Cacilhas;
- Capítulo 7: Conclusões e perspetivas de trabalhos futuros, onde se descrevem as principais conclusões resultantes da concretização desta dissertação e propostas de trabalhos futuros.

2 Síntese de conhecimentos

2.1 Introdução

Neste capítulo, será apresentada uma revisão da literatura iniciando-se com uma breve explicação sobre sistemas de abastecimento de água e que inclui a temática da modelação hidráulica, metodologia para desenvolvimento de modelos, planeamento do modelo, calibração de modelos, definição de modos de operação de redes, gestão de pressões, qualidade da água e método de utilização do software EPANET. A revisão abrange métodos tradicionais e modernos, com ênfase no uso de tecnologias avançadas e abordagens baseadas em dados.

2.2 Sistemas de abastecimento de água

A atividade de abastecimento público de água compreende a captação, o tratamento, a elevação, o transporte, o armazenamento, a distribuição e a utilização da água, conforme apresentado na Figura 2.1.



Figura 2.1 – Cadeia de valor do ciclo do abastecimento de água (ERSAR, 2023).

Nesta atividade, são designados “sistemas em alta” os constituídos por um conjunto de componentes (relativos à captação, tratamento, adução e armazenamento) a montante da rede de distribuição, fazendo a ligação do meio hídrico ao “sistema em baixa”. Por sua vez, os sistemas em baixa são constituídos por um conjunto de infraestruturas ou componentes (e.g. condutas, válvulas de seccionamento, etc.) que permitem prestar aos utilizadores um serviço de distribuição de água.

Um sistema de abastecimento de água é constituído por um conjunto de órgãos, constituídos por obras de construção civil, equipamentos elétricos e eletromecânicos, acessórios, instrumentação e equipamentos de automação e controlo. Cada órgão, num sistema de abastecimento e distribuição, tem um objetivo/função (Sousa, 2001).

O estudo de sistemas de distribuição de água é legalmente enquadrado pelo Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e de Drenagem de Águas Residuais, de 23 de agosto de 1995, ou Decreto Regulamentar nº 23/95 (MOPTC, 1995).

As redes de distribuição de água são a unidade parcelar do sistema de abastecimento de água e são constituídas pelo conjunto de condutas e pelos elementos especiais, que asseguram o transporte e a distribuição da água desde os reservatórios de distribuição até aos utilizadores, em quantidade e pressão adequadas (Sá Marques & Sousa, 2008).

As redes de distribuição de água podem classificar-se em:

Rede ramificada, como demonstrado na Figura 2.2, em que o abastecimento é realizado a partir de uma conduta principal longitudinal que ramifica para ambos os lados havendo apenas um caminho possível entre a origem da água e qualquer ponto na rede (escoamento unidirecional). As vantagens são a simplificação do dimensionamento hidráulico, menor extensão de rede e respetivos acessórios e, resulta numa maior economia no investimento inicial. No entanto, os inconvenientes desta rede são a interrupção do abastecimento a jusante em caso de avaria, pontos com velocidade nula, depósito de sedimentos e estagnação da água nas extremidades (Silva, 2016).

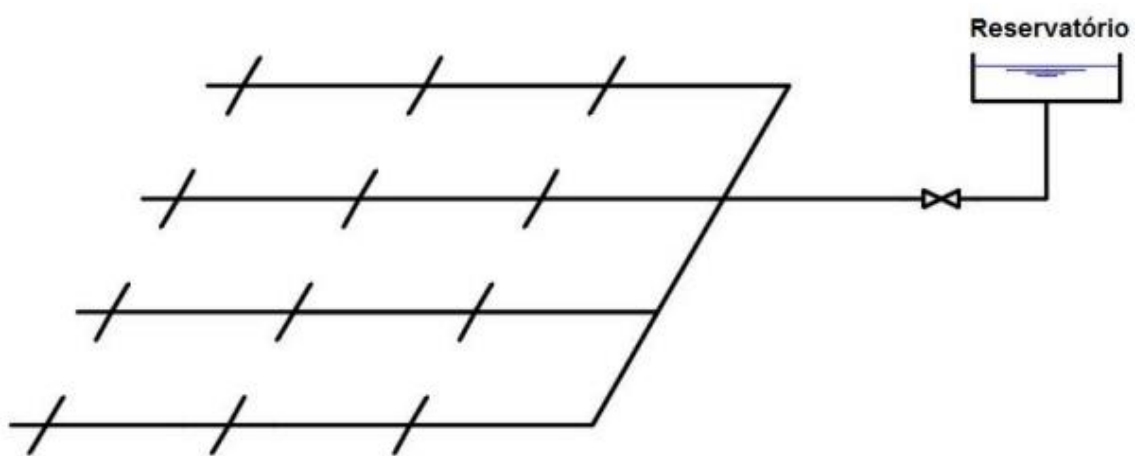


Figura 2.2 – Esquematização de uma rede ramificada com uma origem de alimentação (Silva, 2016).

Rede emalhada, como demonstrado na Figura 2.3, é constituída por condutas que se fecham entre si formando um circuito fechado (malhas), de modo que se possa abastecer qualquer ponto do sistema por mais do que um caminho. As principais vantagens são escoamento bidirecional, com pouca variação de pressões na eventualidade de grandes flutuações de consumo e mínimo de interrupção possível no fornecimento de água. As desvantagens são um custo inicial superior relativamente à rede ramificada e um processo de determinação das condições de equilíbrio hidráulico mais complexo (Silva, 2016).

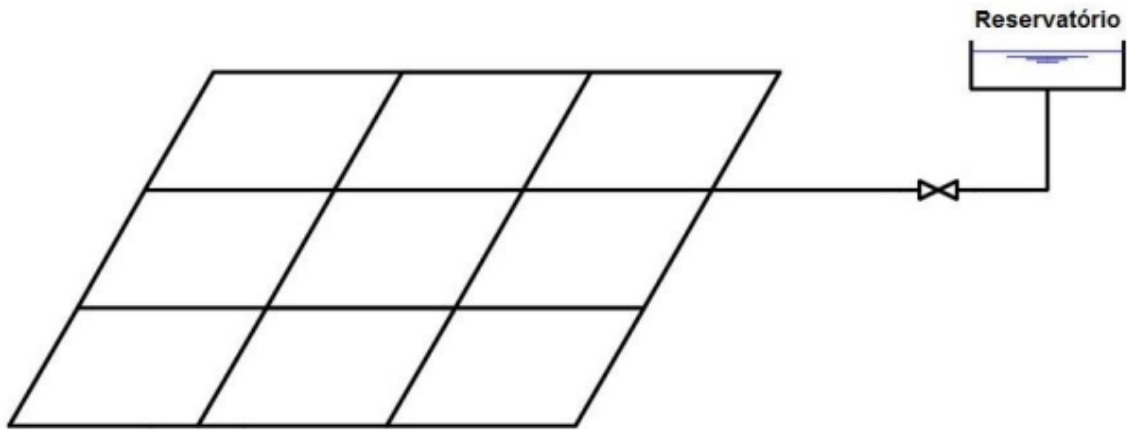


Figura 2.3 – Esquematização de uma rede em malha com uma origem de alimentação (Silva, 2016).

Rede mista, como demonstrado na Figura 2.4, corresponde à conjugação das redes anteriormente mencionadas e é frequentemente a mais adotada em projeto, pois permite uma maior adaptação consoante a implantação do aglomerado a abastecer.

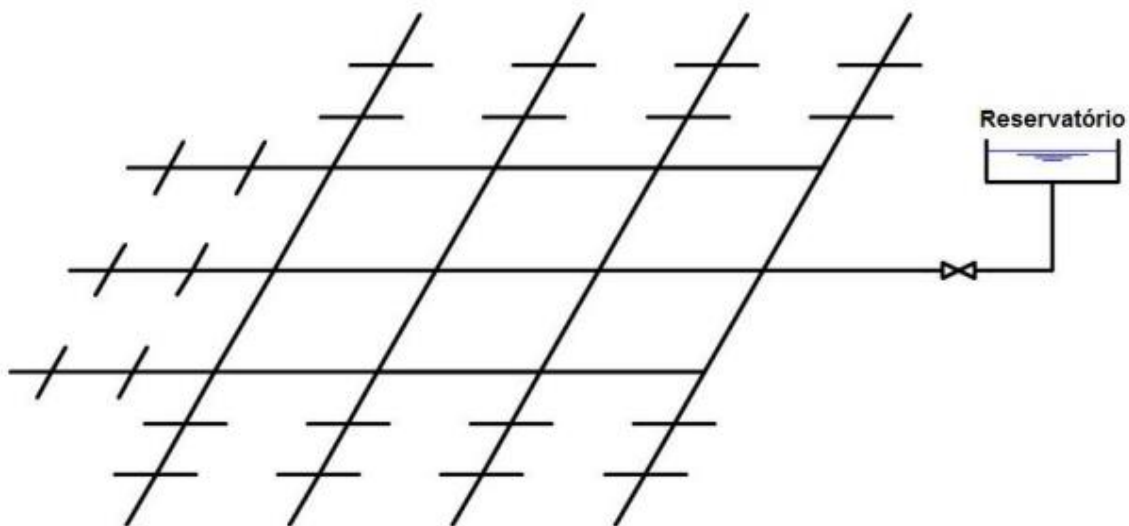


Figura 2.4 – Esquematização de uma rede mista com uma origem de alimentação (Silva, 2016)

Mediante uma utilização racional dos dois tipos de sistemas pode tirar-se partido das principais vantagens de cada um deles e evitar, em grande parte, os inconvenientes próprios de cada um (Sá Marques & Sousa, 2008).

Entende-se por acessórios e elementos especiais os componentes complementares que são utilizados em sistemas de abastecimento de água para garantir a funcionalidade, eficiência e segurança do sistema, nomeadamente (Sá Marques & Sousa, 2008):

- Válvulas de seccionamento;
- Válvulas de retenção;
- Descargas de fundo;

- Ventosas;
- Juntas de ligação e juntas cegas;
- Câmaras de perda de carga ou válvulas reductoras de pressão;
- Bocas de rega e de lavagem;
- Marcos de água;
- Medidores de caudal;
- Instalações elevatórias;
- Fontanários, bebedouros e lavadouros.

As válvulas de seccionamento, como a apresentada na Figura 2.5, servem para permitir isolar facilmente qualquer subsector da rede, em caso de necessidade de reparação de avarias e devem ser instaladas em todas as derivações das linhas principais, tal como, em cruzamentos (três válvulas) e em entroncamentos (duas válvulas). Ao longo da rede de distribuição não se deverão adotar afastamentos entre válvulas demasiado grandes, sendo aconselhado pelo Decreto-Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto (MOPTC, 1995) a instalação em condutas que efetuam distribuição de percurso a um máximo de 500 habitantes, e, em condutas que não efetuam distribuição de percurso, em troços não superiores a 1000 m, em todos os ramais de ligação e a montante e jusante de qualquer elemento acessório ou instalação complementar, por forma a poderem ser colocados fora de serviço (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.5 – Válvula de seccionamento (Fucoli-Somepal, 2024).

As válvulas de retenção, como a ilustrada na Figura 2.6, são de funcionamento automático e destinam-se a que o escoamento apenas se possa processar num único sentido da conduta (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.6 – Válvula de retenção (Fucoli-Somepal, 2024).

As descargas de fundo, como a mostrada na Figura 2.7, têm por objetivo permitir o esvaziamento de condutas, caso seja necessário proceder a operações de limpeza, desinfecção ou reparação e devem ser instaladas nos pontos baixos das condutas (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.7 – Descarga de fundo.

As ventosas, como a apresentada na Figura 2.8, destinam-se a permitir a entrada e saída de ar sempre que seja necessário e devem ser instaladas nos pontos altos das condutas (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.8 – Ventosa (Fucoli-Somepal, 2024).

As juntas de ligação, como a da Figura 2.9, servem para ligarem troços de condutas e as juntas cegas servem como tampões nas secções terminais (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.9 – Junta de ligação (Fucoli-Somepal, 2024).

As bocas de rega e de lavagem, como a mostrada na Figura 2.10, servem para regar zonas verdes e proceder à lavagem de passeios e arruamentos (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.10 – Boca de rega ou lavagem (Fucoli-Somepal, 2024).

Os marcos de água, como o apresentado na Figura 2.11, servem para combater os incêndios e devem ser localizados em conformidade com as necessidades de proteção da zona em estudo (Sá Marques & Sousa, 2008).



Figura 2.11 – Marco de água (Fucoli-Somepal, 2024).

Os medidores de caudal têm como finalidade a medição do caudal escoado numa determinada conduta e devem ser instalados em todos os ramais domiciliários, e em condutas à saída de reservatórios, instalações elevatórias e em diversos pontos da rede ZMC (Sá Marques & Sousa, 2008).

As instalações elevatórias (bombas e hidropressores) servem para aumentar a pressão da água no interior das condutas quando não se consegue efetuar a distribuição gravítica (Sá Marques & Sousa, 2008).

2.3 Modelação hidráulica

2.3.1 O que é um modelo?

É muito comum em contexto académico designar-se por “modelo” o programa de cálculo (simulador) Figura 2.12, que descreve o comportamento do sistema mediante determinadas solicitações. Relativamente às entidades gestoras, é mais normal associarem ao “modelo” o conjunto de componentes físicos e não físicos que descrevem o comportamento hidráulico e de qualidade da água do sistema.

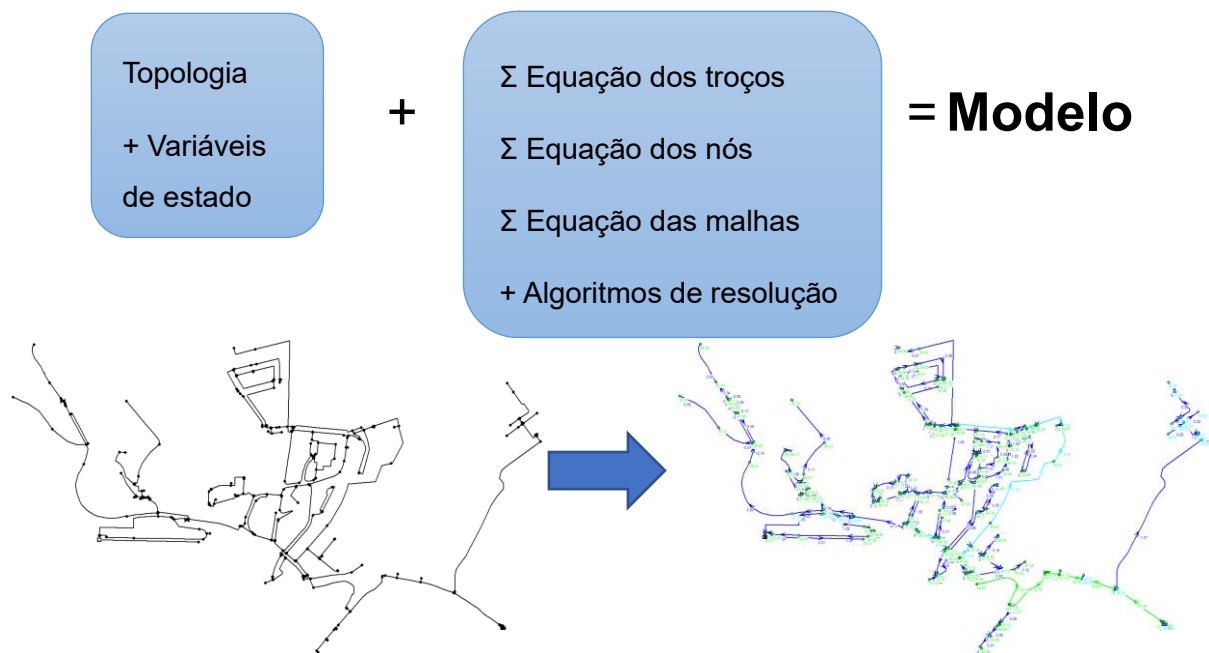


Figura 2.12 – Representação de um modelo.

2.3.2 Qualidade dos modelos

A qualidade dos modelos vai depender da qualidade dos dados de entrada. As principais fontes de incertezas são (Carricho, 2023):

- Características e estado de conservação das tubagens. Faz com que varie os diâmetros úteis e rugosidade;
- Solicitações ao sistema. Qual vai ser o valor e padrão de consumos;
- Topologia do sistema. Ligações e estado de válvulas (aberto/fechado);
- Modo efetivo de operação. Controlos para arranque/paragem de bombas ou manobra de válvulas.

2.3.3 Modelos de apoio ao projeto

O objetivo é apoiar a concepção e dimensionamento de novos sistemas ou mesmo expansões de sistemas existentes. Estes modelos baseiam-se em projeções, isto é, em previsões de solicitações, pois não existem dados físicos ou de consumos (Carriço, 2023).

Podem fazer uso de dados históricos de áreas com características semelhantes e associados a algoritmos de otimização, mas não podem ser calibrados (Carriço, 2023).

2.3.4 Modelos de apoio ao planeamento

Os modelos de apoio ao planeamento têm um triplo objetivo, sendo eles (Carriço, 2023):

- Avaliação de desempenho;
- Diagnóstico das deficiências atuais ou futuras e medidas de melhoria;
- Apoio ao planeamento das obras.

Devem assentar em dados históricos específicos tratados estatisticamente, devem ser calibrados para a situação de partida com vista ao estabelecimento do diagnóstico e associados a algoritmos de avaliação de desempenho e de dimensionamento (Carriço, 2023).

2.3.5 Modelos de apoio à operação

O objetivo dos modelos de apoio à operação são estudar cenários de operação alternativos, tais como (Carriço, 2023):

Situação normal:

- Otimização de bombagens;
- Estabelecimento de ZMC.

Situações de emergência:

- Falha de uma bomba;
- Rotura de uma conduta importante;
- Consumo excecional (incêndio).

Para isso, devem assentar em dados históricos específicos tratados estatisticamente ou usados diretamente, e os modelos devem ser calibrados em conformidade (Carriço, 2023).

2.3.6 Modelos de apoio à manutenção

O objetivo dos modelos de apoio à manutenção são:

- Permitir o apoio à programação de ações de manutenção/reparação (deteção de fugas);
- Permitir o apoio à definição das fronteiras de ZMC permanentes e temporárias (intervenções de manutenção).

Para isso devem assentar em dados históricos específicos tratados estatisticamente, e os modelos devem ser calibrados em conformidade (Carriço, 2023).

2.3.7 Programa de cálculo EPANET

O programa de cálculo EPANET é um simulador hidráulico e de qualidade da água de regime permanente (dinâmico ou de período ampliado), desenvolvido pelo U.S. Environmental Protection Agency (USEPA), amplamente testado e de distribuição gratuita (Disponível em https://github.com/USEPA/EPANET2.2/releases/download/2.2.0/epanet2.2_setup.exe).

O EPANET é um software de domínio público que pode ser copiado e distribuído livremente. É um programa baseado em Windows® e, é um ambiente gráfico para:

- Editar os dados da rede e dos cenários a modelar;
- Executar simulações hidráulicas e de qualidade da água;
- Visualizar os resultados (mapas da rede a cores, gráficos temporais, isolinhas etc.).

As principais vantagens são:

- Distribuído gratuitamente;
- Credível e transparente;
- Existe uma grande comunidade de utilizadores em todo o mundo.

O motor de cálculo é utilizado por outros programas de simulação com custo de aquisição elevado (como por exemplo o WATERCAD e MIKENET), é compatível com outros simuladores (como por exemplo o H2ONET, WATERCAD e MIKENET), e a existência de pequenas extensões ao EPANET de utilização gratuita (como por exemplo o DXF2EPA para converter ficheiros de AutoCAD em EPANET) (Carriço, 2023).

Capacidades de cálculo hidráulico:

- Cálculo de perdas de carga contínua e em singularidades;
- Inserção de múltiplas categorias de consumo nos nós;
- Modelação de vários tipos de válvulas, tais como, válvulas de seccionamento (elemento conduta ou elemento válvula), válvulas de retenção (no elemento conduta), válvulas de regulação de pressão, válvulas de regulação de caudal, entre outras (de alívio, de perda de carga fixa, etc.);

- Modelação de bombas de velocidade fixa ou variável;
- Cálculo da altura de água num reservatório de secção variável em função do volume.

Capacidades de cálculo da qualidade da água:

- Modela o transporte, a mistura e a transformação de substâncias reativas (o cloro residual, que é um subproduto da desinfecção);
- Modela reações no seio do escoamento e na parede da tubagem (através de coeficientes de decaimento no seio do escoamento e de decaimento na parede da conduta);
- Modela o tempo de percurso da água através da rede (tempo médio que uma parcela de água demora a chegar a um determinado nó a partir de outro nó da rede);
- Tem uma *Multi-Species Extension* (Software de extensão várias espécies).

2.4 Metodologia para desenvolvimento de modelos

A metodologia a utilizar no desenvolvimento de um modelo hidráulico de simulação de rede de abastecimento de água que servirá de apoio à operação, planeamento, projeto de reabilitação e manutenção deve seguir as etapas apresentadas na Figura 2.13 (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006). O desenvolvimento de um modelo, deverá seguir uma abordagem estruturada e sistemática, de modo a tornar-se humanamente e monetariamente rentável.

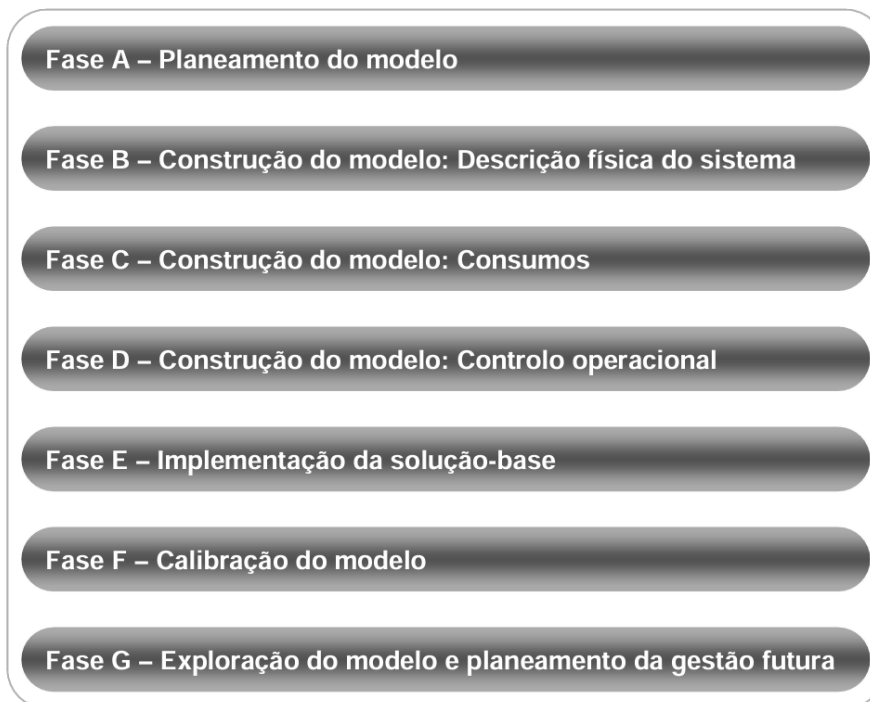


Figura 2.13 – Faseamento recomendado do desenvolvimento de um modelo. (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006)

Fase A – Planeamento do modelo

O objetivo é identificar o sistema a estudar, estabelecer os diversos usos preferenciais e prioritários do modelo, efetuar um levantamento de dados de cadastro, de faturação e operacionais, escolher um sistema de convenções a adotar na modelação a utilizar e as opções básicas de configuração do modelo.

Fase B – Construção do modelo – Descrição física do sistema

O objetivo é recolher os elementos necessários para a criação de um ficheiro computacional contendo a descrição física completa do sistema (condutas, nós, reservatórios, válvulas e outros elementos físicos).

Fase C – Construção do modelo – Consumos

O objetivo é a introdução dos consumos nos nós e dos padrões temporais de consumo no ficheiro de modelação previamente criado.

Fase D – Construção do modelo – Controlo operacional

O objetivo é a introdução dos elementos descritivos das regras operacionais de controlo no modelo computacional.

Fase E – Implementação da solução-base

O objetivo é a criação da versão base do modelo, de acordo com os cenários adotados anteriormente.

Fase F – Calibração do modelo

O objetivo é a criação de uma versão calibrada, otimizada e plenamente funcional do modelo.

Fase G – Exploração do modelo e planeamento da gestão futura

O objetivo é analisar o comportamento hidráulico do sistema, da qualidade da água e das opções técnicas tomadas a partir de uma versão calibrada e otimizada de acordo com os cenários e utilizações finais adotadas.

2.5 Planeamento do Modelo

O primeiro grande passo a ser dado no processo de planeamento é identificar as utilizações mais importantes a conferir ao modelo de simulação do sistema (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006). Em seguida é fundamental definir objetivos de curto, médio e longo prazo. Em função desses objetivos, pode então ser definida uma estratégia de desenvolvimento, e comparar periodicamente o progresso realizado (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os modelos de simulação incorporam uma grande quantidade de informação proveniente do sistema de telegestão, do sistema de cadastro/SIG, do sistema de informação de laboratório, do sistema de informação de manutenção e do sistema de faturação, entre outros, de cuja qualidade dependem os resultados obtidos. Por essa razão, e porque tanto as redes de abastecimento como a informação que lhes diz respeito evolui constantemente no tempo, é importante que seja periodicamente atualizada (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O sistema de distribuição de água representa habitualmente um conjunto de zonas de rede, que são geográfica, topológica e hidraulicamente sectorizáveis, e aos quais correspondem frequentemente diferentes tipologias de idade, material e estado das condutas (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A ordem deverá refletir um grau de prioridade conferido a cada objetivo de forma a serem obtidos modelos de rede funcionais, e cuja aplicação possa atingir resultados eficazes tão cedo quanto possível. O sucesso que possa ser obtido no curto prazo é importante para justificar o investimento numa tarefa longa e por vezes fastidiosa (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

2.5.1 Monitorização e equipamento de medição

A existência de equipamento de medição para registo de pressão e caudal em locais específicos da rede é fundamental para a quantificação dos consumos totais abastecidos a cada zona, para a tipificação dos padrões de consumo da rede, para análise de controlo de perdas e para a calibração de modelos hidráulicos (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A medição da pressão, é importante para a calibração hidráulica dos modelos, e pode ser efetuada com medidores portáteis em marcos de incêndio, estações elevatórias (na conduta de aspiração ou de compressão), reservatórios e válvulas (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A monitorização de parâmetros de qualidade da água, como o cloro residual, é importante para a calibração dos modelos de qualidade da água e definição de campanhas de amostragem. Não é habitual instalar-se medidores em contínuo de cloro residual a não ser à saída dos principais reservatórios ou instalações de cloragem/recloragem. A monitorização de parâmetros de qualidade da água para efeitos de modelação é frequentemente executada por recurso a campanhas temporárias, dirigidas para cada área específica em estudo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A eficaz prática do controlo de caudais em redes de distribuição, para controlo de perdas, minimização de gastos energéticos e gestão operacional da rede, depende de uma adequada rede de medição. As estratégias modernas de controlo de caudais tendem a aconselhar a

divisão das redes de distribuição em zonas de medição e controlo (ZMC) de dimensão não superior a 3000 pontos de consumo, ou cerca de 7000 habitantes (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os medidores de pressão deverão ser fiáveis, ter uma precisão e gama de leitura adequadas, e poder ser ligados a registadores do tipo *datalogger*, o que simplifica e torna mais eficaz o tratamento dos dados resultantes. O preço mais elevado dos aparelhos com *datalogger* é habitualmente compensado por não necessitarem de operador permanente, uma vez que podem ser instalados e deixados a registar por um determinado período (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A previsão de necessidades de equipamento de medição de qualidade da água deverá ser efetuada quando forem definidos os objetivos da análise. No caso do estudo de parâmetros como o do cloro residual, poderá ser efetuado com recurso a um conjunto de medidores portáteis do tipo kit (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

2.5.2 Convenções a adotar

Os dados necessários para a construção de um modelo obrigam geralmente à recolha de um elevado volume de informação, a qual pode encontrar-se dispersa pelas várias unidades operativas envolvidas, e disponível em diversos formatos. É necessário definir um conjunto de convenções que permitam uniformizar e codificar a informação disponível, por forma a facilitar a utilização e a eliminação de erros do modelo, assim como a sua manutenção contínua (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Todos os ficheiros e pastas em que se traduz a implementação computacional do modelo devem ser organizados de forma adequada, adotando igualmente uma convenção de nomenclatura comum por forma a facilitar a gestão dos ficheiros (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A nomenclatura a conferir aos elementos físicos da rede, tais como, condutas, válvulas, reservatórios, estações elevatórias e aos nós deverá obedecer a um critério que utilize um código alfanumérico, já suportado pela maioria dos simuladores existentes no mercado (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O programa de simulação EPANET 2.2 trabalha com um conjunto de vários tipos de ficheiros de dados, de resultados e auxiliares, que servem de base para a construção do modelo e, para apresentação dos resultados obtidos, tais como apresentados no Quadro 2.1.

Quadro 2.1 – Tipos de ficheiros utilizados no EPANET 2.2 (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Categorias	Tipo de Ficheiro
Dados	Ficheiro de dados (.inp) Ficheiro de mapa (.map) Ficheiro de padrão (.pad) Ficheiro de curvas (.crv) Ficheiro de cenário (.scn)
Resultados	Ficheiro binário de resultados (.net) Ficheiro de relatório (.rpt) Ficheiro de texto (.txt)
Auxiliares	Fichas técnicas (.xls)

2.5.3 Gestão no desenvolvimento do modelo

O grupo de trabalho para desenvolvimento dos modelos deverá ter as seguintes valências (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Planeamento e projeto de infraestruturas urbanas;
- Manutenção do cadastro das infraestruturas e ligação a sistemas de informação geográfica;
- Exploração da rede;
- Faturação e gestão de clientes.

Cabe ao gestor do modelo coordenar as seguintes tarefas (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Estabelecer os procedimentos de atualização dos modelos e garantir que esta é levada a cabo com periodicidade adequada, em termos de cadastro, dados físicos, controlos e consumos;
- Planear campanhas periódicas de calibração dos modelos, de modo a assegurar a sua atualidade e fiabilidade;
- Garantir o controlo de versões do modelo, de modo que as versões de referência só possam ser criadas / modificadas pelo Gestor do Modelo;
- Planear as atividades de desenvolvimento dos usos prioritários do modelo e das equipas afetas ao desenvolvimento/exploração do modelo;

- Definir as necessidades de software, de equipamento de medição ou de contratação de equipas especializadas;
- Coordenar a ligação dos modelos com os outros sistemas de informação;
- Sensibilizar os potenciais beneficiários para as vantagens do uso sistemático dos modelos e promover a realização de ações de formação internas.

2.6 Técnicas de simplificação de modelos

2.6.1 Grau de detalhe de um modelo

O grau de detalhe de um modelo depende do objetivo do modelo. O planeamento de longo termo, o dimensionamento de sistemas adutores e localização de reservatórios podem requerer apenas a inclusão das condutas principais, com consumos distribuídos uniformemente ao longo da rede, e utilização de fatores de ponta (Carriço, 2023).

A avaliação da capacidade do sistema em emergência (e.g., o combate a incêndio) ao nível da urbanização, controlo de perdas, gestão da energia e modelação da qualidade da água requerem um maior detalhe, podendo incluir todas as condutas de adução e distribuição, excluindo os ramais de serviço (Carriço, 2023).

O modelador deve estar ciente das limitações do modelo que está a usar (Carriço, 2023).

2.6.2 Estrutura de um modelo

Pode não ser necessário ter um modelo com o grau de detalhe existente no SIG. Podem ser usadas duas técnicas (Carriço, 2023):

- “Esqueletização”: eliminação ou omissão das tubagens de pequeno diâmetro;
- Redução: remoção de nós intermédios (hidraulicamente insignificantes) ao longo dos trechos de tubagens de diâmetro, material e data de construção semelhantes e combinação subsequente dos segmentos de tubagem adjacentes numa única tubagem.

O modelo completo preserva toda a informação do SIG, maior tempo de processamento e de armazenamento, pode facilmente atingir um número significativo de trechos de tubagens, como é possível observar na Figura 2.14 (Carriço, 2023).

No modelo reduzido eliminam-se os nós intermédios hidraulicamente insignificantes, ou seja, os trechos com diâmetro, material e data de construção semelhantes são dissolvidos (reduzidos), como é possível observar na Figura 2.14. O processamento será mais rápido (Carriço, 2023).

O modelo “esqueletizado” inclui todas as tubagens acima de um determinado diâmetro, ficando apenas a “espinha dorsal” da rede de distribuição, o desempenho melhora significativamente, mas o detalhe ao nível da urbanização perde-se, como é possível observar na Figura 2.14 (Carricho, 2023).

O modelo “esqueletizado” reduzido é uma combinação dos dois modelos anteriores, como é possível verificar na Figura 2.14 (Carricho, 2023).

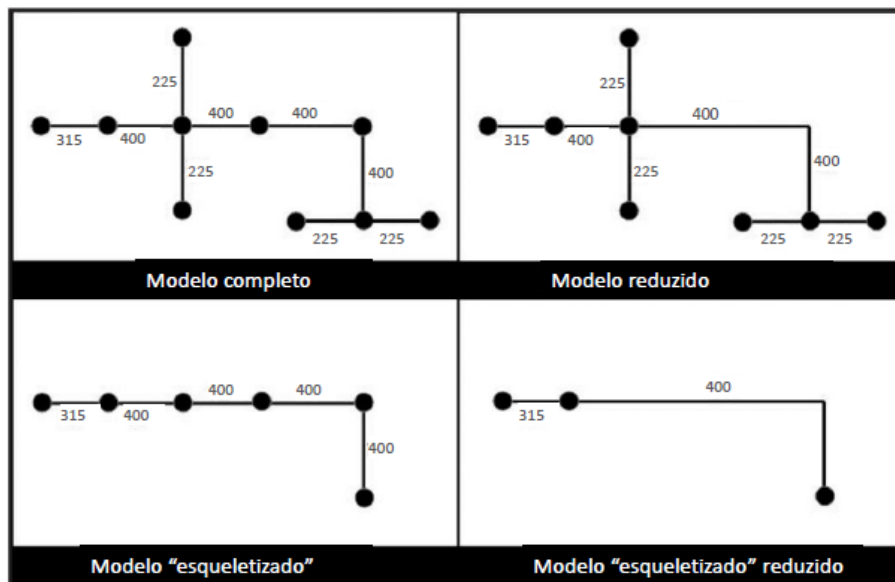


Figura 2.14 – Estrutura de um modelo (Carricho, 2023).

2.7 Calibração de modelos

A calibração do modelo corresponde ao processo de comparar os resultados de um modelo com observações de campo e, se necessário, ajustar os dados que descrevem o sistema até que o comportamento previsto pelo modelo concorde razoavelmente com o comportamento verificado na realidade, para uma gama alargada de condições operacionais (Walski, et al., 2003).

Um modelo calibrado deverá ser capaz de simular adequadamente os valores dos seus parâmetros.

No contexto da modelação de sistemas de abastecimento de água, existem dois tipos de calibração:

- Calibração hidráulica;
- Calibração de qualidade da água.

Um modelo calibrado em termos hidráulicos deverá simular adequadamente tanto os valores do caudal como os valores de pressão, não sendo suficiente obter bons resultados em apenas uma destas variáveis (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Um modelo calibrado em termos de qualidade da água deverá simular adequadamente os valores do parâmetro de qualidade que se está a estudar, (como por exemplo, o cloro residual).

O grau de exatidão de um modelo é a diferença entre os valores das grandezas calculados pelo modelo e os valores (convencionalmente) verdadeiros das grandezas em causa (tipicamente, os valores medidos) (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Um modelo calibrado deverá obedecer a um determinado grau de exatidão pré-estabelecido que dependerá dos objetivos de utilização do modelo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O grau de exatidão obtido poderá resultar do próprio processo de calibração e das limitações de tempo ou de recursos, influenciando diretamente a fiabilidade dos resultados do modelo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A calibração serve para estabelecer o grau de fiabilidade do modelo e adquirir ou aprofundar o conhecimento sobre o funcionamento do sistema, a sua operação, o seu desempenho e descobrir e eliminar erros nos dados ou falhas no conhecimento do sistema (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Para além destes objetivos, a fase de calibração permite muitas vezes identificar problemas no próprio sistema e, nunca deve ser descartado um conjunto de dados de modelação racionalmente construídos sem colocar a hipótese de algo imprevisto ou desconhecido poder ter ocorrido (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os erros são as discrepâncias entre os resultados do modelo e a realidade observada. Os erros podem ter diversas origens, tais como, os dados físicos do sistema, as solicitações e as condições operacionais (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A calibração hidráulica de um modelo trata-se do ajustamento, até ser obtida a concordância de valores de pressão e caudal, dos valores das duas grandes fontes de incerteza, a rugosidade das condutas e os consumos nominais nos nós (estas duas variáveis que podem apenas ser estimadas, contrariamente ao comprimento e diâmetro das condutas e outros elementos que podem ser especificamente medidos) (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

As possíveis fontes de erro ou de incerteza nos dados de entrada de um modelo constituem um potencial parâmetro de calibração, como por exemplo, o coeficiente de rugosidade das condutas, consumos aos nós, diâmetro nominal e diâmetro interno, registos de cadastro, erros

de conectividade, simplificação da rede e níveis e condições de operação de reservatórios e instalações elevatórias (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A realização de medições de campo deverá obedecer a um planeamento, no sentido de se determinar o que medir, quando, onde, sob que condições, se vai implicar custos de equipamento e de mão de obra, se vai implicar cortes do abastecimento ou alterações temporárias na rede e, com o sentido de minimizar as perturbações aos consumidores e ao normal funcionamento da rede (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

A localização das medições para efeitos de calibração, devem ser feitas através do método clássico ou através de uma abordagem mais recente (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O método clássico indica-nos que a localização dos medidores de pressão deve ser na vizinhança de zonas de concentração de consumos e nas zonas periféricas da rede para maximizar a sensibilidade das perdas de carga aos caudais. Os testes de perda de carga ou de caudal de incêndio deverão ser realizados com os maiores caudais de descarga possíveis (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Já a abordagem mais recente indica-nos que seja resolvido iterativamente (através de algoritmos de otimização), o problema de escolher a melhor combinação de localizações de medição (otimização com funções-objetivo que traduzem a minimização do erro entre a previsão do modelo e as medições) (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

As principais grandezas que refletem o comportamento hidráulico de um sistema de abastecimento de água em pressão são o caudal e a pressão.

Os principais pontos de interesse em termos de medição de caudal são as entradas e saídas dos sectores da rede (Carriço, 2023).

Um tipo muito particular de caudal é o caudal consumido nos pontos de utilização (extremamente importante por constituir a solicitação ao sistema, e por gerar a principal incerteza associada ao seu funcionamento) (Carriço, 2023).

A medição de pressões fornece dados essenciais para (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Calibração de modelos;
- Ganho de sensibilidade ao sistema;
- Resolução de variados problemas operacionais (e.g. localização de VRP).

A pressão é um dos principais indicadores de desempenho operacionais no dia-a-dia de um sistema, refletindo-se diretamente na qualidade do serviço prestado (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

As principais localizações para efetuar as medições de pressões é, nos hidrantes de incêndio, nas bocas de rega, nas torneiras de serviço, nas tomadas em pressão e nos inúmeros outros acessórios dos sistemas (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os principais tipos de medidores de pressão, são:

- Transdutores (Figura 2.15a);
- Manómetros (Figura 2.15b).

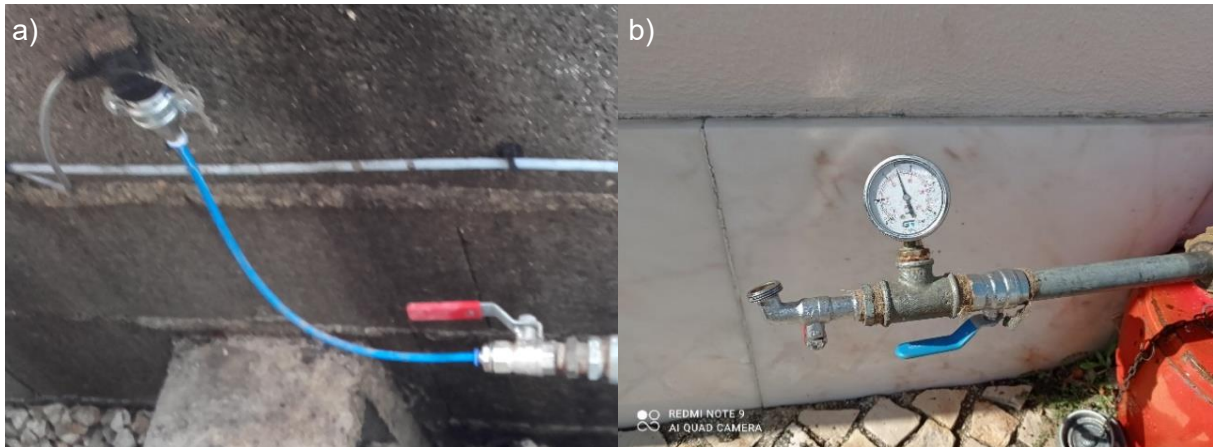


Figura 2.15 – (a) transdutor; (b) manómetro analógico, montado em marco de incêndio.

Que podem ser equipamentos:

- Portáteis (Figura 2.15b) ou fixos (Figura 2.15a);
- Analógicos ou digitais (Figura 2.16);
- De leitura instantânea ou ligados a sistemas de telemedição ou a dataloggers (Figura 2.17);
- Transmitir dados à distância através de transmissores de rádio ou GSM (Figura 2.18).



Figura 2.16 – À esquerda um manómetro digital e à direita dois manómetros analógicos montados numa VRP.

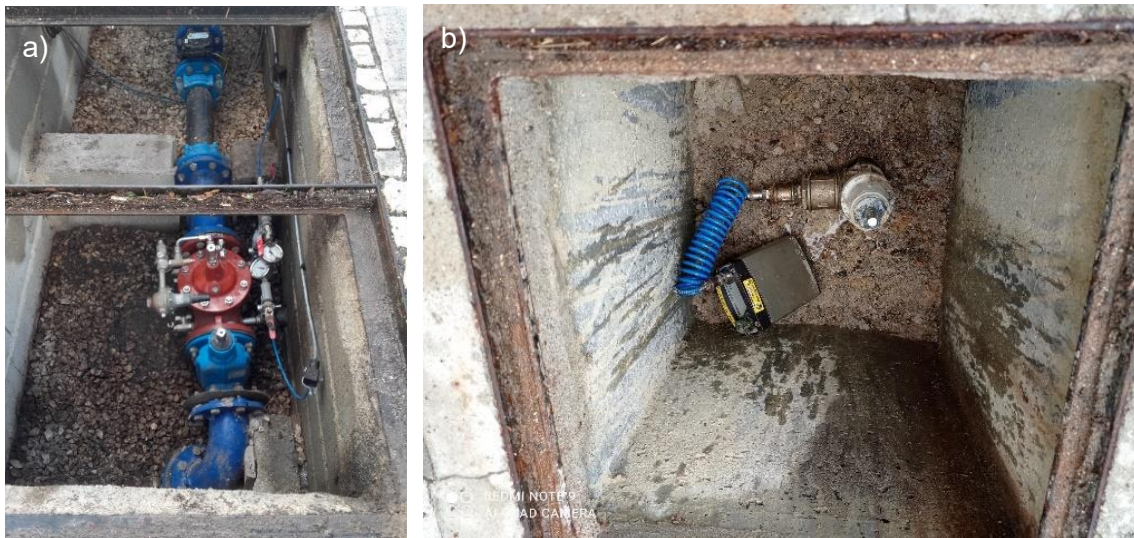


Figura 2.17 – (a) VRP ligada à telemedição (entrada de ZMC); (b) Datalogger instalado numa válvula de descarga da rede.

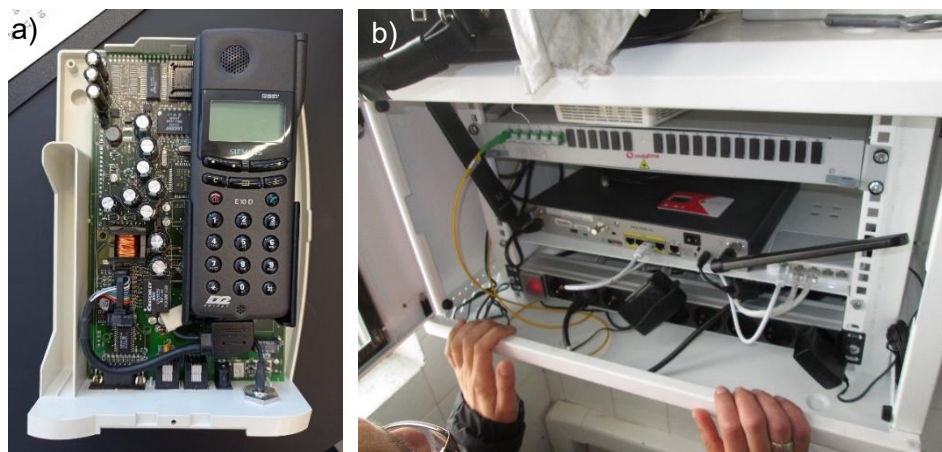


Figura 2.18 – Transmissores de dados (a) por GSM; (b) por internet.

Os medidores de caudal são equipamentos dispendiosos, que obrigam a um planeamento cuidado da sua localização sendo as principais localizações à saída de captações, de reservatórios, de EE, de sistemas/ZMC e em grandes e pequenos consumidores (Carriço, 2023).

A principal razão para a instalação de medidores de caudal são, permitir um melhor controlo das perdas e fugas nas redes e a obtenção de elementos estatísticos relativos a capitações e fatores de ponta, com vista ao cálculo de ampliações ou de remodelações de redes ou instalação de novas redes com características semelhantes (Sá Marques & Sousa, 2008).

Os principais tipos são (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- medidores mecânicos do tipo turbina ou Woltman, ligados a um registador mecânico ou gerador de impulsos, como é possível observar na Figura 2.19;

- medidores eletromecânicos, em que a rotação da turbina é convertida num sinal analógico ou de frequência;
- medidores eletromagnéticos (não intrusivos), emitindo sinal analógico ou de frequência, como é possível observar na Figura 2.20;
- medidores ultrassônicos (não intrusivos), emitindo sinal analógico ou de frequência, como é possível observar na Figura 2.21.

Podem ter registradores, dataloggers e transmissores GSM e podem ser totalizadores, instantâneos ou por impulsos.

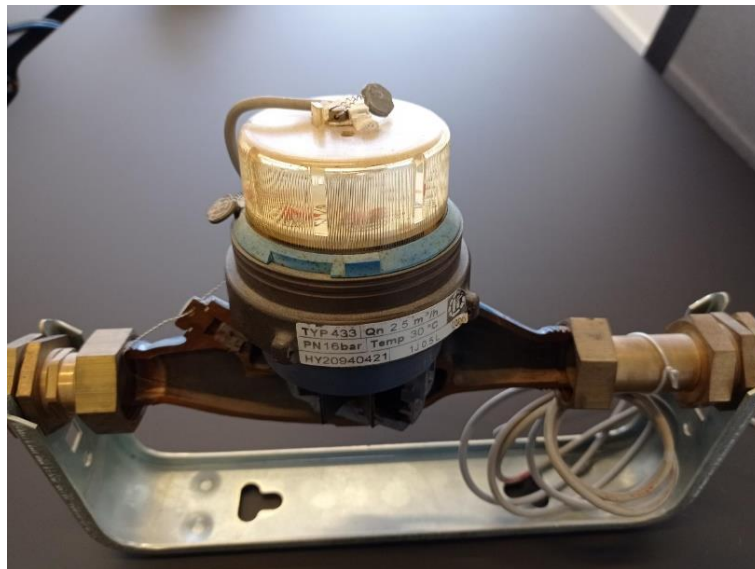


Figura 2.19 – Medidor de caudal mecânico do tipo turbina.



Figura 2.20 – Medidores de caudal eletromagnéticos à saída de reservatório.



Figura 2.21 – Medidor de caudal ultrassônico ligado a sistema de telemedição.

Na Figura 2.22 é demonstrado um exemplo de medição de pressão e caudal.

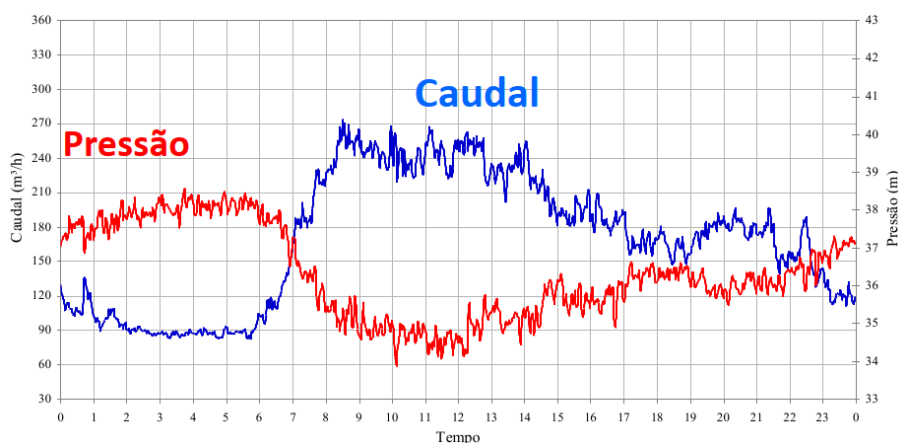


Figura 2.22 – Exemplo de medição de pressão e caudal.

Os testes de rede são um conjunto de práticas destinadas a recolher informação dos parâmetros hidráulicos e de qualidade da água que permitem a calibração de modelos e, podem utilizar equipamento já instalado nos sistemas ou equipamento portátil (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os tipos de testes mais comuns são (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Testes de perda de carga;
- Testes de caudal de incêndio;
- Testes de bombas.

Os testes de perda de carga têm como objetivo estimar ou ajustar os valores atribuídos à rugosidade interna das condutas em grupos de condutas com iguais características (idade, diâmetro, material) (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os testes de perda de carga devem determinar a diferença de cota piezométrica entre dois pontos de uma conduta, na qual o caudal é conhecido e a perda de carga e o caudal são introduzidos na fórmula de perda de carga escolhida, para determinação do parâmetro de rugosidade necessário (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

No Quadro 2.2 veem representadas as fórmulas de perda de carga de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Chezy-Manning, disponibilizadas no software EPANET.

Quadro 2.2 – Equações de perda de carga (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Equação	
Darcy-Weisbach	$\Delta H = 0,083fQ^2D^{-5}L$ (2.1)
Hazen-Williams	$\Delta H = 10,7\left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852}D^{-4,87}L$ (2.2)
Chezy-Manning	$\Delta H = 10,3nQ^2D^{-5,33}L$ (2.3)

sendo:

ΔH – perda de carga (m);

f – fator de resistência (m/m);

Q – caudal (m³/s);

D – diâmetro interno de uma conduta (m);

L – distância (m);

C – coeficiente de Hazen-Williams (adimensional, depende da natureza da parede da conduta);

n – coeficiente de rugosidade de Manning (s/m^{1/3}).

Para minimizar o número de testes, devem ser selecionadas algumas condutas (representativas), de um determinado agrupamento da rede de abastecimento (Carriço, 2023).

O procedimento para a realização de testes de perda de carga com medição de caudal na conduta é efetuado instalando dois manómetros comuns em pontos de acesso à rede e instalando um medidor de caudal a jusante ou utilizando um existente (Carriço, 2023), conforme Figura 2.23.

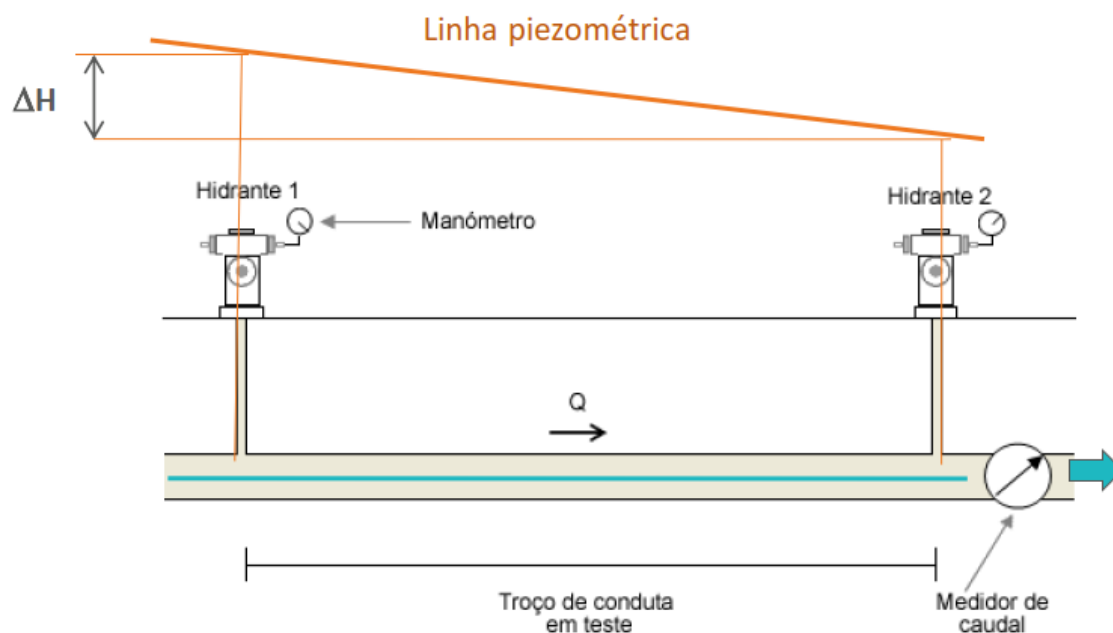


Figura 2.23 – Testes de perda de carga, com medição de caudal na conduta (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O procedimento para a realização de testes de perda de carga com medição de caudal em hidrante é efetuado isolando um trecho de conduta (altera/suspende abastecimento a jusante), instalando dois manómetros comuns em pontos de acesso à rede e abrindo marco de incêndio a jusante e medindo caudal a jusante (Carriço, 2023), conforme Figura 2.24.

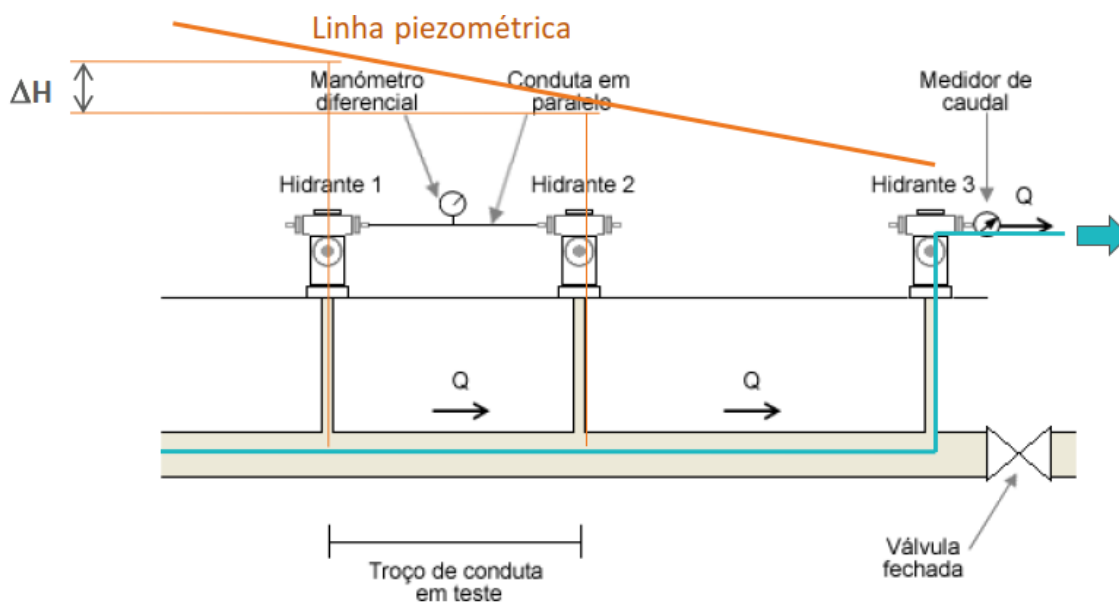


Figura 2.24 – Testes de perda de carga, com medição de caudal em hidrante (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O objetivo de realizar testes de caudal de incêndio são verificar a capacidade de um determinado hidrante para fornecer o caudal requerido para combate a incêndio, avaliar o impacto dessa solicitação excecional no desempenho da rede circundante e suportar a calibração de um modelo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os testes de caudal de incêndio devem determinar a diferença de pressão num ou mais pontos da rede, antes e depois da abertura do caudal de incêndio e a diferença entre a pressão estática e residual constitui uma medida da capacidade hidráulica do sistema (uma pequena diferença indica que se trata de um sistema com elevada capacidade hidráulica e uma grande diferença pode ser uma indicação de uma obstrução, como exemplo, uma válvula parcialmente fechada, ou de um sistema com baixa capacidade hidráulica) (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O procedimento para a realização de testes de caudal de incêndio com medição de caudal em hidrante devem isolar um trecho de uma conduta (alterar ou suspender o abastecimento a jusante), instalar um manómetro num ponto de acesso à rede e abrir marco de incêndio a jusante e medir caudal a jusante (Carriço, 2023), conforme Figura 2.25.

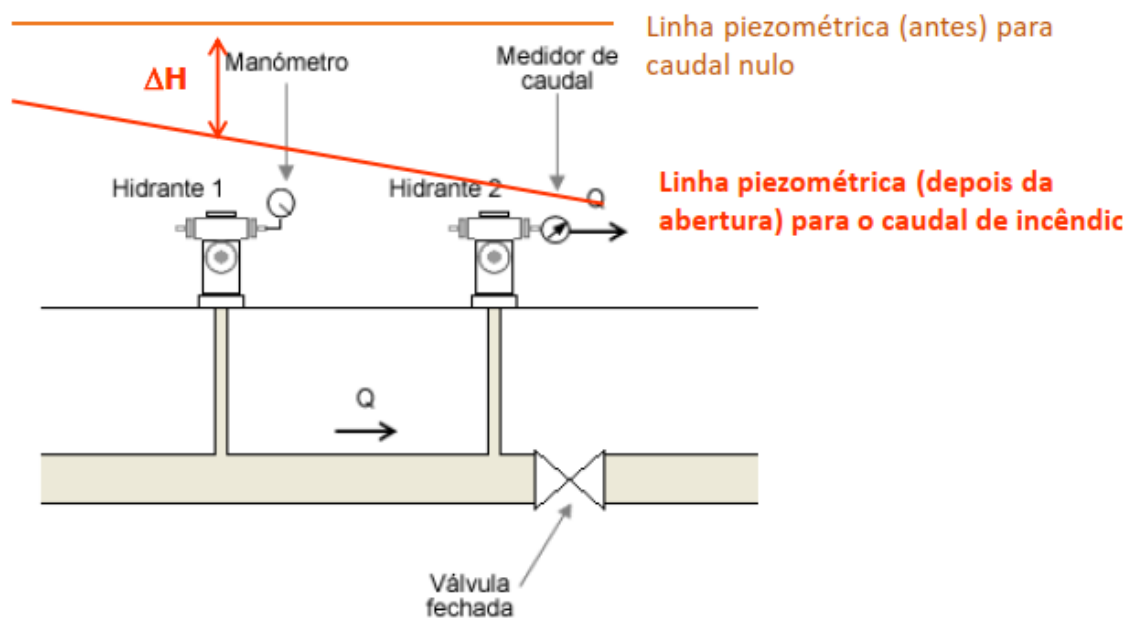


Figura 2.25 – Testes de caudal de incêndio (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O objetivo de realizar testes de bombas são a determinação da curva característica de uma bomba com base nos valores da altura de elevação e caudal (equação da conservação da energia entre as secções de aspiração e de compressão). Estes testes devem ser realizados porque, a eficiência e as características de funcionamento de uma bomba podem diferir das especificadas pelo fabricante, devido às condições de instalação ou ao desgaste provocado pela sua utilização (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O procedimento a realizar é a medição da pressão a montante e a jusante da bomba para cada caudal e variar o caudal através da regulação de uma válvula a jusante (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006), conforme Figura 2.26.

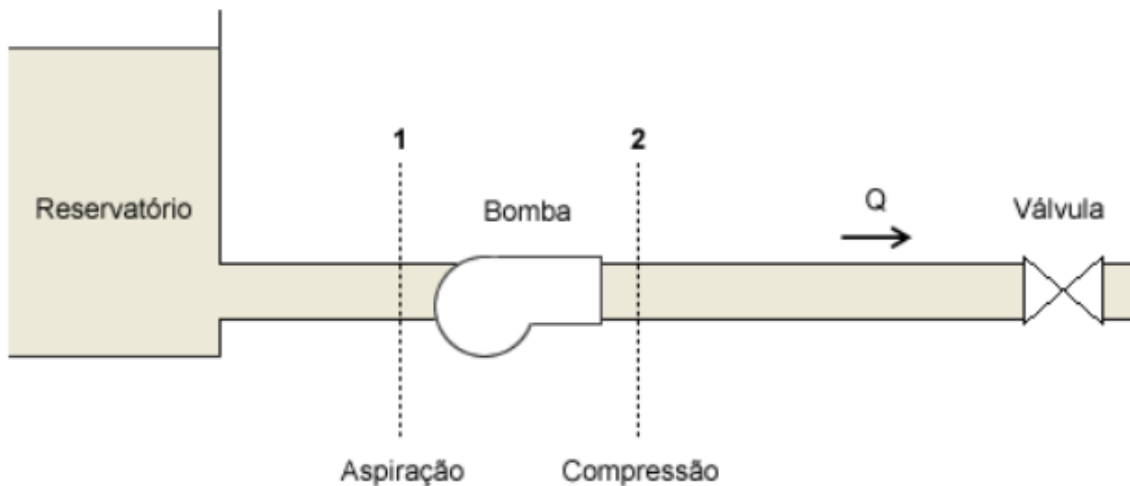


Figura 2.26 – Teste de bomba (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Aplicação da equação da conservação de energia, Eq. 2.4 (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

$$h_b = \left(\frac{P_{com}}{\gamma} - \frac{P_{asp}}{\gamma} \right) + \left(\frac{V_{com}^2}{2g} - \frac{V_{asp}^2}{2g} \right) + h_c + h_L \quad (2.4)$$

Sendo:

h_b – altura de água na bomba (m);

P_{com} – pressão na conduta de compressão (N/m^2);

γ – peso volúmico da água (N/m^3);

P_{asp} – pressão na conduta de aspiração (N/m^2);

V_{com} – velocidade do escoamento na secção onde é medida a pressão P_{com} (m/s);

g – aceleração da gravidade (m/s^2);

V_{asp} – velocidade do escoamento na secção onde é medida a pressão P_{asp} (m/s);

h_c – perda de carga por atrito (m);

h_L – perda de carga localizada (m).

O processo de calibração é um processo iterativo até determinadas condições de aceitabilidade serem verificadas, e tem por base a comparação dos resultados com medições de campo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

O conceito básico do processo de calibração é correr o modelo e comparar os resultados com medições e, se a diferença for superior à tolerância de erro estabelecida, introduzir ajustamentos e voltar a correr o modelo (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Muito dificilmente é possível fazer uma calibração automatizada (através de algoritmos de otimização).

O procedimento a adotar num processo de calibração é (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Identificação do uso que se pretende dar ao modelo;
- Estabelecimento de cenários tipo para a comparação;
- Revisão das condições operacionais e de parâmetros;
- Realização de medições de campo;
- Simulação inicial do processo iterativo;
- Macro-calibração;
- Análise de sensibilidade;
- Micro-calibração ou ajustamento fino.

Nos resultados obtidos da calibração é muito improvável que os valores modelados e os valores medidos no sistema coincidam em todos os pontos do sistema e para todos os instantes de tempo, e, a resposta de um sistema e do respetivo modelo às diferentes condições de caudal impostas poderá variar muito em sistemas com baixas velocidades de escoamento e, em sistemas com altas velocidades de escoamento (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

No caso de sistemas sobredimensionado (com velocidades baixas) (Walski, et al., 2003):

- É típico de muitos sistemas (imposição de diâmetros mínimos);
- Velocidades baixas resultam em perdas de carga pequenas;
- Sistemas pouco sensíveis aos caudais, logo não é muito relevante calibrar os coeficientes de rugosidade (serão sempre incógnitas);
- A informação obtida é útil para verificar conectividade da rede, das condições de fronteira nos reservatórios e em pontos de abastecimento, ajustar alturas de elevação de bombas, ajustar pressões em VRP, verificar cotas do terreno.

Concluindo, em sistemas sobredimensionados, não se justifica calibrar os coeficientes de rugosidade.

No caso de sistemas com velocidades elevadas (Walski, et al., 2003):

- Sistemas próximos da sua capacidade máxima;
- As perdas de carga são sensíveis tanto aos coeficientes de rugosidade como aos consumos;
- Podem ser usados diferentes cenários para calibração, de preferência com elevadas perda de carga;

- Os coeficientes de rugosidade devem ser os mesmos para grupos de condutas e alterados em simultâneo em todas elas.

O procedimento a adotar para comparar as medições com os resultados da simulação no EPANET é (Carriço, 2023):

- Construção do ficheiro de dados de medições (Figura 2.27);
- Registo dos dados de calibração no EPANET (Figura 2.28);
- Executar simulação;
- Visualizar o relatório de calibração (Figura 2.29).

Na Figura 2.27 apresenta-se um exemplo de um ficheiro de texto formatado.

```

;Medições de pressão
;  Nó      Tempo    Pressão(mca)
;-----
;
1113916 13:15    31      ;leituras de 17 e 18 de outubro de 2023
13:30    31
13:45    31
14:00    31
14:15    31
14:30    31
14:45    31
15:00    31
15:15    31
15:30    32
15:45    32
16:00    32
16:15    32
16:30    32
16:45    32
17:00    31
17:15    32
17:30    32
17:45    32
18:00    31
18:15    32
18:30    31
18:45    30
19:00    31
19:15    31
19:30    30
19:45    30
20:00    31
20:15    31
20:30    31
20:45    30
21:00    30
21:15    31
21:30    31

```

Figura 2.27 – Bloco de notas – medição de pressão ao longo do tempo.

Um ficheiro de texto formatado com medições de um parâmetro ao longo do tempo deve conter em cada linha do ficheiro um rótulo de ID do nó onde a medição foi efetuada, o instante (em horas) em que a medição foi efetuada e o resultado da medição (Carriço, 2023).

Devem ser criados ficheiros separados para diferentes parâmetros, o instante de medição deve atender ao instante inicial da simulação e podem ser adicionados comentários ao ficheiro (Carriço, 2023).

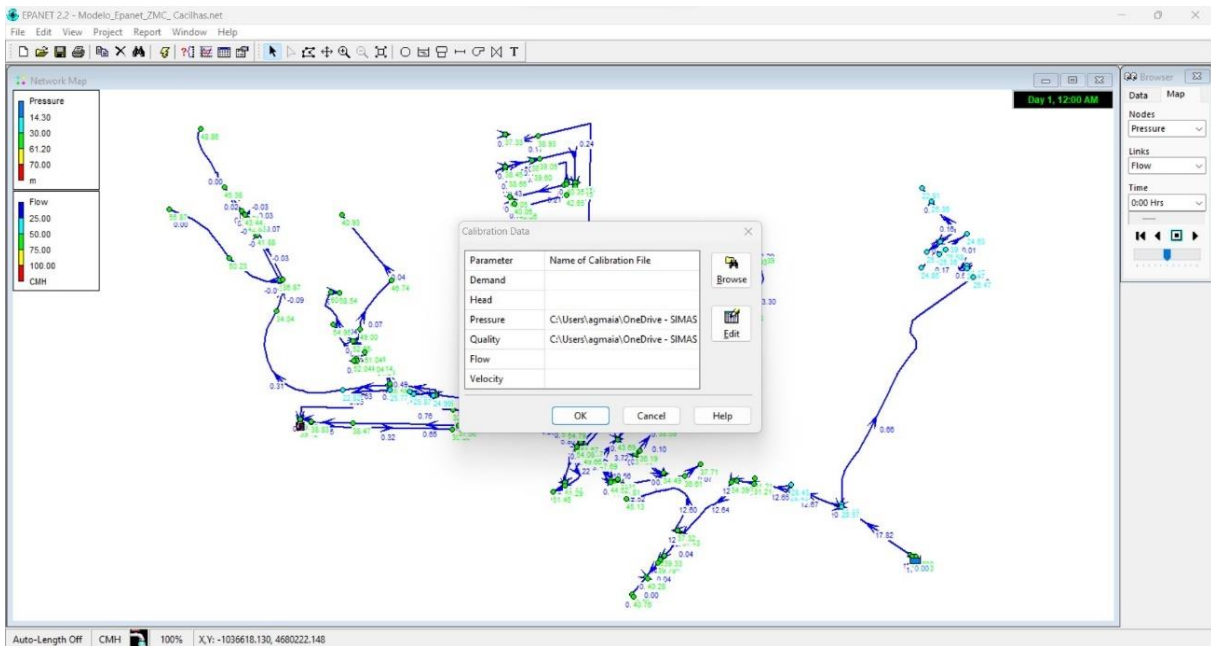


Figura 2.28 – Registo dos dados de calibração no EPANET (Extraído do EPANET 2.2).

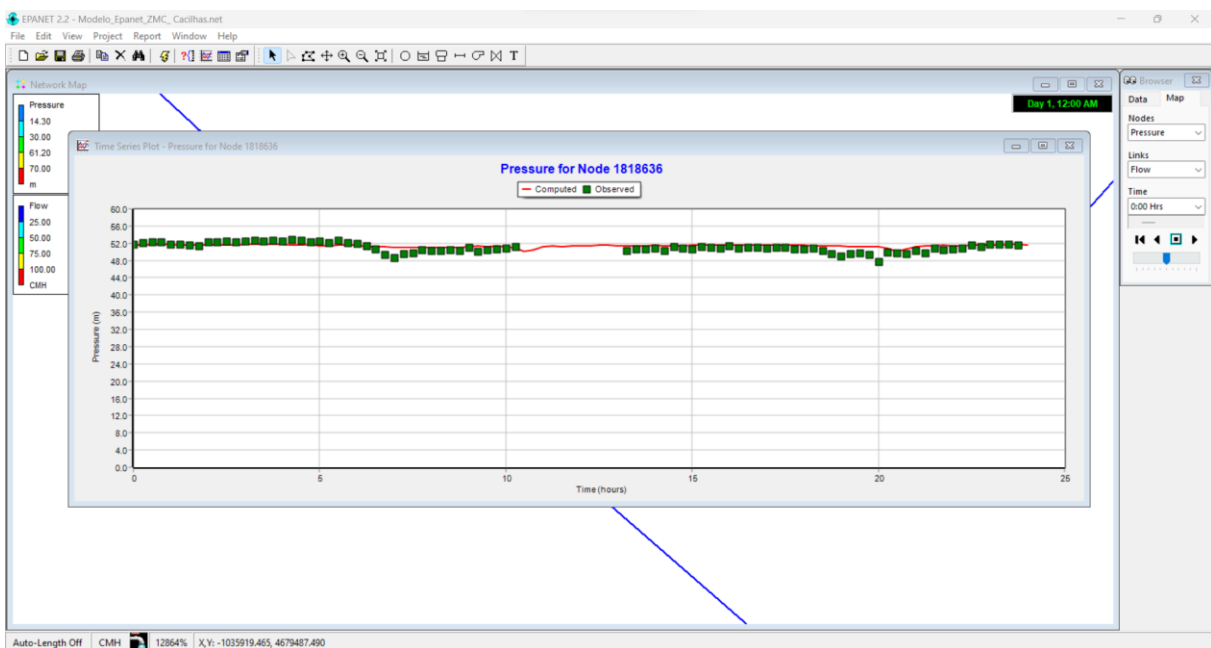


Figura 2.29 – Visualizar o relatório de calibração (Extraído do EPANET 2.2).

2.8 Definição de modos de operação de redes

2.8.1 Válvulas

No caso da modelação, as válvulas são troços especiais de comprimento nulo, que provocam uma perda de carga de acordo com determinadas características e limitam assim a pressão ou o caudal para jusante. Uma válvula pode ser utilizada no modelo para representar o que

existe fisicamente no sistema ou para simular condições de funcionamento específicas (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

As válvulas podem ser de vários tipos, como mostrado no Quadro 2.3 (Rossman, 2000) e na Figura 2.30.

Quadro 2.3 – Descrição de cada tipo de válvulas.

Tipo de Válvula	Nome
PRV (VRP)	Pressure Reducing Valve (válvula redutora de pressão)
PSV (VA)	Pressure Sustaining Valve (válvula de alívio)
PBV (VPCF)	Pressure Breaker Valve (válvula de perda de carga fixa)
FCV (VRC)	Flow Control Valve (válvula reguladora de caudal)
TCV (VB)	Throttle Control Valve (válvula de borboleta)
GPV (VG)	General Purpose Valve (válvula genérica)

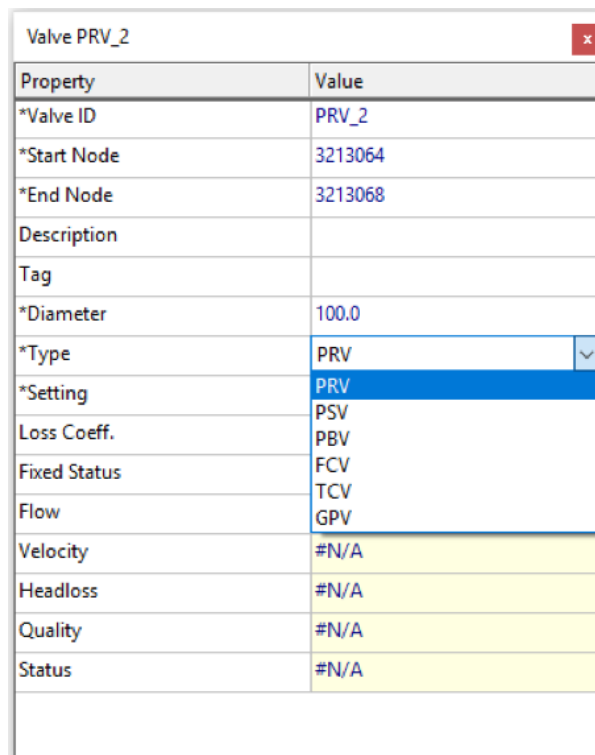


Figura 2.30 – Escolha do tipo de válvula no EPANET (Extraído do EPANET 2.2).

No Quadro 2.4 apresentam-se os parâmetros de controlo (parâmetro necessário para descrever as condições de operação de cada tipo de válvula) (Rossman, 2000):

Quadro 2.4 – Parâmetros de controlo.

Tipo de Válvula	Parâmetro de Controlo
PRV (VRP)	Pressão a jusante (m ou psi)
PSV (VA)	Pressão a montante (m ou psi)
PBV (VPCF)	Pressão perdida (m ou psi)
FCV (VRC)	Caudal que passa (unidades de caudal)
TCV (VB)	Coef. de Perda Carga Singular (adim.)
GPV (VG)	ID da curva de perda de carga

Para evitar instabilidades numéricas segundo Rossman (2000):

- PRV, PSV e FCV não podem ser ligadas diretamente a um reservatório (Tank ou Reservoir), devendo utilizar-se sempre uma conduta curta entre os dois componentes;
- Duas ou mais PRV (ou PSV) não podem partilhar a mesma conduta de jusante nem estar ligadas em série;
- Uma PSV não pode ser ligada ao nó de jusante de uma PRV.

Deve-se sempre ligar qualquer um destes três tipos de válvulas a condutas de comprimento unitário e de grande diâmetro, quer a montante, quer a jusante (para ter perdas de carga desprezáveis) (Carriço, 2023).

As válvulas redutoras de pressão (VRP) são normalmente usadas para:

- Assegurar que a pressão a jusante das mesmas não seja superior a um valor previamente estabelecido (Sá Marques & Sousa, 2008).

As válvulas redutoras de pressão provocam perdas de carga localizadas cujos valores são possíveis de adaptar em função das condições existentes.

2.8.2 Controlos

Os controlos são um conjunto de instruções de operação de um sistema e podem ser do tipo simples (Simple) ou condições múltiplas (Rule-Based) (Rossman, 2000), conforme mostrado na Figura 2.31.

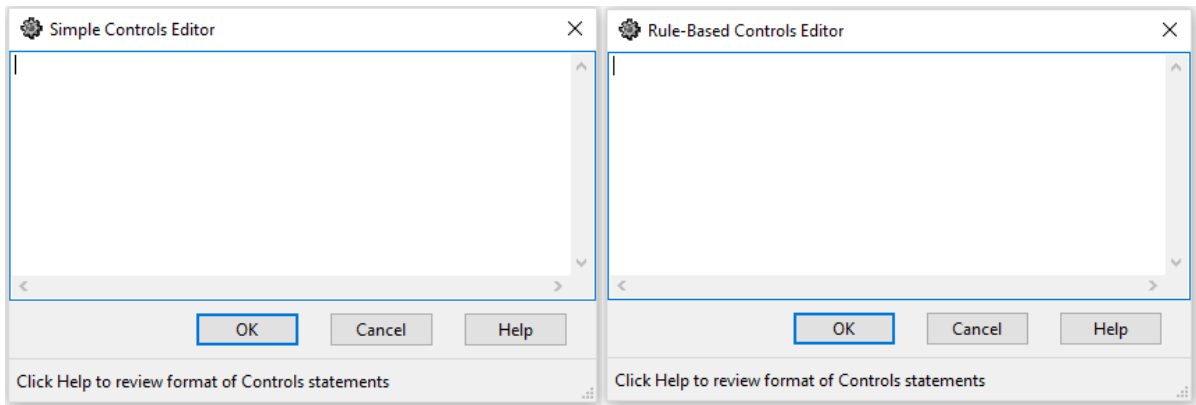


Figura 2.31 – Controlos simples ou condições múltiplas (Extraído do EPANET 2.2).

Podem ser seleccionados no software EPANET em Browser ⇒ Data ⇒ Controls ⇒ Simple ou Rule-Based, como é possível observar na Figura 2.32.



Figura 2.32 – Navegador do EPANET (Extraído do EPANET 2.2).

Alguns controlos simples que alteram o estado ou propriedades de um troço com base em (Rossman, 2000):

- Variação da altura de água num RNV (reservatório de nível variado);
- Pressão num nó;
- Instante de simulação;
- Instante do dia.

Já os controlos com condições múltiplas permitem que o estado e as propriedades dos troços dependam da combinação de um conjunto de condições que podem ocorrer na rede, após o cálculo das condições hidráulicas iniciais (Rossman, 2000).

2.9 Gestão de Pressões

As pressões muito elevadas apresentam grandes inconvenientes, como a produção de ruídos nas redes internas dos edifícios e a deterioração de válvulas e outros equipamentos, e, simultaneamente, contribui para o aparecimento de fugas (Sá Marques & Sousa, 2008).

O Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto (MOPTC, 1995), indica as seguintes condições de pressão:

“ARTIGO 21.º - Dimensionamento hidráulico

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

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

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

$$H = 100 + 40n$$

Onde H é a pressão mínima (kPa) e n é o número de pisos acima do solo, incluindo o piso térreo; em casos especiais, é aceitável uma redução daquela pressão mínima, a definir, caso a caso, em função das características do equipamento.”

O efeito da redução de pressão sobre as perdas reais é dado pela Eq.2.5:

$$\frac{Q_{final}}{Q_{inicial}} = \left(\frac{p_{final}}{p_{inicial}} \right)^n \quad (2.5)$$

Sendo:

Q_{final} – caudal de perdas após redução da pressão (m^3/s);

$Q_{inicial}$ – caudal de perdas antes da redução da pressão (m^3/s);

p_{final} – pressão final após redução (m);

$p_{inicial}$ – pressão inicial anterior à redução (m);

n – expoente.

O expoente **n** varia com o material da conduta e com o tipo de fugas. Pode ser determinado experimentalmente através do isolamento de sectores e suspendendo o abastecimento aos

consumidores servidos ou através de testes noturnos em sectores, incluindo o consumo noturno, onde os sectores devem ser homogéneos em termos de materiais/idade, deve medir-se o caudal para diferentes valores de pressão e a estimativa de n para esse sector (se existir consumo noturno este deve ser deduzido ao caudal mínimo noturno), como apresentado na Figura 2.33 e Quadro 2.5, sendo $n=1,18$ o valor mais usado para redes reais (Alonso, et al., 2000).

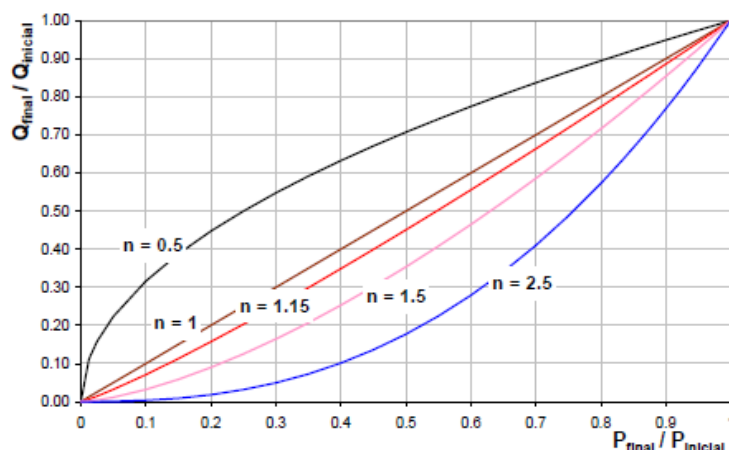


Figura 2.33 – Gráfico de variação do valor do expoente n (Carrigo, 2023).

Quadro 2.5 – Descrição da variação dos valores do expoente n (Lambert, 2001).

Valor de n	Descrição
0,5	Fugas significativas, detetáveis em condutas de materiais metálicos (fugas em orifícios de área fixa)
1,0	Em caso de desconhecimento do material ou nível de perdas reais
1,5	Pequenas fugas, indetetáveis, em juntas e ligações (background leakage) independentemente do tipo de material
$\geq 1,5$	Fugas significativas, detetáveis em condutas de materiais plásticos (fugas em orifícios de área variável)

Os benefícios da redução de pressão, são (Carrigo, 2023):

- Redução do caudal de perdas reais;
- Redução do consumo em dispositivos domiciliários;
- Aumento do nível de serviço aos consumidores;
- Proteção do estado estrutural da rede;
- Redução de interrupções no abastecimento.

Os potenciais problemas, são a perda de faturação, enchimento deficiente dos reservatórios em período noturno, funcionamento deficiente das válvulas redutoras de pressão e limitações em edifícios altos, caso não sejam devidamente planeados e os dispositivos não sejam devidamente instalados, operados e mantidos (manutenção periódica) (Carriço, 2023).

As opções são (Carriço, 2023):

- Criação de uma sectorização: Estabelecimento de zonas com pressão diferenciada (Zonas de Gestão da Pressão, ZGP) com recurso a operação de válvulas;
- Instalação de válvulas redutoras de pressão;
- Instalação de sobreprensoras que permitem elevar a pressão localmente e devem ser usadas bombas de velocidade variável para esta finalidade - maior flexibilidade na gestão de pressões e na resposta às variações de consumo;
- Criação de reservatórios e instalações elevatórias: escolha de períodos de bombeamento que não impliquem um aumento significativo das pressões nas redes e controlo dos níveis nos reservatórios que a minimizem as pressões elevadas.

Matematicamente, as fugas podem ser descritas pela lei de vazão dos orifícios (Alonso, et al., 2000), conforme Eq. 2.6:

$$q = C \times (p_1 - p_0)^\beta \rightarrow q = C \times p^\beta \quad (2.6)$$

Sendo:

$p_0 = p_{atm} = 0$;

$p = p_1$;

q – caudal através do orifício (l/s);

C – coeficiente do orifício dependente da forma e dimensões do orifício e das características do meio envolvente (l/s/m^β);

p_1 – pressão à entrada do orifício (m);

p_0 – pressão à saída do orifício (m), tipicamente assumida igual à pressão atmosférica (em termos de pressões relativas é nula);

β – expoente da pressão (-).

Vários investigadores modificaram a equação anterior, propondo diversos valores e fórmulas para C e β , (Jowitt & Xu, 1990; Vairavamoorthy & Lumbers, 1998; Alonso, et al., 2000).

O simulador do modelo EPANET 2.2 dispõe de dispositivos emissores associados aos nós. Os emissores descrevem as fugas através de orifícios com descarga direta para atmosfera, onde estes dispositivos são indicados para modelar consumos que dependam da pressão (sistemas com aspersores ou redes de rega, o caudal de combate a incêndio e o caudal de fugas em tubagens) e os coeficientes K e β devem ser convenientemente estimados (Carriço, 2023).

Os caudais de perdas/fuga em cada nó i para cada hora (Alonso, et al., 2000; Rossman, 2000), conforme Eq. 2.7:

$$Q_{fi} = K_{fi} \times p_i^\beta \quad (2.7)$$

Em que:

Q_{fi} – caudal de fuga no nó i (l/s);

K_{fi} – coeficiente de fuga no nó i , específico de cada nó (l/s/m ^{β});

p_i – pressão no nó i (m);

β – expoente da pressão (igual para toda a rede).

Na Figura 2.34 apresenta-se o coeficiente de fuga e expoente da pressão no EPANET.

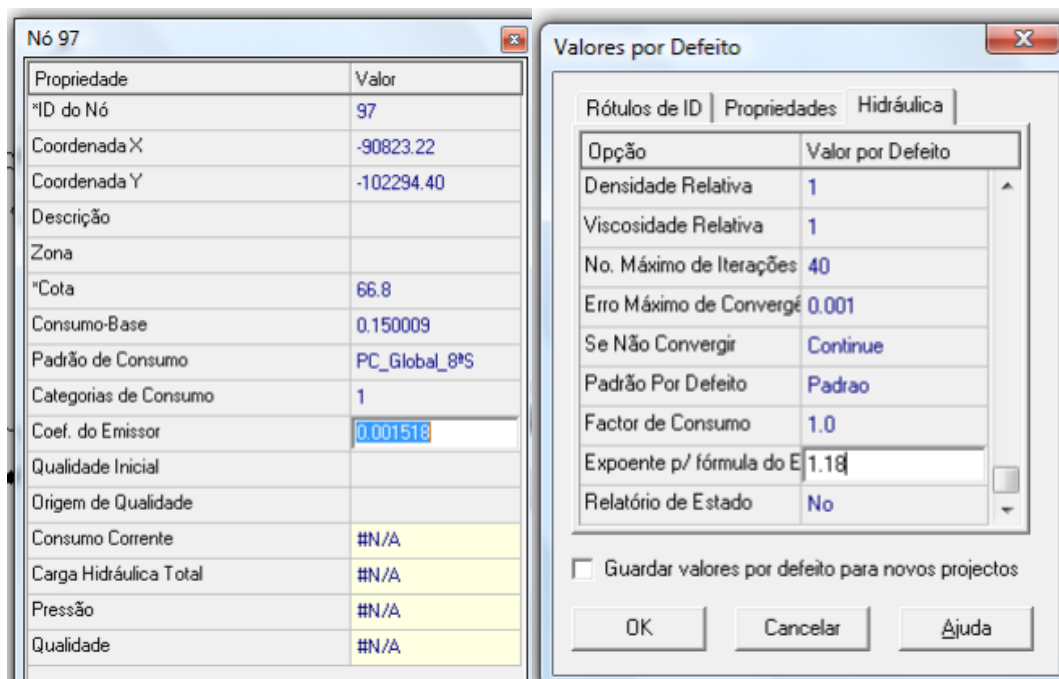


Figura 2.34 – Coeficiente de fuga e expoente da pressão no EPANET.

O coeficiente de fuga associado a cada nó (K_{fi}) é determinado pelo produto do coeficiente fixo de fuga (C), igual para toda a rede, pela semissoma do comprimento de todas as condutas

ligadas ao referido nó (Araújo, Murinello, Ramos, & Coelho, 2004) conforme Eq. 2.8, e Figura 2.35:

$$K_{fi} = C \times \sum_{j=1}^{M_i} \frac{L_{ji}}{2} \quad (2.8)$$

Em que:

K_{fi} – coeficiente de fuga do nó i ($l/s/m^{\beta}$);

C – coeficiente de vazão fixo de fuga que depende das características do sistema de distribuição, por exemplo, idade e estado de conservação das condutas, e propriedades do solo, valor da ordem de 10^{-5} $l/s/m/m^{\beta}$ (Jowitt & Xu, 1990; Araújo, Murinello, Ramos, & Coelho, 2004);

M_i – número de condutas ligadas ao nó i (-);

L_{ji} – comprimento de cada conduta j ligada ao troço i (m).

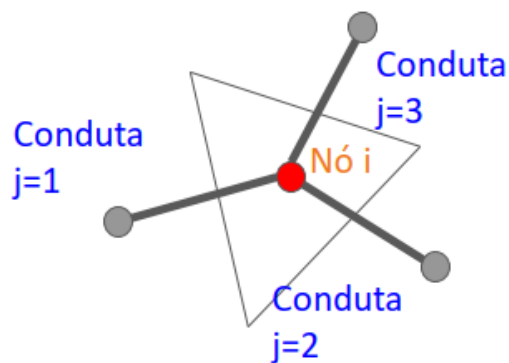


Figura 2.35 – Condutas j , ligadas ao nó i (Carriço, 2023).

2.10 Qualidade da água

2.10.1 Introdução

A perceção física dos sistemas de abastecimento de água, dos fenómenos químicos e biológicos que possam estar envolvidos, complementada com uma modelação computacional fiável, contribui de forma decisiva para uma adequada análise do funcionamento dos mesmos, potenciando as diferentes etapas do projeto, da execução e da exploração, nas vertentes económica, de segurança e de qualidade de serviço às comunidades (Sá Marques & Sousa, 2008).

A modelação da qualidade da água tem especial importância na proteção da saúde pública e, em questões económicas, uma vez que a água deverá ser distribuída aos consumidores com qualidade adequada, a custo mínimo (Sá Marques & Sousa, 2008).

2.10.2 Modelos de qualidade da água

Os modelos de qualidade da água servem para calcular o movimento ao longo dos troços e mistura nos nós de substâncias presentes na água (e.g., cloro residual), simular a transformação de substâncias não-conservativas ao longo do tempo, calcular o tempo de percurso (idade da água) e permitem rastrear a origem da água (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Os modelos de qualidade da água podem ser usados para (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Simulação – descrição dos processos que ocorrem nos sistemas (complemento da monitorização);
- Otimização de processos – procura de uma solução ideal para um problema de dimensionamento ou operação.

A advecção (transporte) ao longo dos troços pode ser modelado pelas equações do equilíbrio hidráulico e baseia-se na descrição completa de Q (caudal) e v (velocidade) ao longo do tempo, através do sistema (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006), como é possível observar na Figura 2.36.

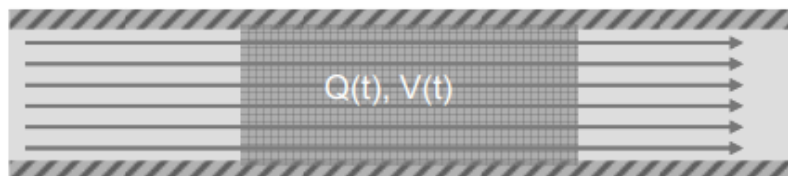


Figura 2.36 – Advecção ou transporte com o escoamento (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Relativamente à mistura que ocorre nos nós de junção e concentração nos troços que saem do nó, é igual à mistura completa das concentrações que entram, respeitando o princípio de conservação da massa (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006), como é possível observar na Figura 2.37.

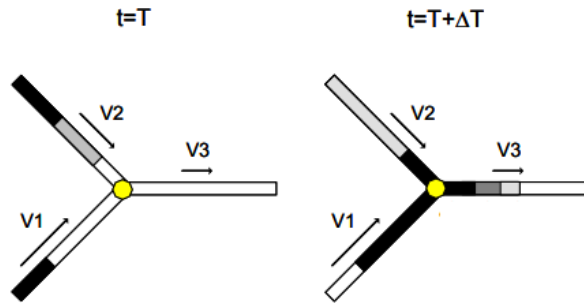


Figura 2.37 – Mistura completa nos nós (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

2.10.3 Processos modelados

As reações químicas no interior de uma conduta resultam da alteração da concentração do parâmetro ou substância ao longo do seu transporte e ao longo do tempo e podem ter sinal positivo (+) ou negativo (-), como é possível observar na Figura 2.38 (Carricho, 2023).

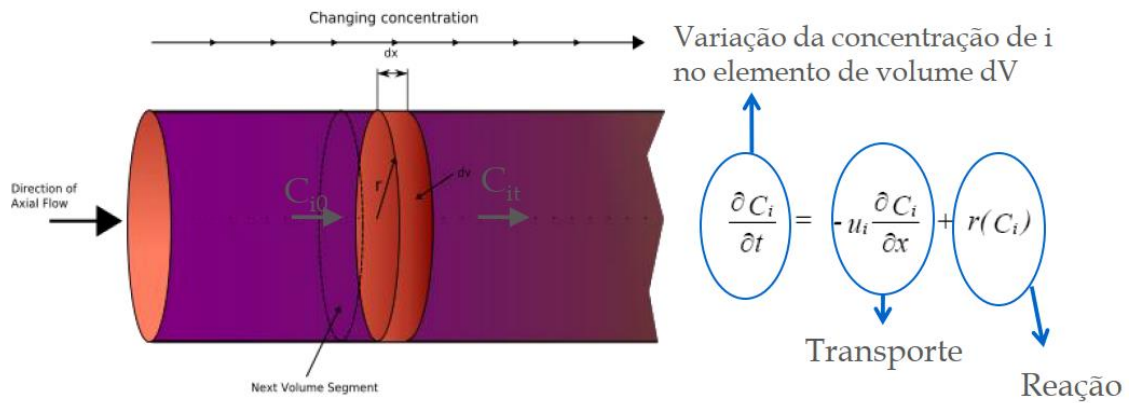


Figura 2.38 – Variação de concentração no interior da conduta (Carricho, 2023).

Por exemplo, o decaimento da concentração de cloro residual no seio do escoamento e formação de subprodutos devido a reação com a matéria orgânica presente na água (NOM) e o ferro da superfície interna da conduta (Fe), como é possível observar na Figura 2.39 (Rossman, 2000).

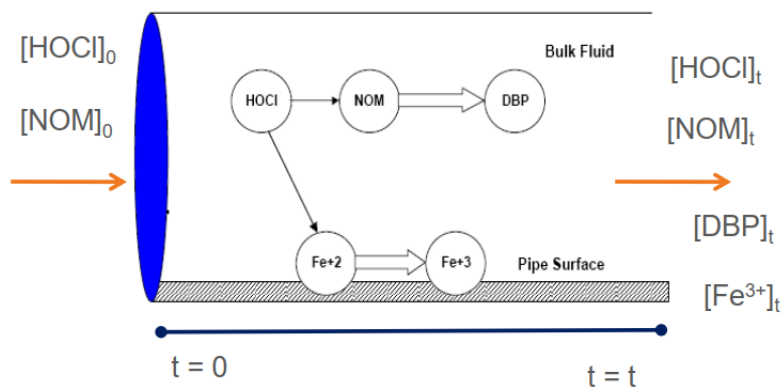


Figura 2.39 – Reações químicas no interior das condutas (Carricho, 2023).

2.10.4 Simplificação dos modelos

A simplificação dos modelos consiste na mistura completa nos nós, ausência de mistura/difusão longitudinal, parâmetros ou concentrações de substâncias em solução, simplificações dos modelos de reação química (modelos cinéticos) e simplificações do modelo hidráulico (Carriço, 2023).

Podem ser utilizados no planeamento de programas de amostragem, localização de estações de recloração e o respetivo doseamento, comparação de estratégias operacionais (e.g., com vista à minimização de tempos de percurso), previsão da propagação de contaminantes e estabelecimento de estratégias de lavagem (*flushing*) de condutas, previsão de potenciais problemas de degradação de qualidade (e.g., efeitos do armazenamento) e apoio à elaboração de Planos de Segurança da Água (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

2.10.5 Modelação de qualidade da água no EPANET

O EPANET tem capacidade para efetuar os seguintes tipos de análise de qualidade da água (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006):

- Decaimento de cloro residual;
- Formação de subprodutos da desinfecção;
- Mistura de água de origens distintas;
- Rastreio da propagação de contaminantes ao longo do sistema;
- Determinação do tempo de percurso (idade) da água.

O EPANET permite modelar reações químicas que ocorram no seio do escoamento (*bulk phase*) e/ou junto à parede das condutas (*wall phase*), como é possível observar na Figura 2.40 (Rossman, 2000).

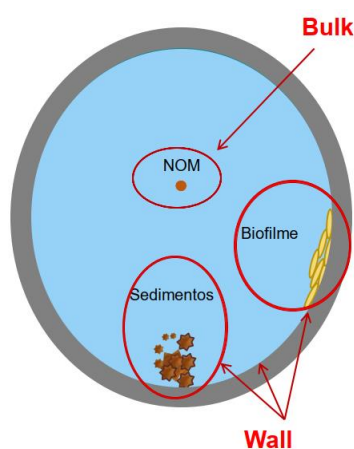


Figura 2.40 – Matéria orgânica natural da água no seio do escoamento e sedimentos e biofilme nas paredes das condutas (Carriço, 2023).

A reação no seio do escoamento (*Bulk*) é descrita pela Eq. 2.9 (Rossman, 2000):

$$\frac{dC}{dt} = k_b C^n \quad (2.9)$$

Em que:

C – concentração da substância a modelar (mg/L);

k_b – constante de velocidade de reação na água (*Global Bulk Coefficient*) ((mg/L)⁽¹⁻ⁿ⁾/dia);

n – ordem da reação na água (*Bulk Reaction Order*) (adimensional, n≥0);

t – tempo (dia).

Os parâmetros da equação (k_b e n) são característicos de cada água e determinam-se a partir de ensaios laboratoriais.

A reação na parede (*Wall*) é descrita pela Eq. 2.10 (Rossman, 2000):

$$\frac{dC}{dt} = \left(\frac{A}{V}\right) k_w C^n \quad (2.10)$$

Em que:

C – concentração da substância a modelar (mg/L);

A/V – área por unidade de volume (4/D= [m]);

k_w – constante de velocidade de reação na parede (*Global Wall Coefficient*) (m/dia);

n – ordem da reação na parede (*Wall Reaction Order*) (adimensional, n≥0);

t – tempo (dia).

k_w é normalmente calibrado nos simuladores de qualidade da água pela minimização da diferença entre as concentrações de cloro medidas e as estimadas.

Relativamente aos dados de qualidade, as opções disponíveis no EPANET são as que constam na Figura 2.41, selecionando no Browser ⇒ Data ⇒ Options ⇒ Quality.

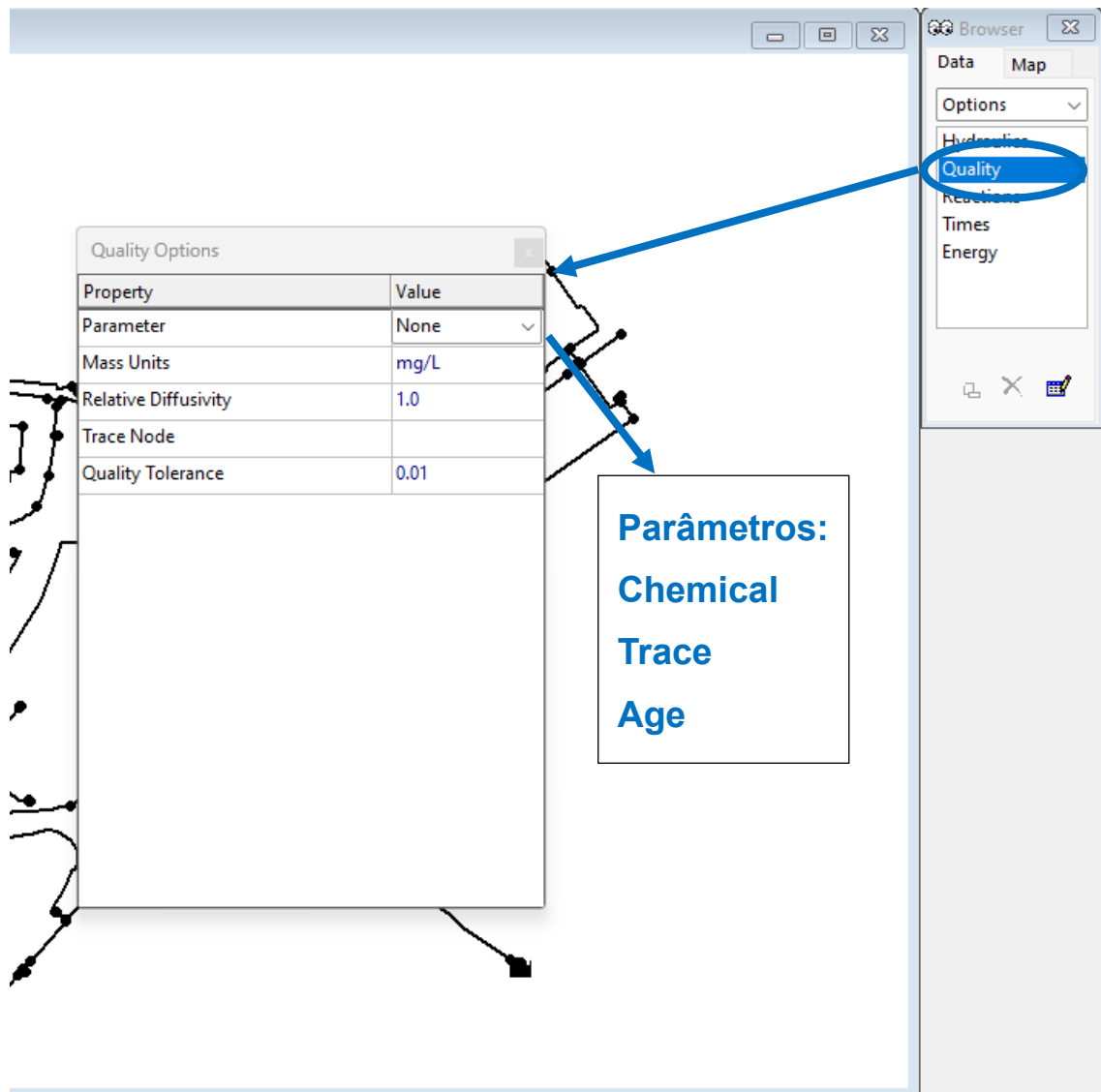


Figura 2.41 – Opções no EPANET 2.2 relativas à qualidade da água (Extraído do EPANET 2.2).

As opções de qualidade da água a selecionar, são (Carriço, 2023):

- Parâmetro a modelar: o transporte e o aumento ou decaimento da concentração de um composto químico reativo (e.g., cloro), o transporte de um composto não reativo (rastreamento de origem) e a idade da água;
- Unidades: mg/L ou µg/L;
- Difusividade relativa: razão entre a difusão molecular do químico a ser modelado e a do cloro a 20°C (0,000104 m²/dia). Aplica-se apenas quando se modela transferência de massa para a parede.

No nó de rastreamento insere-se a identificação do nó cujo caudal está a ser rastreado.

A tolerância de qualidade é a menor variação de qualidade da água que fará com que um novo segmento seja criado numa tubagem para a modelação de qualidade da água. Um valor típico é 0,01 para espécies químicas medidas em mg/L (Carriço, 2023).

Relativamente aos dados de reação, as opções disponíveis no EPANET são as que constam na Figura 2.42, selecionando no Browser ⇒ Data ⇒ Options ⇒ Reactions.

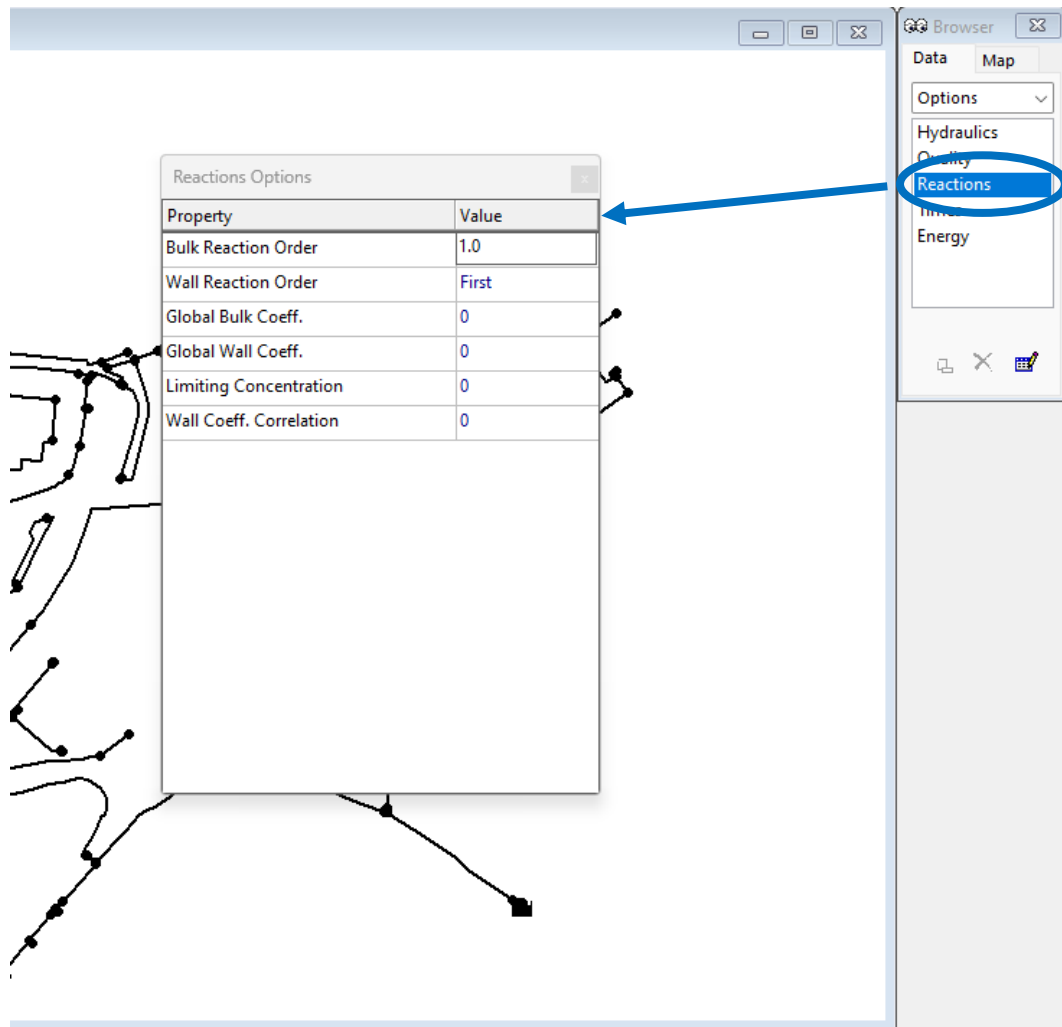


Figura 2.42 – Opções no EPANET 2.2 relativas às reações (Extraído do EPANET 2.2).

As opções de reação a selecionar, são (Carriço, 2023):

- Ordem da reação no seio do escoamento: o valor de n determinado pelos estudos laboratoriais, admite qualquer número (inteiro ou não) superior a zero e é frequente tomar o valor 1 em sistemas de distribuição;
- Coeficiente global de reação no seio do escoamento: é o valor da constante de velocidade de reação no seio do líquido (k_b) determinada nos ensaios laboratoriais e atribui-se um valor negativo para reações de decaimento. Tem como unidades $(\text{mg/L})^{(1-n)}/\text{dia}$;

- Ordem da reação junto à parede: permite seleccionar 1ª ordem ou ordem zero;
- Coeficiente global de parede: é o valor da constante de velocidade de reação na parede (k_w). Atribui-se um valor negativo para reações de decaimento. Tem como unidades $\text{kg/m}^2/\text{dia}$ para reações de ordem zero e m/dia para reações de primeira ordem;
- Concentração limite: concentração máxima ou mínima que o composto a modelar pode atingir. Pressupõe o uso de um modelo cinético de ordem n limitada. Atribui-se o valor zero quando não é aplicável;
- Correlação do coeficiente de parede: fator que relaciona o coeficiente de reação na parede com o coeficiente de rugosidade da fórmula de perda de carga. Atribui-se o valor zero quando não é aplicável.

Relativamente à origem da qualidade, as opções disponíveis no EPANET são as que constam na Figura 2.43, e são relativas à identificação do nó de origem da substância a modelar, seleccionando no Browser \Rightarrow Data \Rightarrow Reservoirs \Rightarrow Source Quality.

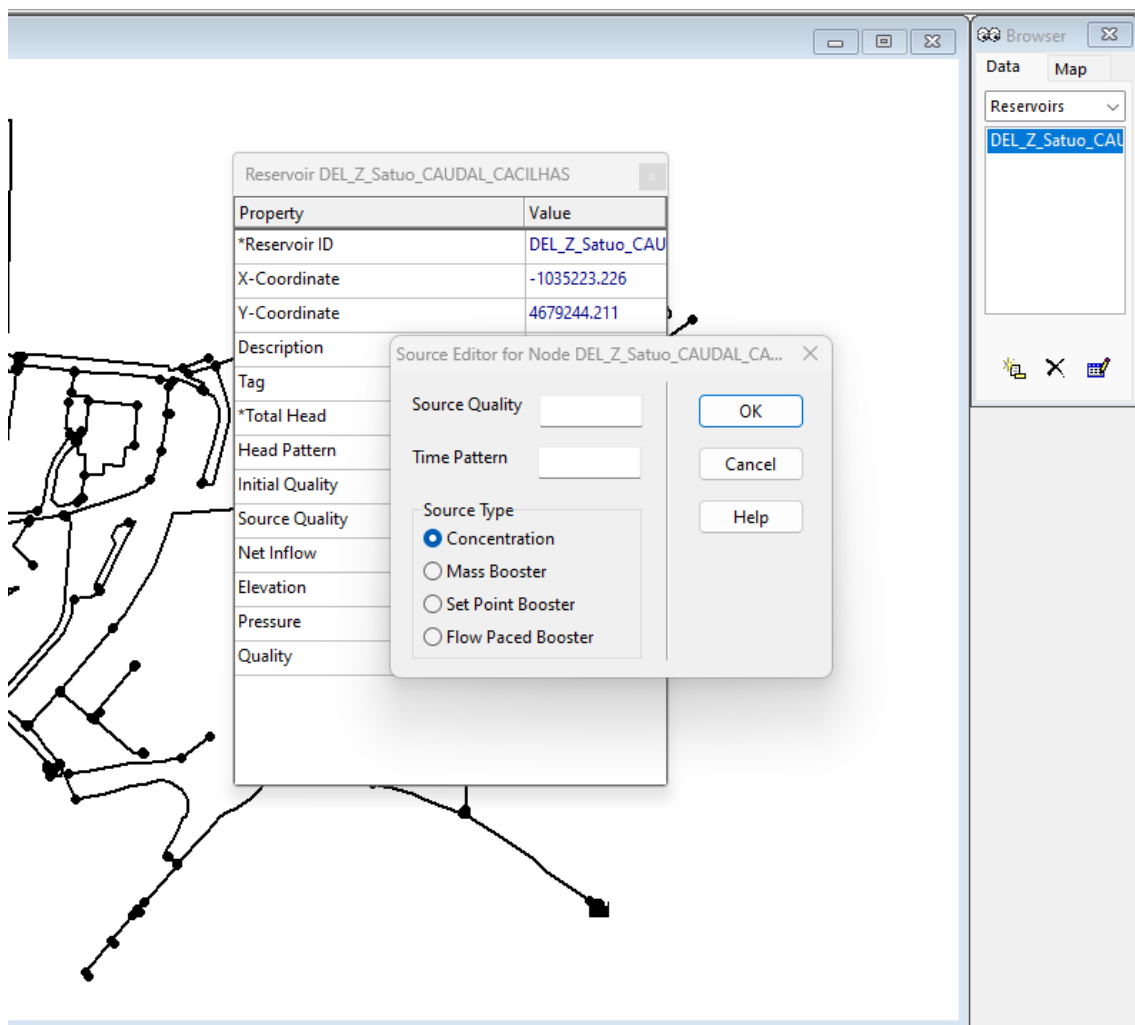


Figura 2.43 – Opções no EPANET 2.2 relativas à origem da qualidade (Extraído do EPANET 2.2).

As opções da origem da qualidade a seleccionar, são (Carriço, 2023):

- Qualidade Inicial: nível de qualidade da água no nó no início do período de simulação;
- Origem de Qualidade: qualidade da água que entra no sistema através do nó e concentração base média ou nominal (ou massa por minuto) da origem;
- Tipo de origem: concentração, ponto de reforço de massa, ponto de reforço de concentração e ponto de fixação de concentração.

Relativamente à calibração do modelo, as opções disponíveis no EPANET são as que constam na Figura 2.44, seleccionando em Project ⇒ Calibration Data ⇒ Quality ⇒ Seleccionar ficheiro de texto.

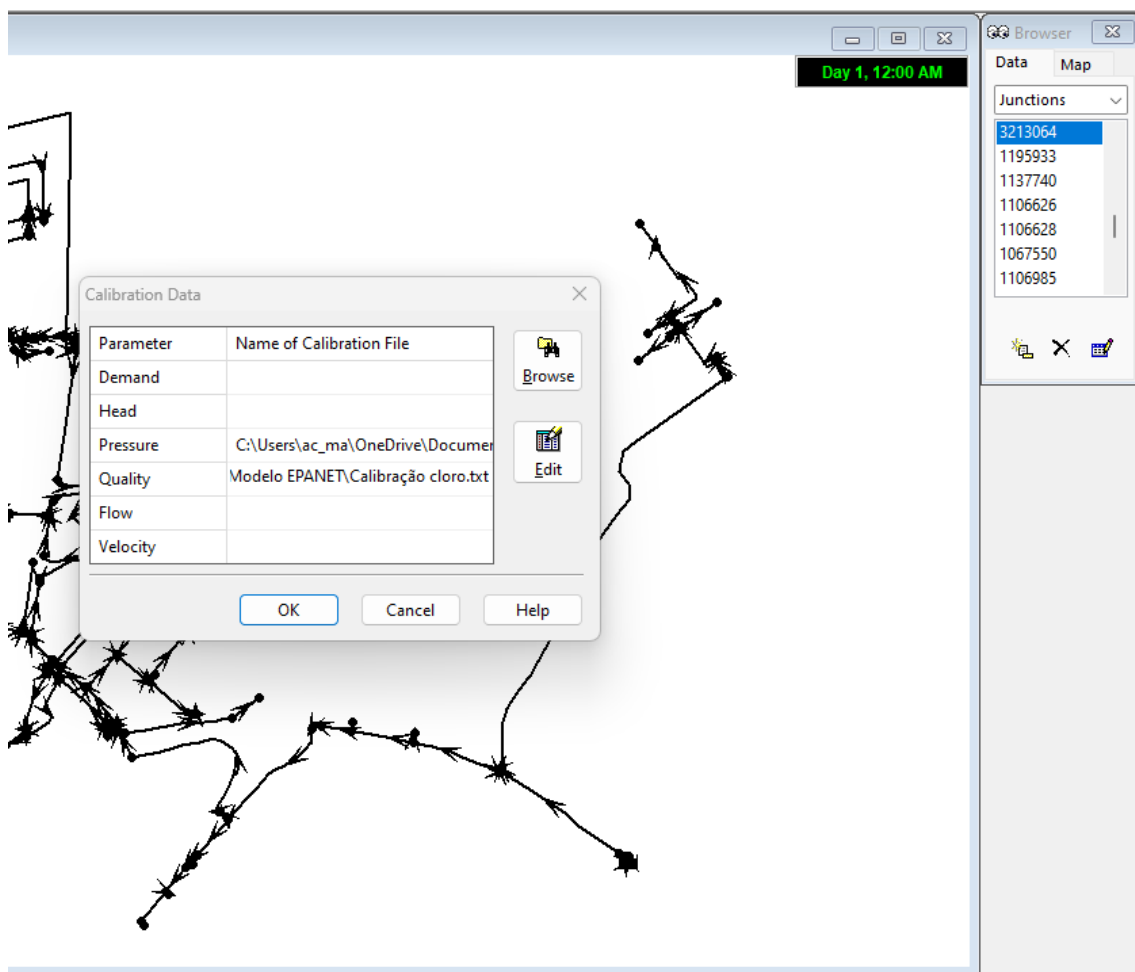


Figura 2.44 – Opções no EPANET 2.2 relativas à calibração do modelo (Extraído do EPANET 2.2).

É necessário criar um ficheiro de texto com os dados das medições efetuadas no sistema, com (Carriço, 2023):

- Identificação dos nós;
- Hora: minutos;
- Concentração.

Resumo dos requisitos:

O que é necessário para executar uma simulação de qualidade da água (componente reativo) no EPANET (Carriço, 2023):

- Modelo hidráulico devidamente calibrado;
- Parâmetros da reação (k_b , n);
- Concentração ou padrão de variação temporal do parâmetro a estudar no ponto de entrada no sistema;
- Medições do parâmetro em estudo em diversos pontos.

2.11 Síntese

No presente capítulo, efetuou-se o levantamento do estado da arte da modelação hidráulica, metodologia para desenvolvimento de modelos, planeamento do modelo, técnicas de simplificação dos modelos, calibração de modelos, definição de modos de operação de redes, definições sobre perdas de água que podem ocorrer em sistemas e, respetivos métodos para minimização das perdas e modelação da qualidade da água.

Os conhecimentos obtidos neste capítulo são fundamentais para o desenvolvimento dos capítulos seguintes, tais como, construção e calibração do modelo e análise hidráulica e diagnóstico do comportamento do sistema.

Esta dissertação teve como motivo o desenvolvimento dos conhecimentos em otimização hidráulica e da qualidade da água, mais concretamente na ZMC de Cacilhas, para posteriormente poder aplicar a todas as ZMC's dos SIMAS de Oeiras e Amadora, e assim, poder reduzir as perdas reais e, detetar e resolver problemas de qualidade da água.

3 Caso de estudo

3.1 Introdução

Dada a facilidade de aquisição de dados e informação da entidade gestora Serviços Intermunicipais de Água e Saneamento (SIMAS) de Oeiras e Amadora, o caso de estudo seria uma zona de medição e controlo (ZMC) desta entidade. Assim, em primeiro lugar, foi necessário identificar qual a ZMC a estudar, para isso, definiu-se um critério combinado com as seguintes questões:

- Qual a ZMC com mais roturas na rede de abastecimento?
- Em que tipo de material e porque se estão a dar essas roturas?
- Quais as consequências derivadas das roturas?
- As perdas são elevadas?

Na resposta a estas perguntas sobressaiu a ZMC de Cacilhas, porque:

- Foram identificadas várias roturas na rede de abastecimento, e não, como é mais habitual, em ramais;
- Essas roturas deram-se principalmente em condutas de fibrocimento e ferro galvanizado (materiais mais antigos), em que, no caso do fibrocimento, as condutas estavam a fissurar na horizontal (ao longo da conduta) e onde era necessário substituir por varas de 6m de PVC e que, por conseguinte, era necessário abrir uma grande extensão de vala e maior duração (tempo) para efetuar a reparação;
- Estavam a ficar muitos clientes afetados porque as válvulas encontravam-se obsoletas, isto quer dizer que, com incrustações internas devidas à oxidação do ferro e, por conseguinte, não vedavam em condições (originavam fugas de água), ou mesmo, inexistência de válvulas na proximidade da rotura (no arruamento da rotura) para conseguir efetuar as reparações necessárias. Concluindo, ficava uma grande área afetada por várias horas, com grande volume de perdas de água associado;
- Para além do mencionado anteriormente, devido às pressões excessivas e em não conformidade com o D.R. n.º 23/95 (MOPTC, 1995) e, ainda por cima, em material mais antigo (condutas, ramais e acessórios de rede), as fugas e perdas eram mais elevadas do que deveriam ser.

Assim, pelas razões apresentadas o caso de estudo recaiu sobre a ZMC de Cacilhas que se enquadra e caracteriza em seguida.

3.2 Enquadramento geográfico

A ZMC a estudar pertence ao subsistema de abastecimento a Cacilhas, que é uma localidade do Município de Oeiras pertencente à freguesia de Oeiras e São Julião da Barra, Paço de Arcos e Caxias. Situada na margem direita da ribeira da Laje, é delimitada a norte pela autoestrada A5 e limita a leste com a vila de Paço de Arcos, a sul com a Figueirinha e a oeste com a Estação Agronómica Nacional. A área em estudo compõe-se sobretudo de residências de baixa densidade construídas na década de 80 do século XX, bem como alguns núcleos habitacionais de maior densidade. Dentro dos seus limites incluem-se a Quinta da Laje, o Casal do Brejo e a Urbanização C.H.E.O..

Na Figura 3.1 apresenta-se o mapa do Concelho de Oeiras com a localização do caso de estudo (assinalado a vermelho).

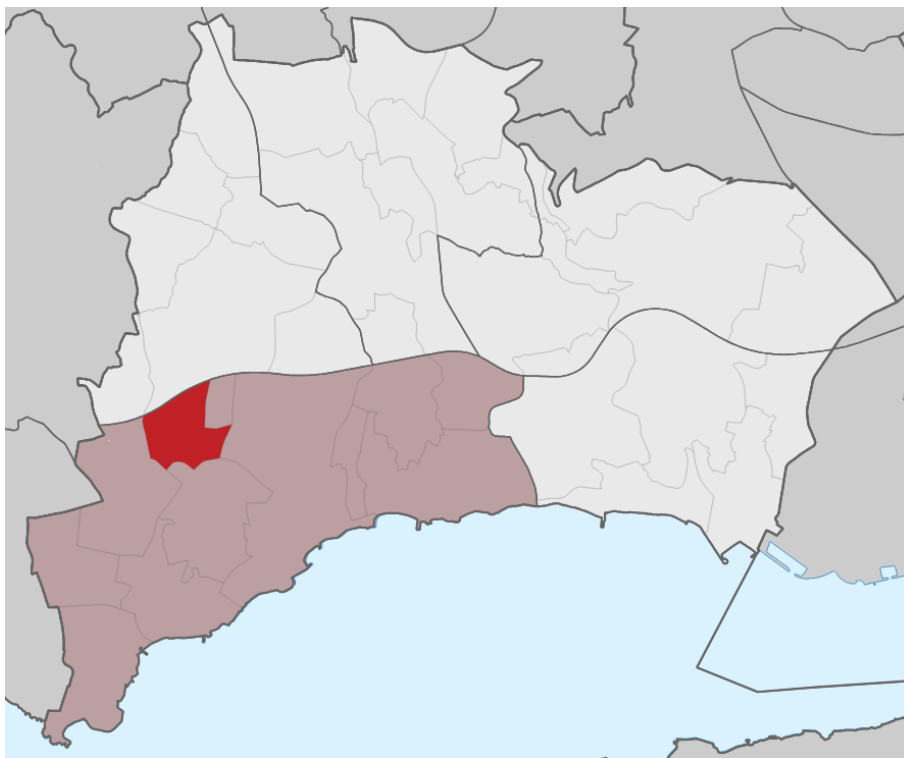


Figura 3.1 – Localização de Cacilhas, em Oeiras (imagem obtida via Wikipédia).

Na Figura 3.2 apresenta-se uma fotografia aérea do caso de estudo.

Na Figura 3.4 apresenta-se a gama de diâmetros e material da tubagem que constitui a rede de distribuição do subsistema TO – Torneiro.

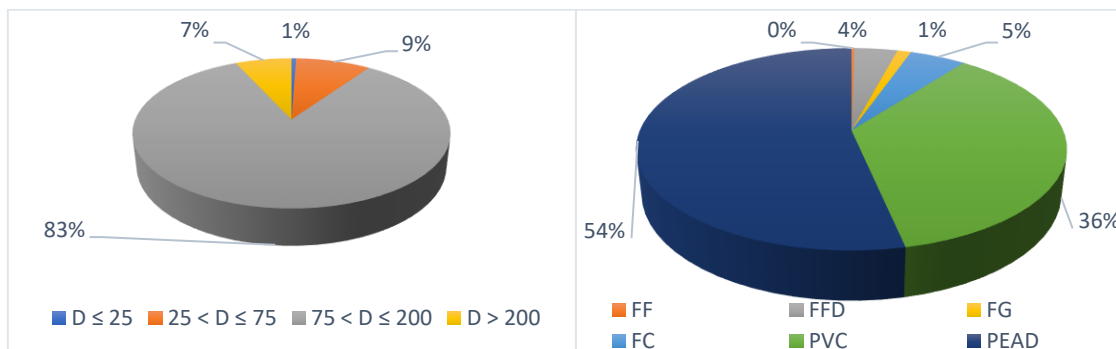


Figura 3.4 – Gama de diâmetros e material da tubagem que constitui a rede de distribuição do subsistema TO – Torneiro (dados de cadastro).

Essa mesma rede tem uma extensão de cerca de 84 km com tubagens com diâmetros nominais na sua maioria compreendidos entre 75 e 200 mm, essencialmente em PEAD (54%).

O subsistema TO – Torneiro serve 6 ZMC's, associadas a caudalímetros instalados, sendo estas as seguintes:

- 261 – Torneiro Augusto de Castro;
- 262 – Torneiro Cacilhas;
- 263 – Torneiro Fonte de Maio;
- 264 – Torneiro Laveiras/ Caxias;
- 265 – Torneiro Parque dos Poetas;
- 266 – Torneiro Quinta Fonte.

As 6 ZMC's forneceram um volume anual de água, em 2022, de 1 844 420 m³, resultando num caudal médio diário de 5 053 m³/dia. Na Figura 3.5 apresenta-se o exemplo de uma curva de consumos do subsistema TO – Torneiro.

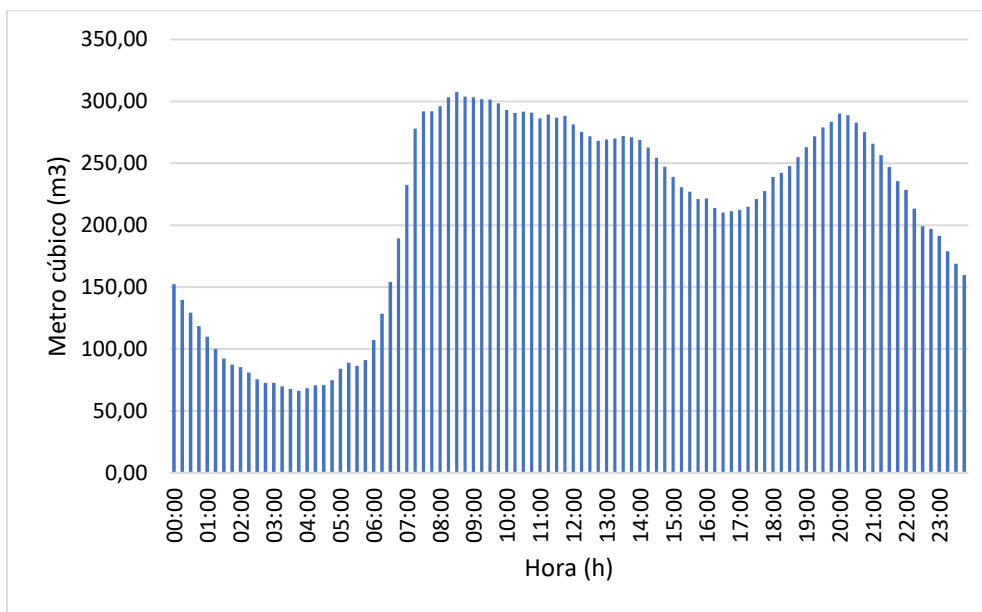


Figura 3.5 – Curva de consumos do subsistema TO – Torneiro (dados de cadastro).

A rede de abastecimento tem um histórico de 38 roturas detetadas no ano de 2019 e 11 roturas no ano de 2022.

Ao longo da rede de distribuição, estão identificados 106 clientes sensíveis (definidos pelos SIMAS), sendo que 76 são referentes à componente de qualidade da água e 30 à componente de quantidade.

A presente dissertação irá incidir sobre a **ZMC 262 – Torneiro Cacilhas**, esta tinha uma extensão total de rede de cerca de 10,7 km que abastecia 811 clientes (cerca de 1500 habitantes), o que corresponde aproximadamente a 5% do subsistema. Com tubagens de diâmetros nominais na sua maioria compreendido entre 75 e 200 mm, essencialmente com material de PEAD (54%) no ano de 2019, como é possível verificar no Quadro 3.1, Quadro 3.2, Figura 3.6 e Figura 3.7.

Quadro 3.1 – Gama de diâmetros da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).

Diâmetro	Comprimento de tubagem (m)	Percentagem (%)
≤25	232,3	2
25<D≤75	1602,5	15
75<D≤200	8862,7	83
Total	10697,5	100

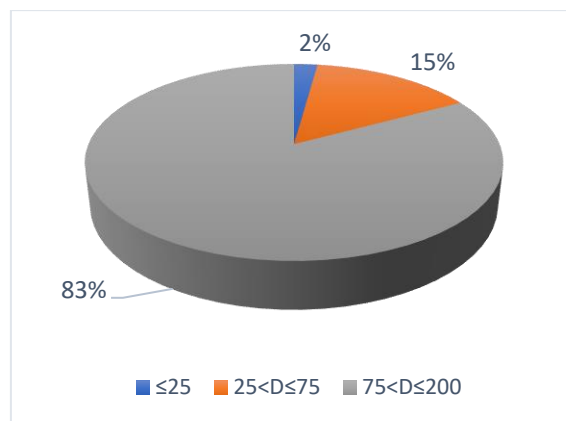


Figura 3.6 – Gama de diâmetros da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).

Quadro 3.2 – Gama de material da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).

Material	Comprimento de tubagem (m)	Percentagem (%)
FC	232,3	2
FFD	108,9	1
FG	192	2
PEAD	5777,2	54
PVC	4387,1	41
Total	10697,5	100

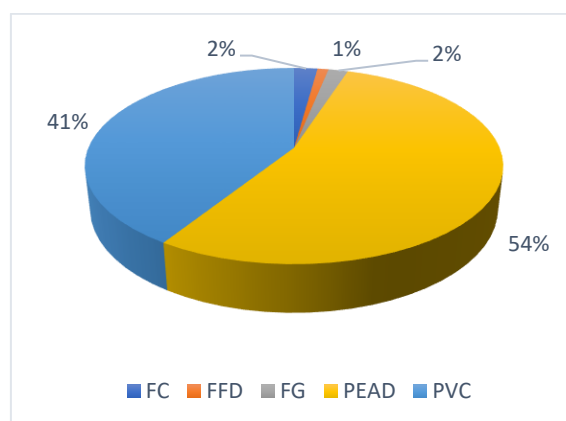


Figura 3.7 – Gama de material da tubagem que constituíam a rede de distribuição da ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).

A rede de abastecimento tem um histórico de seis avarias registadas no ano de 2019, cujas intervenções vêm especificadas no Quadro 3.3.

Quadro 3.3 – Tipo de avarias na ZMC de Cacilhas, no ano de 2019 (dados de cadastro).

Avaria	Tipo de avarias
1	Reparação de rotura na rede
2	Reparação de rotura na rede p/ empreiteiro *
3	Reparação de rotura na rede p/ empreiteiro *
4	Substituição de válvula de seccionamento na rede p/ empreiteiro *
5	Reparação de rotura na rede p/ empreiteiro *
6	Reparação de rotura na rede

*Reparado por empreiteiro ao serviço dos SIMAS.

Na Figura 3.8 apresenta-se um mapa da rede de abastecimento de água da ZMC 262 – Torneiro Cacilhas, em estudo.

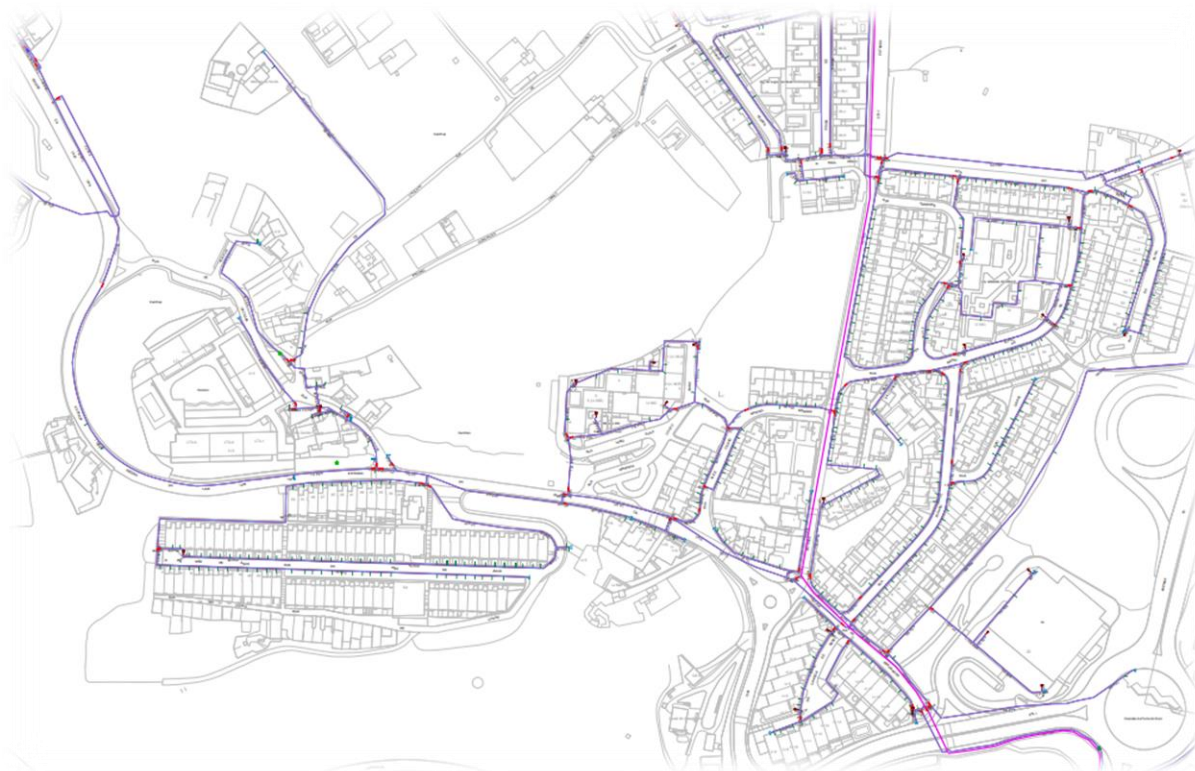


Figura 3.8 – Imagem SIG de um mapa da rede de abastecimento de água do caso de estudo (Extraído do WebSIG).

4 Construção e Calibração do Modelo

4.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo efetuar a construção de dois modelos (modelo de 2019 e modelo de 2022), validação de parâmetros dos modelos, implementação do modelo base e calibração do modelo hidráulico da ZMC de Cacilhas, em Oeiras.

Apresenta-se também a abordagem para extrair, implementar a solução-base e calibrar o modelo hidráulico da rede de distribuição de água da ZMC de Cacilhas.

A ZMC de Cacilhas encontra-se identificada no Capítulo 3 (Caso de estudo) e os usos preferenciais e prioritários vão ser estudar o comportamento hidráulico do sistema, como vai ser possível verificar no Capítulo 5 (Análise hidráulica e diagnóstico do comportamento do sistema).

4.2 Construção do modelo

O SIMAS Oeiras e Amadora possuem um Sistema de Informação Geográfica (SIG) que permite a exportação do modelo hidráulico, sendo que este modelo mais antigo carece de alguma validação. Existe uma outra ferramenta, o Baseform, que permite às entidades gestoras centralizar o máximo de informação para se conseguir uma gestão mais eficiente dos seus sistemas de abastecimento de água, e que permite a exportação de um modelo mais atualizado.

Para exportar um modelo através do SIG é necessário aceder ao programa G/InterAqua e criar um GeoWorkspace, selecionando File ⇒ New ⇒ Escrever o nome do ficheiro, como é possível observar na Figura 4.1.

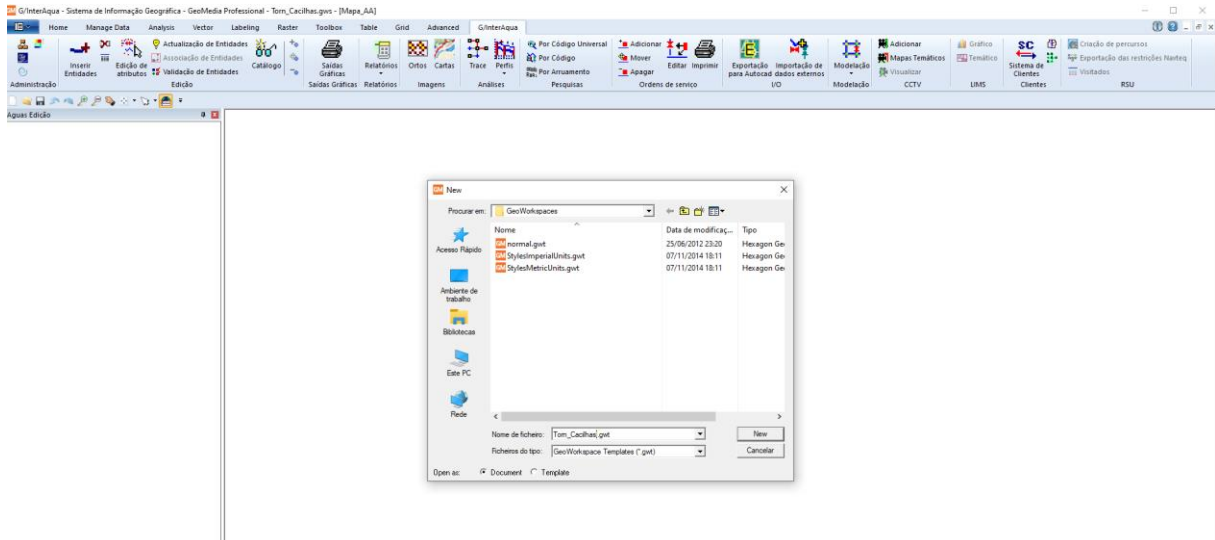


Figura 4.1 – Criar GeoWorkspace (Obtido do G/InterAqua).

Para criar um modelo hidráulico em EPANET é necessário selecionar cinco elementos do SIG, tais como, tubagens, válvulas, válvulas redutoras de pressão, nós e juntas cegas.

Em seguida é necessário escolher os elementos da ZMC de Cacilhas, selecionando Analysis ⇒ Attribute Query ⇒ Selected features in ⇒ Filter ⇒ Query name (escrever nome da Query), como é possível observar na Figura 4.2 até à 4.4.

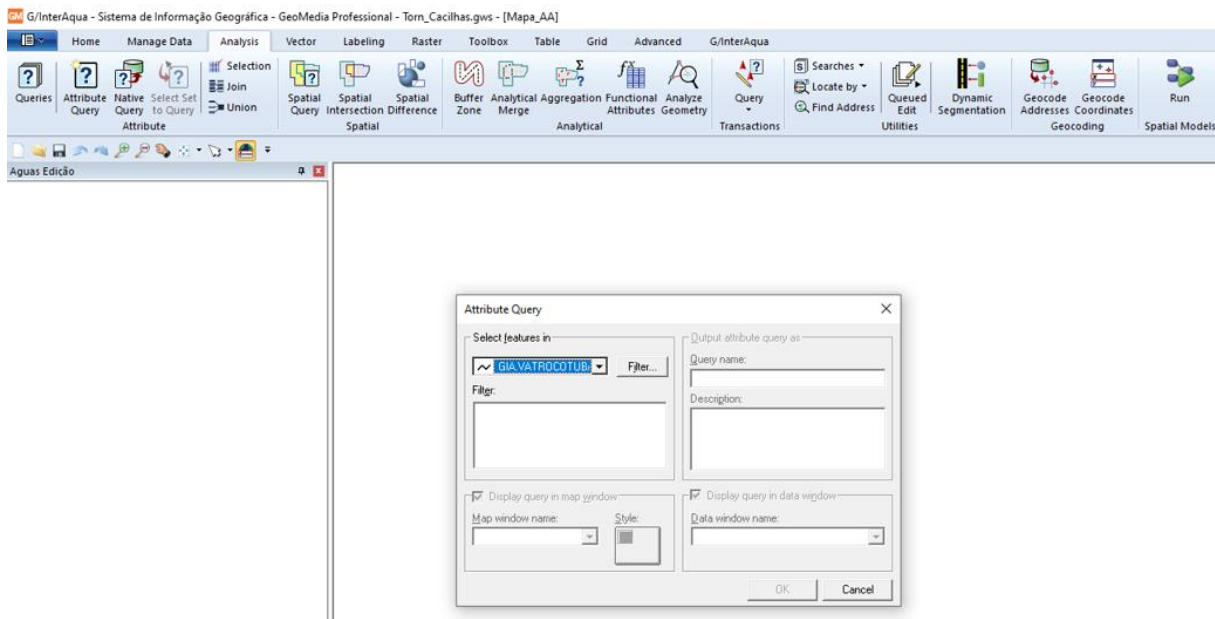


Figura 4.2 – Selecionar elemento (Obtido do G/InterAqua).

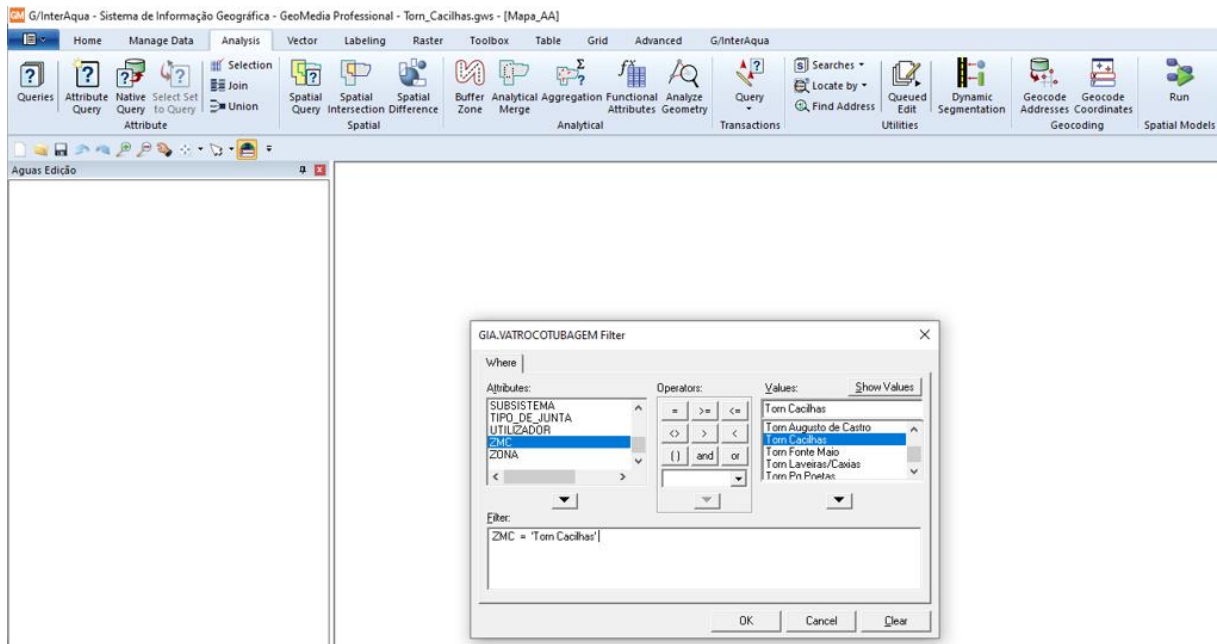


Figura 4.3 – Selecionar ZMC (Obtido do G/InterAqua).

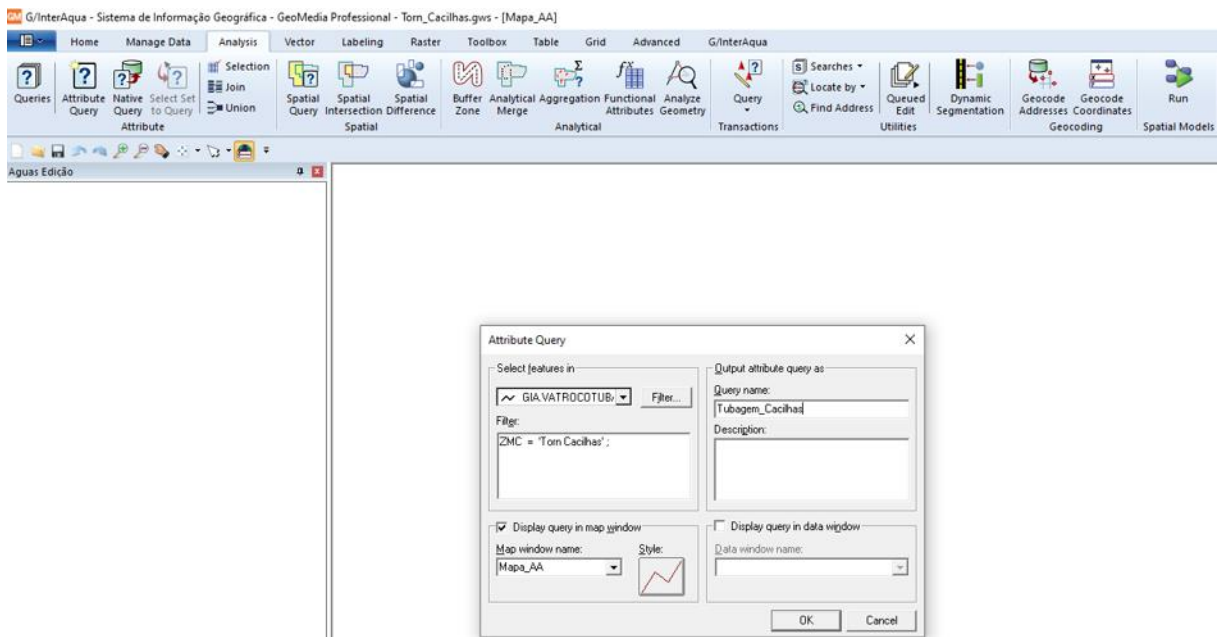


Figura 4.4 – Escrever nome da Query (Obtido do G/InterAqua).

Com os passos dados anteriormente obtemos o “esqueleto” da ZMC de Cacilhas, como é possível observar na Figura 4.5 e, repete-se o processo para todos os restantes elementos, até obtermos o sistema completo, como é possível observar na Figura 4.6.

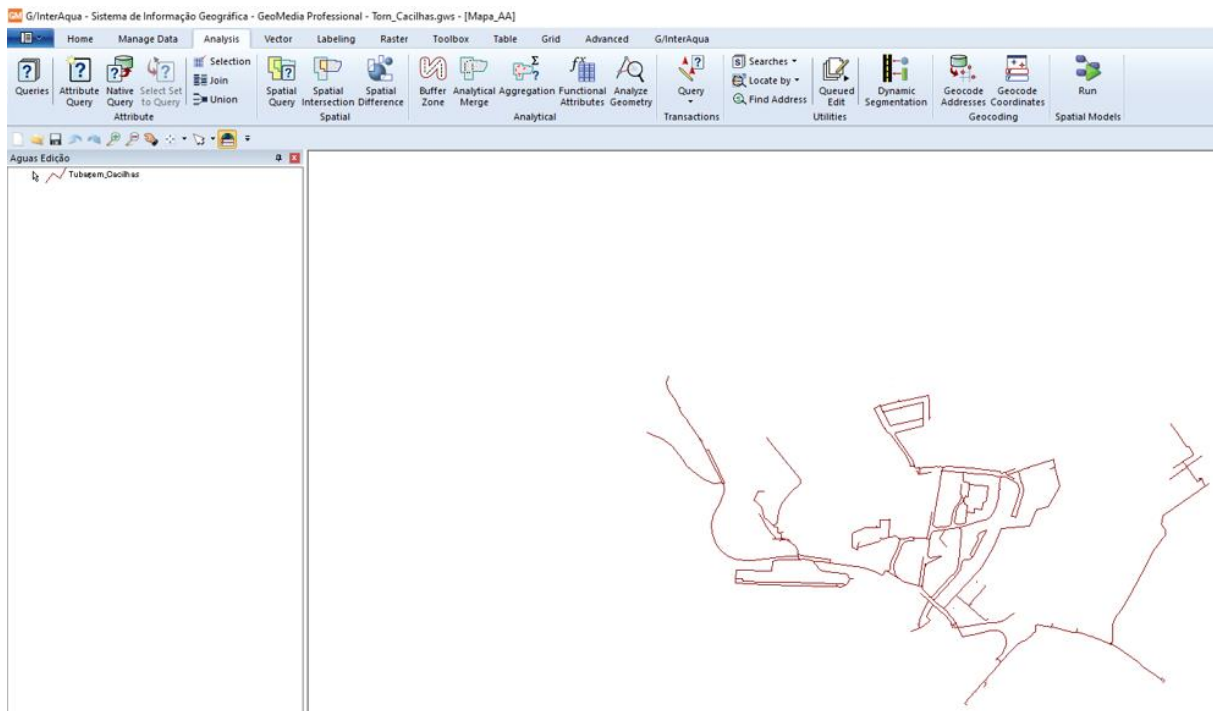


Figura 4.5 – “Esqueleto” da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).

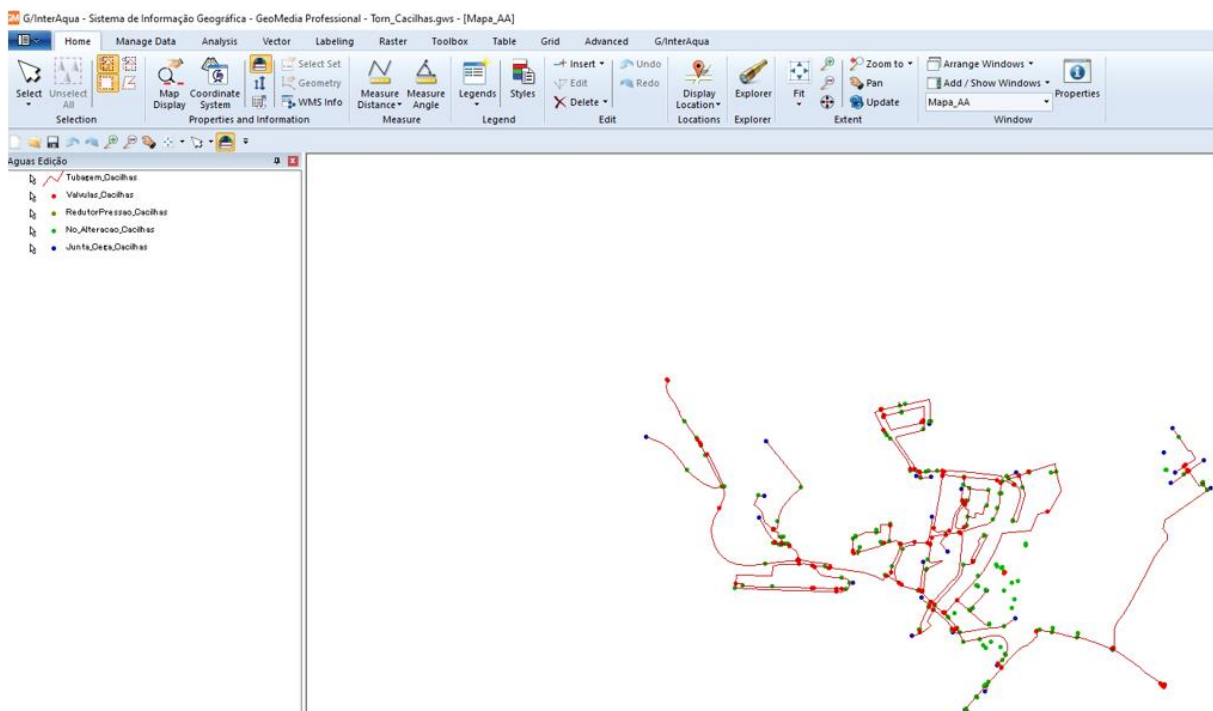


Figura 4.6 – Sistema de abastecimento da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).

O passo seguinte passa por distribuir os consumos pelos nós (distribuição automática de consumos), para isso é necessário selecionar em Distribuição de consumos por nó ⇒ Tipo de consumo (Todos) ⇒ Opções (Totalmente dentro ou que toquem) ⇒ Universo de distribuição (Desenhar área), e desenha-se uma área à volta do sistema de distribuição para carregamento dos consumos nos nós, como é possível observar na Figura 4.7 e Figura 4.8.

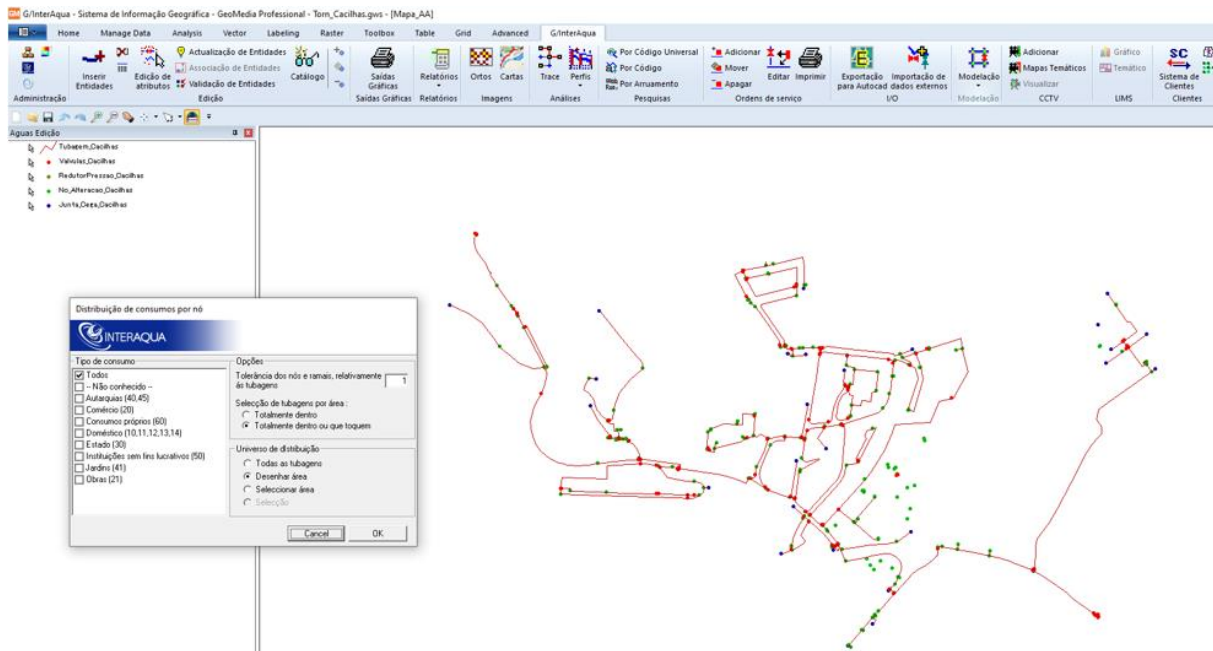


Figura 4.7 – Distribuição dos consumos pelos nós (Obtido do G/InterAqua).

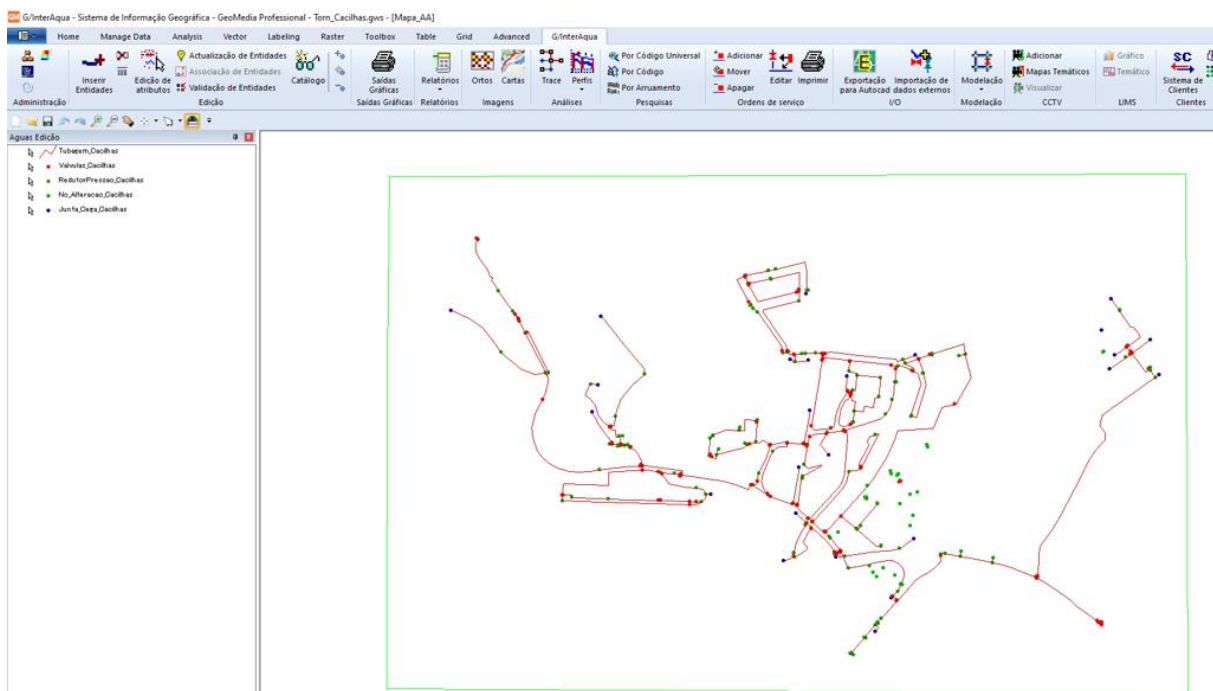


Figura 4.8 – Desenhar área à volta do sistema de distribuição (Obtido do G/InterAqua).

Por último, vamos gerar o modelo da ZMC de Cacilhas para leitura com o programa EPANET 2.2 (gerar ficheiro INP), selecionando em Modelação ⇒ Modelação Matemática ⇒ Modo de seleção (Desenhar área) ⇒ Ficheiro de Saída (dar nome ao ficheiro INP e selecionar pasta) ⇒ Gerar, como é possível observar na Figura 4.9. Por fim, aparece uma mensagem no ecrã a dizer “Operação concluída”.

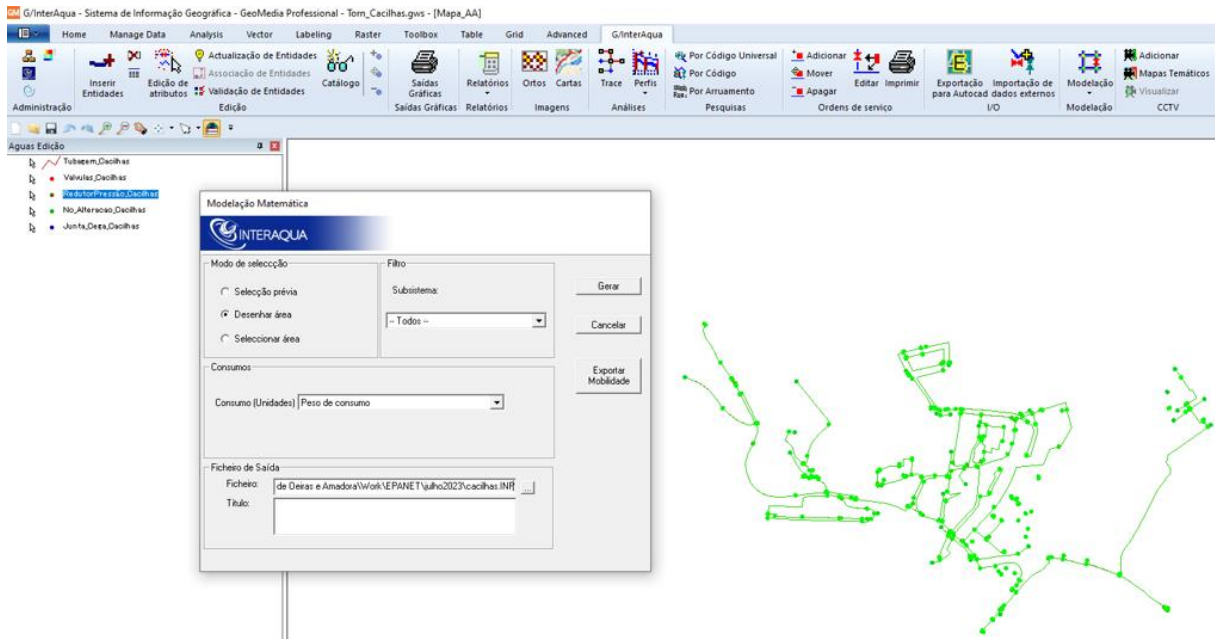


Figura 4.9 – Gerar o modelo da ZMC de Cacilhas (Obtido do G/InterAqua).

No caso do programa Baseform, é um pouco mais simples, para exportar um modelo é necessário aceder ao programa e, em seguida efetuar os seguintes passos, selecionando em Ferramentas ⇒ Modelos de rede ⇒ Torn Cacilhas.inp ⇒ Exportar ⇒ INP de Epanet, como é possível observar na Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12.

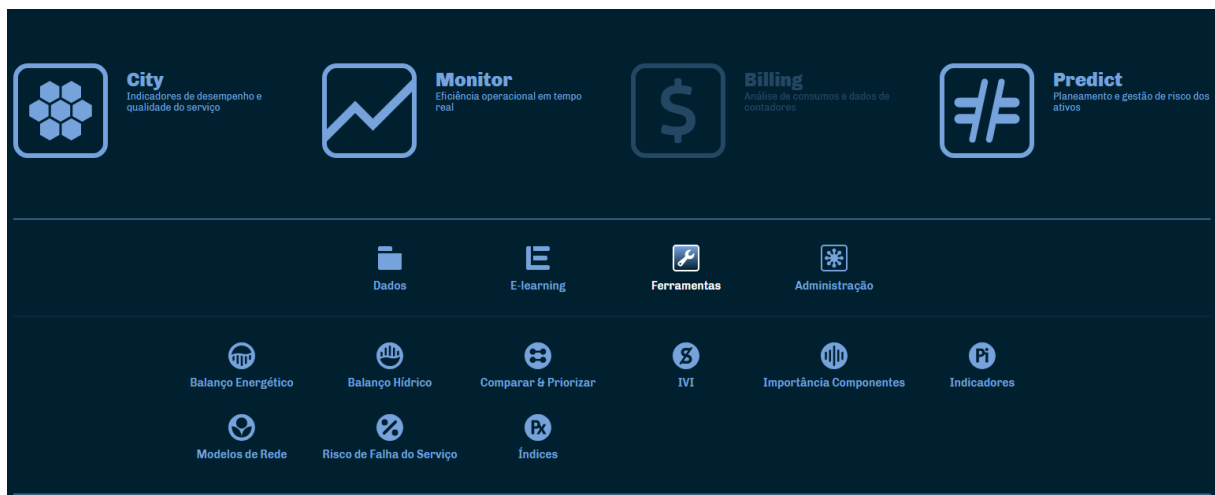


Figura 4.10 – Selecionar ferramentas e modelos de rede (Obtido do Baseform).

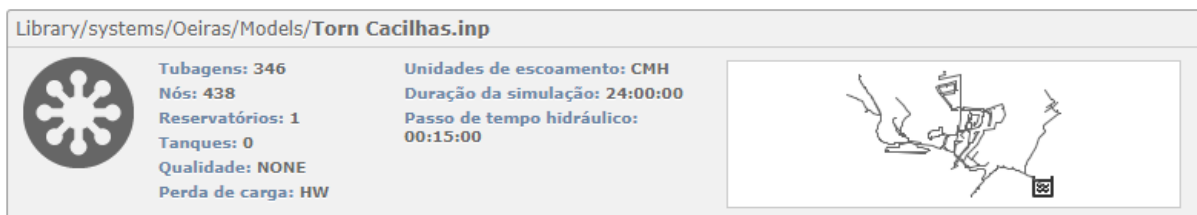


Figura 4.11 – Selecionar Torn Cacilhas.inp (Obtido do Baseform).

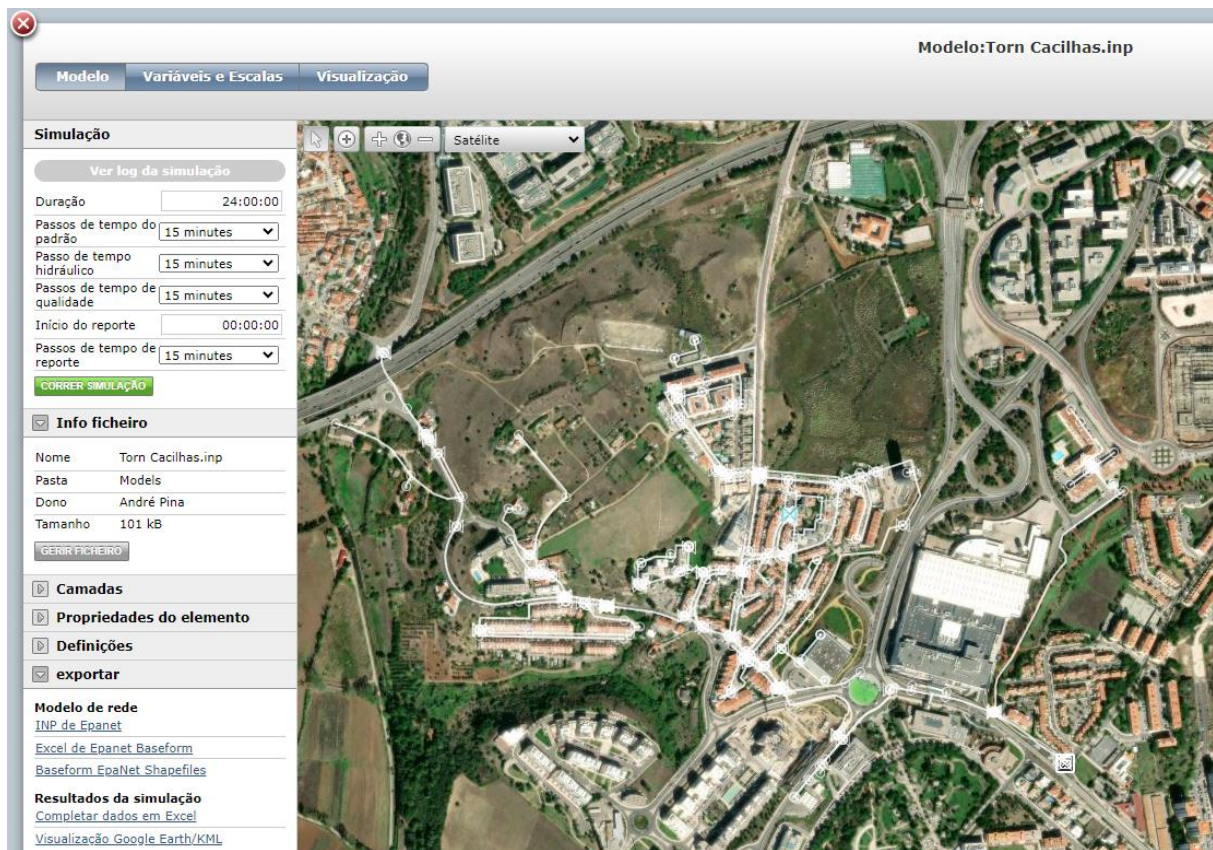


Figura 4.12 – Exportar ficheiro INP (Obtido do Baseform).

Para se poder verificar se existiam erros de cadastro (e.g. diâmetros, materiais de condutas, etc.) foi necessário efetuar um levantamento de campo e, em seguida, introduzir as devidas alterações ao cadastro e modelo exportado, como é possível verificar, e.g., nas Figura 4.13 e Figura 4.14.

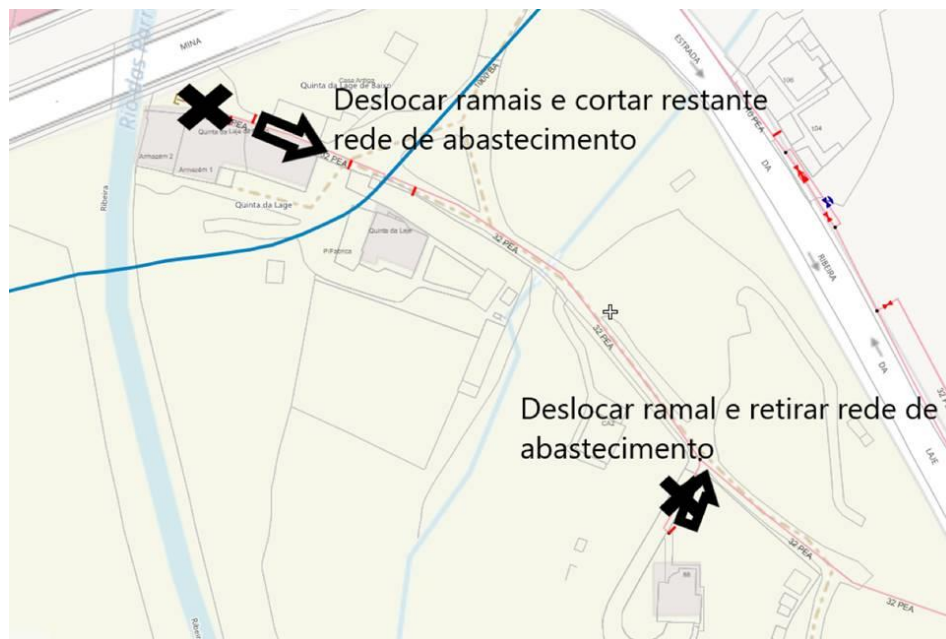


Figura 4.13 – Exemplo de alteração de cadastro efetuado (Extraído do WebSIG).



Figura 4.14 – Exemplo de alteração de cadastro efetuado (Extraído do WebSIG).

Também foi necessário efetuar um levantamento de dados de faturação, através do WebSIG (o programa está ligado ao sistema de clientes e é possível saber o consumo de cada cliente, como é possível verificar na Figura 4.15), e operacionais, que também é possível através do WebSIG (e.g. indicação de válvulas fechadas como é possível verificar na Figura 4.16, localização de reservatórios como é possível verificar na Figura 4.17, etc.).

Identificação	Ramal - água	Localização	Intervenção:	Multimédia	Agu. Mediçã	Ramal Aquat	Clientes ativ	Contadores
Calibre	Nº do Contador	Nº de fabrico	Ano do Contad...	Data de instal...	Grupo contador	Estimativa	Data de leitura	
15	00000299909	5010903	2019	2020-05-29	116	9	2024/02/29	

Figura 4.15 – Exemplo de verificação de consumo de um determinado cliente (Extraído do WebSIG).

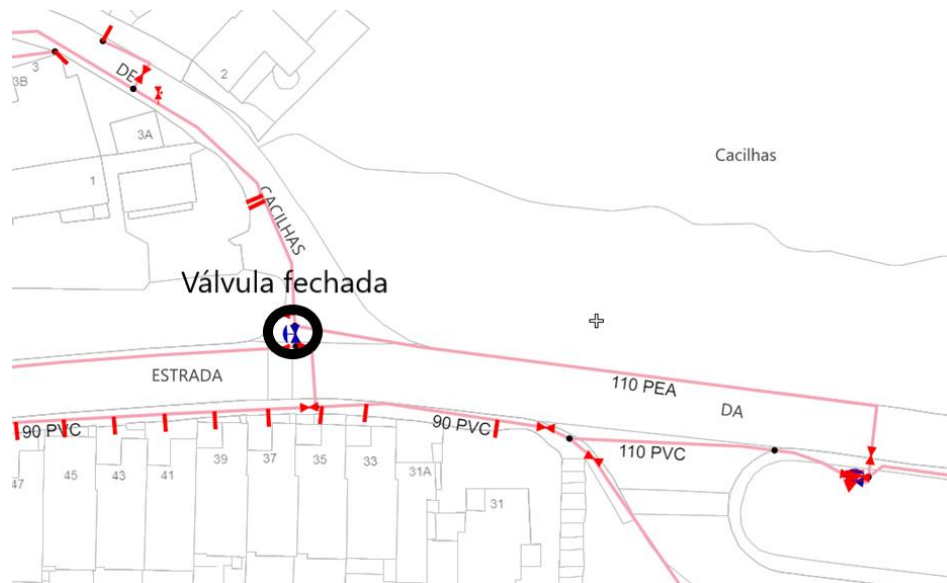


Figura 4.16 – Indicação de válvula fechada de patamares de pressão independentes (Extraído do WebSIG).

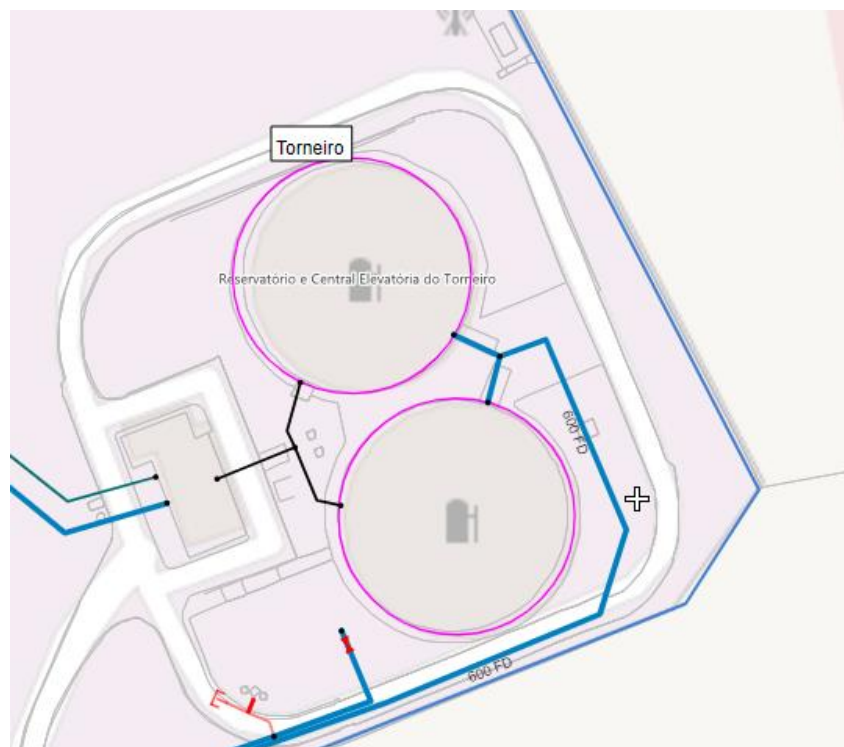


Figura 4.17 – Localização de reservatório (Extraído do WebSIG).

O sistema de convenções a adotar e as opções básicas de configuração do modelo são as que vêm representadas na seguinte Figura 4.18.

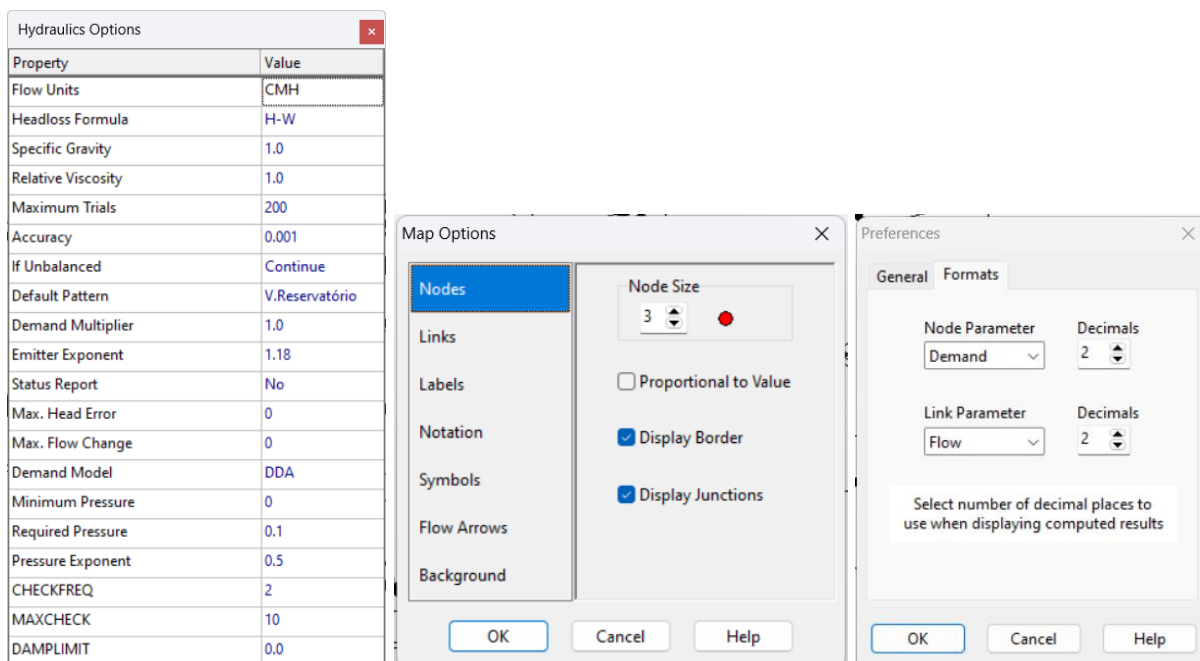


Figura 4.18 – Opções no EPANET 2.2 relativas à hidráulica, mapa e preferências (Extraído do EPANET 2.2).

O grupo de trabalho para desenvolvimento dos modelos foi maioritariamente constituído pela Divisão de Água de Oeiras, Divisão de Controlo de Infraestruturas e Divisão de Controlo da Qualidade da Água dos SIMAS de Oeiras e Amadora.

4.3 Validação de parâmetros do modelo

4.3.1 Descrição física do sistema

O modelo é constituído por condutas, nós, reservatório, válvulas e outros elementos físicos, como é possível observar na Figura 4.19.

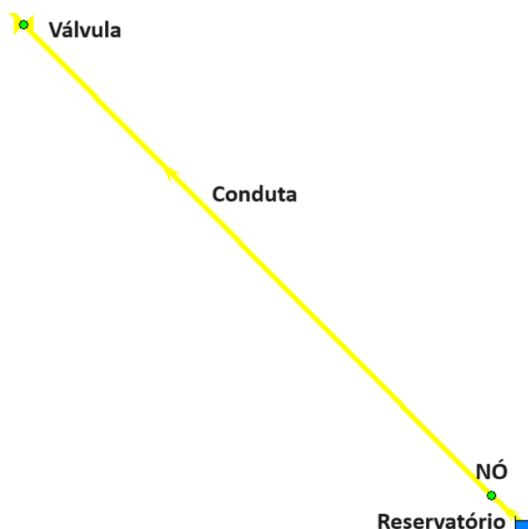


Figura 4.19 – Exemplo de condutas, nós, reservatório e válvula (Extraído do EPANET 2.2).

4.3.2 Consumos

Os consumos-base e padrão de consumo foram inseridos nos nós, como é possível observar na Figura 4.20. Sendo o padrão de consumo a variação periódica dos consumos nos nós ao longo do tempo.

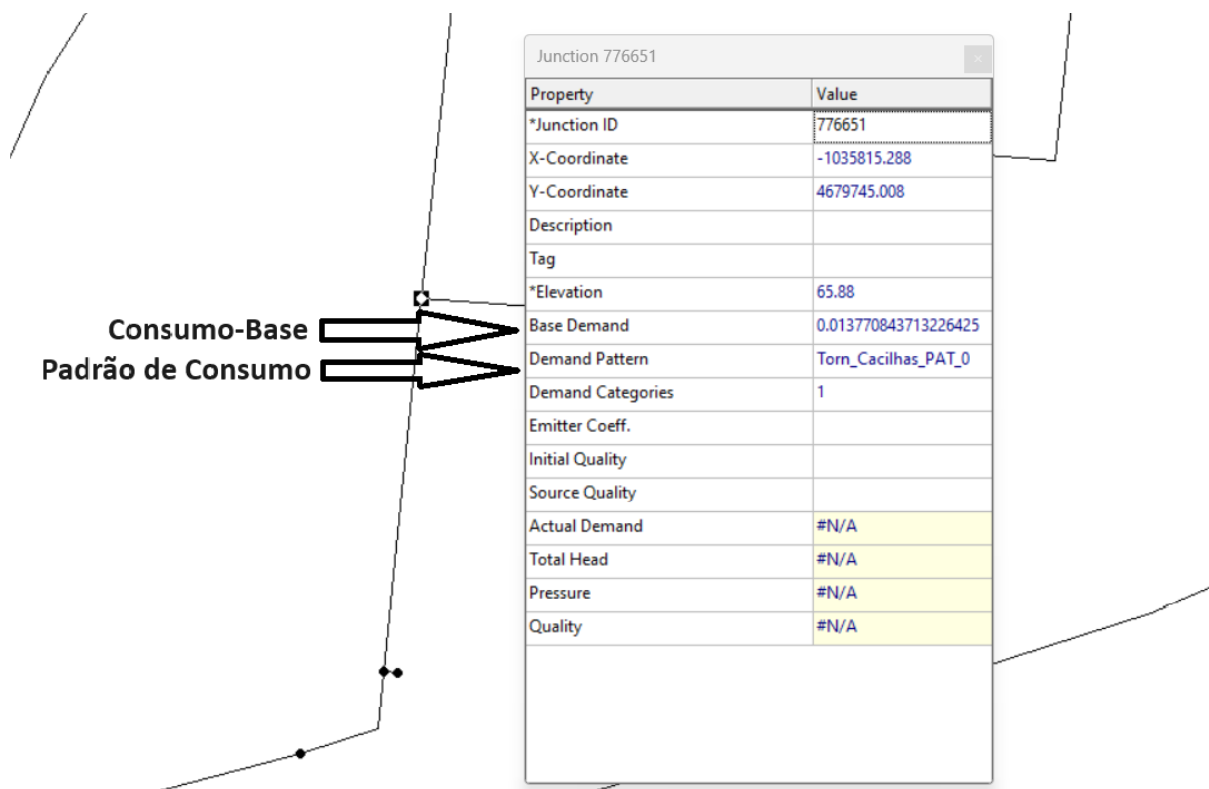


Figura 4.20 – Consumo-Base e Padrão de Consumo num Nó (Extraído do EPANET 2.2).

4.3.3 Configuração de VRP

Para configurar a VRP e definir a zona abrangida pelo patamar de pressão da VRP, foi necessário efetuar dois passos:

- O primeiro passo passou por definir a pressão a jusante da válvula redutora de pressão, como é possível observar na Figura 4.21, onde foi necessário definir que iria ter uma pressão a jusante de 25 m.c.a..
- O segundo passo passou por definir os patamares de pressão independentes, tendo ficado, acima da válvula fechada a pressão elevada e abaixo a pressão baixa, como é possível observar na Figura 4.22.

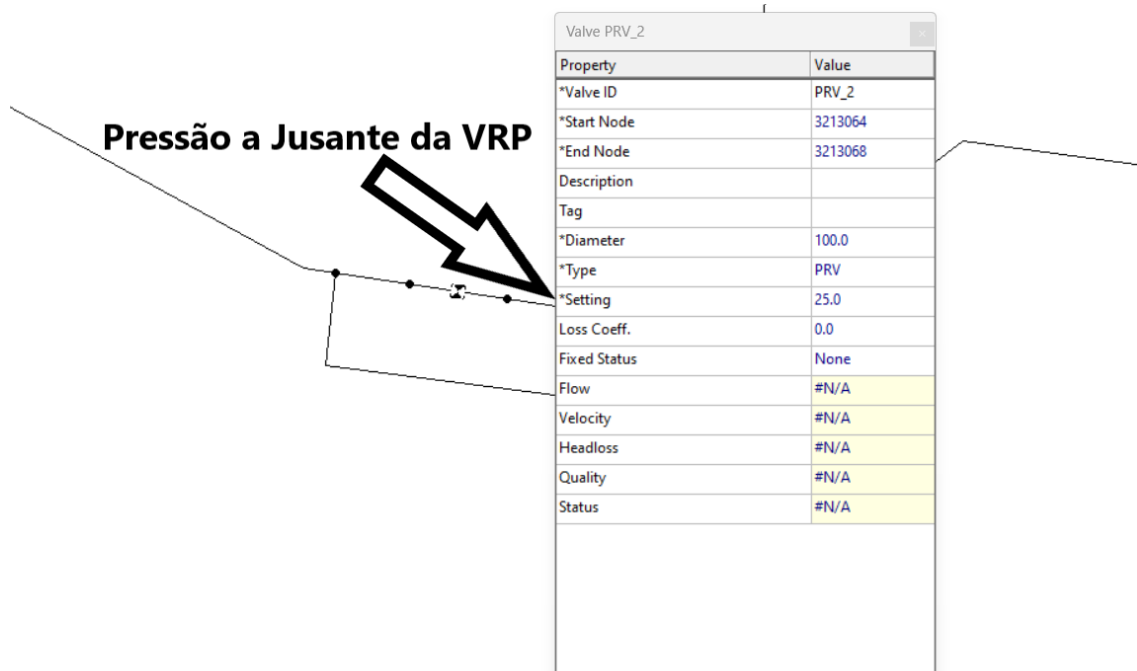


Figura 4.21 – Controlo operacional de uma VRP (Extraído do EPANET 2.2).

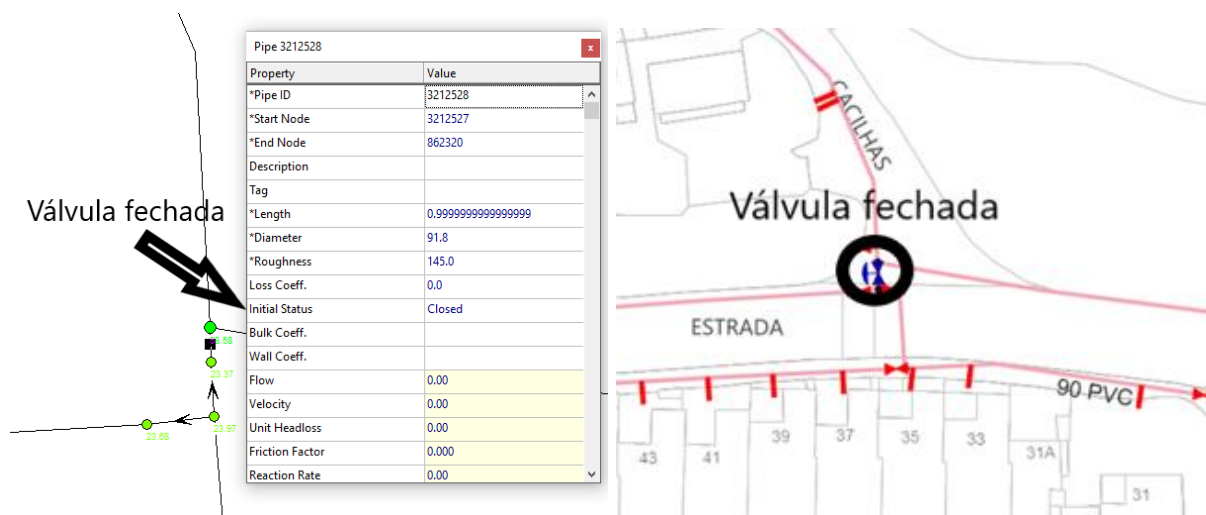


Figura 4.22 – Indicação de válvula fechada de patamares de pressão independentes (Extraído do EPANET 2.2 e do WebSIG).

4.3.4 Dimensionamento da VRP implementada

Apresenta-se na Figura 4.23, o dimensionamento (escolha de diâmetro nominal) da válvula redutora de pressão implementada na ZMC de Cacilhas.

O diâmetro nominal da VRP deve ser sempre dimensionado em conformidade com a marca e características de cada modelo (tendo cada marca o seu próprio software).

No caso da ZMC de Cacilhas, devido ao caudal de incêndio ($Q_{\max} = 22,5$ l/s), foi necessário instalar uma VRP DN100.

Foi também necessário definir a pressão a montante (verificada no modelo) e a jusante da VRP, assim como o caudal mínimo (verificado no modelo).

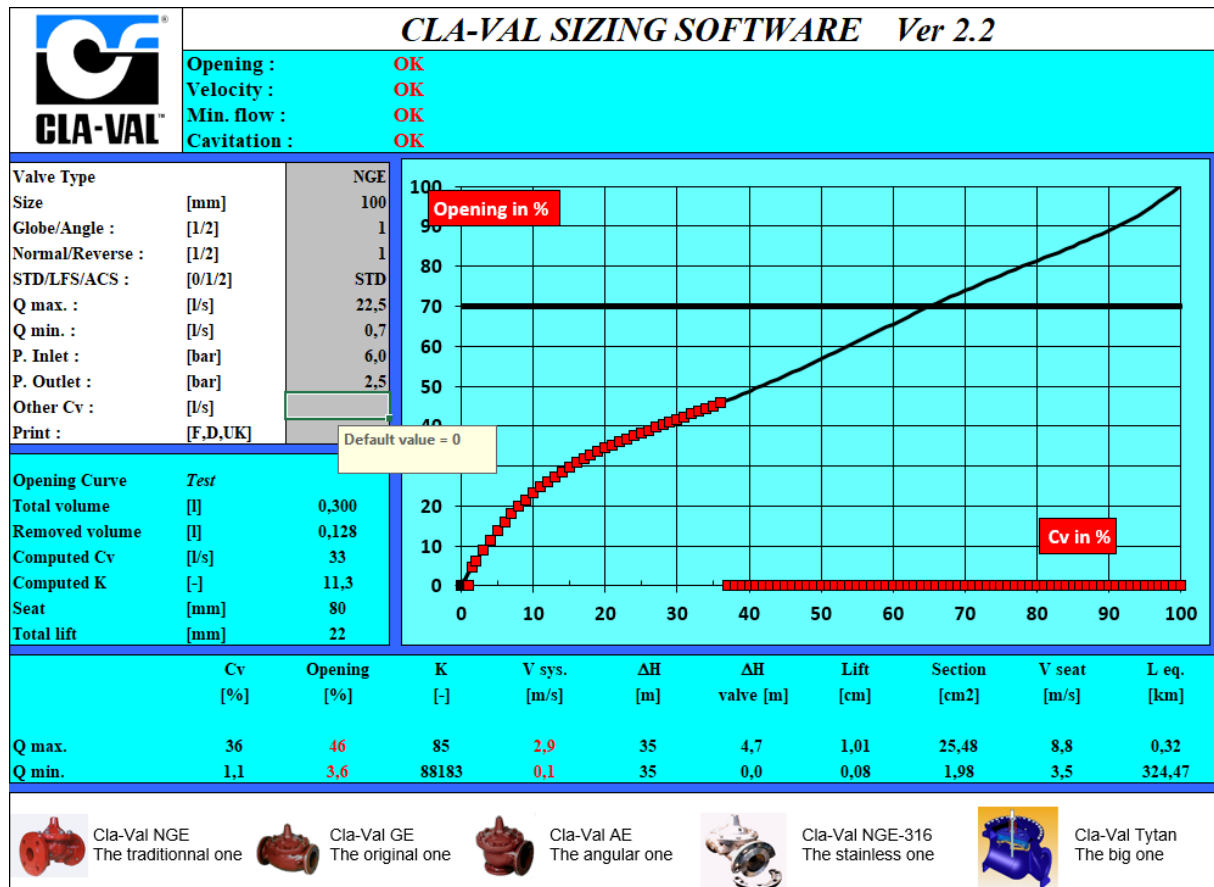


Figura 4.23 – Dimensionamento da válvula redutora de pressão (Extraído do CLA-VAL sizing software 2.2).

4.4 Implementação do modelo base

O modelo base é basicamente o modelo não calibrado, onde se procede à eliminação de erros detetáveis e afinação de opções de modelação, exploração das capacidades de simulação, e primeira abordagem aos objetivos de modelação para ganho de sensibilidade ao modelo.

Ao correr o modelo base (modelo de 2019), rapidamente nos apercebemos que é possível efetuar uma simplificação do modelo, procedendo-se à deslocação do reservatório do Torneiro do local original para o local onde se encontra o caudalímetro da ZMC de Cacilhas e efetuando-se a eliminação de todos os troços e nós antes do caudalímetro, como é possível observar na Figura 4.24 (modelo antes da alteração) e na Figura 4.25 (modelo depois da alteração).

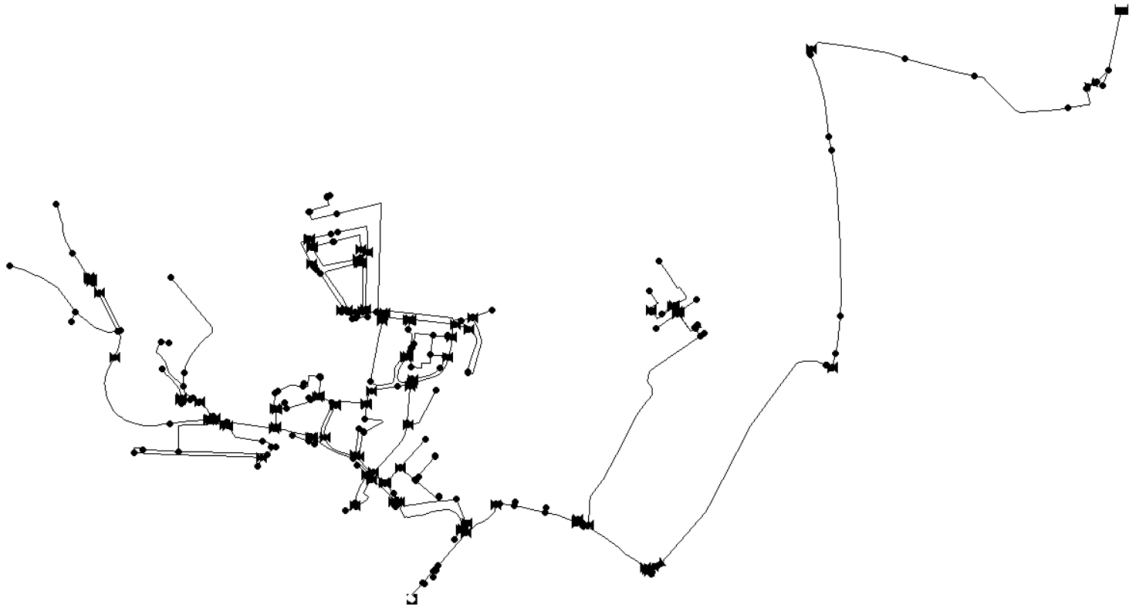


Figura 4.24 – Modelo da ZMC de Cacilhas com o reservatório do Torneiro no local original (Extraído do EPANET 2.2).

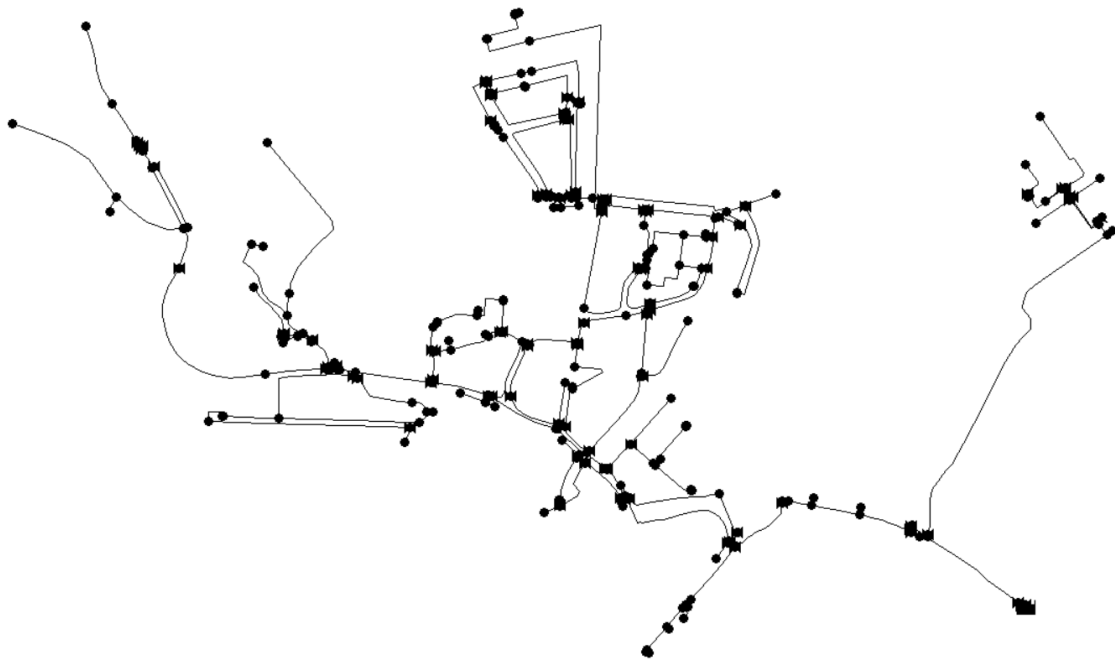


Figura 4.25 – Modelo base da ZMC de Cacilhas com a simulação do reservatório do Torneiro no caudalímetro da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

Em seguida é efetuada uma primeira simulação (antes de calibrar o modelo), onde se vai analisar o sistema em relação às pressões nos nós de consumo, como é possível observar na Figura 4.26 e Figura 4.27, tendo sido atribuído o valor da cota piezométrica de água do reservatório de 110 m.

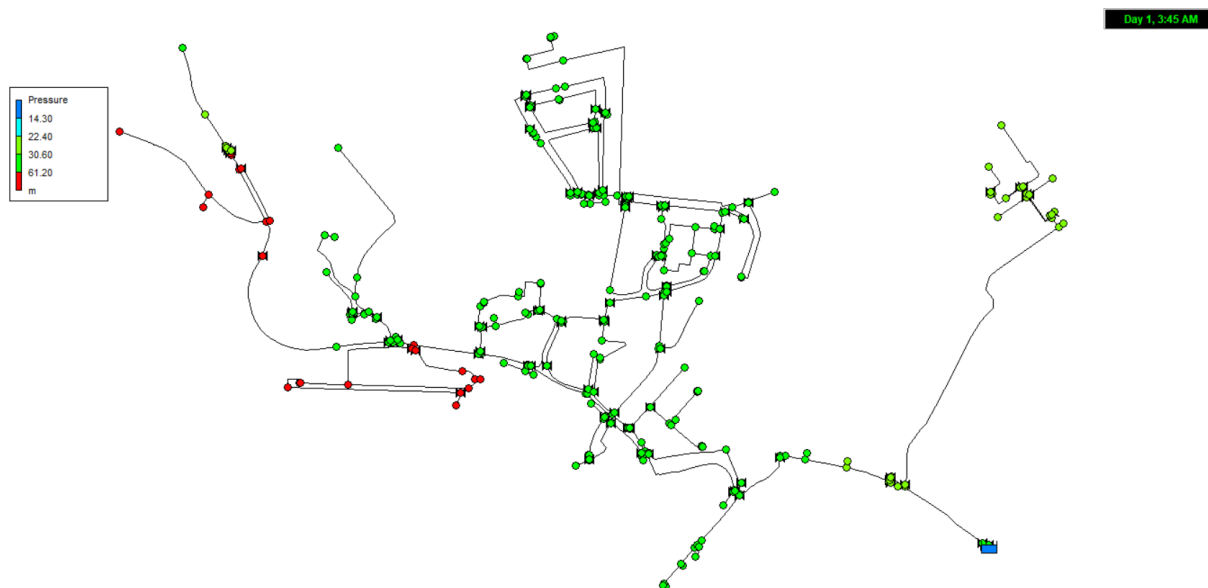


Figura 4.26 – Modelo base da ZMC de Cacilhas, com representação da pressão nos nós através de cores (Extraído do EPANET 2.2).



Figura 4.27 – Gráfico de isolinhas de pressão da solução-base do modelo da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

Como foi possível observar nas figuras anteriores, os nós com pressão excessiva superiores a 600kPa, como definido no D.R. n.º 23/95, (MOPTC, 1995) estão representados com a cor vermelha. Com esta primeira simulação do modelo base, é possível verificar que, existem nós com pressões excessivas (em alguns nós, superiores a 90 m.c.a.), e que indica a necessidade de instalar uma válvula redutora de pressão (VRP), para conseguir baixar a pressão na zona onde existem pressões excessivas e, por conseguinte, cumprir o regulamento.

Por último, vamos analisar o modelo em relação à qualidade da água nos nós, para isso, é necessário compreender o decaimento de cloro ao longo do sistema. Apresenta-se na Figura 4.28 e Figura 4.29 o modelo com a quantidade de cloro por litro de água da rede de distribuição, sendo atribuído o valor de entrada no sistema de 0,60 mg/l (Reservatório).

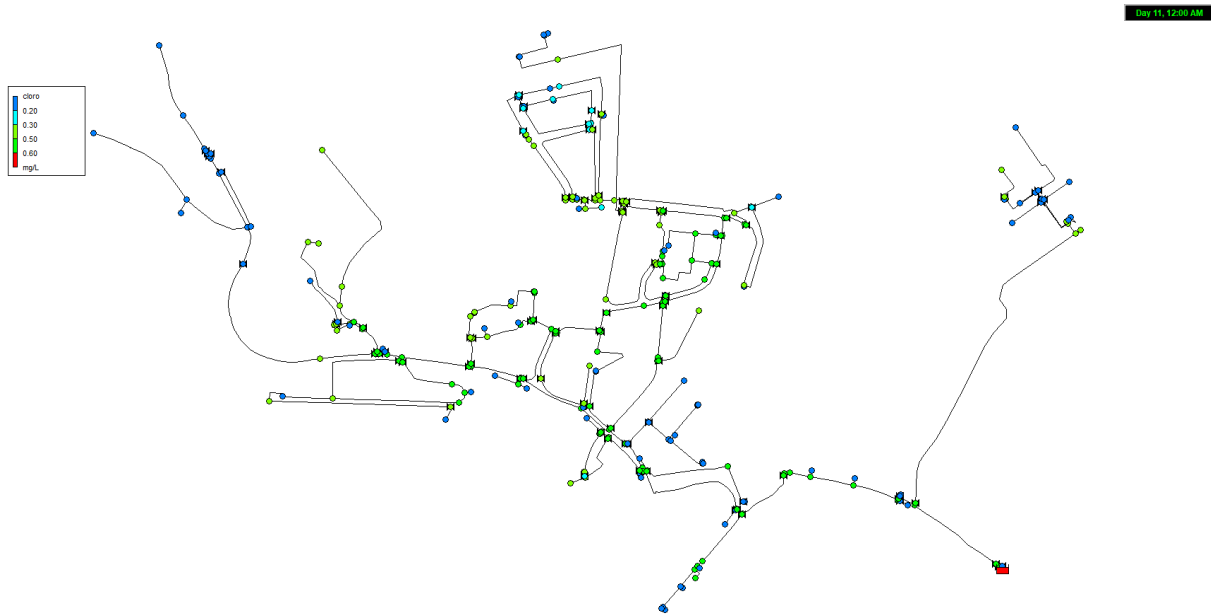


Figura 4.28 – Modelo base da ZMC de Cacilhas, com representação da quantidade de cloro por litro de água através de cores (Extraído do EPANET 2.2).

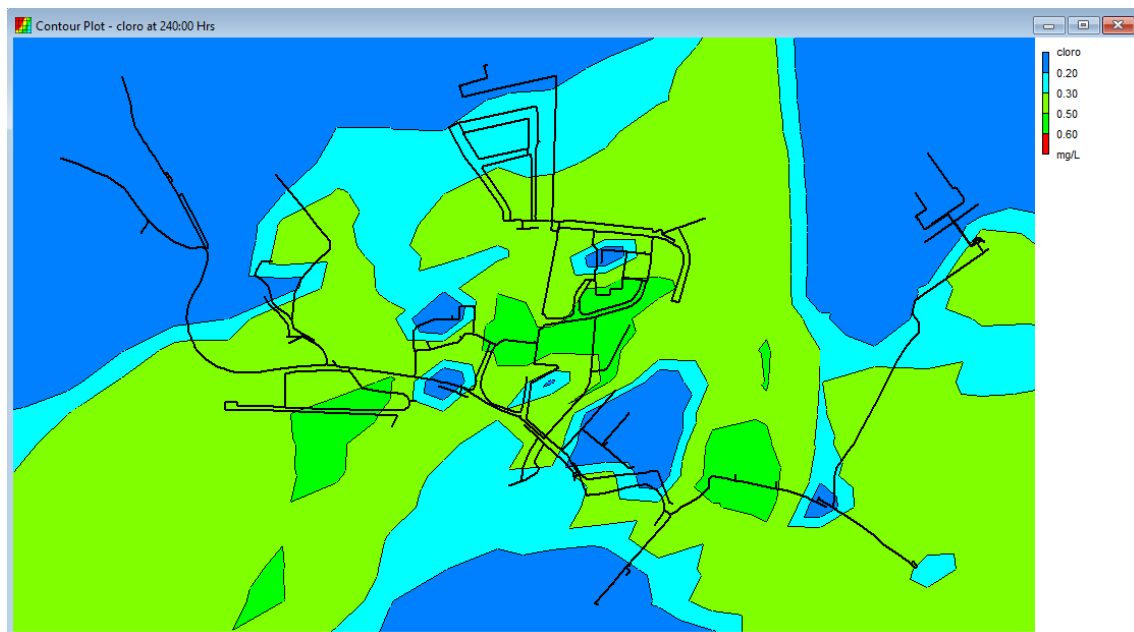


Figura 4.29 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água da solução-base do modelo da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

Ao analisar o modelo não calibrado podemos concluir que, existem vários extremos de rede onde o cloro é inferior a 0,2 mg/l, estando estes resultados abaixo da gama de valores

recomendados no Decreto-Lei n.º 69/2023 (AAC, 2023), de 0,2 a 0,6 mg/l de cloro residual livre.

Para a resolução dos problemas descritos anteriormente, identificaram-se três alternativas de intervenção, sendo elas:

- Instalação de uma VRP e substituição das condutas de distribuição em fibrocimento e ferro galvanizado, como é possível observar na Figura 4.30;
- Igual ao anterior, mas com o acréscimo de substituição de uma zona da rede de distribuição onde existia válvulas de seccionamento da rede que não vedavam ou estavam com avaria, ou mesmo, a ausência de válvulas de seccionamento da rede, ramais e outros acessórios da rede, como é possível observar na Figura 4.31;
- Fechamento de algumas malhas para melhoramento da qualidade da água, como é possível observar na Figura 4.31, efetuado um fechamento de malha e anulação de conduta sem ramais, a posteriori do projeto, como é possível observar na Figura 4.32 e Figura 4.33, e retirar uma VRP na estrada da Ribeira da Laje (aproveitada para outra ZMC), como é possível observar na Figura 4.34 e Figura 4.35, esta VRP apenas servia para, caso fosse necessário, fornecer água à ZMC Porto Salvo Aldeia do Meio, mais concretamente na zona do bairro da Laje, que foi estudado por (Araújo, Murinello, Ramos, & Coelho, 2004).

Optou-se, em 2020, por efetuar o somatório das três soluções indicadas anteriormente, mesmo sendo economicamente mais desvantajosa, era a que solucionava todas as anomalias descritas anteriormente.

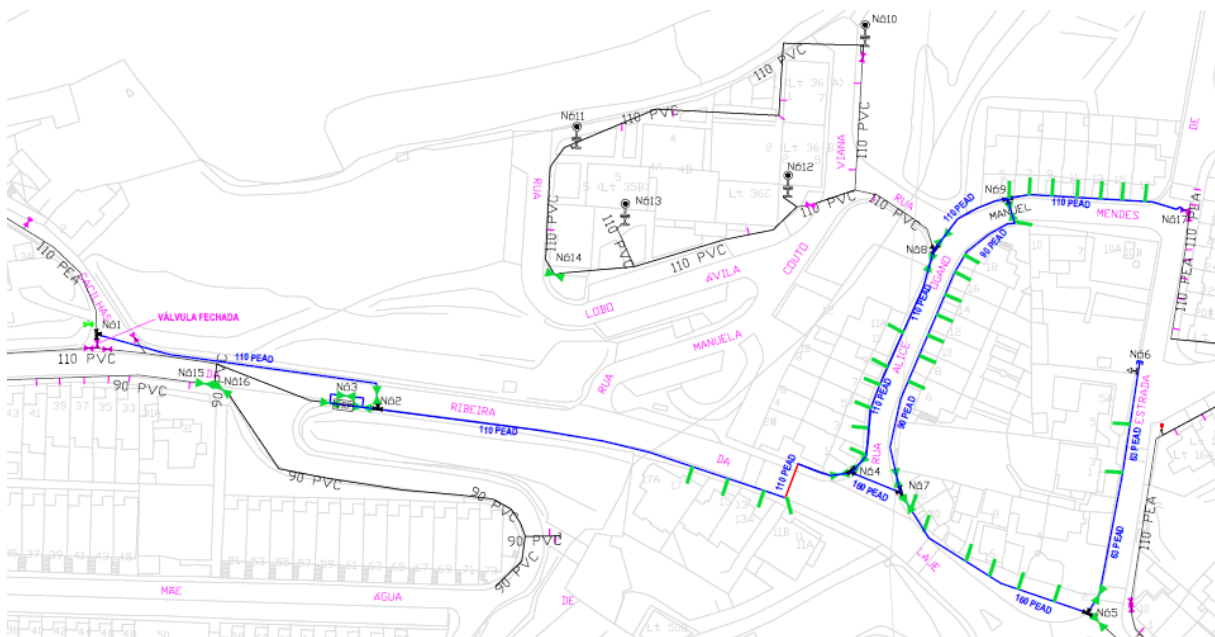


Figura 4.30 – Projeto inicial da ZMC de Cacilhas.

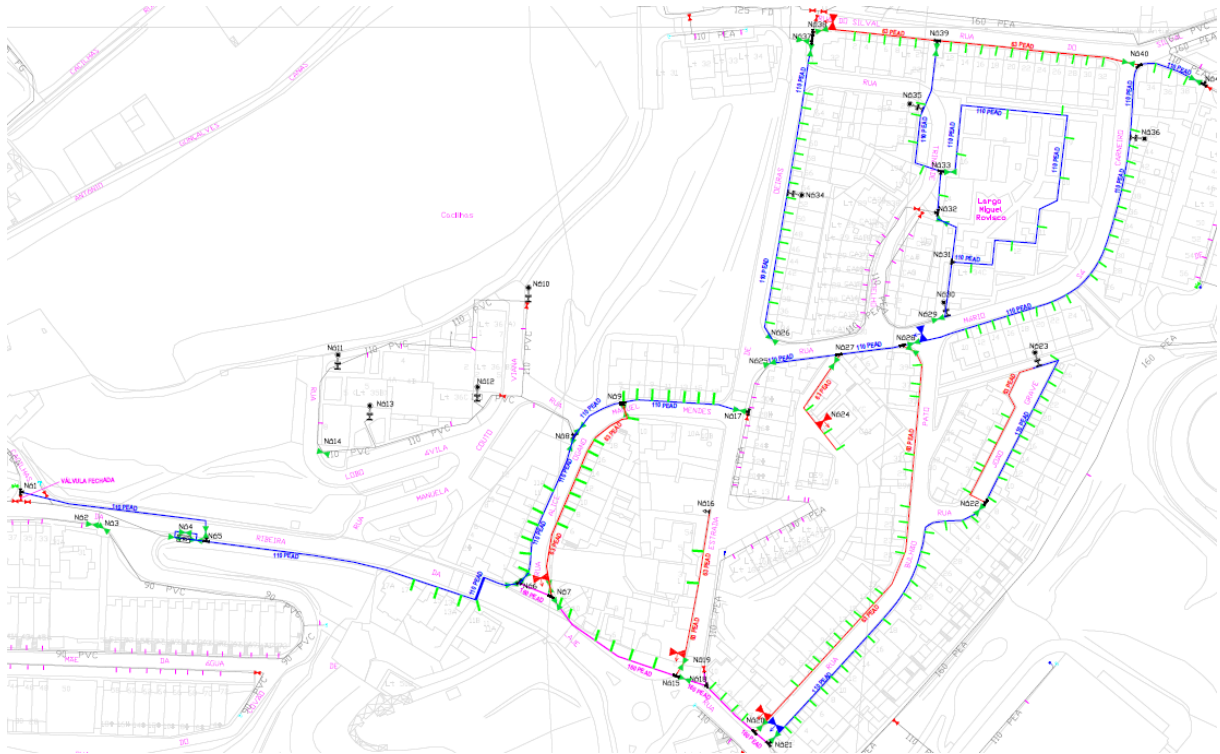


Figura 4.31 – Projeto da ZMC de Cacilhas.

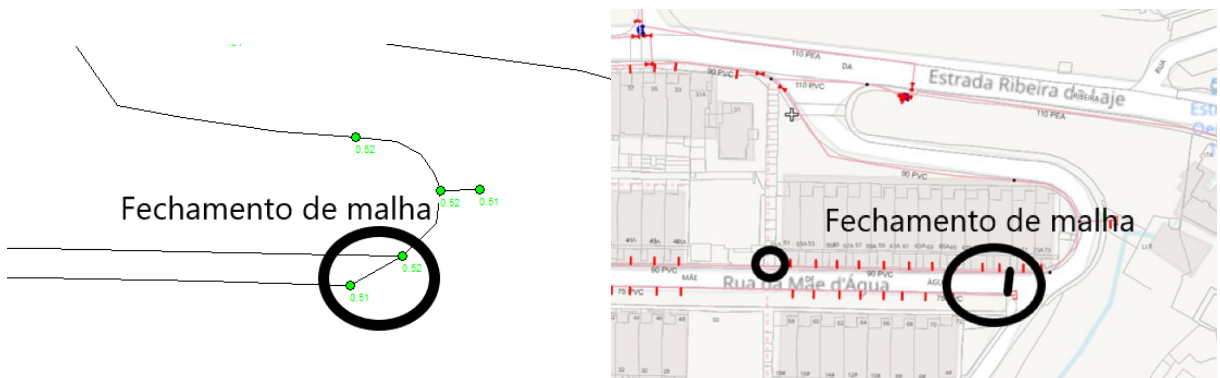


Figura 4.32 – Exemplo de um fechamento de malha executado (Extraído do EPANET 2.2 e WebSIG).

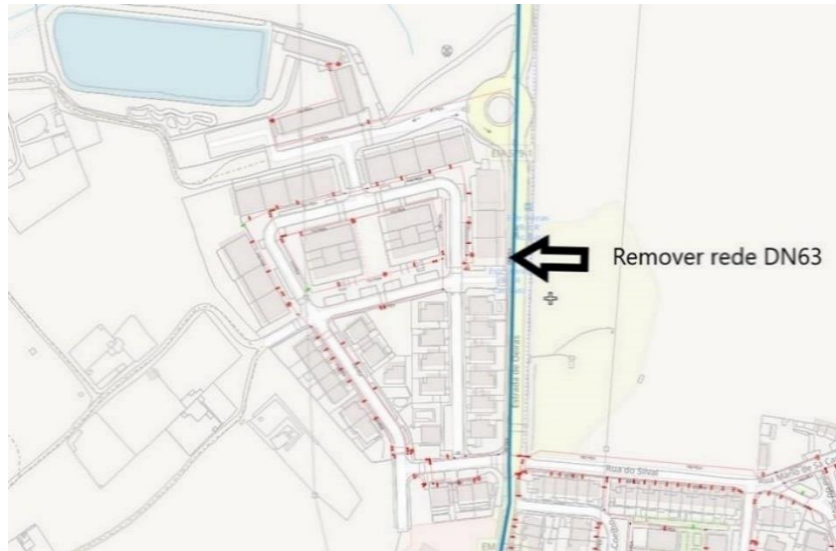


Figura 4.33 – Exemplo de uma conduta sem ramais que foi anulada (Extraído do WebSIG).

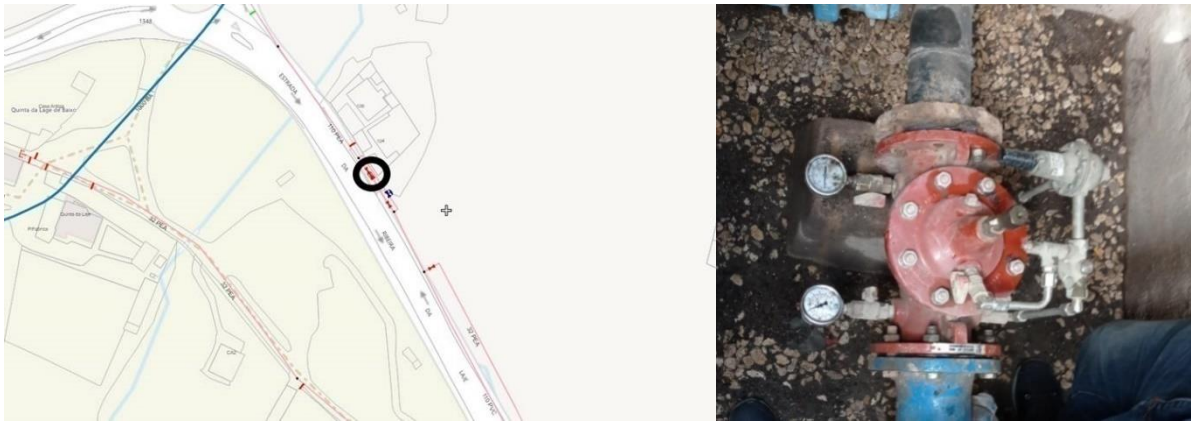


Figura 4.34 – VRP a ser retirada (retirada em 2023).



Figura 4.35 – VRP retirada (retirada em 2023).

4.5 Calibração do modelo

A fase de calibração hidráulica do modelo de 2022, passou por identificar as necessidades de calibração e planificação dos trabalhos a executar, realização de campanhas de medição de caudais e pressões, e de ensaios de perda de carga, calibração iterativa do modelo por comparação com os resultados de campo.

Os resultados esperados eram uma versão calibrada e plenamente funcional do modelo em estudo, de acordo com os cenários selecionados previamente, atualização do cadastro da rede e um relatório conciso descrevendo os ensaios de perda de carga e as medições de rede efetuadas, bem como o processo de calibração do modelo.

4.5.1 Calibração da pressão

Em primeiro lugar foi necessário identificar os locais onde se queria efetuar as medições de pressão e de cloro, para isso, definiu-se para o caso da pressão:

- Ponto 1 – Av. António Bernardo Cabral de Macedo (Nó 1113941) – entrada da ZMC (caudalímetro), como é possível observar na Figura 4.36;

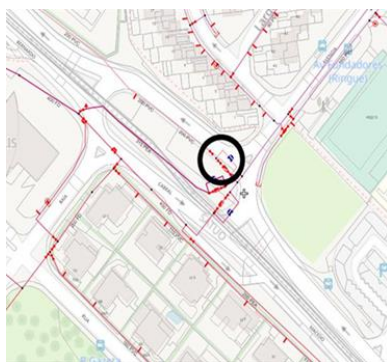


Figura 4.36 – Entrada da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 2 – Rua da Abrunheira (Nó 1818636) – local intermédio da ZMC, como é possível observar na Figura 4.37;

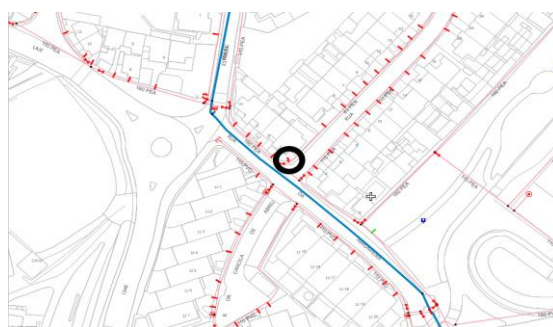


Figura 4.37 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 3 – Rua Mário de Sá Carneiro (Nó 3223370) – local intermédio da ZMC, como é possível observar na Figura 4.38;

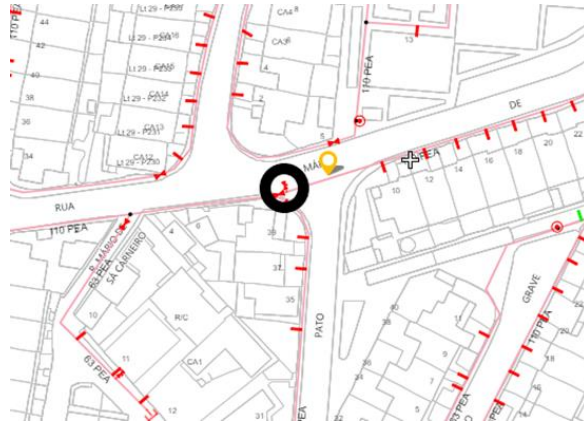


Figura 4.38 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 4 – Rua Fernando Pessoa (Nó 853247) – extremo da ZMC, como é possível observar na Figura 4.39;



Figura 4.39 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 5 – Rua da Mãe de água (Nó 3213064) – a montante da VRP instalada, como é possível observar na Figura 4.40;

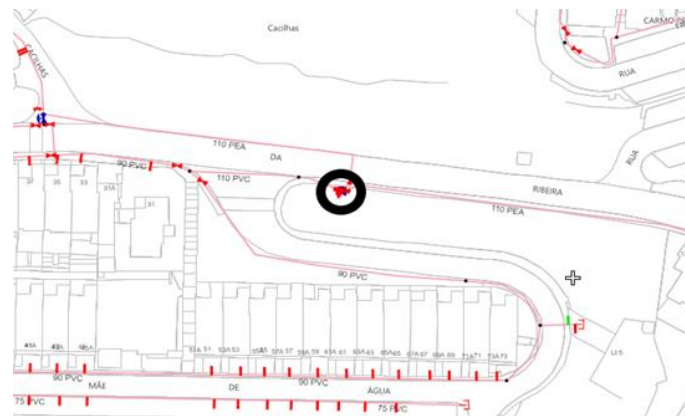


Figura 4.40 – A montante da VRP instalada (Extraído do WebSIG).

- Ponto 6 – Estrada da Ribeira da Laje (Nó 772343) – extremo da ZMC, como é possível observar na Figura 4.41;

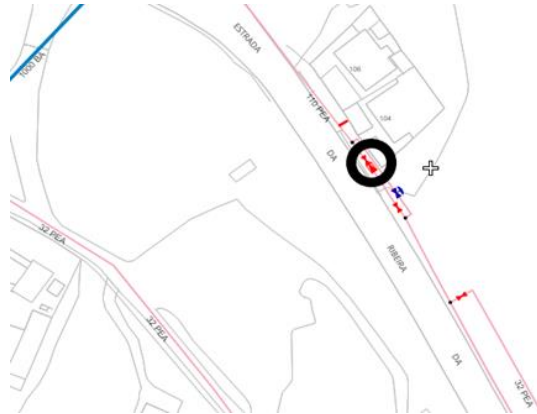


Figura 4.41 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).

Nos locais indicados anteriormente foram instalados *data loggers* de pressão e efetuadas algumas medições instantâneas nos marcos de incêndio, como é possível observar na Figura 4.42 e Figura 4.43



Figura 4.42 – Medição de pressão em marco de incêndio.



Figura 4.43 – Instalação de data logger de pressão em caixa de contador.

Os resultados obtidos das medições de pressão nos 6 pontos escolhidos são apresentados graficamente para cada ponto escolhido, como é possível observar na Figura 4.44, onde foi efetuada a medição no ponto 1 através de telemedição e, na Figura 4.45 até à Figura 4.49, onde foi efetuada a medição no ponto 2, 3, 4, 5 e 6 através da instalação de *data loggers*. Nos gráficos apresentados em seguida, é possível observar a variação de pressão ao longo do dia.

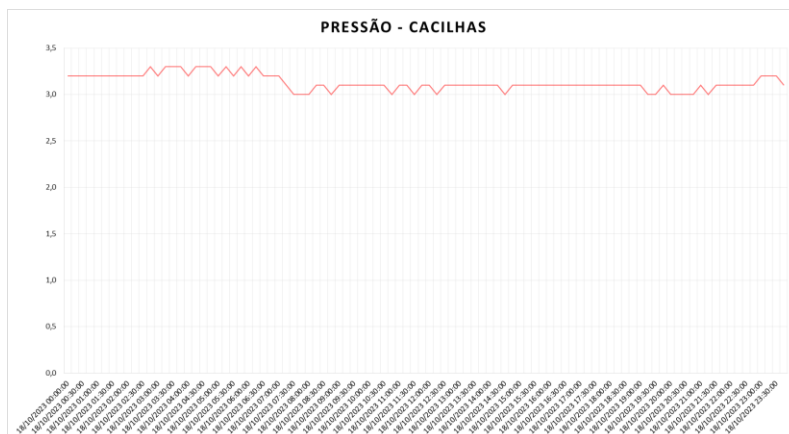


Figura 4.44 – Gráfico de medição de pressão através de telemedição do ponto 1 (Dados extraídos do LERNE).

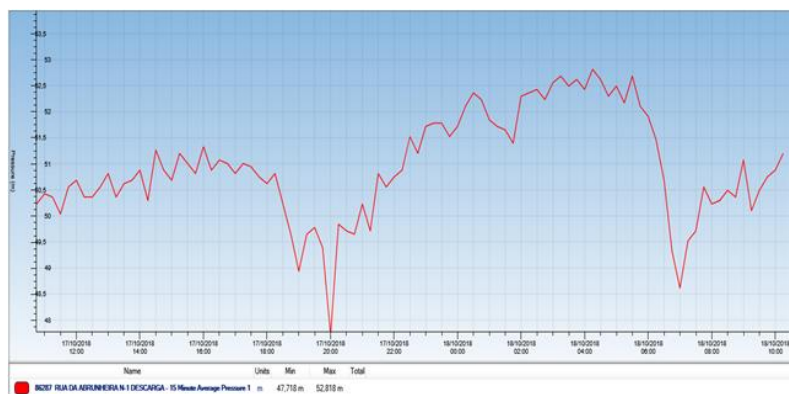


Figura 4.45 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 2 (Extraído do Primayer).

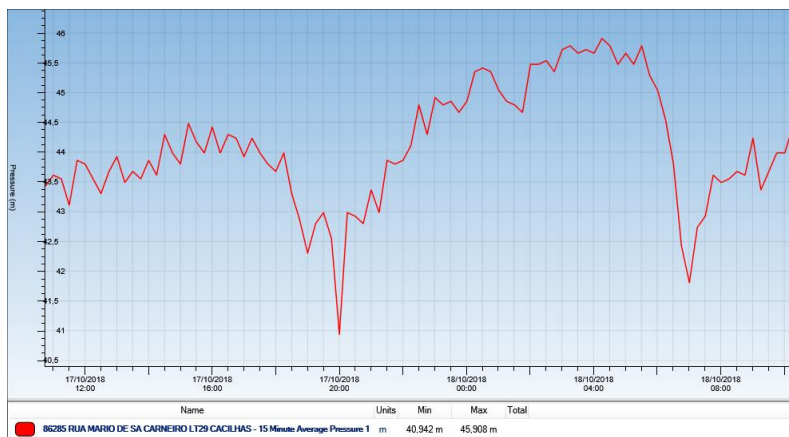


Figura 4.46 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 3 (Extraído do Primayer).

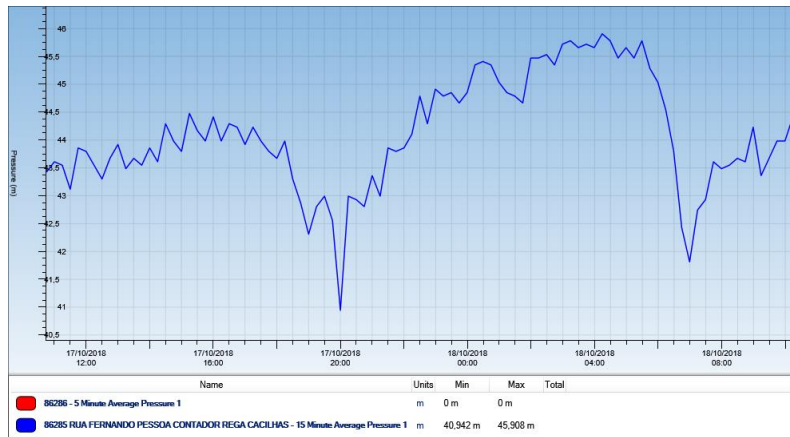


Figura 4.47 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 4 (Extraído do Primayer).

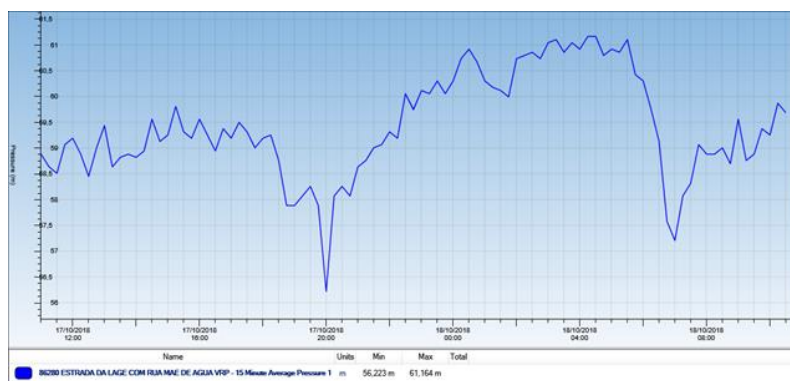


Figura 4.48 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 5 (Extraído do Primayer).



Figura 4.49 – Gráfico de medição de pressão através de data logger do ponto 6 (Extraído do Primayer).

No Quadro 4.1 apresentam-se descritas algumas características relevantes sobre os pontos de medição de pressão:

Quadro 4.1 – Características da rede de abastecimento nos pontos de medição de pressão.

Características da rede	Ponto 1 – Nó 1113941	Ponto 2 – Nó 1818636	Ponto 3 – Nó 3223370	Ponto 4 – Nó 853247	Ponto 5 – Nó 3213064	Ponto 6 – Nó 772343
		Av. António Bernardo Cabral de Macedo	Rua da Abrunheira	Rua Mário de Sá Carneiro	Rua Fernando Pessoa	Rua da Mãe de água
Material e diâmetro	PVC DN 200	PEAD DN 63	PEAD DN 110	PEAD DN 110	PEAD DN 110	PEAD DN 110
Ano de instalação	2004	2021	2021	2006	2021	2003
Cotas	78,00 m	57,50 m	64,29 m	68,55 m	48,99 m	29,66 m

Na Figura 4.50 é possível identificar no modelo através de círculos azuis os pontos onde foram efetuadas as medições de pressão durante o mês de outubro de 2023.

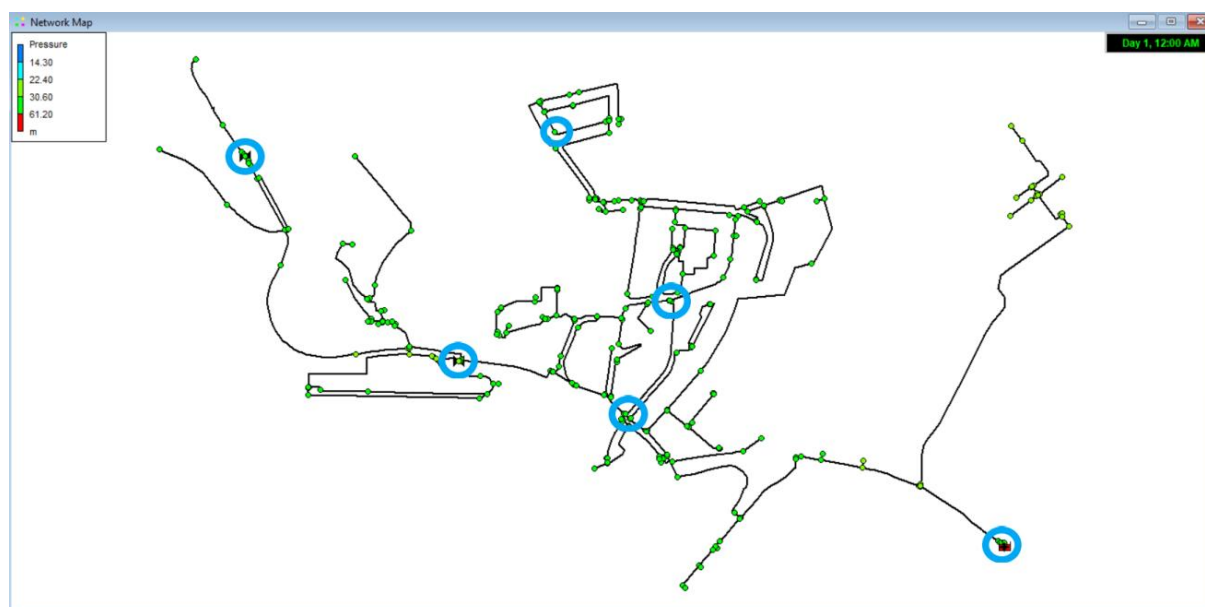


Figura 4.50 – Localização dos pontos de medição de pressão no modelo (Extraído do EPANET 2.2).

Depois de identificar os nós no modelo, é necessário efetuar a construção do ficheiro de dados de medições (blocos de notas) para cada ponto identificado anteriormente e registar os dados de calibração no EPANET 2.2, como foi explicado no subcapítulo 2.7 (Calibração de modelos),

por fim, é necessário calibrar o modelo em conformidade com os valores obtidos da medição, sendo o resultado final para cada ponto o identificado na Figura 4.51 até à Figura 4.56, onde foi necessário efetuar uma verificação e ajuste final de:

- Consumos;
- Cota altimétrica dos nós;
- Diâmetro e respetiva rugosidade das condutas;
- Parâmetro da VRP, como explicado no subcapítulo 4.3.3 (Configuração de VRP).

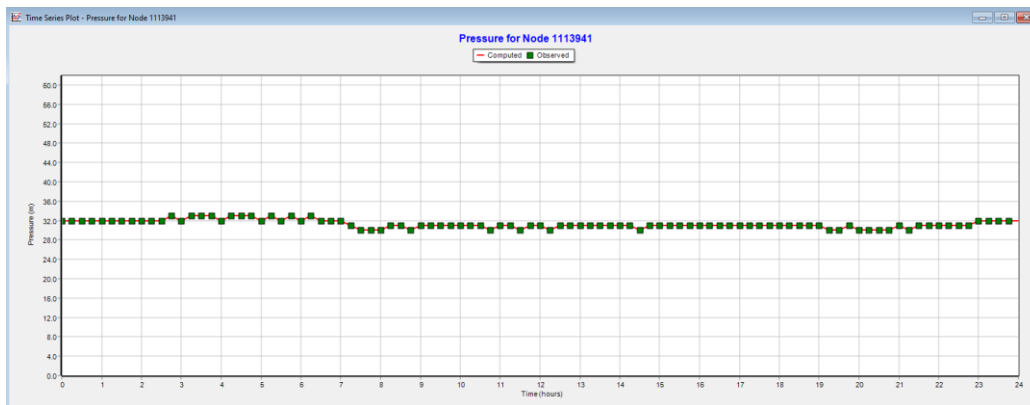


Figura 4.51 – Relatório de calibração do ponto 1 (Extraído do EPANET 2.2).

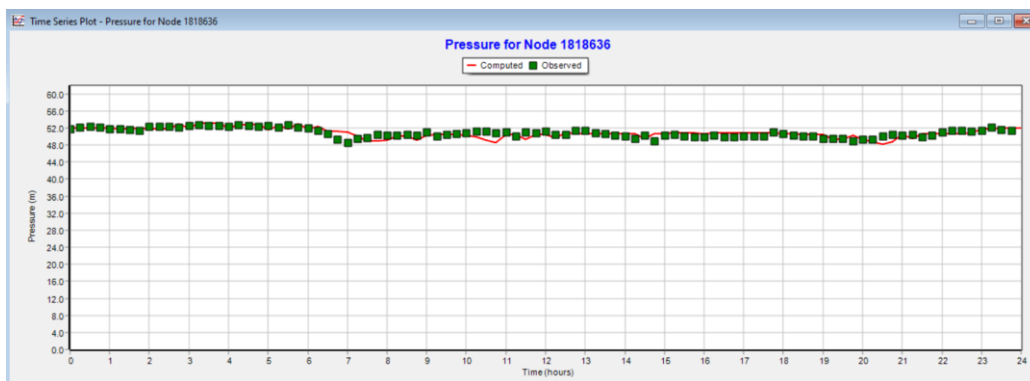


Figura 4.52 – Relatório de calibração do ponto 2 (Extraído do EPANET 2.2).

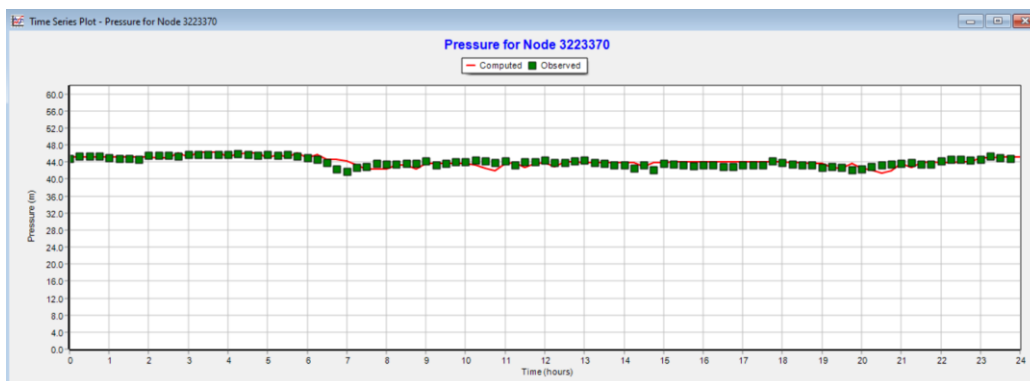


Figura 4.53 – Relatório de calibração do ponto 3 (Extraído do EPANET 2.2).

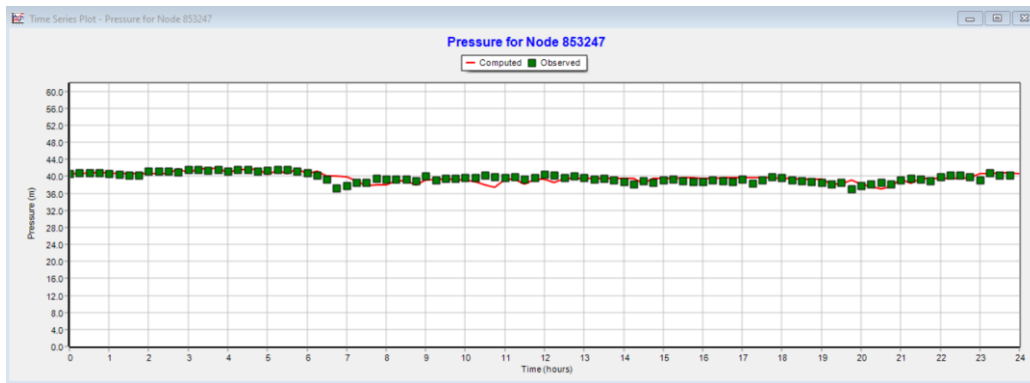


Figura 4.54 – Relatório de calibração do ponto 4 (Extraído do EPANET 2.2).

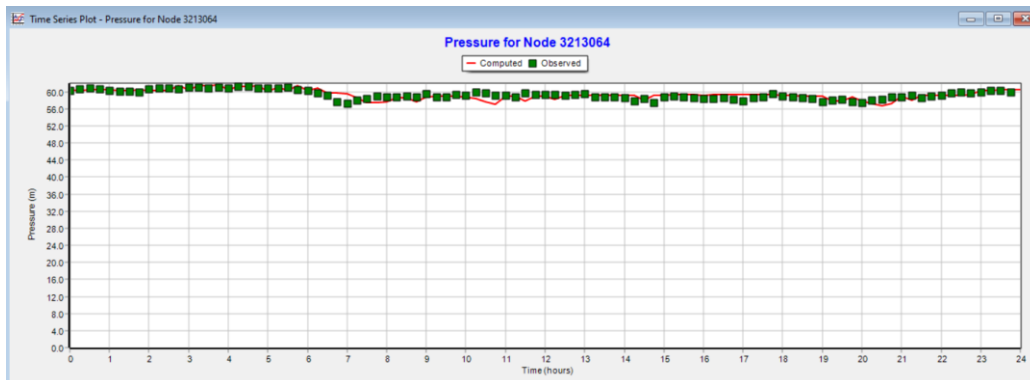


Figura 4.55 – Relatório de calibração do ponto 5 (Extraído do EPANET 2.2).

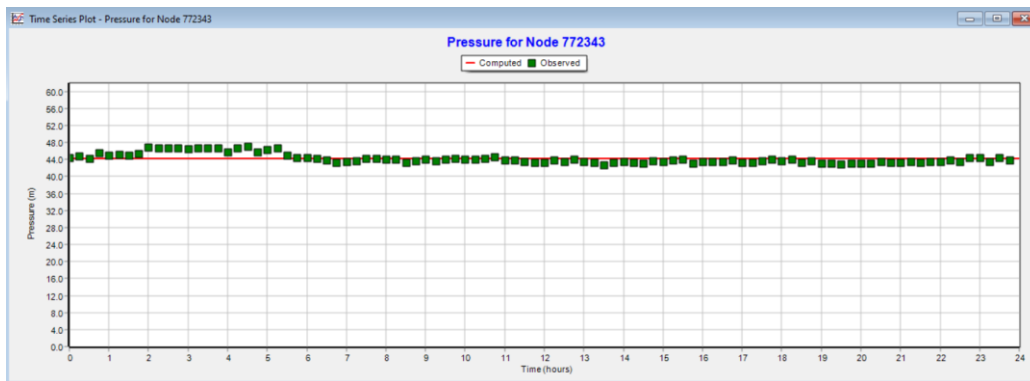


Figura 4.56 – Relatório de calibração do ponto 6 (Extraído do EPANET 2.2).

Como é possível observar nos relatórios de calibração de pressão, os valores medidos no sistema de abastecimento estão muito próximos do modelo em EPANET 2.2, o que quer dizer que o modelo se encontra bem calibrado, refletindo o comportamento real da pressão da ZMC, como é possível verificar no relatório de calibração de pressão apresentado na Figura 4.57 até à Figura 4.59, onde a correlação entre médias é de 1.

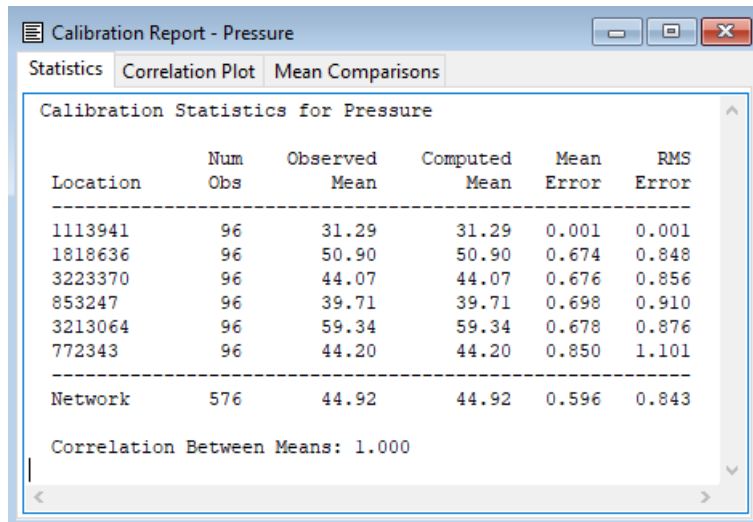


Figura 4.57 – Dados estatísticos da calibração de pressão (Extraído do EPANET 2.2).

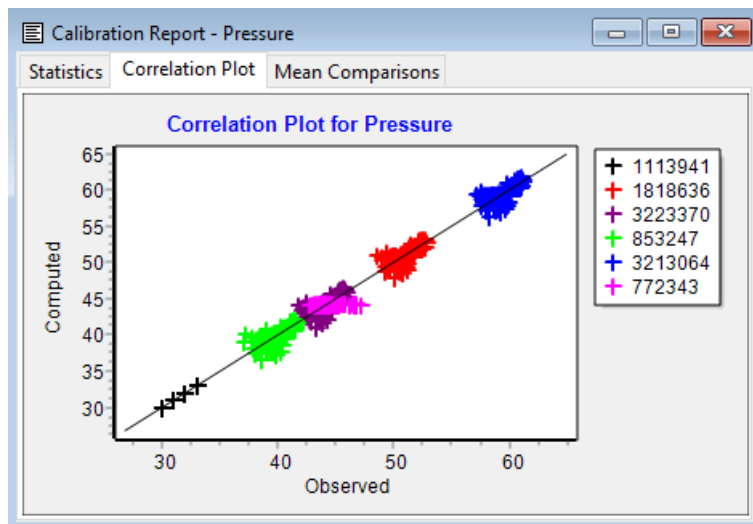


Figura 4.58 – Gráfico de correlação dos valores de pressão (Extraído do EPANET 2.2).

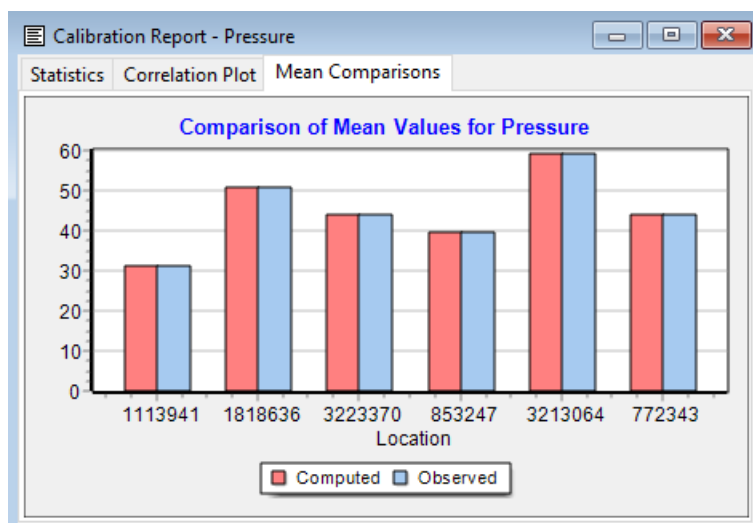


Figura 4.59 – Comparação dos valores médios de pressão (Extraído do EPANET 2.2).

4.5.2 Calibração de qualidade da água (cloro)

Para o caso das medições de cloro no sistema, optou-se por escolher os seguintes locais:

- Ponto 1 – Av. António Bernardo Cabral de Macedo (Nó 1113941) – entrada da ZMC (caudalímetro), como é possível observar na Figura 4.60;

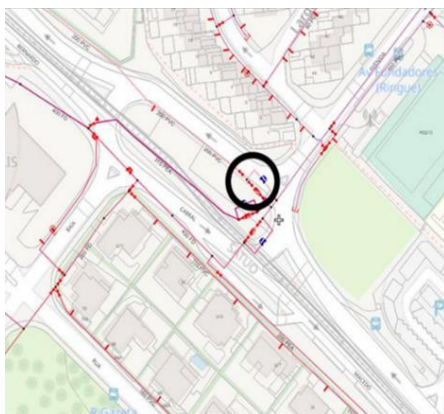


Figura 4.60 – Entrada da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 2 – Rua Fernando Pessoa (Nó 853247) – extremo da ZMC, como é possível observar na Figura 4.61;

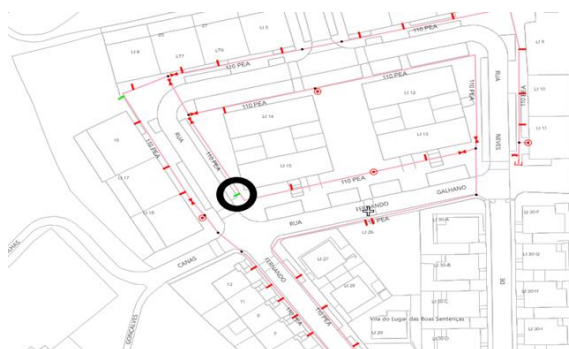


Figura 4.61 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 3 – Rua da Mãe de água (Nó 3213064) – local intermédio da ZMC, como é possível observar na Figura 4.62;

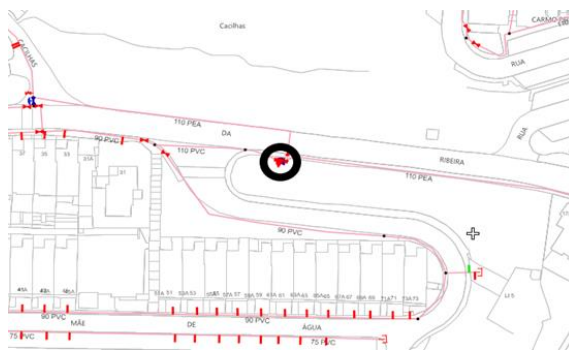


Figura 4.62 – Local intermédio da ZMC (Extraído do WebSIG).

- Ponto 4 – Estrada da Ribeira da Laje (Nó 722419) – extremo da ZMC, como é possível observar na Figura 4.63;

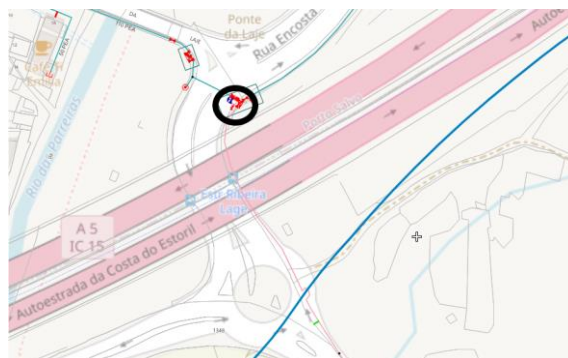


Figura 4.63 – Extremo da ZMC (Extraído do WebSIG).

Nos locais indicados anteriormente, foram instaladas sondas multiparâmetros para medição de cloro durante 48 horas (2 dias), como é possível observar na Figura 4.64, e foram efetuadas medições instantâneas para validação dos valores obtidos, como é possível observar na Figura 4.65.



Figura 4.64 – Instalação de sonda multiparâmetros para medição de cloro.



Figura 4.65 – Medição de cloro.

No Quadro 4.2 apresentam-se algumas características relevantes sobre os pontos de medição de cloro:

Quadro 4.2 – Características da rede de abastecimento nos pontos de medição de cloro.

Características da rede	Ponto 1 – Nó 1113941	Ponto 2 – Nó 853247	Ponto 3 – Nó 3213064	Ponto 4 – Nó 722419
	Av. António Bernardo Cabral de Macedo	Rua Fernando Pessoa	Rua da Mãe de água	Estrada da Ribeira da Lage
Material e diâmetro	PVC DN 200	PEAD DN 110	PEAD DN 110	PEAD DN 110
Ano de instalação	2004	2006	2021	2003
Cotas	78,00 m	68,55 m	48,99 m	25,01 m

Na Figura 4.66 é possível identificar no modelo através de círculos cor de laranja os pontos onde foram efetuadas as medições de cloro durante o mês de julho de 2024.



Figura 4.66 – Localização dos pontos de medição de cloro no modelo (Extraído do EPANET 2.2).

Depois de identificar os nós no modelo, é necessário efetuar a construção do ficheiro de dados de medições (blocos de notas) para cada ponto identificado anteriormente e registar os dados de calibração no EPANET 2.2, como foi explicado no subcapítulo 2.7 (Calibração de modelos) e no subcapítulo 2.10.5 (Modelação de qualidade da água no EPANET), por fim, é necessário

calibrar o modelo em conformidade com os valores obtidos da medição, sendo o resultado final para cada ponto o identificado na Figura 4.67 até à Figura 4.70.

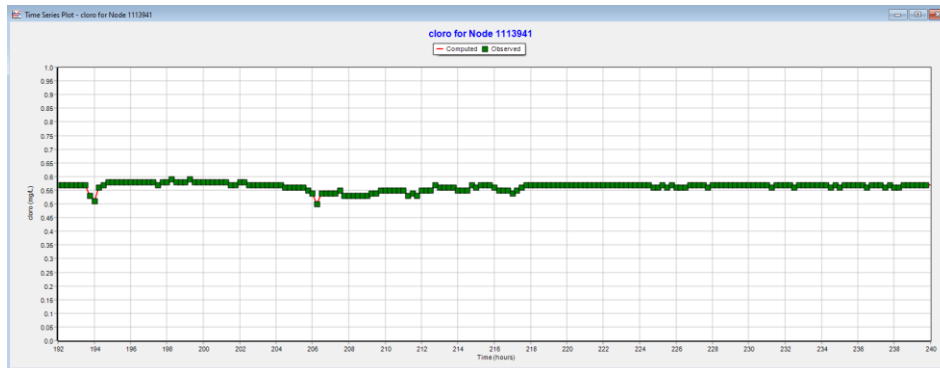


Figura 4.67 – Relatório de calibração do ponto 1 (Extraído do EPANET 2.2).

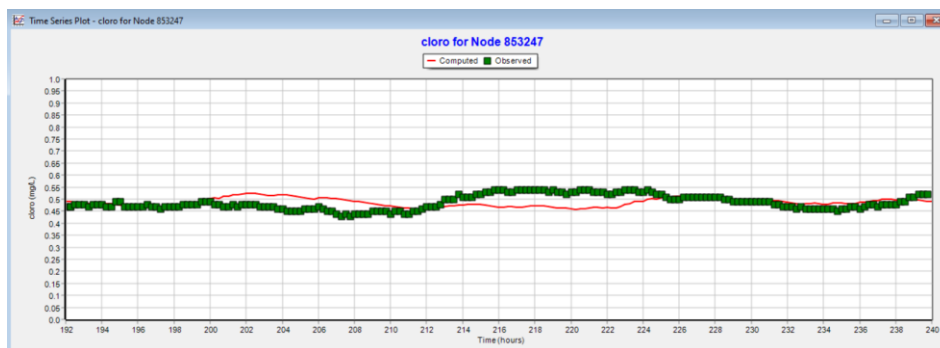


Figura 4.68 – Relatório de calibração do ponto 2 (Extraído do EPANET 2.2).

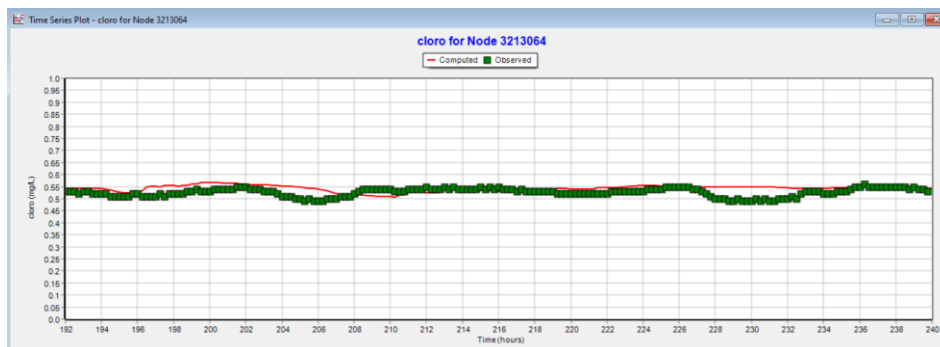


Figura 4.69 – Relatório de calibração do ponto 3 (Extraído do EPANET 2.2).

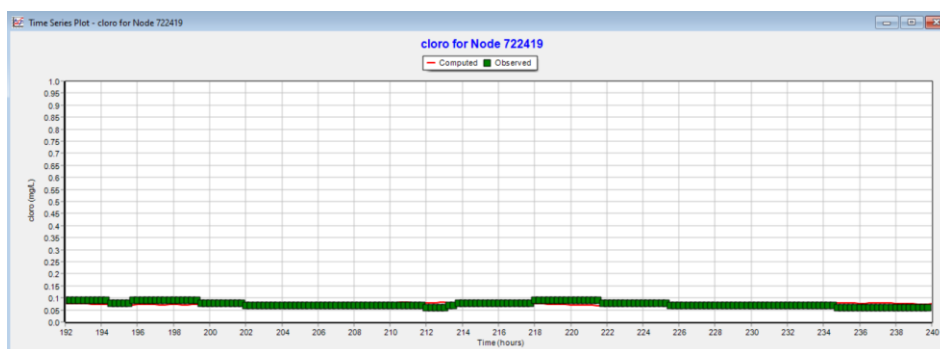


Figura 4.70 – Relatório de calibração do ponto 4 (Extraído do EPANET 2.2).

Para calibrar o modelo, foi necessário ajustar alguns consumos e recorrer a iterações, até obter os seguintes valores para o coeficiente da reação no seio da água $-1.30 (k_b)$ e coeficiente da reação nas condutas $-1.00 (k_w)$.

Como é possível observar nos relatórios de calibração de cloro, os valores medidos no sistema de abastecimento estão muito próximos do modelo em EPANET 2.2, o que quer dizer que o modelo se encontra bem calibrado, refletindo o comportamento real do cloro da ZMC, como é possível verificar no relatório de calibração de cloro apresentado na Figura 4.71 até à Figura 4.73, onde a correlação entre médias é de 1.

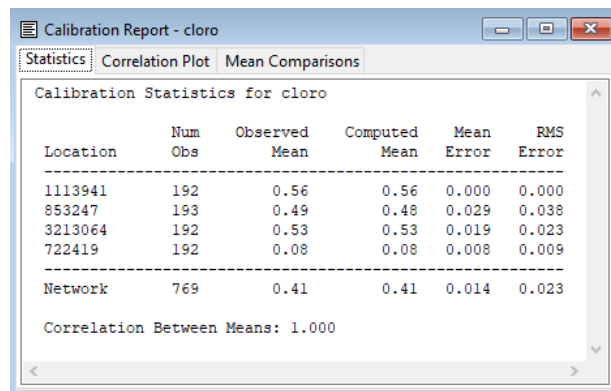


Figura 4.71 – Dados estatísticos da calibração de cloro (Extraído do EPANET 2.2).

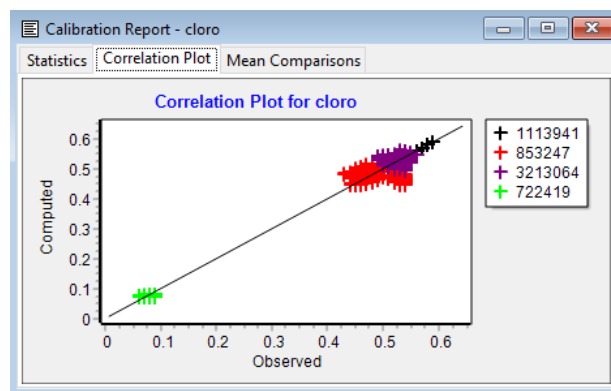


Figura 4.72 – Gráfico de correlação dos valores de cloro (Extraído do EPANET 2.2).

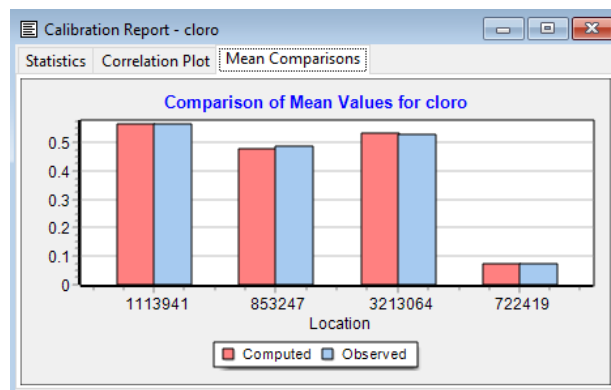


Figura 4.73 – Comparação dos valores médios de cloro (Extraído do EPANET 2.2).

5 Análise hidráulica e diagnóstico do comportamento do sistema

5.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo efetuar uma análise hidráulica e diagnóstico do comportamento do sistema da ZMC de Cacilhas, em Oeiras, antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção de substituição de uma parte significativa da rede de abastecimento e instalada uma válvula redutora de pressão, como foi descrita no final do subcapítulo 4.4 (Implementação do modelo base).

Para tal, vai ser apresentado ao longo do capítulo, o modelo antes e depois da intervenção efetuada.

Apresenta-se também a abordagem para explorar o modelo hidráulico da rede de distribuição de água da ZMC de Cacilhas.

Irá também ser apresentada mais duas soluções de otimização de pressões, para ponderação e aplicação futura, terminando com uma simples análise económica para demonstração dos gastos e ganhos na ZMC, assim como, a verificação do retorno do investimento efetuado e ponderação futura.

5.2 Exploração e comparação dos modelos hidráulicos

Para poder compreender o sistema, é necessário começar por verificar as características físicas, tais como, topologia (mapa da rede), diâmetros, materiais, comprimentos das condutas e altimetria dos nós (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006). Na Figura 5.1 é apresentada a respetiva ZMC (mapa da rede), onde é perceptível a topologia antes da intervenção efetuada (modelo de 2019) e na Figura 5.2 é apresentada a ZMC depois da intervenção efetuada (modelo de 2022).

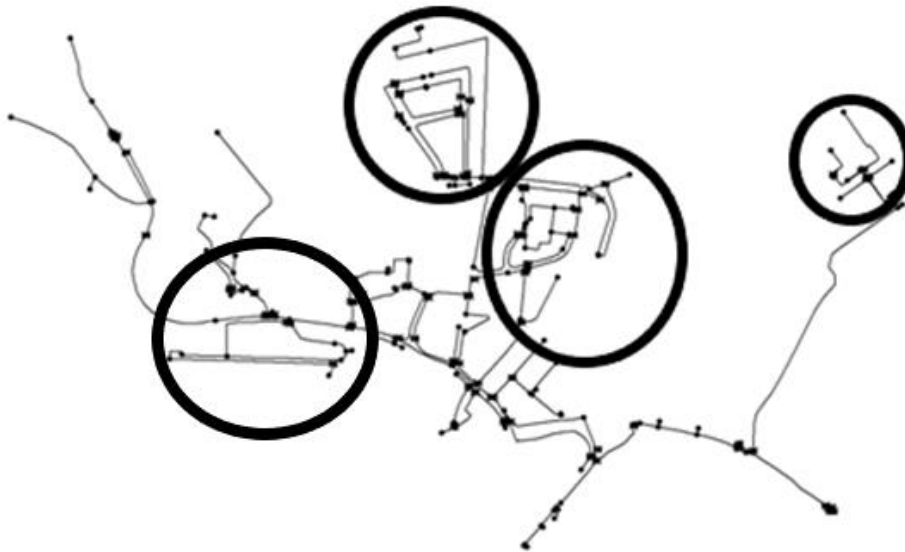


Figura 5.1 – Modelo de 2019 da ZMC de Cacilhas, antes da intervenção (Extraído do EPANET 2.2).

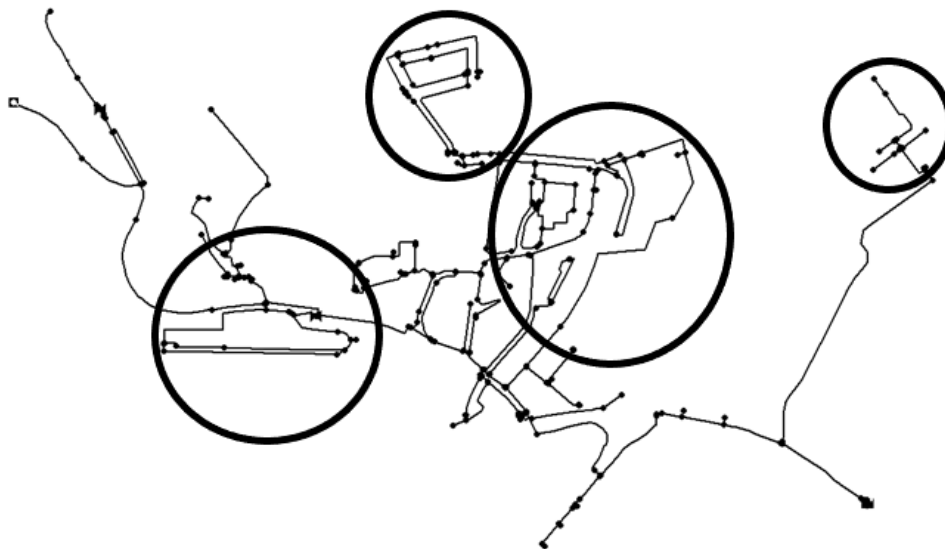


Figura 5.2 – Modelo de 2022 da ZMC de Cacilhas, depois da intervenção (Extraído do EPANET 2.2).

Trata-se de um sistema que abastece na sua maioria uma zona urbana, onde predominam edifícios entre dois e quatro pisos de altura.

Com o objetivo de se compreender a variação altimétrica da zona em estudo, apresenta-se na Figura 5.3 o mapa de isolinhas de cotas topográficas da rede de distribuição (mapa extraído do software EPANET 2.2).

As cotas altimétricas da zona em estudo variam entre os 18 m e os 86 m, sendo por isso, o declive do terreno acentuado, como é possível observar na Figura 5.4. O reservatório está à cota 110 m (cota da superfície livre), sendo a variação de 92 m desde o ponto mais baixo da rede até à cota da superfície livre do reservatório.

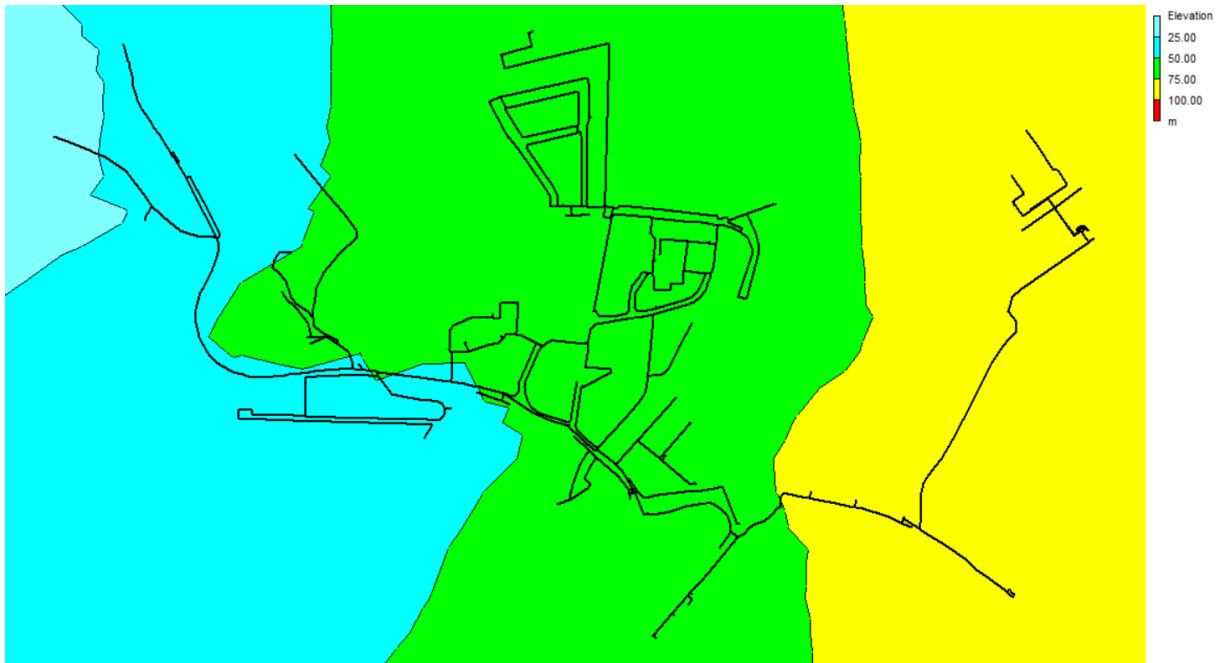


Figura 5.3 – Gráfico de isolinhas de cotas topográficas da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

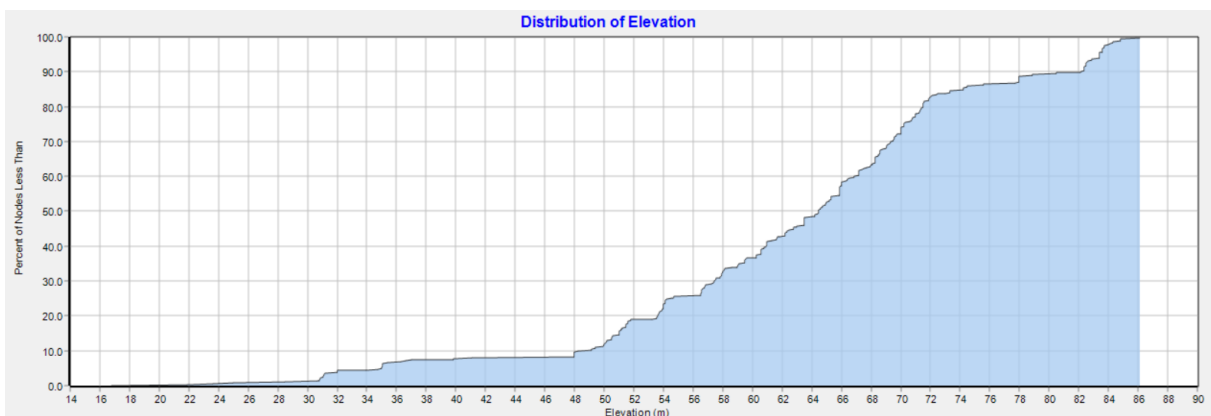


Figura 5.4 – Gráfico da distribuição de elevação da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

Na zona em estudo existem dois grandes consumidores, sendo eles, o Oeiras Parque (centro comercial) e uma fonte situada numa rotunda entre o Oeiras Parque, o Leroy Merlin e o novo edifício da Câmara Municipal de Oeiras, como é possível ver na Figura 5.5 a sua localização em Cacilhas. Para avaliar o impacto do perfil de consumos destes consumidores, existem no local de consumo um sistema de telemetria, com um *data logger* de caudal.



Figura 5.5 – Localização dos grandes consumidores na fotografia aérea de Cacilhas, em Oeiras; 1) Oeiras Parque; 2) Fonte (imagem obtida via Google Maps).

Em termos de diâmetros das condutas, a rede de distribuição antes da intervenção variava entre 25 e 200mm, como é possível observar na Figura 5.6, depois da intervenção a rede de distribuição varia entre 28mm e 181mm, como é possível observar na Figura 5.7.

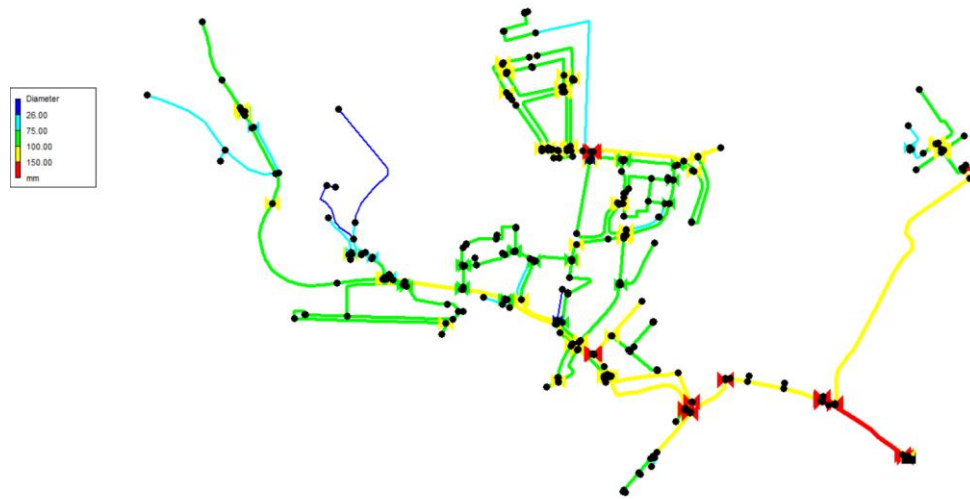


Figura 5.6 – Representação dos diâmetros das condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

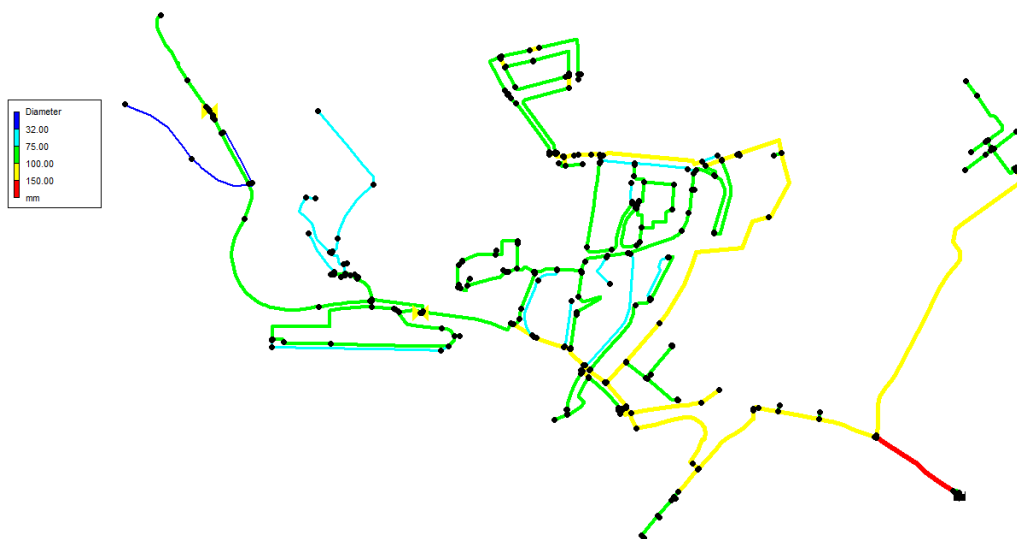


Figura 5.7 – Representação dos diâmetros das condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

E assim, chegamos à estrutura-base do sistema de distribuição, mais conhecido por “esqueleto” da rede. Este foi claramente um sistema construído por forma a acompanhar uma expansão urbana pouco planeada mostrando assim um aspeto moderadamente assimétrico.

Tendo já efetuado uma análise da infraestrutura física, passamos então à análise das principais variáveis de estado, através da execução de simulações, para verificarmos o comportamento da rede antes e depois da intervenção efetuada.

5.2.1 Padrões de consumo residenciais e dos grandes consumidores

Os modelos foram desenvolvidos para simulação em período alargado, com um padrão de consumo geral para toda a rede, como é possível verificar na Figura 5.8, com exceção de dois grandes consumidores, como é possível observar na Figura 5.9 e Figura 5.10, utilizados e inseridos apenas nos nós dos grandes consumidores.

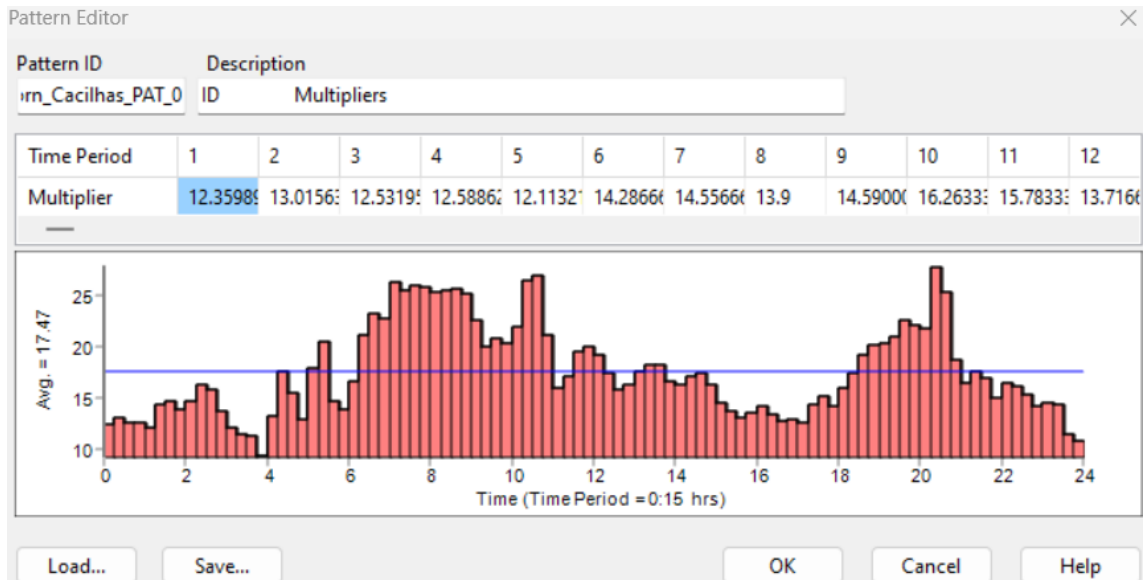


Figura 5.8 – Padrão de consumo residencial, utilizado em toda a ZMC (Extraído do EPANET 2.2).

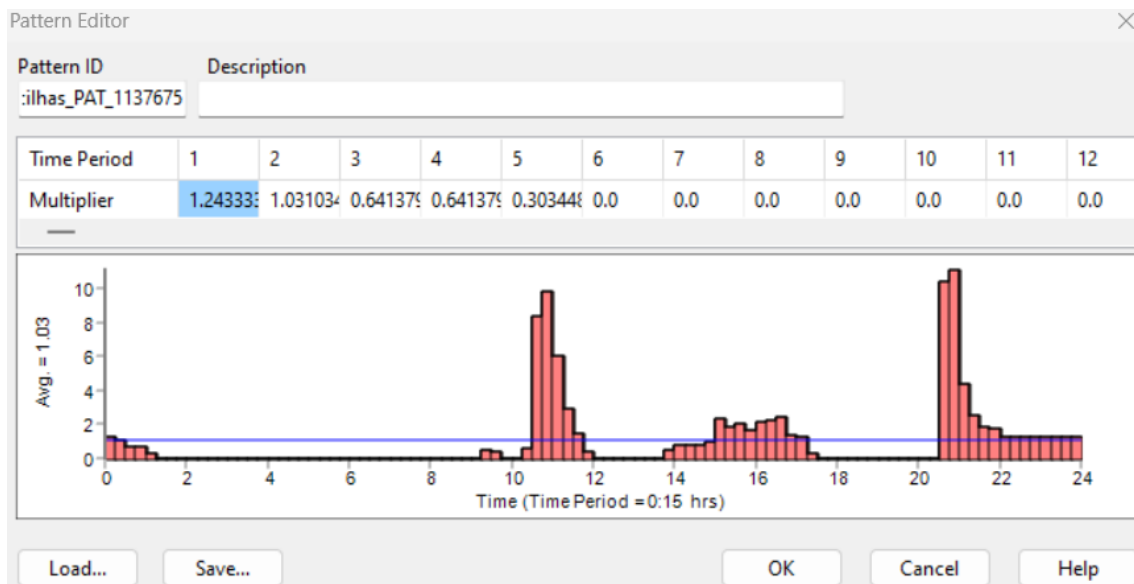


Figura 5.9 – Padrão de consumo do grande consumidor (fonte), utilizado apenas no nó do grande consumidor (Extraído do EPANET 2.2).

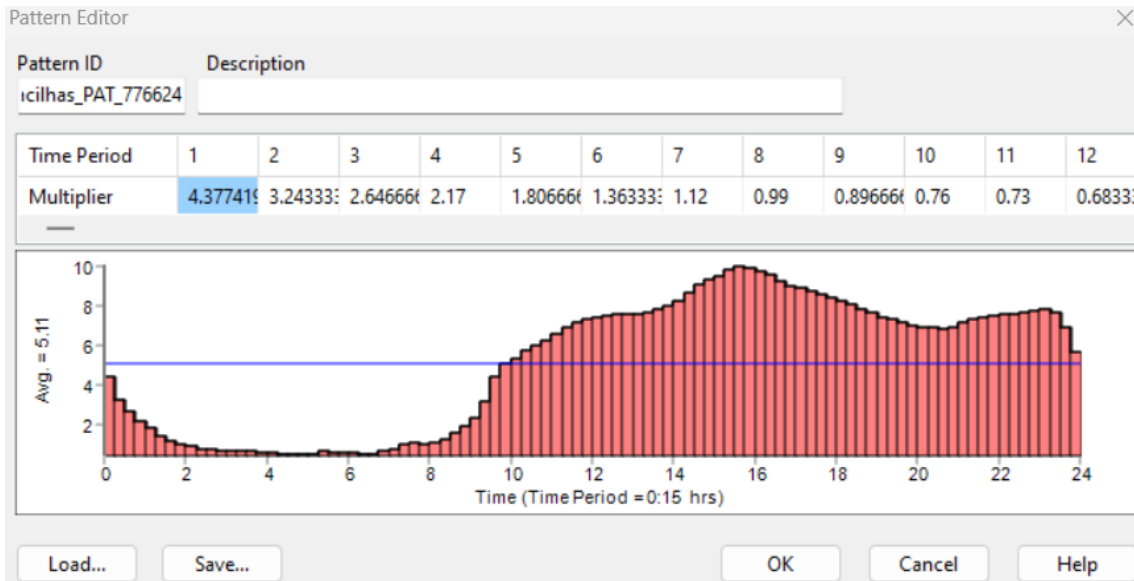


Figura 5.10 – Padrão de consumo do grande consumidor (centro comercial), utilizado apenas no nó do grande consumidor (Extraído do EPANET 2.2).

Executando a simulação, é possível observar na Figura 5.11 que o consumo máximo de toda a ZMC se dá às 20:30 e o consumo mínimo às 3:45.

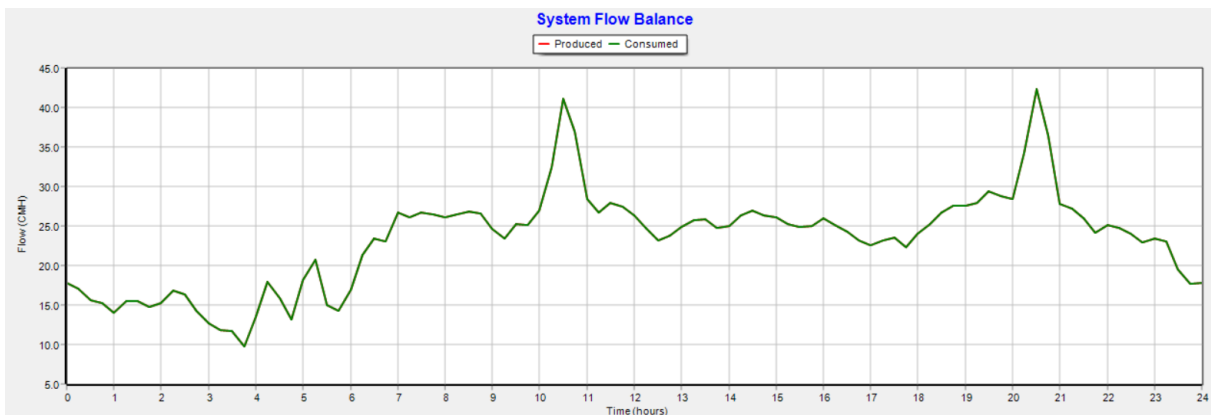


Figura 5.11 – Gráfico temporal do consumo total da ZMC de Cacilhas (Extraído do EPANET 2.2).

5.2.2 Caudais

Na Figura 5.12 é possível observar os caudais à hora de maior consumo antes da intervenção efetuada (através de cores e traço proporcional ao valor) e, na Figura 5.13 depois da intervenção efetuada (através de cores e traço proporcional ao valor), tendo maior realce os traços que transportam efetivamente os caudais mais elevados.

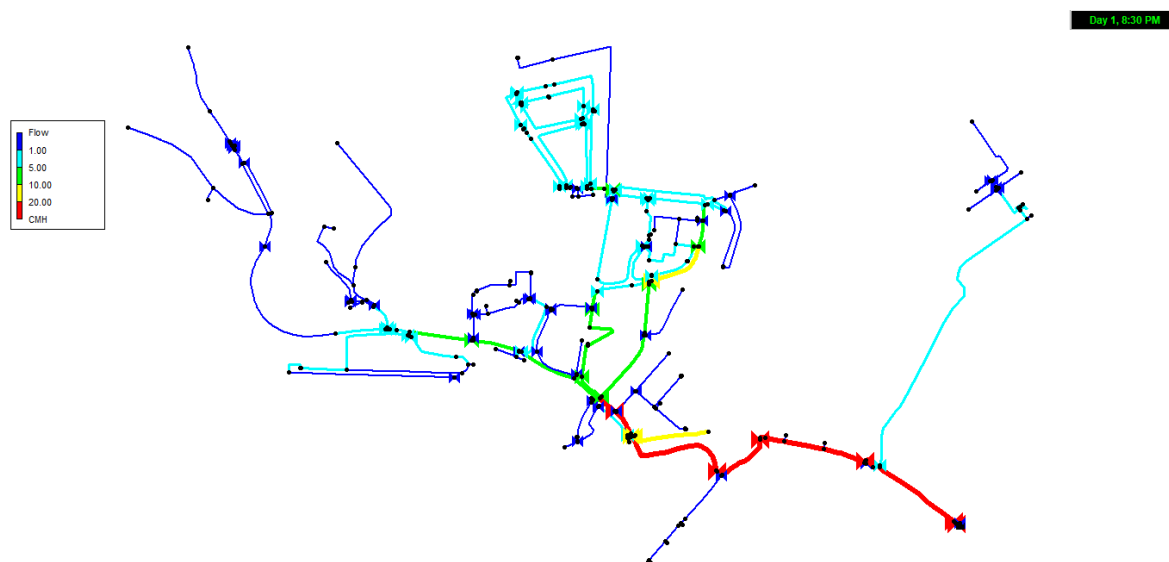


Figura 5.12 – Representação do caudal nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

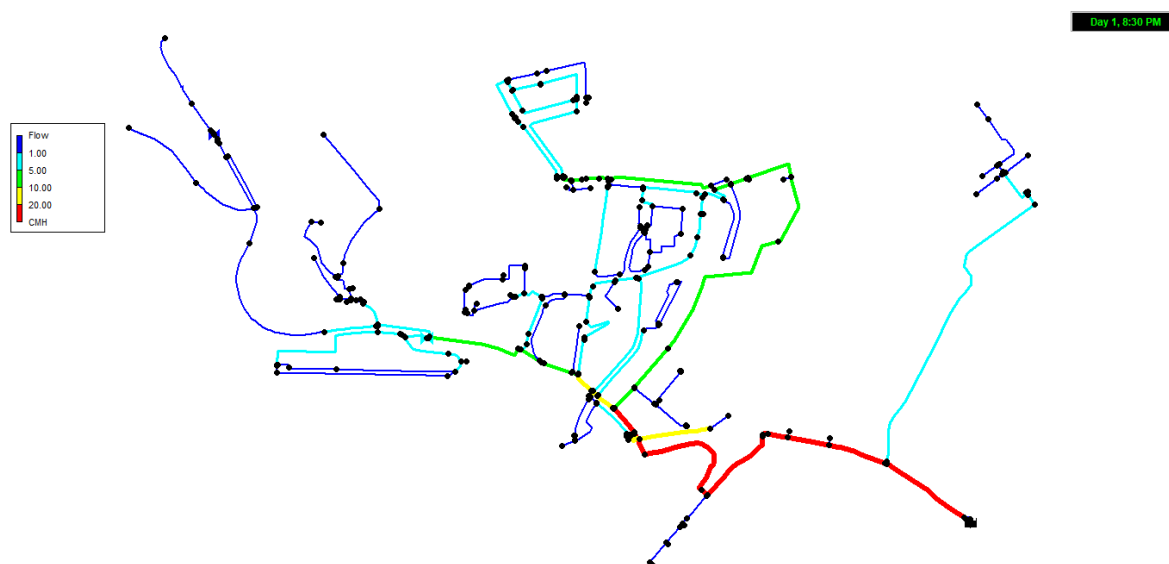


Figura 5.13 – Representação do caudal nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

Efetuando-se uma comparação entre o “esqueleto” de diâmetros com a distribuição dos caudais, verifica-se que existe alguma sobreposição entre ambos, tanto no modelo antes da intervenção, como no modelo depois da intervenção.

5.2.3 Velocidades

Na Figura 5.14 e Figura 5.15 é possível analisar a velocidade na hora de maior consumo, tanto no modelo antes da intervenção, como no modelo depois da intervenção. Esta análise é importante para conhecer o funcionamento do sistema em relação às velocidades.

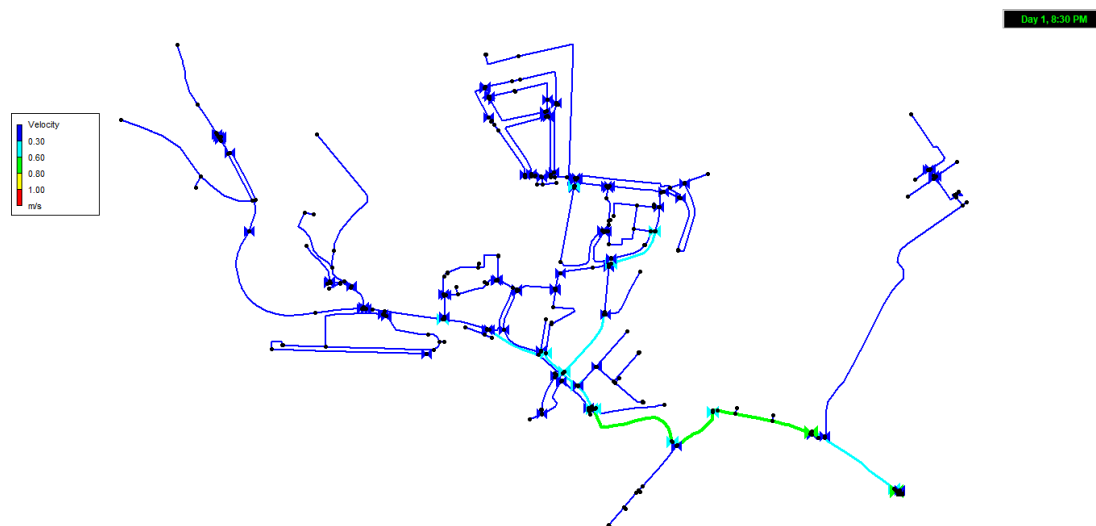


Figura 5.14 – Representação da velocidade nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

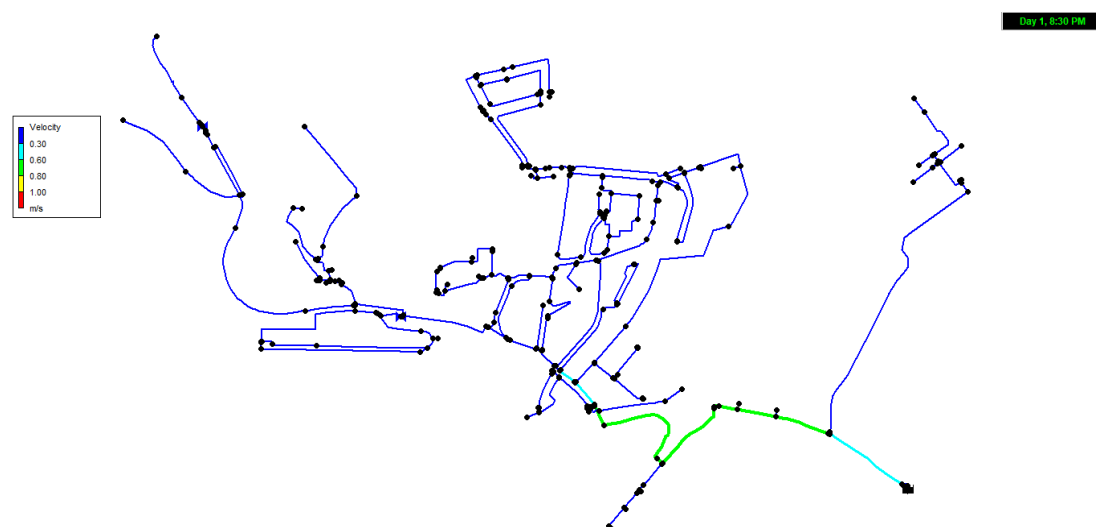


Figura 5.15 – Representação da velocidade nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

No modelo antes e depois da intervenção, é possível observar que, as velocidades nas condutas na hora de maior consumo, é de modo geral, inferior a 0,3 m/s, o valor mínimo estipulado pelo D.R. n.º 23/95, (MOPTC, 1995), isto quer dizer que estamos perante um sistema sobredimensionado (em grande parte, devido aos diâmetros mínimos recomendados pelo D.R. n.º 23/95, para situações de incêndio).

5.2.4 Teste de caudal de incêndio

Na Figura 5.16 e Figura 5.17 é possível verificarmos como o sistema se vai comportar numa situação de combate a incêndio (abertura de um marco de incêndio). Esta análise é importante para conhecer o funcionamento da ZMC numa situação de caudal de incêndio, mais concretamente, em relação à diferença de pressão.

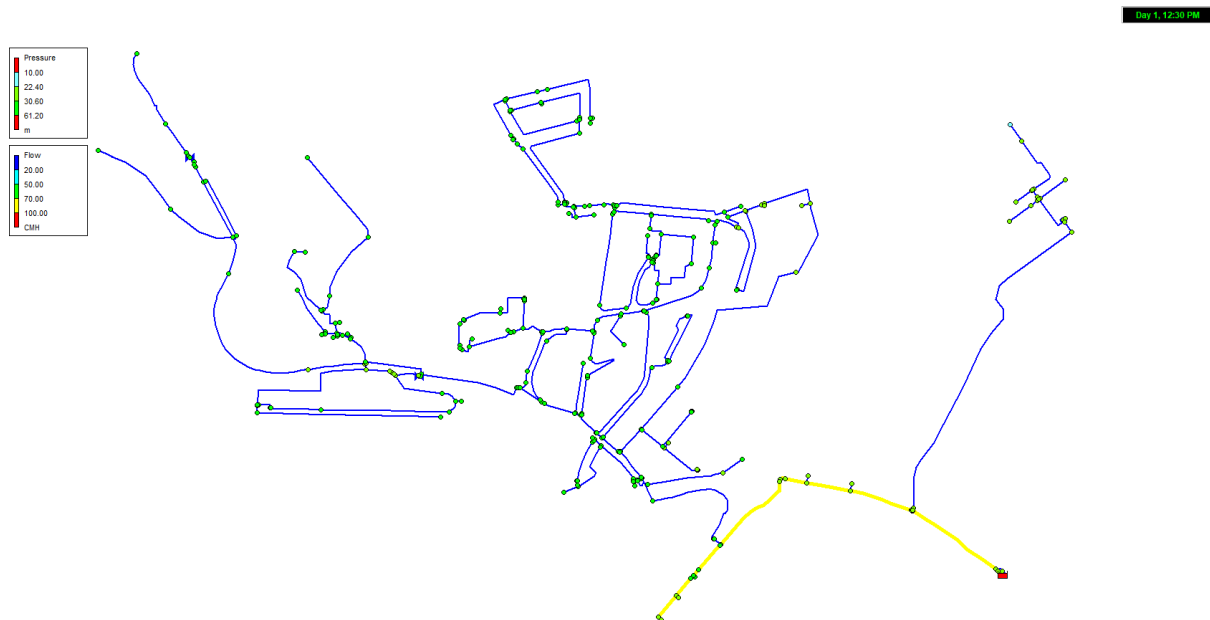


Figura 5.16 – Teste de caudal de incêndio na ZMC de Cacilhas, através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

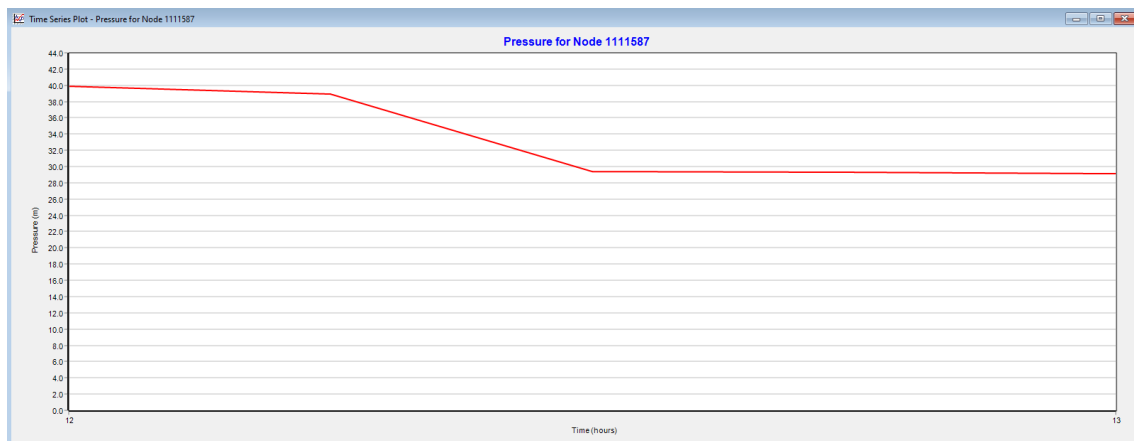


Figura 5.17 – Comportamento da pressão na rede de abastecimento a montante de marco de incêndio a ser aberto (Extraído do EPANET 2.2).

O teste de caudal de incêndio realizado demonstrou uma diferença de pressão de 10 m.c.a., tanto no modelo hidráulico, como é possível observar na Figura 5.17, como nos resultados de campo, como é possível observar na Figura 5.18 e Figura 5.19, esta pequena diferença indica que se trata de um sistema com elevada capacidade hidráulica.



Figura 5.18 – À esquerda temos o marco de incêndio do extremo da rede aberto e à direita temos um manômetro digital montado em marco de incêndio situado a montante (tiradas em 2024).



Figura 5.19 – À esquerda temos a leitura da pressão em bar antes da abertura do marco de incêndio e à direita temos a leitura da pressão em bar depois da abertura do marco de incêndio (tiradas em 2024).

Para a realização deste teste de caudal de incêndio, foi necessário a criação de um padrão de consumo no EPANET, como é possível observar na Figura 5.20, onde o caudal de incêndio de $72 \text{ m}^3/\text{h}$ tem início às 12:30 em equivalência com o teste efetuado em campo (abertura de M.I.).

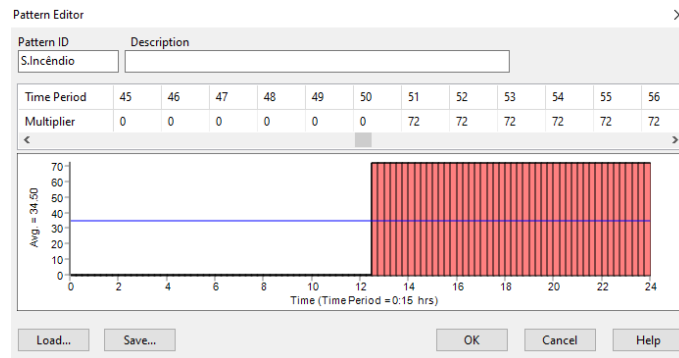


Figura 5.20 – Padrão de consumo de marco de incêndio. Abertura de M.I. pelas 12:30 (Extraído do EPANET 2.2).

5.2.5 Perdas de Carga

Na Figura 5.21 e Figura 5.22 é possível analisar a perda de carga unitária na hora de maior consumo, tanto no modelo antes da intervenção, como no modelo depois da intervenção. Esta análise é importante para conhecer o funcionamento do sistema em relação às perdas de carga (se o sistema tem ou não grandes perdas de carga e se tem capacidade para crescimento dos consumos).

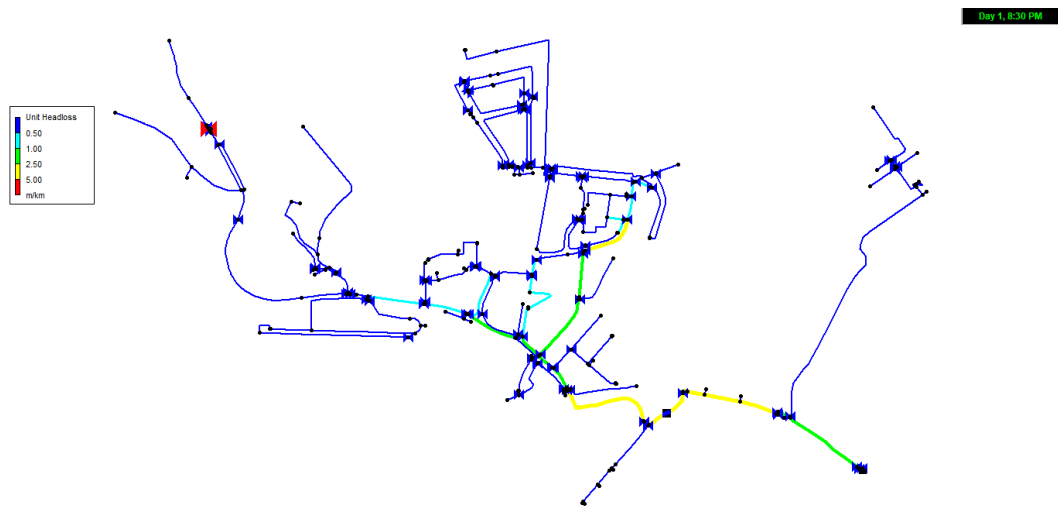


Figura 5.21 – Representação da perda de carga unitária nas condutas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

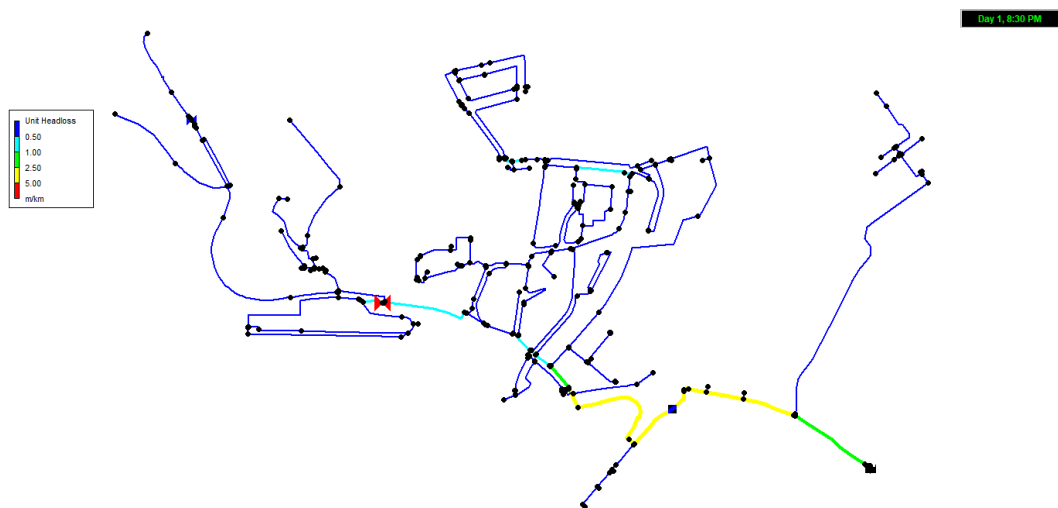


Figura 5.22 – Representação da perda de carga unitária nas condutas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores e traço proporcional ao valor (Extraído do EPANET 2.2).

No modelo antes e depois da intervenção, é possível observar que, a perda de carga unitária na hora de maior consumo é pequena (a rondar os 4 m/km no trecho mais desfavorável, como é possível observar na Figura 5.21 e Figura 5.22), isto quer dizer que estamos perante um sistema com capacidade para aumentar os consumos.

5.2.6 Pressões

Ao analisar o sistema em relação às pressões nos nós de consumo, podemos verificar que se trata de um sistema com baixa perda de carga e elevado desnível altimétrico, será importante sobretudo averiguar as pressões máximas, que se verificarão à hora de menor consumo (que se dá às 03:45), como é possível observar na Figura 5.23 e Figura 5.24.

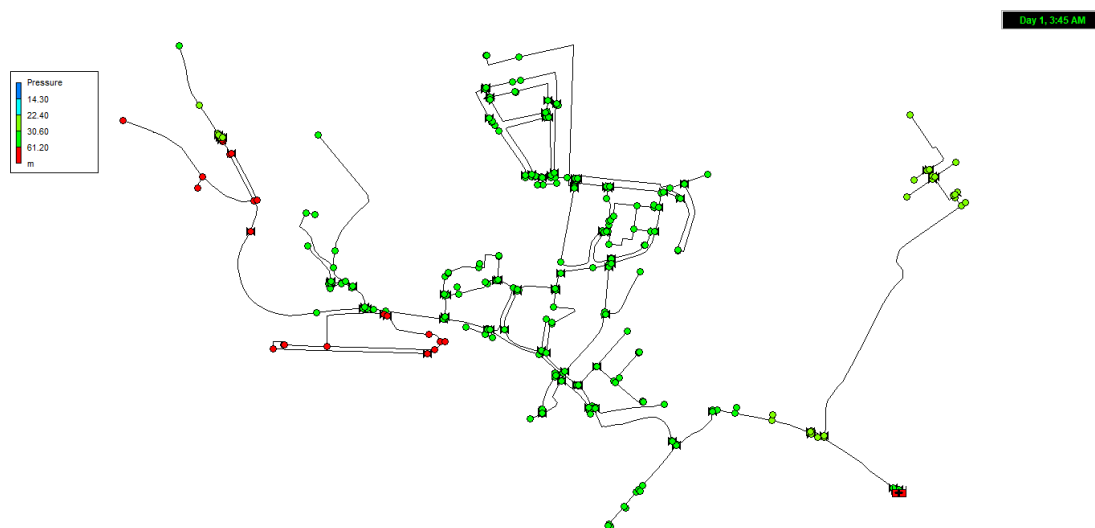


Figura 5.23 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).



Figura 5.24 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019) (Extraído do EPANET 2.2).

Os nós com pressão excessiva superiores a 600kPa, como definido no D.R. n.º 23/95, (MOPTC, 1995) estão representados com a cor vermelha. Tal como se previa, existem nós com pressões excessivas bastantes altas (em alguns nós, superiores a 90 m.c.a.),

confirmando a ideia de se tratar de um sistema onde é necessário instalar uma válvula redutora de pressão (VRP), para conseguir baixar a pressão na zona onde existem pressões excessivas, e, por conseguinte, cumprir o regulamento.

No modelo depois da intervenção, como é possível observar na Figura 5.25 e Figura 5.26, não existem pressões excessivas, logo podemos concluir que a intervenção foi bem-sucedida na redução de pressão na ZMC de Cacilhas, instalando apenas uma VRP na zona onde existia pressões mais elevadas (a VRP vem assinalada na Figura 5.25 com um círculo vermelho). Com a instalação desta VRP, foi possível reduzir a pressão em 35 m.c.a..

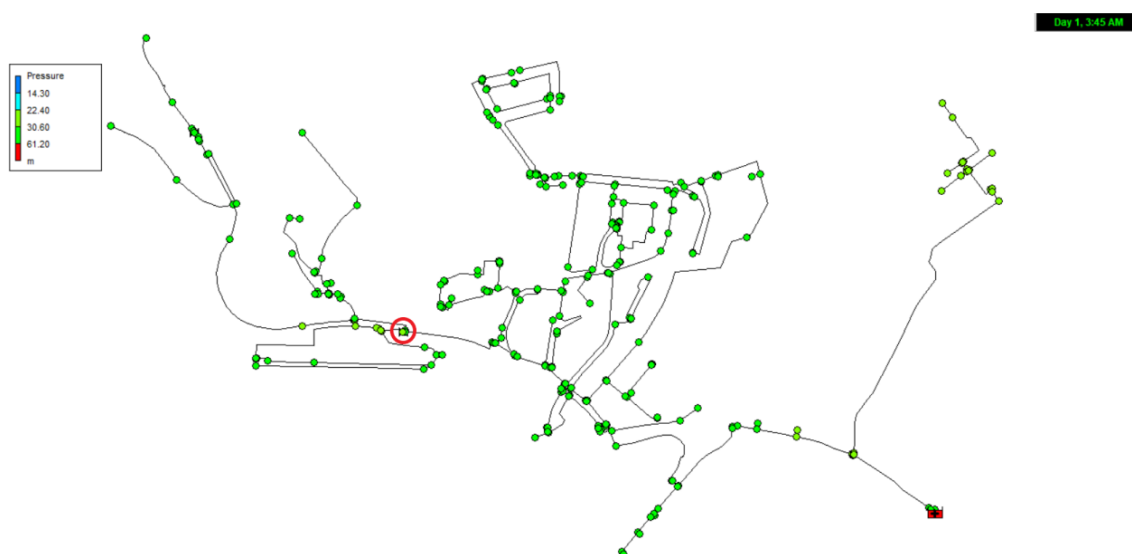


Figura 5.25 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo 2022), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).



Figura 5.26 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022) (Extraído do EPANET 2.2).

5.2.7 Qualidade da água

Por último, vamos analisar o modelo em relação à qualidade da água nos nós, para isso, é necessário compreender o decaimento de cloro ao longo do sistema. Apresenta-se na Figura 5.27 até à Figura 5.29 o modelo com a concentração de cloro por unidade de volume da rede de distribuição antes e depois da intervenção (mapa extraído do software EPANET 2.2). Tendo-se obtido na calibração do modelo o valor da constante de velocidade de reação no seio do líquido de -1.30 (k_b) e constante de velocidade de reação na parede da conduta -1.00 (k_w), como descritos no subcapítulo 4.5.2 (Calibração de qualidade da água (cloro)).

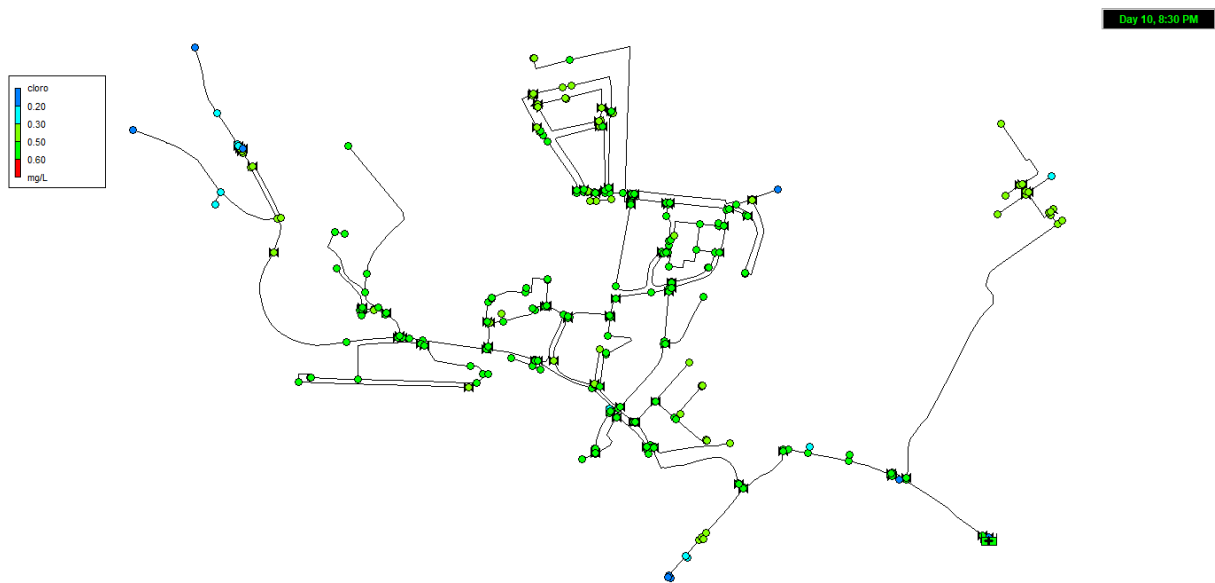


Figura 5.27 – Representação da concentração de cloro por unidade de volume na ZMC de Cacilhas antes da intervenção (modelo de 2019), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).

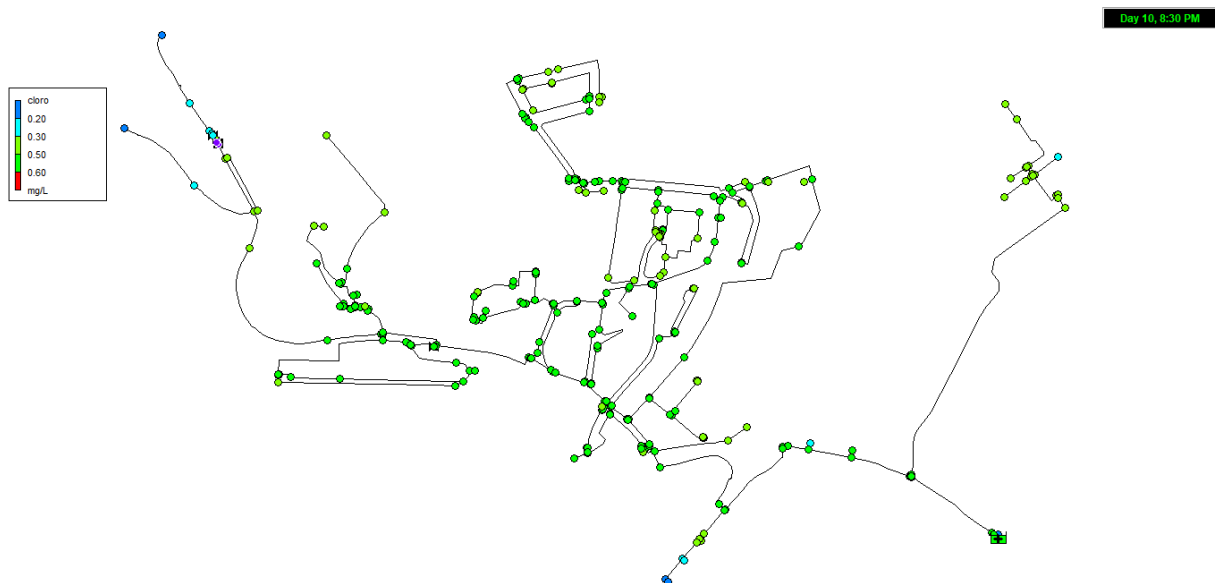


Figura 5.28 – Representação da concentração de cloro por unidade de volume na ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022), através de cores (Extraído do EPANET 2.2).

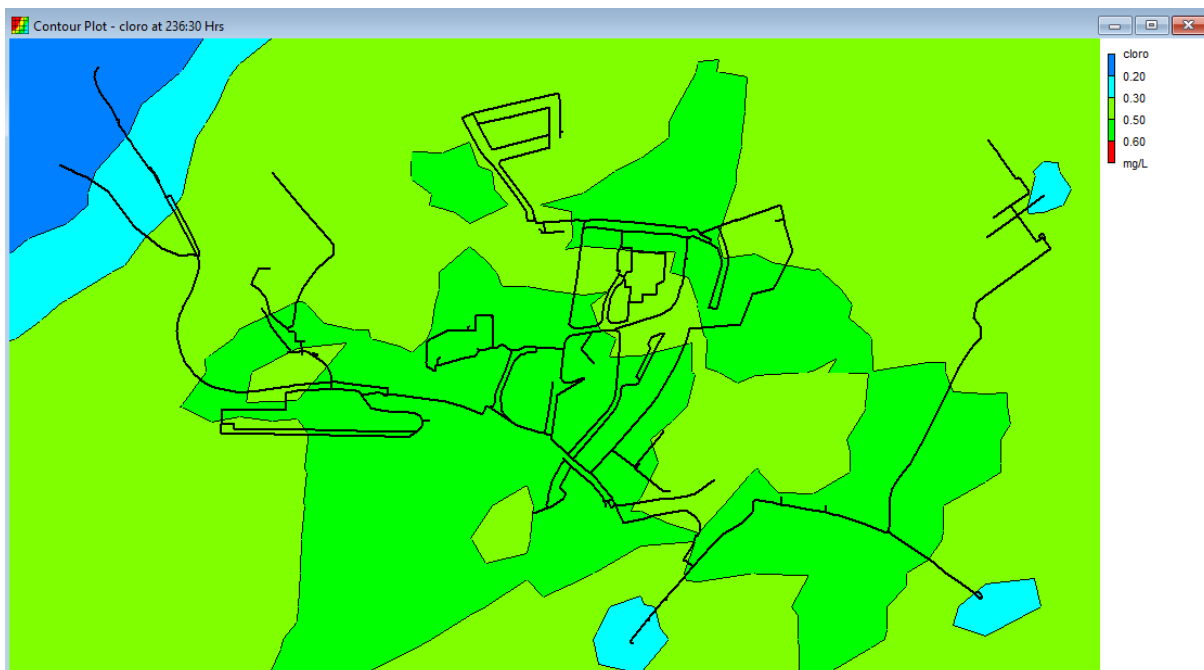


Figura 5.29 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas depois da intervenção (modelo de 2022) (Extraído do EPANET 2.2).

Ao analisarmos os modelos podemos concluir que, a intervenção eliminou um extremo de rede onde o cloro era inferior a 0,2 mg/l e em algumas zonas da rede de distribuição gerou uma ligeira diferença na concentração de cloro por unidade de volume, estando os resultados, na sua grande maioria, na gama dos valores recomendados no Decreto-Lei n.º 69/2023 (AAC, 2023), que diz que devem estar entre 0,2 e 0,6 mg/l de cloro residual livre.

Esta diferença deveu-se, em parte, devido a alteração de condutas, diâmetros das condutas e fechamento de malhas (eliminação de alguns fins de linha), mas não abrangeu totalmente a ZMC, tendo ficado três extremos de rede abaixo de 0,2 mg/l, o que vai ser necessário efetuar-se descargas periódicas.

5.2.8 Segunda solução de otimização de pressões

Criando uma segunda solução de otimização de pressões, relativa às pressões mínimas recomendáveis para as edificações existentes em vez da pressão máxima recomendada pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95 (MOPTC, 1995) e, tendo em conta o investimento e a qualidade da água, vamos necessitar de instalar uma segunda VRP e execução de um troço de conduta (investimento de aproximadamente 8500,00 €), o que vai permitir baixar as pressões numa zona considerável da ZMC, como é possível observar na Figura 5.30 (onde a nova VRP a instalar vem assinalada com um círculo vermelho) e Figura 5.31.

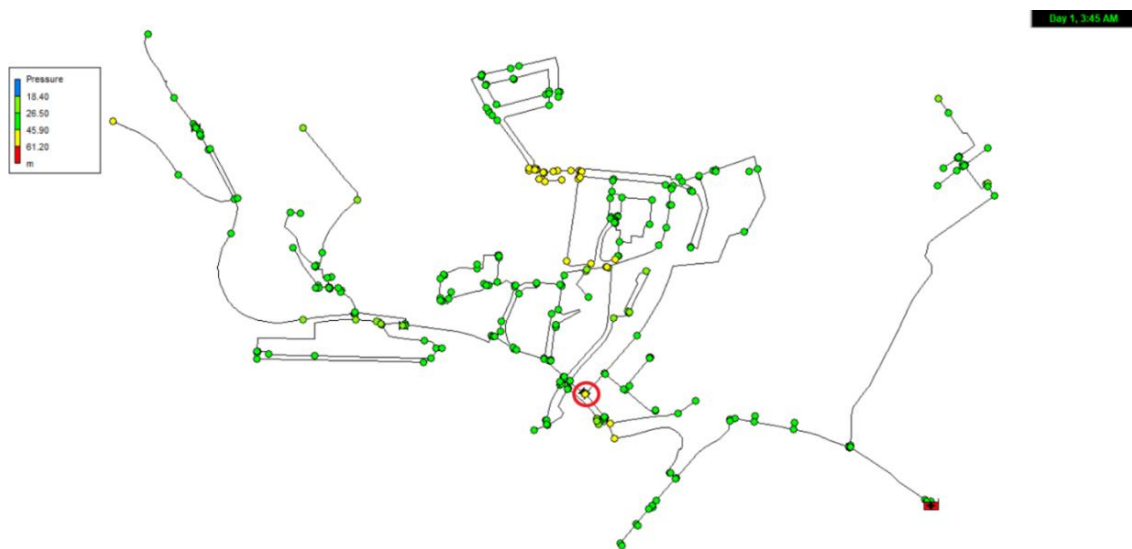


Figura 5.30 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas, através de cores. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).



Figura 5.31 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

Ao analisarmos o modelo otimizado podemos concluir que, a instalação desta segunda VRP permite reduzir a pressão abaixo dos 45,9 m.c.a. em praticamente todos os nós da ZMC na hora de menor consumo (maior pressão) e, reduzir a pressão média da primeira solução (modelo atual) de aproximadamente 45 m.c.a., como é possível observar na Figura 5.32, para aproximadamente 35 m.c.a., como é possível observar na Figura 5.33, na hora de menor consumo (maior pressão). Com a instalação desta VRP, é possível reduzir a pressão em 24,8 m.c.a., e, mesmo assim, na VRP instalada atualmente, é possível reduzir a pressão em 16 m.c.a. (o que perfaz uma redução de 40,8 m.c.a. na zona onde existia pressões excessivas).

Ao efetuar esta redução de pressão, vai permitir melhorar a qualidade do serviço e reduzir as perdas reais de água.

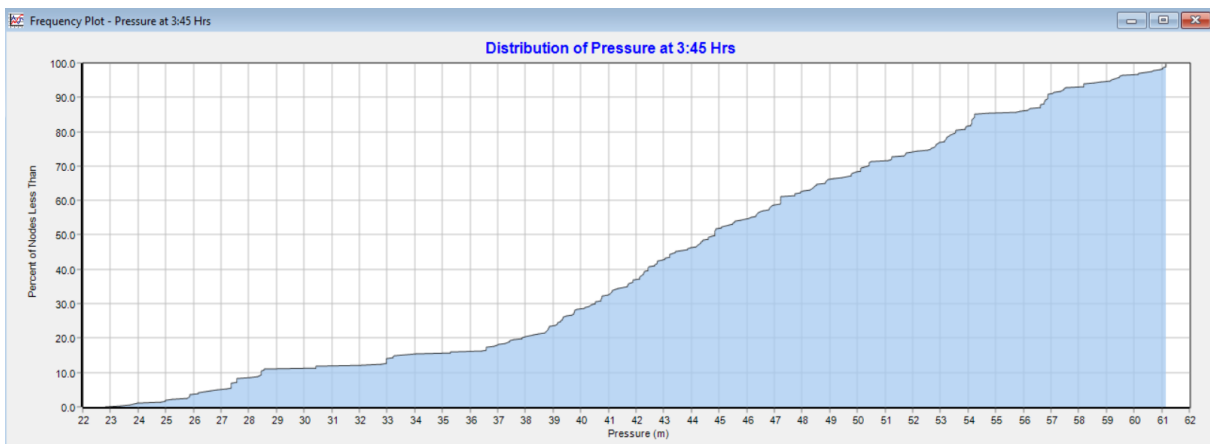


Figura 5.32 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Primeira solução de otimização de pressões, modelo de 2022 (Extraído do EPANET 2.2).

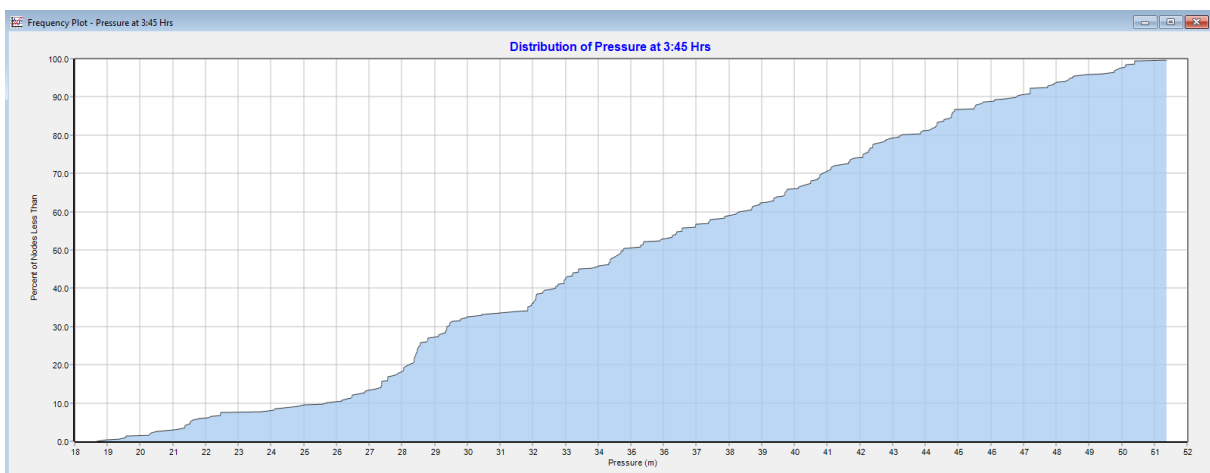


Figura 5.33 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

Por último, vamos analisar o segundo modelo otimizado em relação à qualidade da água nos nós, como é possível observar na Figura 5.34 e Figura 5.35, a diferença é pequena em relação à solução anterior, o que não põe em causa, em termos de qualidade da água, este segundo modelo otimizado.

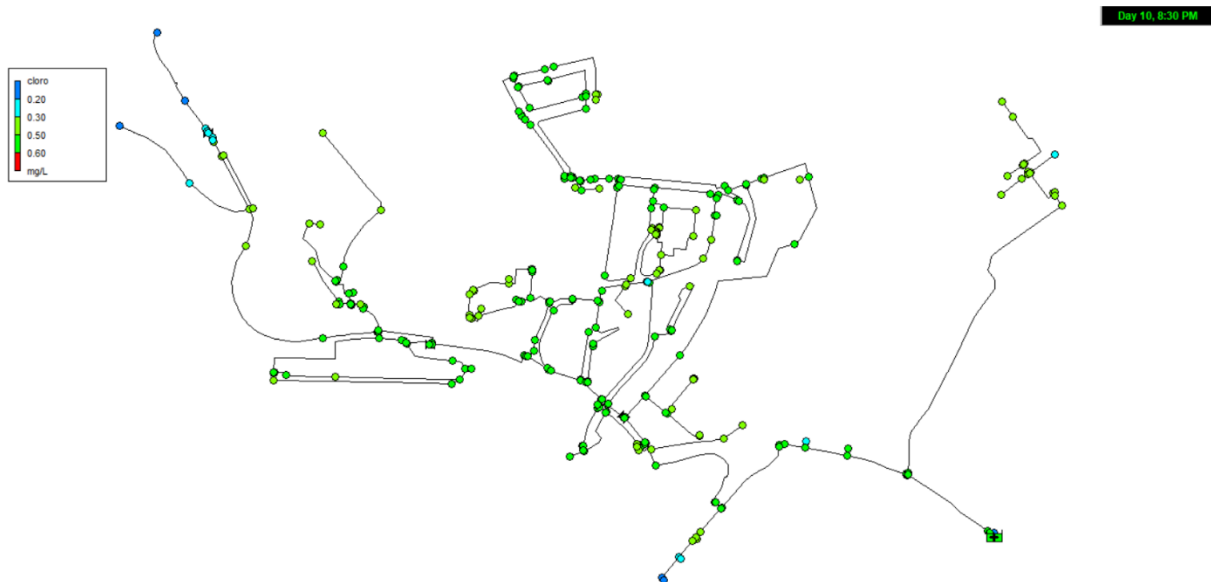


Figura 5.34 – Representação da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas, através de cores. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

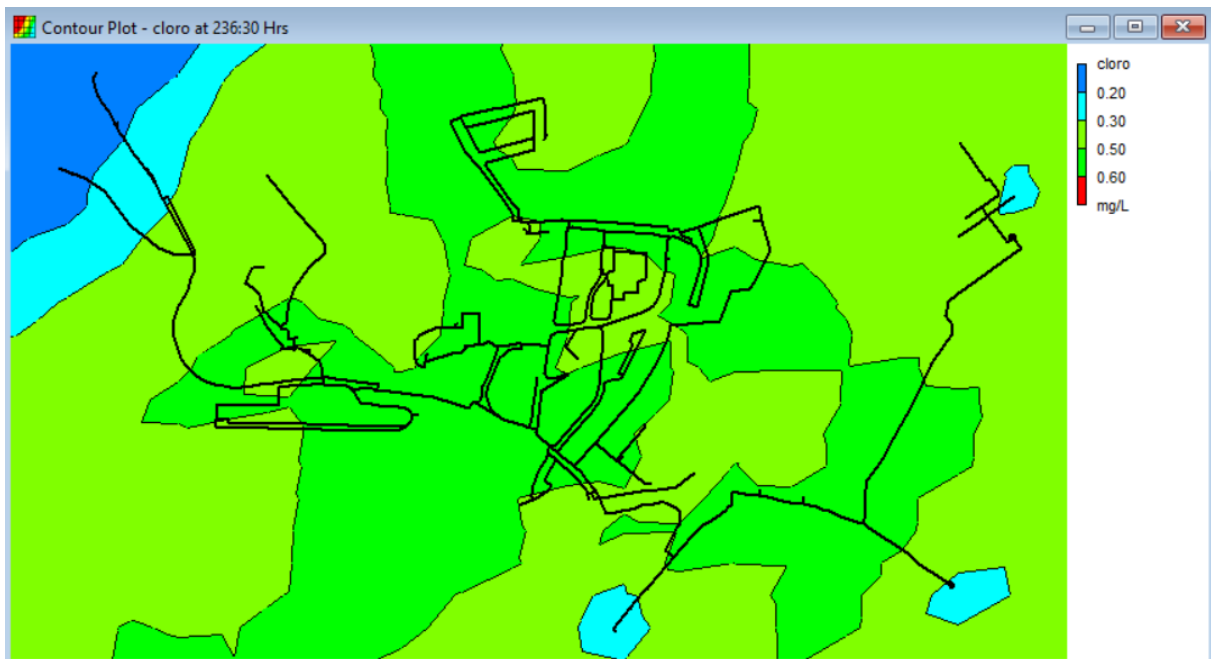


Figura 5.35 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas. Segunda solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

5.2.9 Terceira solução de otimização de pressões

Criando uma terceira solução de otimização de pressões, relativa às pressões mínimas recomendáveis para as edificações existentes (similar à segunda solução) em vez da pressão máxima recomendada pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95 (MOPTC, 1995) e, tendo em conta o investimento e a qualidade da água, vamos necessitar de instalar uma segunda VRP (investimento de aproximadamente 7800,00 €), o que vai permitir baixar as pressões numa zona considerável da ZMC, como é possível observar na Figura 5.36 (onde a nova VRP a instalar vem assinalada com um círculo vermelho) e Figura 5.37.

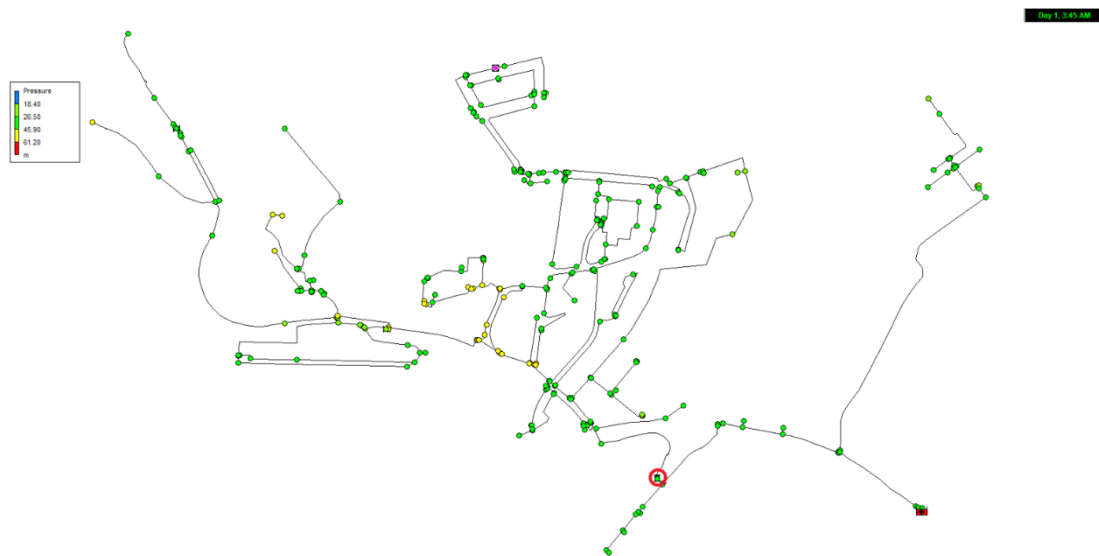


Figura 5.36 – Representação da pressão nos nós da ZMC de Cacilhas, através de cores. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).



Figura 5.37 – Gráfico de isolinhas de pressão da ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

Ao analisarmos o modelo otimizado podemos concluir que, a instalação desta segunda VRP permite reduzir a pressão abaixo dos 45,9 m.c.a. em praticamente todos os nós da ZMC na hora de menor consumo (maior pressão) e, reduzir a pressão média da primeira solução (modelo atual) de aproximadamente 45 m.c.a., como é possível observar na Figura 5.38, para aproximadamente 36 m.c.a., como é possível observar na Figura 5.39, na hora de menor consumo (maior pressão). Com a instalação desta VRP, é possível reduzir a pressão em 10,4 m.c.a., e, mesmo assim, na VRP instalada atualmente, é possível reduzir a pressão em 29,9 m.c.a. (o que perfaz uma redução de 40,3 m.c.a. na zona onde existia pressões excessivas).

Ao efetuar esta redução de pressão, vai permitir melhorar a qualidade do serviço e reduzir as perdas reais de água.

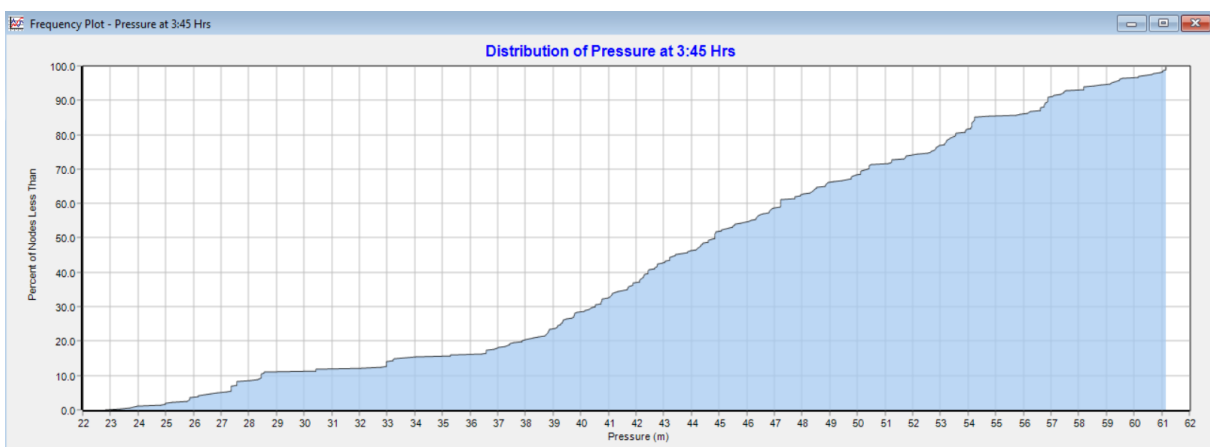


Figura 5.38 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Primeira solução de otimização de pressões, modelo de 2022 (Extraído do EPANET 2.2).

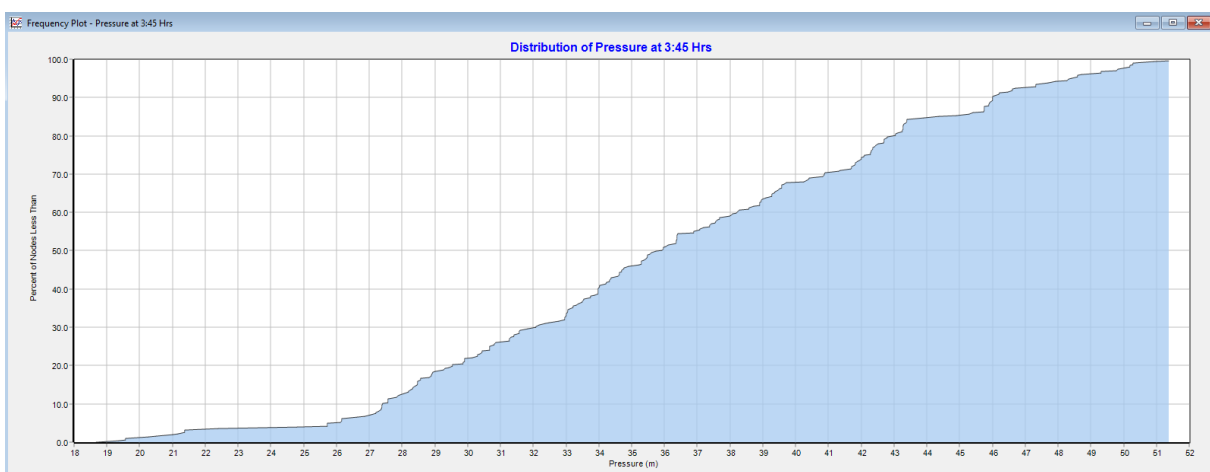


Figura 5.39 – Gráfico da distribuição de pressões da ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

Por último, vamos analisar o terceiro modelo otimizado em relação à qualidade da água nos nós, como é possível observar na Figura 5.40 e Figura 5.41, a diferença é pequena em relação à solução anterior, o que não põe em causa, em termos de qualidade da água, este terceiro modelo otimizado.

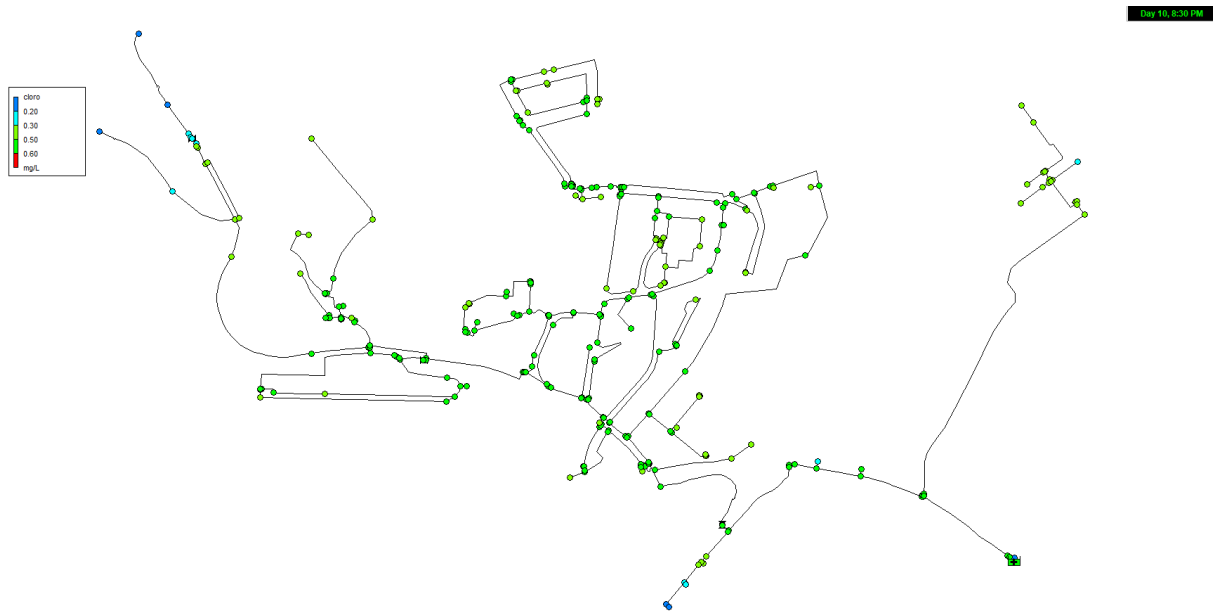


Figura 5.40 – Representação da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas, através de cores. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

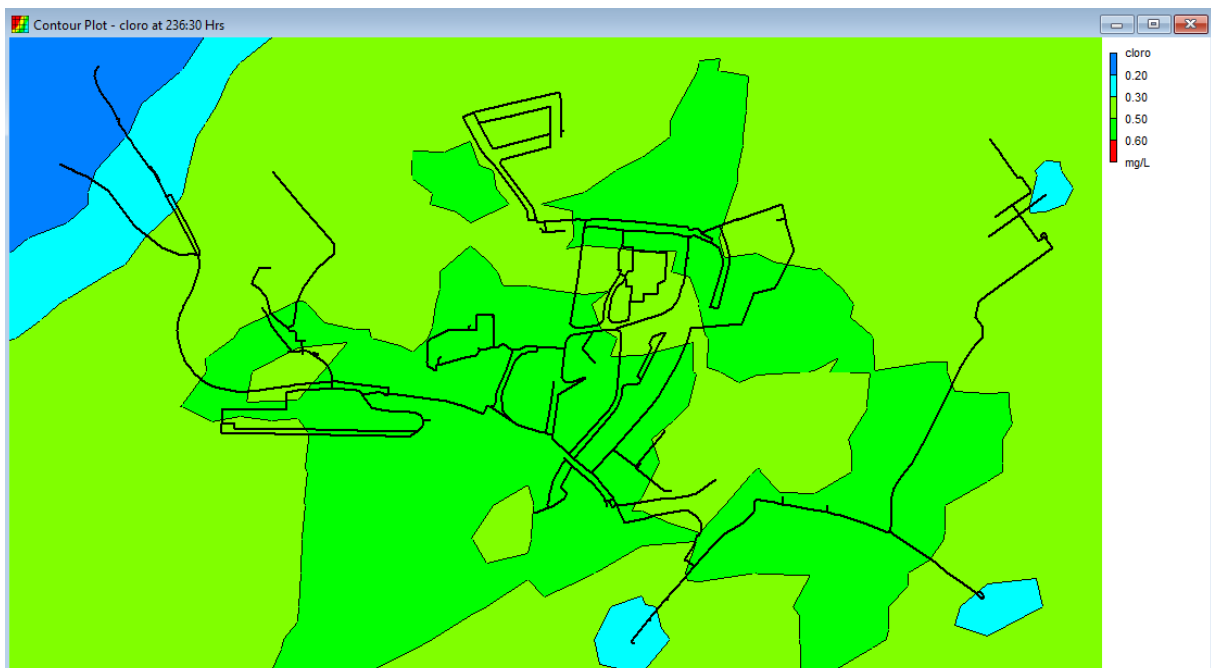


Figura 5.41 – Gráfico de isolinhas da quantidade de cloro por litro de água na ZMC de Cacilhas. Terceira solução de otimização de pressões (Extraído do EPANET 2.2).

5.3 Análise económica

Efetuada uma simples análise económica, é possível verificarmos que o retorno do investimento da instalação de uma VRP ocorrerá em menos de quatro meses, como é possível observar no Quadro 5.1, relativamente à substituição das condutas de fibrocimento e ferro galvanizado, que têm maior probabilidade de ocorrer falhas (roturas/fugas), o retorno do investimento é inferior a dois anos, como é possível observar no Quadro 5.2, e, relativamente ao investimento total da empreitada (devido, em grande parte, à inexistência de válvulas de ramal e inexistência ou obsolescência de válvulas da rede de distribuição), o retorno do investimento é cerca de dez a onze anos, como é possível observar no Quadro 5.2.

Quadro 5.1 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2019 com o 2022).

Custo da água adquirida à EPAL $\approx 0,716 \text{ €/m}^3$
Ganhos de água $\approx 30.970,25 \text{ m}^3/\text{ano}$
Poupança $\approx 27.396,73 \text{ €/ano}$
Custo de implantação de uma válvula redutora de pressão $\approx 7.000,00 \text{ €}$
Período para amortização do investimento $< 4 \text{ meses}$

Quadro 5.2 – Retorno de investimento na ZMC de Cacilhas.

Custo de substituição das condutas de FC e FG $\approx 50.000,00 \text{ €}$
Período para amortização do investimento $< 2 \text{ anos}$
Custo total da empreitada $\approx 275.600,00 \text{ €}$
Período para amortização do investimento $\approx 10 \text{ a } 11 \text{ anos}$

Efetuada uma simples análise económica à segunda solução de otimização de pressões, é possível verificarmos que o retorno do investimento da instalação de uma segunda VRP e instalação de um troço de conduta ocorrerá em menos de 6 anos, como é possível observar no Quadro 5.3.

Quadro 5.3 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2022).

Custo da água adquirida à EPAL $\approx 0,716 \text{ €/m}^3$
Ganhos de água $\approx 2.000,00 \text{ m}^3/\text{ano}$
Poupança $\approx 1.432,00 \text{ €/ano}$
Custo de implantação de uma válvula redutora de pressão e conduta $\approx 8.500,00 \text{ €}$
Período para amortização do investimento $< 6 \text{ anos}$

Efetuada uma simples análise económica à terceira solução de otimização de pressões, é possível verificarmos que o retorno do investimento da instalação de uma segunda VRP ocorrerá em menos de 7 anos, como é possível observar no Quadro 5.4.

Quadro 5.4 – Demonstração dos gastos e ganhos na ZMC de Cacilhas (comparação do ano 2022).

Custo da água adquirida à EPAL $\approx 0,716 \text{ €/m}^3$
Ganhos de água $\approx 1.800,00 \text{ m}^3/\text{ano}$
Poupança $\approx 1.288,80 \text{ €/ano}$
Custo de implantação de uma válvula redutora de pressão $\approx 7.800,00 \text{ €}$
Período para amortização do investimento $< 7 \text{ anos}$

Apesar da primeira solução (modelo atual) resolver as pressões excessivas, propõe-se como complemento à primeira solução, a implementação da segunda solução de otimização de pressões, onde é demonstrada no subcapítulo 6.2.1 (Avaliação do desempenho das pressões) uma melhoria significativa no desempenho das pressões, e, porque, apesar do custo de investimento ser um pouco mais elevado do que a terceira solução, é a solução que permite a maior redução da pressão média da ZMC.

6 Avaliação do desempenho técnico e diagnóstico da ZMC de Cacilhas

6.1 Introdução

O presente capítulo tem como objetivo efetuar uma avaliação do desempenho técnico e diagnóstico do desempenho, antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção à ZMC de Cacilhas, para verificação se a solução foi eficiente.

Na avaliação do desempenho das pressões, também se irá efetuar uma avaliação e comparação entre o antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção à ZMC de Cacilhas e a segunda solução de otimização de pressões.

6.2 Avaliação do desempenho técnico da ZMC de Cacilhas

A avaliação do desempenho técnico do modelo desenvolvido consiste em garantir que um sistema de abastecimento de água é capaz de desempenhar adequadamente a sua missão sob as mais variadas condições operacionais.

Com a finalidade de verificar-se o comportamento da rede relativamente à gestão das pressões e velocidades, efetuaram-se estudos para avaliar a ZMC de Cacilhas quanto ao desempenho técnico, aplicando-se, para o efeito, a metodologia adaptada de “Modelação e análise de sistemas de abastecimento” (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006), para o modelo antes e depois da intervenção efetuada, e que é descrita em seguida:

1. O valor numérico de uma propriedade ou variável de estado: neste caso, escolheu-se a pressão nos nós e a velocidade nas condutas. No caso da pressão nos nós, cada ponto deve estar dentro de um valor mínimo e máximo para satisfazer o funcionamento hidráulico e, como consequência, originar melhorias nas perdas, quer diretamente pela diminuição das pressões, ou pela diminuição do número de roturas causadas por pressões elevadas;
2. As curvas de desempenho que façam a relação entre os valores das variáveis da pressão e velocidade, e, uma escala de classificação de desempenho, para cada nó e troço de rede, definida em conformidade para a pressão, como é possível observar na Figura 6.1 e Figura 6.2 e para a velocidade, como é possível observar na Figura 6.3 e Figura 6.4.

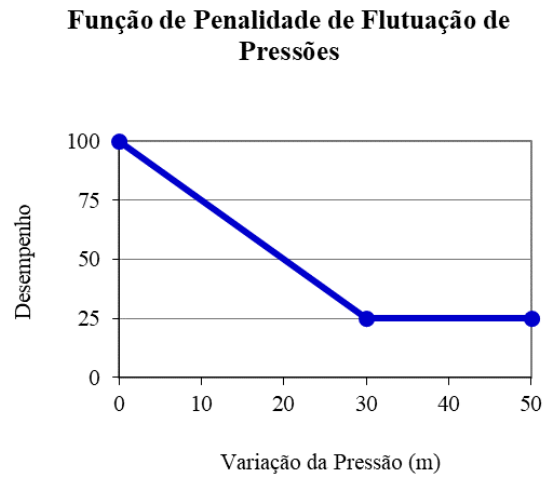
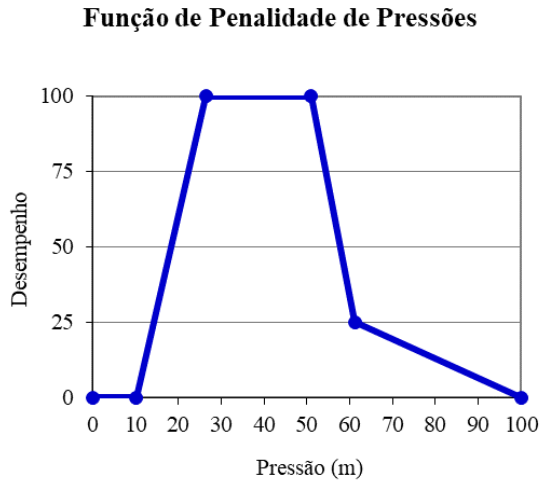


Figura 6.1 – Curvas de desempenho adotadas para as pressões (pressões e flutuação de pressões).

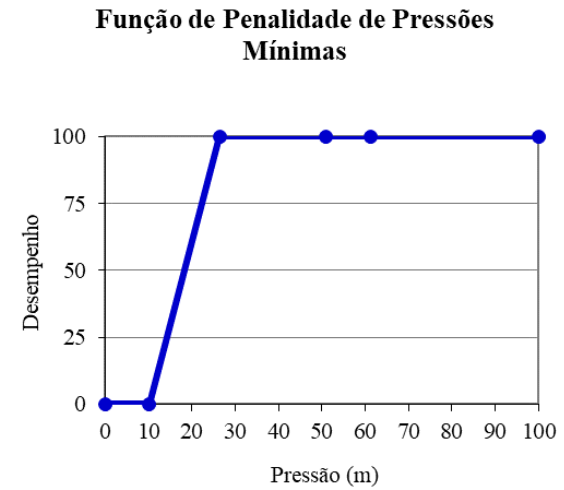
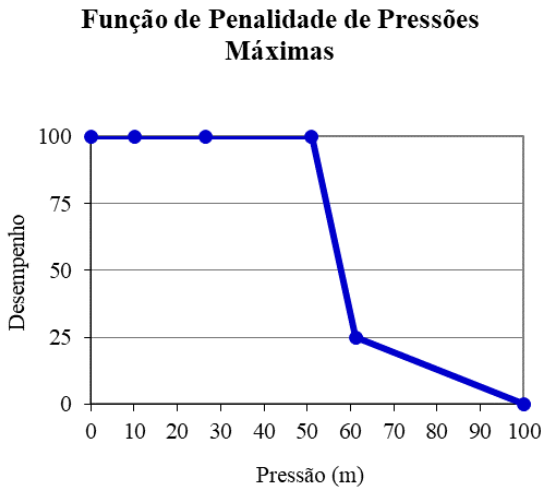


Figura 6.2 – Curvas de desempenho adotadas para as pressões (pressões máxima e mínima).

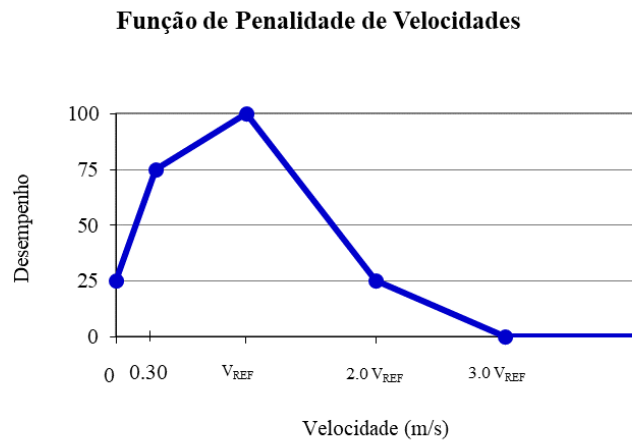


Figura 6.3 – Curva de desempenho adotadas para as velocidades.

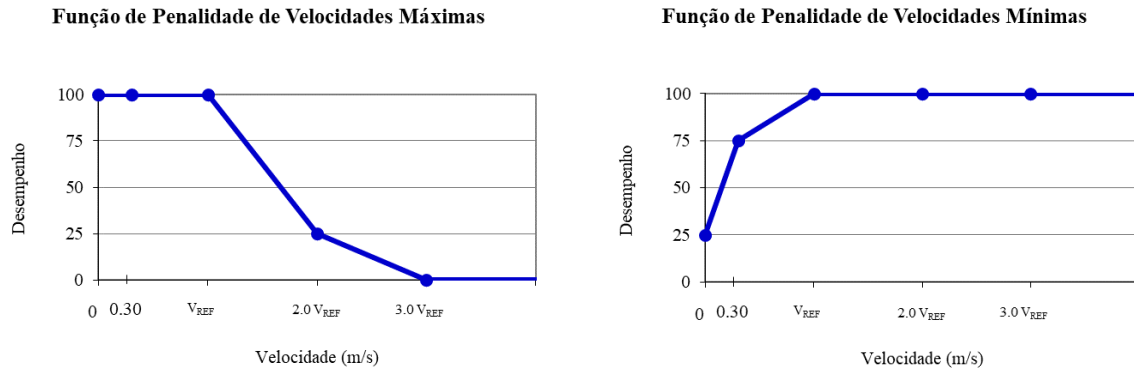


Figura 6.4 – Curvas de desempenho adotadas para as velocidades (velocidades máximas e mínimas).

- Um operador que permita a agregação espacial entre os valores elementares do desempenho (em cada nó ou troço), por forma a poderem ser obtidos valores globais para a totalidade do sistema (desempenho global).

A escala da avaliação do desempenho técnico varia de:

- 0% – Ausência/interrupção de serviço;
- 25% – Serviço inaceitável;
- 50% – Serviço minimamente aceitável (limiar de aceitabilidade);
- 75% – Serviço adequado;
- 100% – Serviço ótimo.

6.2.1 Avaliação do desempenho das pressões

Neste subcapítulo será avaliado e comparado o desempenho técnico das pressões do sistema antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção, como foi descrita no final do subcapítulo 4.4 (Implementação do modelo base), e, também, será avaliado e comparado a segunda solução de otimização de pressões, como foi descrito no subcapítulo 5.2.8 (Segunda solução de otimização de pressões), por ser a solução que baixava mais a pressão média do sistema.

Na Figura 6.5 observa-se que o desempenho da rede, relativamente ao volume de caudal consumido nos nós, para as condições sem controlo de pressões apresenta, em termos de desempenho médio, uma situação um pouco acima do serviço adequado. Nota-se que as pressões elevadas a que a rede está submetida numa certa zona são a principal causa do baixo desempenho entre o percentil de 0 a 25% do consumo (o desempenho chega muito próximo de 0% – Ausência/interrupção).

Ao efetuarmos uma comparação do desempenho entre o antes e depois da intervenção efetuada e a segunda solução de otimização de pressões, podemos verificar na Figura 6.5

até à Figura 6.7 uma melhoria do desempenho médio (já muito próximo do serviço ótimo) e deixamos de ter o percentil de 0 a 25% do consumo com desempenho próximo de 0%, o que revela uma melhoria significativa do desempenho das pressões.

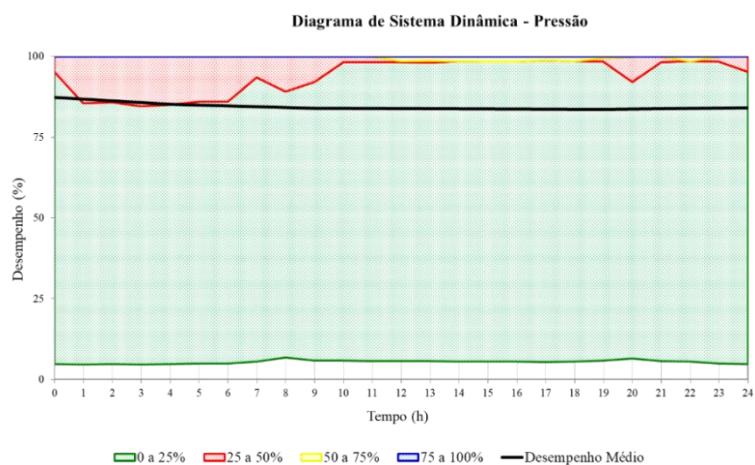


Figura 6.5 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

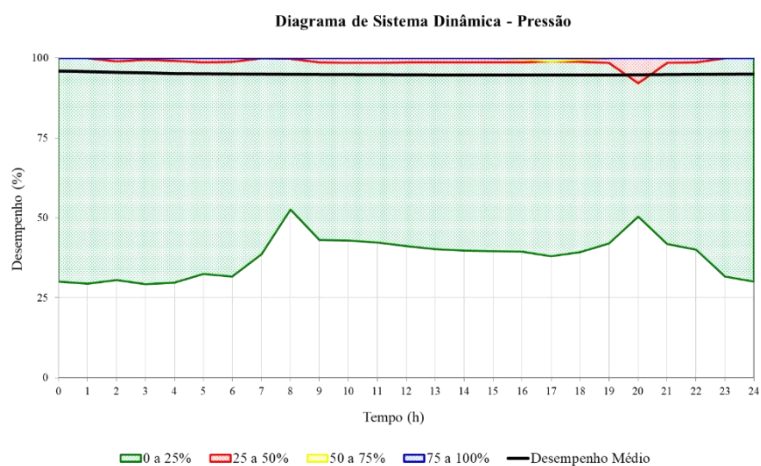


Figura 6.6 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

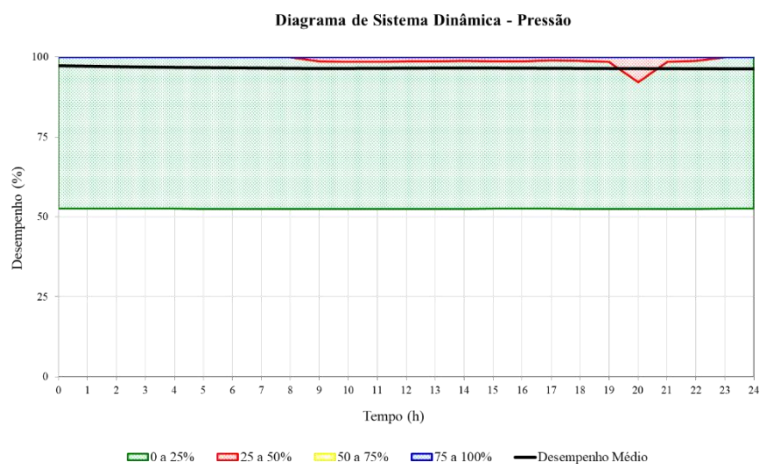


Figura 6.7 – Gráfico de desempenho das pressões da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).

Relativamente à avaliação do desempenho técnico da variação de pressão, é possível verificar uma ligeira melhoria do desempenho médio e dos vários percentis de consumo do modelo antes para o modelo depois da intervenção e para a segunda solução de otimização de pressões, como é possível observar da Figura 6.8 até à Figura 6.10.

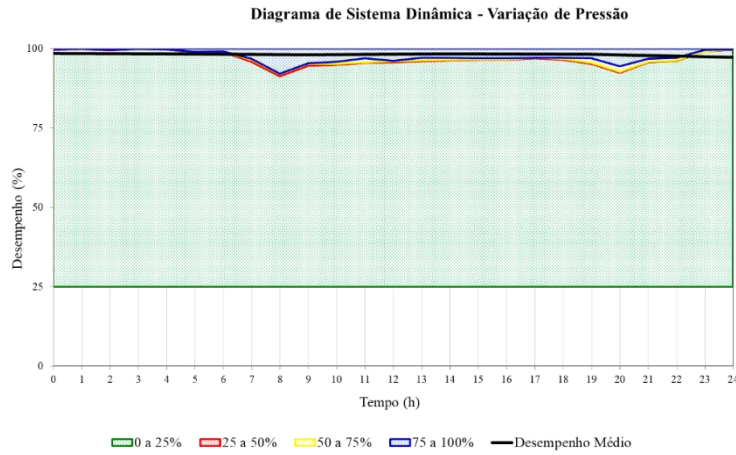


Figura 6.8 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

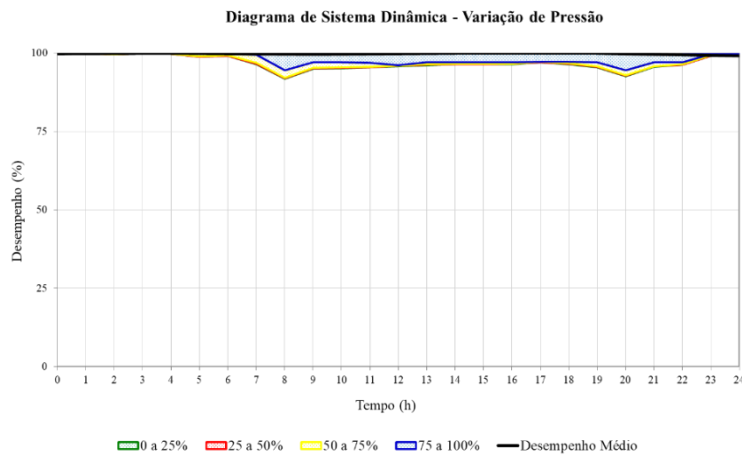


Figura 6.9 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

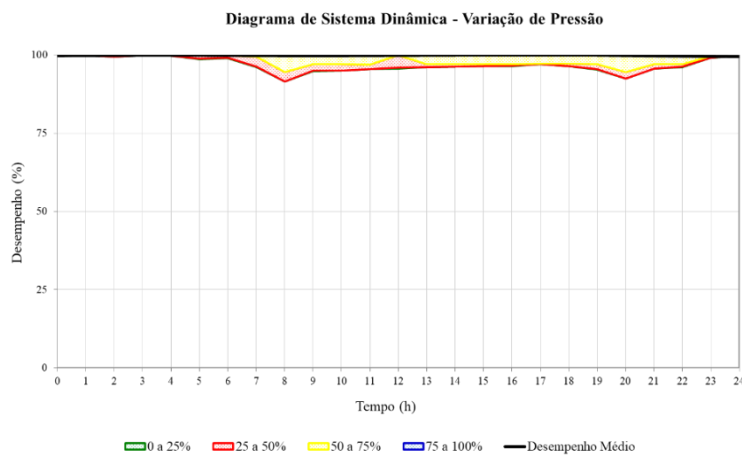


Figura 6.10 – Gráfico de desempenho da variação de pressões da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).

Relativamente à avaliação do desempenho técnico das pressões máximas, tal como já se tinha verificado na avaliação do desempenho das pressões, na pressão máxima sucede o mesmo, mas, com a segunda solução de otimização de pressões com um desempenho médio de 100% (serviço ótimo) e no percentil de 0 a 25% muito próximo dos 100%, como é possível observar na Figura 6.11 até à Figura 6.13.

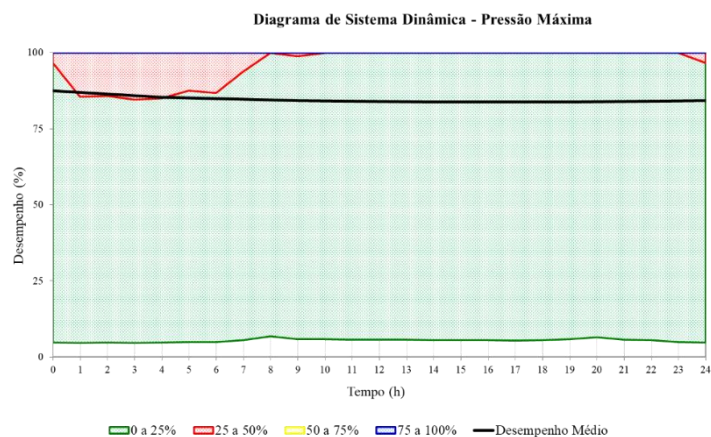


Figura 6.11 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

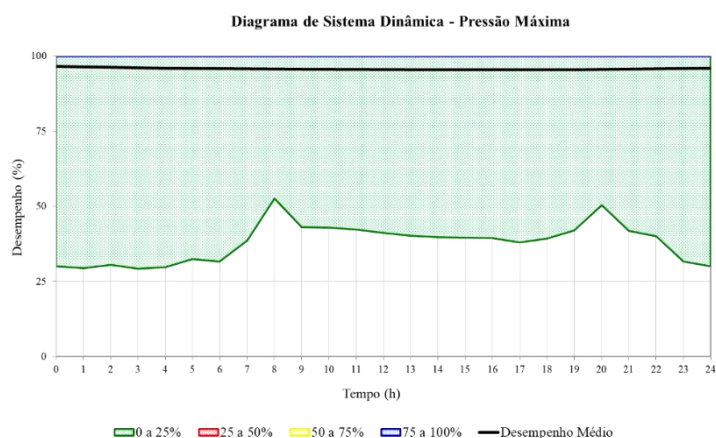


Figura 6.12 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

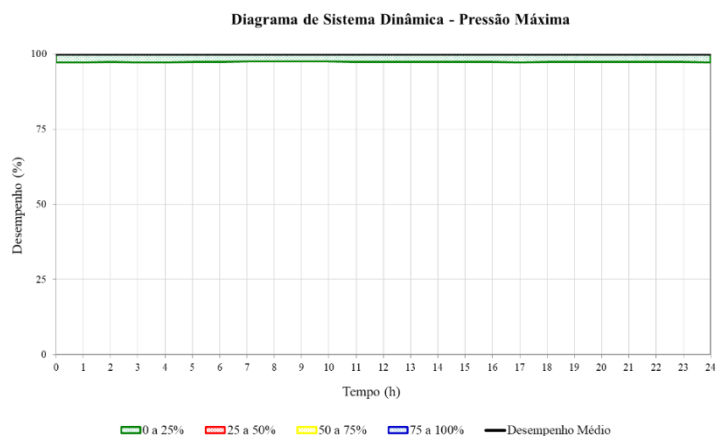


Figura 6.13 – Gráfico de desempenho das pressões máximas da ZMC de Cacilhas, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).

Relativamente à avaliação do desempenho técnico das pressões mínimas, é possível verificar que se mantiveram praticamente inalteradas, como é possível observar na Figura 6.14 até à Figura 6.16, sendo apenas um pouco mais expressiva a redução de desempenho da segunda solução de otimização de pressões, mas, praticamente, mantendo o desempenho médio muito próximo dos 100% (serviço ótimo).

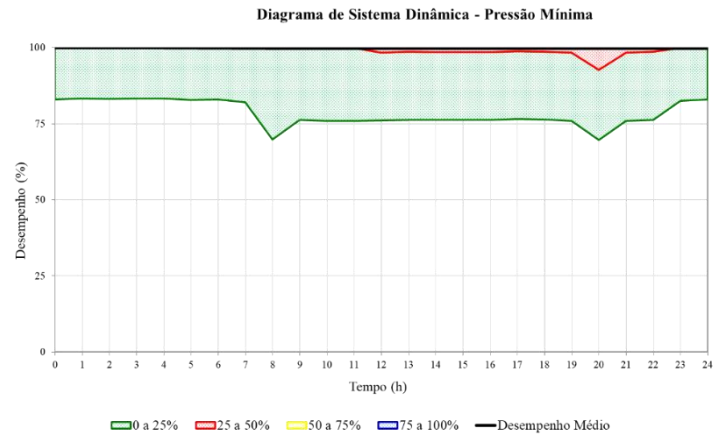


Figura 6.14 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

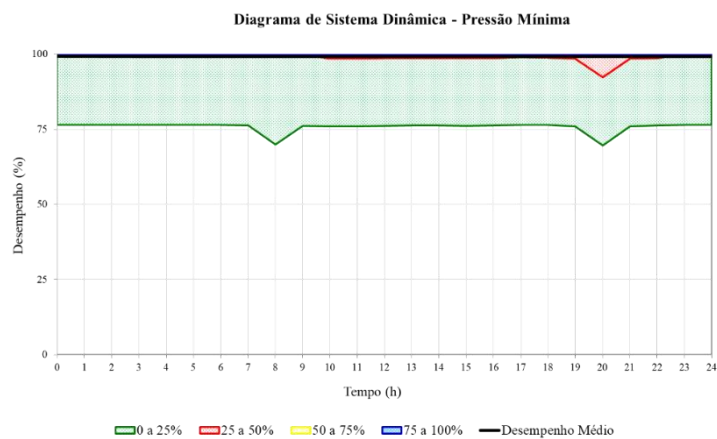


Figura 6.15 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

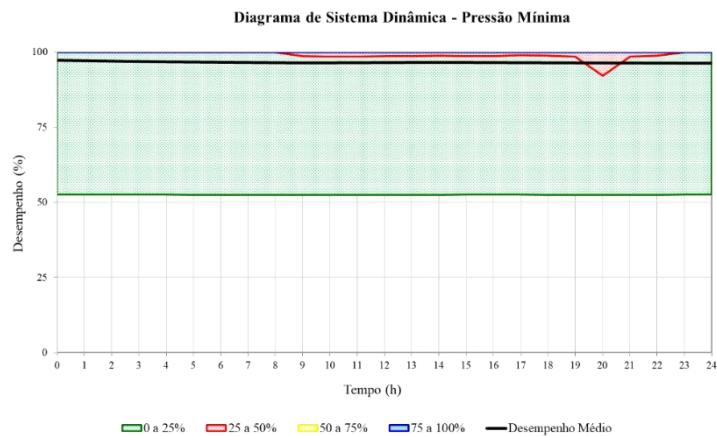


Figura 6.16 – Gráfico de desempenho das pressões mínimas da ZMC, segunda solução de otimização de pressões (situação futura).

6.2.2 Avaliação do desempenho das velocidades

Neste subcapítulo será avaliado e comparado o desempenho técnico das velocidades do sistema antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção, como foi descrita no final do subcapítulo 4.4 (Implementação do modelo base).

O desempenho técnico das velocidades da ZMC de Cacilhas, mantém-se praticamente inalterado do modelo antes para o modelo depois da intervenção, como é possível observar da Figura 6.17 até à Figura 6.22.

O desempenho das velocidades e da velocidade mínima encontra-se entre 25% serviço inaceitável e 50% serviço minimamente aceitável (limiar de aceitabilidade), em grande parte, devido aos diâmetros mínimos recomendados pelo D.R. n.º 23/95, para situações de incêndio (como foi mencionado no subcapítulo 5.2.3 Velocidades).

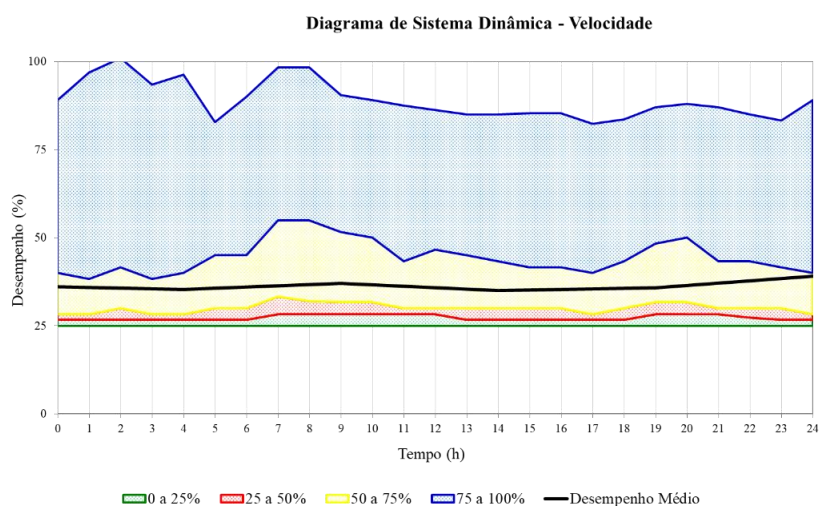


Figura 6.17 – Gráfico de desempenho das velocidades da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

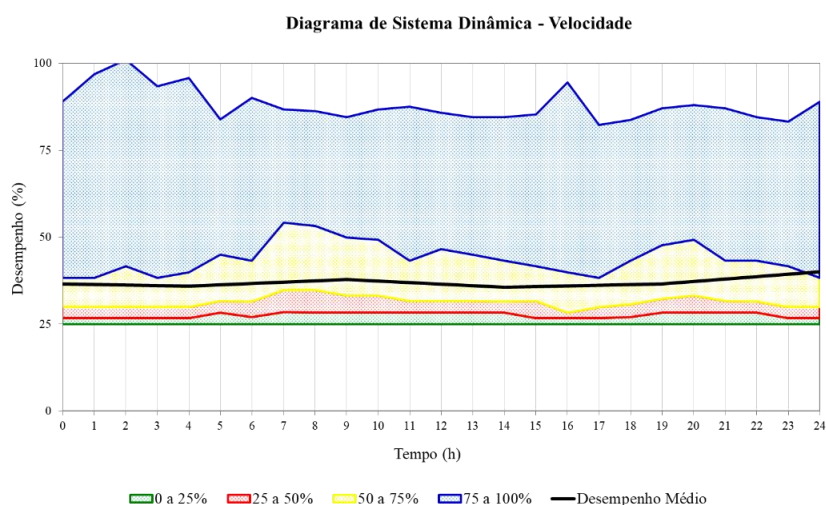


Figura 6.18 – Gráfico de desempenho das velocidades da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

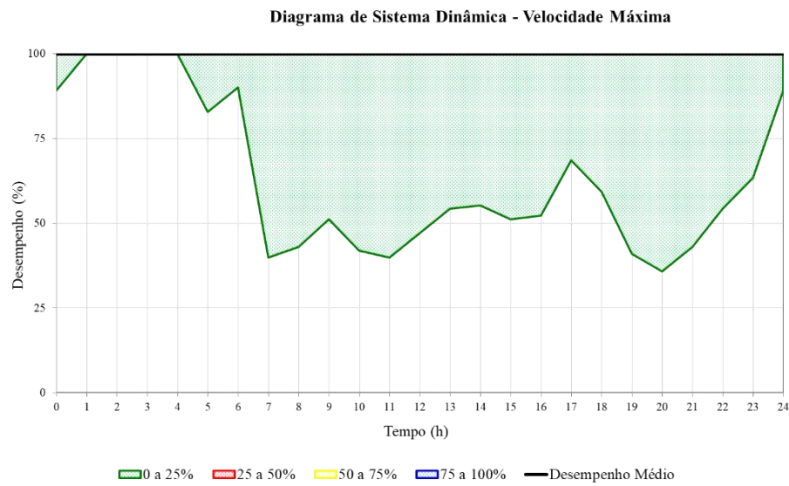


Figura 6.19 – Gráfico de desempenho das velocidades máximas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

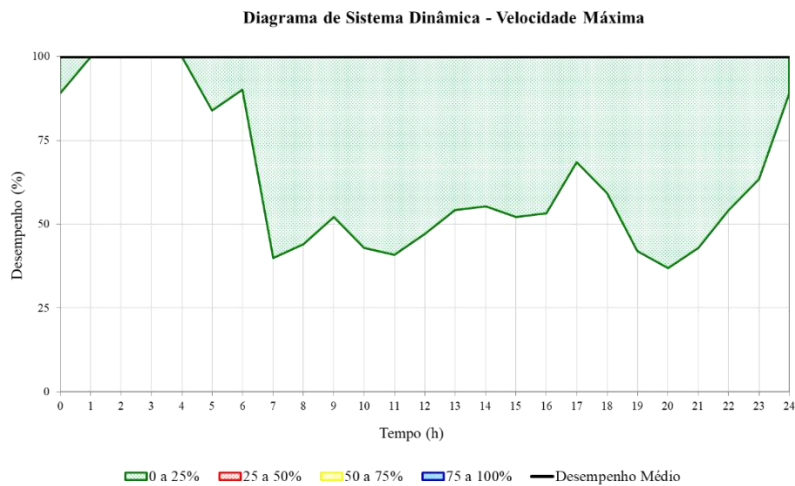


Figura 6.20 – Gráfico de desempenho das velocidades máximas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

Já o desempenho da velocidade máxima encontra-se nos 100% (serviço ótimo).

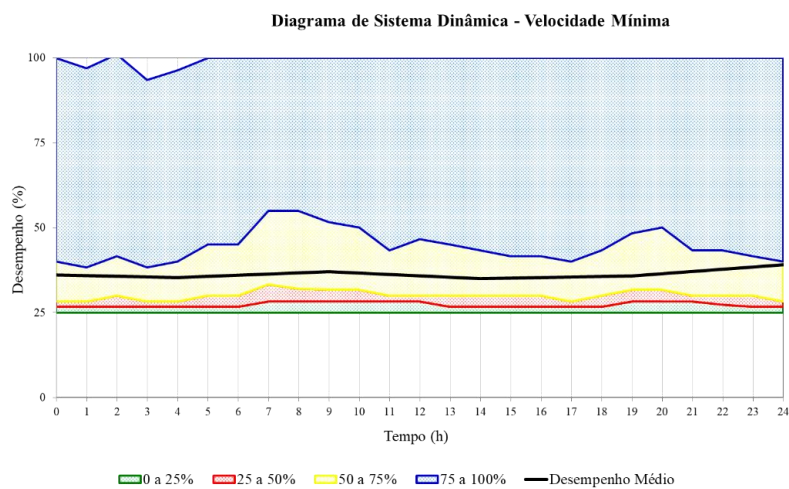


Figura 6.21 – Gráfico de desempenho das velocidades mínimas da ZMC de Cacilhas antes da intervenção (2019).

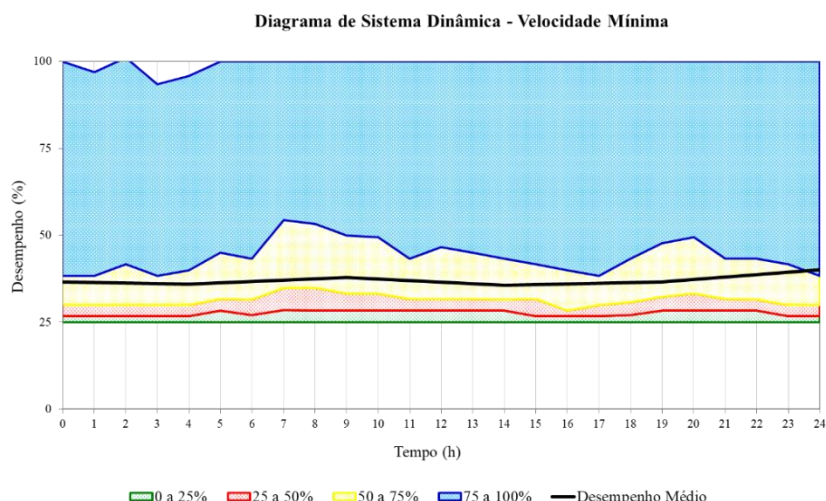


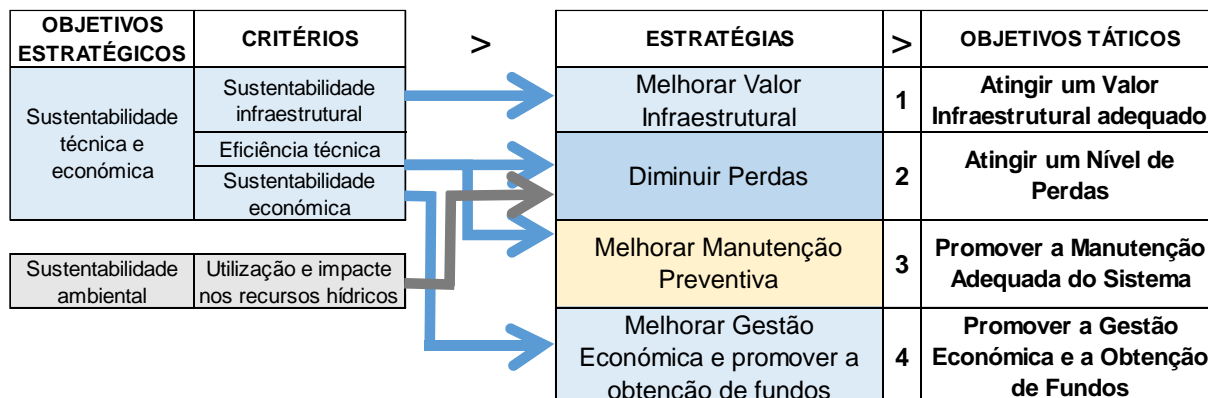
Figura 6.22 – Gráfico de desempenho das velocidades mínimas da ZMC de Cacilhas depois da intervenção (2022).

6.3 Diagnóstico da ZMC de Cacilhas

Neste subcapítulo iremos efetuar o diagnóstico e comparar o sistema antes (2019) e depois (2022) de efetuada uma intervenção, como foi descrita no final do subcapítulo 4.4 (Implementação do modelo base).

Efetuando um diagnóstico simples da ZMC de Cacilhas, aplicando-se, para o efeito, a metodologia e indicadores adaptados do “Guia de avaliação da qualidade dos serviços de águas e resíduos prestados aos utilizadores. 4.ª geração do sistema de avaliação” (Cardoso, et al., 2024) e dos SIMAS de Oeiras e Amadora, obteve-se os seguintes objetivos estratégicos e táticos descrito no Quadro 6.1. e Quadro 6.2, e, analisando os indicadores de desempenho de 2019 (antes da intervenção), e os de 2022 (depois da intervenção), como é possível observar no Quadro 6.3, é notório que houve uma melhoria em todos os indicadores do nível mau/razoável para o nível bom, exceto na Métrica 1-01 e Métrica 3-04, que se mantiveram no nível bom.

Quadro 6.1 – Objetivos estratégicos e táticos.



Quadro 6.2 – Objetivos táticos, critérios de avaliação, métricas e valores de referência.

Objetivos táticos	Crítérios de avaliação	Métricas	Valores de referência
1 – Atingir um valor infraestrutural adequado	Critério 1.1: Adequar o valor infraestrutural das redes	Métrica 1-01 – IVI: Índice de Valor Infraestrutural da Rede (-)	Classe 1: [1.00 , 0.55] Classe 2:]0.55 , 0.40] Classe 3:]0.40 , 0.00]
	Critério 1.2: Adequar o nível de reabilitação	Métrica 1-02 – REAB: Reabilitação da Rede (%)	Classe 1: [4.00 , 1.00] Classe 2:]1.00 , 0.80] Classe 3:]0.80 , 0.00]
2 – Atingir um nível de Perdas de Água	Critério 2.1: Diminuir o nível de perdas reais	Métrica 2-01 – PERDAS: Perdas Reais de Água (l / ramal.dia)	Classe 1: [0 , 100] Classe 2:]100 , 150] Classe 3:]150 , ∞]
		Métrica 2-02 – PERDAS: Ineficiência na Utilização dos recursos Hídricos (%)	Classe 1: [0 , 12] Classe 2:]12 , 20] Classe 3:]20 , 100]
	Critério 2.2: Adequar o controlo da medição de consumos	Métrica 2-03 – NÃO MED: Água Não Medida (%)	Classe 1: [0 , 15] Classe 2:]15 , 25] Classe 3:]25 , 100]
	Critério 2.3: Otimizar o nível de pressão na rede	Métrica 2-04 – PRESS EXC: Pressão Média Acima da Referência (m.c.a.)	Classe 1: [0 , 15] Classe 2:]15 , 25] Classe 3:]25 , ∞]
3 – Promover a Manutenção Adequada do Sistema	Critério 3.1: Diminuir o risco de falhas e avarias	Métrica 3-01 – FALHAS RD: Ocorrência de Falhas Devidas à Rede (h / 100 clientes)	Classe 1: [0.00 , 1.00] Classe 2:]1.00 , 2.50] Classe 3:]2.50 , ∞]
		Métrica 3-02 – FALHAS RM: Ocorrência de Falhas Devidas aos Ramais (h / 100 clientes.ano)	Classe 1: [0.00 , 1.00] Classe 2:]1.00 , 2.50] Classe 3:]2.50 , ∞]
		Métrica 3-03 – ROTURA RD: Ocorrência de Avarias em condutas (n.º / 100km.ano)	Classe 1: [0 , 30] Classe 2:]30 , 60] Classe 3:]60 , ∞]
		Métrica 3-04 – ROTURAS RM: Ocorrência de Avarias em Ramais (n.º / 1000 ramais.ano)	Classe 1: [0 , 10] Classe 2:]10 , 20] Classe 3:]20 , ∞[
	Critério 3.2: Adequar o nível de reclamações relativas à prestação do serviço	Métrica 3-05 – RECL: Reclamações (n.º / 1000 clientes)	Classe 1: [0.00 , 0.50] Classe 2:]0.50 , 1.00] Classe 3:]1.00 , ∞]
	4 – Promover a Gestão Económica e a Obtenção de Fundos	Critério 4.1: Diminuir o nível de custos operacionais	Métrica 4-1 – CUSTO OM: Custos Operacionais Unitários (€ / km)

Quadro 6.3 – Diagnóstico de 2019 e 2022 da ZMC Cacilhas (comparação entre o antes e o depois da intervenção).

DADOS 2019/2022					
Métrica	Variável	2019	Valor	2022	Valor
1-01 IVI	Valor Patrimonial atual da Rede de Águas (€)	216727	● 0,66	305458	● 0,75
	Valor total da construção a novo da Rede de Águas (€)	330808		408303	
1-02 REAB	Comprimento de condutas reabilitadas no ano (km)	0,07	● 0,67	2,23	● 22,30
	Comprimento total de condutas (km)	10,0		10,0	
2-01 PERDAS	Perdas reais (m3/ano)	31454,4	● 210,19	7784,56	● 51,77
	Ramais de ligação (n.º)	410		412	
2-02 PERDAS	Perdas Reais (m3/ano)	31454,4	● 14,36	7784,56	● 4,00
	Água Entrada no Sistema (m3/ano)	218991		194722	
2-03 NÃO MED	Água Entrada no Sistema (m3/ano)	218991	● 20,52	194722	● 7,17
	Água Medida (faturada e não faturada) (m3/ano)	174056		180757	
2-04 PRESS EXC	Pressão Mínima em cada nó (m.c.a.)	47,5	● 16,90	43,5	● 12,90
	Pressão de Referência para a Área de Análise (m.c.a.)	30,6		30,6	
	Número de nós do modelo da rede	373		307	
3-01 FALHAS RD	Numero total de horas de falhas em condutas por ano (h/ano)	18	● 2,22	0	● 0,00
	Número de Clientes Ativos	811		813	
3-02 FALHAS RM	Número total de horas de falhas em ramais por ano (h/ano)	12	● 1,48	0	● 0,00
	Número de Clientes Ativos	811		813	
3-03 ROTURA RD	Avarias em condutas (n.º/ano)	6	● 60,00	0	● 0,00
	Comprimento total de condutas (km)	10		10	
3-04 ROTURAS RM	Número de intervenções em ramais existentes (n.º/ano)	4	● 9,76	0	● 0,00
	Número total de ramais	410		412	
3-05 RECL	Número total de reclamações específicas do funcionamento da rede de distribuição, excetuando-se reclamações/sugestões de faturação e atendimento do Gabinete Comercial (n.º/ano)	5	● 6,17	0	● 0,00
	Número total de Clientes Ativos (n.º)	811		813	
4-01 CUSTO OM	Gastos Totais (€/ano)	5222,03	● 522,20	0	● 0,00
	Comprimento total de condutas (km)	10		10	

Ao analisarmos e compararmos o Diagnóstico referente a 2019 e 2022 podemos verificar que a intervenção foi bem-sucedida e que teve melhorias em todos os indicadores, destacando-se a ausência de falhas, roturas, reclamações e custos operacionais (reparação de roturas), e, para a redução das perdas reais de 14,36% para 4,00% e água não medida de 20,52% para 7,17%.

7 Conclusões e perspetivas de trabalhos futuros

7.1 Conclusões

A presente dissertação de mestrado teve como objetivo principal estudar o comportamento hidráulico da Zona de Medição e Controlo (ZMC) de Cacilhas, em Oeiras, para identificar as principais falhas de funcionamento e propor as respetivas medidas de correção. Para tal, procedeu-se à construção, validação e calibração de um modelo hidráulico.

A criação deste tipo de modelo hidráulico, é bastante relevante na gestão deste sistema de distribuição de água, pois possibilita aos técnicos da entidade gestora (SIMAS Oeiras e Amadora) prever quais as ações que podem ser ideais para combater problemas na rede de distribuição, tais como, pressões e velocidades fora do estabelecido no Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto (MOPTC, 1995), assim como, perdas de água ao longo do sistema, ou mesmo, problemas na qualidade da água.

A modelação confirmou que a política de gestão de pressões, conduz a uma diminuição real dos caudais de perdas com melhoria significativa no desempenho da ZMC de Cacilhas no que diz respeito às pressões de serviço, assim como, uma renovação periódica das condutas no combate às perdas reais e a substituição periódica de contadores no combate às perdas aparentes por submedição.

Da análise de qualidade da água (decaimento de cloro ao longo do sistema), podemos concluir que, a intervenção teve um ligeiro impacto, e que, em apenas três extremos de rede o cloro residual é inferior ao recomendado pelo Decreto-Lei n.º 69/2023 (AAC, 2023), pelo que vai ser necessário efetuarem-se descargas periódicas. Em dois extremos de rede, localizados na estrada da Ribeira da Laje, está prevista a construção de uma urbanização, o que poderá solucionar esta anomalia num futuro próximo, já no outro extremo, localizado na bomba de combustível da Avenida Eng. Álvaro Roquete, onde o último local de consumo está antes de dois marcos de incêndio, poderá passar pela execução de uma caixa de contador de jardim para rega dos espaços envolventes (teria de haver um acordo com os espaços verdes da câmara municipal de Oeiras, para nova localização), o que solucionaria a anomalia para os meses menos chuvosos.

A avaliação do desempenho técnico, o diagnóstico da ZMC e a análise socioeconómica comprovam que a intervenção realizada foi bem-sucedida e que ainda pode melhorar se for implementada a segunda solução de otimização de pressões.

7.2 Perspetivas de trabalhos futuros

Relativamente a trabalhos futuros, seria interessante efetuar uma avaliação do desempenho técnico da qualidade da água.

Outra recomendação de trabalho futuro é, efetuar uma análise similar à que foi feita na ZMC de Cacilhas (ZMC piloto) em outras ZMC's dos SIMAS de Oeiras e Amadora, como por exemplo, a ZMC Leceia Fábrica da Pólvora (onde a água não faturada em 2023, representou aproximadamente 34% da ZMC), onde já foi iniciado o mesmo trabalho, estando ainda em falta a parte da qualidade da água, verificação e substituição de contadores e análise do antes e depois da intervenção (para comparação do comportamento hidráulico, avaliação do desempenho técnico, diagnóstico e impacto socioeconómico). Na ZMC Leceia Fábrica da Pólvora, apenas foi necessário investir, até à data, na instalação de uma válvula redutora de pressão (VRP), e, aproveitar uma outra que já se encontrava instalada e reduzir um pouco mais a pressão para cumprir o Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto (MOPTC, 1995), sendo o investimento de aproximadamente 7.800,00 €.

Referências Bibliográficas

- AAC. (2023). *Decreto-Lei n.º 69/2023, de 21 de agosto*. Lisboa: Diário da República n.º 161/2023, Série I.
- ADP. (2023). *Águas de Portugal*. Obtido de <https://www.adp.pt>
- Alonso, J. M., Alvarruiz, F., Guerrero, D., Hernández, V., Ruiz, P. A., Vidal, A. M., . . . Ulanicki, B. (2000). Parallel Computing in Water Network Analysis and Leakage Minimization. *Journal of Water Resources Planning and Management*.
- Araújo, L., Murinello, E., Ramos, H., & Coelho, S. T. (2004). Avaliação do desempenho de sistemas em pressão integrados numa política de gestão sustentável de recursos hídricos. *7º Congresso da água*. APRH.
- Câmara Municipal de Sesimbra. (2023). Obtido de <https://www.sesimbra.pt/viver/agua-e-saneamento/galeria-65>
- Cardoso, M. A., Rosa, M. J., Brito, R. S., Silva, C., Beceiro, P., Jorge, C., . . . Carrega, M. (31 de janeiro de 2024). Guia de avaliação da qualidade dos serviços de água e resíduos prestados aos utilizadores. 4.ª geração do sistema de avaliação. *Guia Técnico 27*.
- Carriço, N. (2023). Modelação de Sistemas de Distribuição de Água com EPANET. Oeiras: APRH.
- Carriço, N., Ferreira, B., Barreira, R., Antunes, A., Grueau, C., Mendes, A., . . . Brito, I. S. (2020). Data integration for infrastructure asset management in small to medium-sized water utilities.
- Coelho, S. T., Loureiro, D., & Alegre, H. (2006). *Modelação e análise de sistemas de abastecimento*. Lisboa, Portugal: Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Colarejo, J. M. (2017). Combate às perdas por sub-medição em contadores de instalações residenciais.
- EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S. (30 de 08 de 2024). *EPAL - Grupo Águas de Portugal*. Obtido de EPAL - Grupo Águas de Portugal: <https://www.epal.pt/EPAL/menu/produtos-e-servi%C3%A7os/wone>
- ERSAR. (2023). *Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos*. Obtido de ERSAR Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos: <https://www.ersar.pt/pt>
- Ferreira, B., Carriço, N., & Covas, D. (2024). Near Real-time Leak Location by Inverse Analysis Integrating Measurement Uncertainty.
- Fucoli-Somepal. (2024). Obtido em 2024, de <https://www.fucoli-somepal.pt/PT/produtos/produtos/agua-potavel/>
- Jowitt, P. W., & Xu, C. (1990). Optimal valve control in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*.

- Lambert, A. (2001). *What do we know about pressure: Leakage relationships in distribution systems?*
- MOPTC. (1995). Regulamento geral dos sistemas públicos e prediais de distribuição de água e de drenagem de águas residuais. *Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de agosto*. Lisboa, Portugal: Ministério das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- Quintela, A. d. (2011). *Hidráulica 12.ª Edição*. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian.
- Reis, N. (2021). Inspeção subaquática à Torre de Captação de Castelo do Bode. *Águas Livres, Nº289, 5/2021, EPAL*.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 users manual*. Cincinnati, OH, U.S.A.: National risk management research laboratory; U.S. environmental protection agency.
- Sá Marques, J. A., & Sousa, J. J. (2008). *Hidráulica Urbana, Sistemas de Abastecimento de Água e de Drenagem de Águas Residuais, 2.ª Edição*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra.
- Serranito, F., Donnelly, A., Sardinha, J., Marmelo, V., Saraiva, P., Dias, N., . . . Rocha, V. (2015). *Controlo Ativo de Perdas de Água*. Lisboa: EPAL, Empresa Portuguesa das Águas Livres S.A.
- Silva, P. A. (2016). *Modelação e Calibração de um Sistema de Abastecimento de Água (Sistema adutor de Câmara de Lobos)*. *Dissertação submetida para o grau de Mestre em Engenharia Civil na Universidade da Madeira*.
- Simões, A. F. (2019). *Contributo para a eficiência do sistema de abastecimento de água de Montemor-o-Velho. Relatório de Estágio apresentado para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil Especialização em Construção Urbana*. Coimbra.
- Sousa, E. R. (2001). *Sistemas de Abastecimento de Água. Elementos de apoio à disciplina de "Saneamento Ambiental I", Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura; Secção de Hidráulica e dos Recursos Hídricos e Ambientais*. Lisboa: Instituto Superior Técnico.
- Tecedeiro, L. (2022). *Hidrologia e Recurso Hídricos. Área Departamental de Engenharia Civil*. Lisboa: ISEL.
- Vairavamoorthy, K., & Lumbers, J. (1998). Leakage Reduction in Water Distribution Systems: Optimal Valve Control. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Beckwith, S., & Koelle, E. (2003). *Advanced Water Distribution Modeling and Management*. Bentley Institute Press.