



Universidade dos Açores  
Departamento de Ciências Agrárias  
Mestrado em Engenharia e Gestão de Sistemas de Água

## Aplicação do modelo de simulação EPANET 2.0 ao estudo das pressões e cloro residual do sistema de abastecimento de água de Angra do Heroísmo



Lady Vanessa Abreu Vieira

2013



Universidade dos Açores  
Departamento de Ciências Agrárias  
Mestrado em Engenharia e Gestão de Sistemas de Água

**Aplicação do modelo de simulação EPANET 2.0 ao estudo das pressões  
e cloro residual do sistema de abastecimento de água de Angra do  
Heroísmo**

Lady Vanessa Abreu Vieira

Tese reformulada submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia e Gestão de Sistemas de Água

Orientada por: Professora Doutora Sílvia Alexandra Quadros

2013

*Com força de vontade tudo se consegue realizar.*

**RESUMO**

A presente tese teve como propósito realizar a modelação da rede de distribuição de água do Concelho de Angra do Heroísmo, nomeadamente, a rede que constitui o Subsistema do reservatório da Cidade com uma extensão de 13.062 m. O estudo é efetuado mediante a utilização do modelo EPANET 2.0 que é um *software* gratuito criado pela EPA, sendo este uma ferramenta essencial para uma boa gestão das redes de distribuição de água. Ocorre assim, a necessidade de recolher a informação das características dos elementos que compõem a rede, para tal, realizou-se uma recolha exaustiva e pormenorizada de todos os dados necessários, designadamente: tubagens (material, diâmetro); válvulas (tipo, material e estado), reservatório (dimensão da célula e cotas de implantações); nós (cotas, tipos de nó como seja cruzetas e tês); sentido do escoamento; presença do cloro residual, para se proceder à aplicação de um modelo de simulação hidráulico e de qualidade de água, onde é possível efetuar estudos que visam a redução de perdas de água, contaminações exteriores e um maior controlo microbiológico. A modelação permite-nos conhecer a evolução dos caudais, velocidades de escoamento e pressões de serviço para diferentes padrões de consumo, verificando-se a sua conformidade com a legislação vigente. No decorrer do trabalho surgiu a alteração do cadastro da rede de distribuição em estudo, com a colocação de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) e a alteração de algumas válvulas de seccionamento (VCT) o que levou à realização de um novo cenário de simulação em que houve a oportunidade de observar as vantagens e desvantagens das mesmas alterações no sistema de distribuição de água.

**ABSTRACT**

The purpose of this work was to achieve the modelling of a distribution net for the district of Angra do Heroísmo, namely the distribution net that forms the subsystem of this district, which the area that comprehends the distribution is the one from the reservoir of the City with a length of 42,85 ft. The study is done with the use of EPANET 2.0 that is a free software created by EPA, it is an essential tool for effective management of water distribution net. Then, occurs the need to obtain the information of the elements characteristics that compose the net. Based on this fact, a gathering of all the necessary data took place, like pipes (material, diameter); valves (type, material and condition), reservoir (cell size and the elevation of implantation), nodes (elevations, node types such as double tee junction and t), the flow direction; presence of total and free chlorine in the net. All this information was necessary to proceed an application of a hydraulic simulation model and water quality, where it is possible conduct studies aimed at reducing water losses, external contamination and increased microbiological control. A modulation allows us to understand the evolution of streams, the speed of flowing and service pressures for the different consumption patterns, making shore it is in conformity with the current legislation. Along the work, emerged a change of registration of the distribution network under study, with the placement of a Pressure Reducing Valve (PRV) and amendment of some gate valves (VCT) which led to the realization of a new simulation scenario where there was the opportunity to observe the advantages and disadvantages of the same changes in the system of water distribution.

## AGRADECIMENTOS

Para a realização da presente tese houve que contar com o apoio de algumas entidades e com a amizade, apoio e orientação de muitos amigos e família que souberam estar sempre presentes no momento certo. Assim, passo a expressar o meu sincero reconhecimento e apreço para:

- À Professora Doutora Sílvia Alexandra Quadros, por ter aceite ser minha orientadora, por ter demonstrado muito interesse, paciência, apoio, pelo conhecimento que me transmitiu, pelo material disponibilizado, pelas críticas, sugestões e pela disponibilidade demonstrada.
- Ao Eng<sup>o</sup> Humberto Bettencourt, dos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo, pelo apoio disponibilizado, pelos conhecimentos que me transmitiu acerca da rede de águas para consumo humano e infraestruturas no concelho de Angra do Heroísmo.
- A todos os funcionários dos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo (SMAH) que de algum modo contribuíram para a realização da minha tese, em especial, àqueles com quem trabalhei diretamente:
  - O Eng<sup>o</sup> César, por disponibilizar toda a informação para a calibração do modelo em SIG da rede de distribuição em estudo e os dados de faturação, por toda a ajuda e tempo despendido na parte do cadastro da rede e importação e exportação de dados da mesma.
  - O Sr. Leopoldino Tavares, por disponibilizar informação, transporte e equipamentos para a recolha de dados de calibração.
  - O Sr. Vasconcelos, por acompanhar a recolha dos dados de calibração de cloro e pelo companheirismo durante as saídas de campo.
  - O Sr. Mike Botelho, por acompanhar a recolha dos dados de calibração da pressão e pelo companheirismo durante a saída de campo.
- À Eng<sup>a</sup> Dália Loureiro, do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), pelo esclarecimento de dúvidas no funcionamento do programa de modelação EPANET 2.0.
- Às pessoas mais importantes da minha vida: os meus pais, Lina Maria de Sousa Abreu Vieira e José João de Jesus Vieira, e ao meu irmão João César Abreu Vieira, por todo apoio, carinho e palavras de reconforto nos momentos mais difíceis.

- À minha restante família: avós, tios e primos, por todo o apoio prestado.
- Aos meus amigos especiais: Sónia Silva, Luís Abreu, Ivan António, Raquel Pereira, Francisco Vieira, Marco Braga, Catarina Meneses, Neide Xavier e Paola Gomes por todo o incentivo, amizade e apoio prestado.
- A todos os outros que não se inserem no grupo anteriormente referido, mas que estão sempre na minha consideração.

## ÍNDICE GERAL

RESUMO .....	I
ABSTRACT .....	II
AGRADECIMENTOS .....	III
ÍNDICE GERAL .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE QUADROS .....	X
ABREVIATURAS .....	XI
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Sistemas de Distribuição de Água .....	4
2.1.1. Conceito de Sistemas de Abastecimento e de Zona de Abastecimento .....	6
2.1.2. Gestão de Sistemas de Abastecimento .....	8
2.2. Modelos de Simulação .....	11
2.2.1. Caracterização do EPANET 2.0 .....	12
2.2.2. Capacidade de Modelação Hidráulica e Variáveis de Estado .....	17
2.2.3. Capacidade de Modelação da Qualidade da Água e Variáveis de Estado ...	18
2.2.4. Aplicação da Modelação de Sistemas de Distribuição de Água em Portugal	19
2.3. Situação do Abastecimento de Águas na Região Autónoma dos Açores .....	21
3. OBJECTIVOS .....	22
4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO .....	23
4.1. Sistema de Distribuição da Água do Concelho de Angra do Heroísmo .....	23
4.2. Caracterização do Caso de Estudo .....	24
5. METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO .....	28
5.1. Fases do Planeamento do Modelo .....	28
5.2. Componentes Físicos do Sistema .....	28



5.3.	Solicitações da Rede .....	28
5.3.1.	Dados de Faturação .....	29
5.3.2.	Tipos de Consumo e Distribuição de Consumos .....	29
5.3.3.	“Consumo Base” e “Grandes Consumidores” .....	32
5.4.	Calibração do Modelo.....	33
6.	DISCUSSÃO DE RESULTADOS .....	40
6.1.	Interpretação dos Dados Medidos.....	40
6.1.1.	Consumos .....	40
6.1.2.	Cloro Residual.....	42
6.1.3.	Pressão.....	43
6.2.	Interpretação de Dados de Simulação.....	43
6.2.1.	Simulação Hidráulica .....	44
6.2.2.	Simulação da Qualidade da Água .....	56
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	60
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
	ANEXOS .....	66

**ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1 - Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água (adaptado Coelho *et al.* 2006). ..... 7

Figura 2 - Ilha Terceira com a delimitação do concelho de Angra do Heroísmo e Praia da Vitória e a rede de abastecimento e reservatórios das mesmas (<http://sig.srrn.azores.gov.pt/SRAM/site/SRIA/>). ..... 23

Figura 3 - Nascente da Nasce Água. .... 24

Figura 4 - Estação de Tratamento de Água (ETA) da Nasce Água..... 25

Figura 5 - Tambor de cloro gasoso de 600 kg, garrafa de reserva de cloro e clorómetro. .... 25

Figura 6 - Clorómetro e garrafa de reserva de cloro gasoso..... 25

Figura 7 - Reservatório da cidade: a) célula que abastece o caso de estudo e b) Câmara de manobras..... 26

Figura 8 - Rede de distribuição de água do caso em estudo (azul) e as duas VRP (preto). .... 27

Figura 9 - Componentes do balanço hídrico do sistema (adaptado Alegre *et al.* 2005). 30

Figura 10 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Adaptado Coelho *et al.* 2006). ..... 31

Figura 11 - Manómetro..... 34

Figura 12 - Zonas de Reação no interior de uma tubagem. (Adaptado Loureiro e Coelho, 2004)..... 35

Figura 13 - Garrafa de mergulho. .... 36

Figura 14 - Colheita da amostra de água. .... 36

Figura 15 - Garrafas não reativas do tipo Winkler, numeradas com os respetivos tempos de medição..... 37

Figura 16 - Reagente DPD adicionado numa amostra de água. ....	37
Figura 17 - Termómetro de Mercúrio e Fotómetro Eutech instruments, clorímetro C201. .....	37
Figura 18 - Evolução do teor de cloro residual em função da dosagem de cloro (Opas, 1999). ....	38
Figura 19 – Padrões de Consumos Médios Semanais. ....	40
Figura 20 - Consumo de água semanal em m <sup>3</sup> /h, à saída do reservatório da Cidade. ...	41
Figura 21 - Representação gráfica dos dados experimentais para obtenção da constante cinética Kb. ....	42
Figura 22 - Padrão temporal do consumo doméstico semanal, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	43
Figura 23 – Diagrama da rede para os caudais nos troços, para as 5h no cenário I e II (a) e b)) e para as 14h no cenário I e II (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	45
Figura 24 - Diagrama da rede ilustrando o diâmetro das tubagens, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	47
Figura 25 - Diagrama da rede para as velocidades nos troços, para as 5h no cenário I e II (a) e b)) e para as 14h no cenário I e II (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	49
Figura 26 - Tratamento estatístico dos dados de calibração para a pressão semanal, no primeiro cenário, no modelo EPANET 2.0. ....	51
Figura 29 - Tratamento estatístico dos dados de calibração para a pressão semanal, no segundo cenário, no modelo EPANET 2.0. ....	52
Figura 30 - Gráfico de correlação para a pressão (m), no segundo cenário, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	53

Figura 31 - Comparação dos valores médios de pressão observados e simulados, no segundo cenário, no modelo de simulação EPANET 2.0.....	53
Figura 32 - Diagrama da rede para as pressões nos troços, para as 5h no cenário I e II (a) e b)) e para as 14h no cenário I e II (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	55
Figura 33 - Diagrama da rede ilustrando os intervalos de cloro residual nos diversos nós às 0:00 h, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	56
Figura 34 - Diagrama da rede para o cloro nos troços, para as 5h no cenário I eII (a) e b)) e para as 14h no cenário I eII (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0. ....	58

**ÍNDICE DE QUADROS**

Quadro 1 - Tipo de entidades gestoras e serviços de águas (www.ersar.pt). .....	9
Quadro 2 - Objetos Físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (Loureiro e Coelho, 2004).....	14
Quadro 3 - Objetos não Físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (Loureiro e Coelho, 2004). .....	16
Quadro 4 - Consumos mensais dos contadores dos grandes consumidores da zona em estudo.....	33
Quadro 5 - Indicação dos pontos de medição com os respetivos nós e cotas do terreno. ....	34
Quadro 6 - Concentrações de cloro residual em mg/L medidos na ETA da Nasce Água e respetiva constante cinética. ....	42
Quadro 7 -Valores dos registos da pressão, medidos nos pontos-chave da rede do caso de estudo para o primeiro e segundo cenário. ....	43
Quadro 8 - Velocidade máxima em função do diâmetro da tubagem. ....	47
Quadro 9 – Legenda dos valores de pressão e respetivas cores. ....	54
Quadro 10 - Legenda dos valores de concentração de cloro e respetivas cores.....	57

**ABREVIATURAS**

<b>SMAH</b>	Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo
<b>LNEC</b>	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
<b>EG</b>	Entidade Gestora
<b>USEPA</b>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<b>PCQA</b>	Planos de Controlo de Qualidade da Água
<b>OMS</b>	Organização Mundial de Saúde
<b>ST</b>	Sistemas de Telegestão
<b>EPA</b>	<i>Environmental Protection Agency</i>
<b>RNF</b>	Reservatório de Nível Fixo
<b>RNV</b>	Reservatório de Nível Variável
<b>IRAR</b>	Instituto Regulador de Águas e Resíduos
<b>ERSAR</b>	Entidade Reguladora dos Serviços, Águas e Resíduos
<b>INSAA</b>	Instituto Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água
<b>INAG</b>	Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas residuais
<b>ETA</b>	Estação de Tratamento de Água
<b>VRP</b>	Válvula Redutora de Pressão
<b>ETAR</b>	Estação de Tratamento de Águas Residuais
<b>DPD</b>	Dietil-p-fenilenediamina
<b>VCT</b>	Válvula de Seccionamento

## 1. INTRODUÇÃO

A adequada gestão dos recursos hídricos é uma questão pertinente e atual, face à escassez dos recursos naturais e à crescente procura de água.

A água é um recurso natural renovável, escasso e imprescindível à vida humana, cuja disponibilidade, em quantidade e em qualidade, exige a aplicação de elevados investimentos em infraestruturas, quer para satisfazer a procura de água no espaço geográfico e no tempo, quer para manter o meio hídrico em condições adequadas de equilíbrio ambiental, como também para garantir um abastecimento fiável (Alves e Pinto, 2004). Neste contexto a gestão do abastecimento de água, a qualidade do serviço de distribuição de água e o uso racional dos recursos hídricos tornam-se cada vez mais importantes. Esta é uma boa justificação para a realização deste trabalho, ou seja, contribuir para sistemas de distribuição de água mais eficientes para minimizar as perdas, detetar os pontos deficientes da rede, bem como, garantir uma melhor qualidade da água que é distribuída à população.

Os sistemas de abastecimento de água têm por objetivo a prestação de um serviço público fundamental para a saúde e o bem-estar das populações, que consiste em satisfazer as necessidades das comunidades em termos de fornecimento de água. São um conjunto de recursos (humanos, materiais, financeiros, equipamentos, etc.) que devem ser utilizados eficientemente, de modo a garantirem a sua maximização da sua utilidade pelos consumidores (Alegre *et al*, 2005).

Cabe às entidades gestoras a procura de soluções em termos tecnológicos, de eficiência socioeconómica, técnica e ambiental, para um bom desempenho no que diz respeito à gestão da água. A gestão de um sistema de abastecimento de água para consumo humano requer um conhecimento profundo de toda a sua dinâmica desde a origem até à torneira do consumidor. Para tal é necessário que estejam definidos padrões de quantidade e qualidade consistentes e que sejam implementados mecanismos de verificação dos parâmetros que reproduzem os padrões essenciais e que conduzem ao estado de excelência de gestão.

A pressão da água e a concentração de cloro residual são duas das variáveis que definem a qualidade do serviço de distribuição de água. A importância do controlo destas duas variáveis é muito significativa: em relação à pressão por esta ter um papel

fundamental no controlo das perdas de água e na proteção contra contaminações exteriores, e em relação ao cloro o seu papel é fundamental por assegurar a qualidade microbiológica da água para consumo humano. Tanto a pressão como a concentração em cloro residual devem ser monitorizadas em pontos-chave da rede para controlo operacional. A pressão máxima não deve ultrapassar os 600 kPa<sup>1</sup> e a mínima não deve ser inferior a  $100 + 40 n$  (kPa), em que  $n$  é o número de pisos acima do solo (DR n°23/95, de 23 de Agosto).

Relativamente ao cloro residual torna-se necessário manter o teor de cloro residual livre dentro da gama recomendável para água para consumo humano 0,2 a 0,6 mg/L (DL 306/2007 de 27 de Agosto). A finalidade do cloro residual é limitar a presença de microrganismos patogénicos, que podem ser introduzidos acidentalmente no sistema por ruturas ou fissuras nas tubagens, ou também que se podem desprender do biofilme das paredes da tubagem. Como o cloro é um elemento não conservativo, a sua concentração diminui ao longo do percurso conforme as condições encontradas nos reservatórios e nas redes (Salgado, 2008). Os pontos críticos das redes são os troços das extremidades onde o cloro residual livre pode ser nulo.

Para garantir a manutenção de cloro residual livre até os pontos mais distantes do sistema de distribuição, normalmente, aumentam-se as dosagens de cloro nas estações de tratamento de água (Clarke *et al*, 1995). Por outro lado, essa estratégia pode resultar em problemas relacionados com sabor e odor, principalmente nas áreas de influência mais próxima do tratamento de água (Rouhiainen *et al*, 2003).

A utilização de cloro poderá originar a formação de subprodutos com potencial cancerígeno em função das características da água a desinfetar.

O decaimento do cloro ao longo das tubagens da rede de distribuição resulta do efeito conjunto das reações que ocorrem nas paredes da tubagem e no seio do escoamento. Assim, o bom desempenho dos modelos depende da calibração dos parâmetros cinéticos de decaimento do cloro tanto na massa líquida, como junto das paredes das tubagens. Uma tarefa complexa, pois esses parâmetros não são globais e uniformes dentro do mesmo sistema de distribuição (Shekhar, 2001)

---

<sup>1</sup> 10 kPa = 1 m.c.a. = 0,1 kgf/cm<sup>2</sup>



Como as redes de distribuição de água são infraestruturas que têm a particularidade de estar, na sua maioria, enterradas no solo, existe a dificuldade na inspeção de grande parte das suas componentes tanto no tempo como no espaço geográfico face à complexidade das redes, ao número de pontos de consumo e à variabilidade destes. A Entidade Gestora (EG) e/ou os utilizadores podem aperceber-se que algo não está bem através de fatores como a falta de pressão, a falta de água, elevados volumes de perdas, aparecimento de água à superfície do solo, coloração ou turvação da água. A caracterização e o diagnóstico detalhado da situação por inspeção direta são excessivamente dispendiosos, o que leva à necessidade de instrumentos de apoio baseados em modelação e análise (Coelho *et al*, 2006). A utilização destes modelos de simulação na área de abastecimento de água são a ajuda técnica valiosa para avaliar quer o desempenho hidráulico quer a qualidade da água, na medida em que permite estudar diferentes cenários alternativos de consumos ou de condições operacionais (Araújo, 2006).

Para garantir um desempenho adequado é necessária a análise do sistema em cenários diferentes de operação, tais como abertura e fecho de válvulas e variações sazonais de consumo. A utilização de instrumentos de apoio sobre o comportamento do sistema permite responder aos requisitos para atingir uma maior eficiência em termos de controlo de pressão.

Para se proceder ao modelo da avaliação da qualidade da água e do desempenho hidráulico da rede de abastecimento de água da cidade de Angra do Heroísmo utilizar-se-á a versão mais recente do programa de simulação EPANET 2.0, atualização de Setembro de 2004. Este programa é um dos simuladores mais utilizados para a aplicação de modelos e foi desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA), dos Estados Unidos da América.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Sistemas de Distribuição de Água

Uma rede geral de distribuição de água pode ser definida como um sistema de tubagens e elementos acessórios instalados na via pública, em terrenos da entidade distribuidora ou em outros sob concessão especial, cuja utilização interessa ao serviço público de abastecimento de água potável (Sousa, 2001).

A partir desta rede geral são alimentados, os diversos edifícios ou instalações a servir por meio de ramais de ligação, que se definem como a tubagem que assegura o abastecimento predial de água, desde a rede pública até ao limite da propriedade a servir, em boas condições de caudal e pressão.

São de igual forma servidos, a partir das redes gerais de distribuição de água as bocas de incêndio e marcos de água, os fontenários e outros pontos de utilização de água.

No que diz respeito à sua configuração as redes de distribuição de água podem classificar-se em:

- ✓ Redes Malhadas: em que as condutas se fecham sobre si mesmas constituindo malhas, definidas como um conjunto de tubagens que formam um circuito fechado;
- ✓ Redes Ramificadas: em que há uma conduta principal longitudinal que se ramifica para ambos os lados;
- ✓ Redes mistas: que correspondem à conjunção, numa mesma rede de distribuição de água, das duas configurações anteriores.

Sob o ponto de vista hidráulico, nas redes de distribuição de água malhadas, o escoamento é bidirecional, enquanto que nas redes ramificadas é, normalmente unidirecional, salvo se existir mais do que um ponto de alimentação do sistema (reservatório ou estação elevatória). Nas redes mistas, o escoamento é, simultaneamente, bidirecional e unidirecional (Sousa 2001).

As vantagens de uma rede de distribuição malhada podem ser resumidas ao seguinte:

- ✓ Pelo facto do escoamento ser bidirecional, para se atingir um dado ponto, existem percursos alternativos;

- ✓ No caso de avaria numa tubagem (por exemplo, pela ocorrência de uma rotura), é possível isolar uma determinada zona da rede de distribuição de água, através do fechamento de um conjunto de válvulas de seccionamento, sem que os restantes consumidores sejam afetados no normal fornecimento, o que lhe confere maior fiabilidade;
- ✓ Quando ocorrem grandes flutuações de consumo na rede de distribuição, os efeitos, em termos de pressão, são pouco significativos.

No entanto, apresenta as seguintes desvantagens:

- ✓ Exigem custos de investimento superiores, uma vez que requerem uma maior quantidade de tubagens e de órgãos acessórios;
- ✓ O cálculo para a determinação das condições de equilíbrio é mais complexo do que nas redes ramificadas.

Em contrapartida, de entre as vantagens de uma rede de distribuição ramificada podem salientar-se as seguintes:

- ✓ Exigem menores custos de investimento, uma vez que requerem uma menor quantidade de tubagens e de órgãos acessórios;
- ✓ Os diâmetros das tubagens são mais económicos;
- ✓ O cálculo para a determinação das condições de funcionamento hidráulico é mais simples do que nas redes malhadas, podendo dizer-se que é um problema trivial de hidráulica.

No entanto, uma rede de distribuição ramificada apresenta as seguintes desvantagens:

- ✓ Pelo facto do escoamento ser unidirecional, no caso de avaria numa tubagem (por exemplo, pela ocorrência de uma rotura), são menores as condições de fiabilidade, uma vez que qualquer avaria numa conduta interrompe todo o fornecimento de água a jusante;
- ✓ Quando ocorrem aumentos ou se verificam flutuações de consumo na rede de distribuição, os efeitos para jusante, em termos de pressão, são significativos;
- ✓ Os troços, nos pontos terminais da rede de distribuição, têm tendência a acumular sedimentos, devido às baixas velocidades de escoamento.

A distribuição de água potável a um aglomerado populacional pode ser feita por uma só rede geral ou por várias. A solução a adotar depende das características do aglomerado a abastecer, sendo necessário proceder a um estudo cuidadoso das mesmas.

Assim, a existência de um aglomerado de certa dimensão, em que haja diferenciação nítida de zonas altimétricas, é aconselhado que se considere uma rede de distribuição de água para cada zona altimétrica, designando-se por distribuição por andares.

Este critério apresenta grandes vantagens, pois a existência duma rede única obrigaria a uma elevação, do caudal total máximo, a uma altura correspondente à zona mais alta. Deste modo, não só haveria um gasto inútil de energia de bombagem, como ocorreriam elevadas pressões nas zonas baixas. Esta situação obrigaria à instalação de dispositivos de utilização mais resistentes e à implantação de tubagens da rede de distribuição de classes ou pressões de serviço maiores, o que aumentaria o custo total da mesma.

### **2.1.1. Conceito de Sistemas de Abastecimento e de Zona de Abastecimento**

Os serviços de águas destinam-se à prestação de serviços públicos na sua comunidade, nomeadamente, no abastecimento de água em quantidade e qualidade. Como pode ser observado na Figura 1, os sistemas de abastecimento público de água incluem habitualmente:

- ✓ **Fonte ou Fontes de Captação:** Estrutura que permite obter um determinado volume de água bruta, e que de acordo com a origem, se distinguem em nascentes, furos, lagoas e albufeiras. Tem também como finalidade a obtenção de água de forma contínua e duradoura em quantidade compatível com as necessidades;
- ✓ **Sistema de Adução:** Tem como função o transporte da água, da fonte de captação até aos reservatórios por intermédio de tubagens;
- ✓ **Sistemas de Tratamento de Água:** tem por objetivo o procedimento das correções necessárias para que as características físicas, químicas e microbiológicas da água tratada a jusante da adução, sejam a de uma água própria para consumo;

- ✓ **Reservatórios:** tem como função o armazenamento da água para atender a diversos propósitos, como a variação de consumo e a manutenção da pressão mínima na rede de distribuição;
- ✓ **Sistemas de Distribuição:** rede de tubagens que estabelece ligação, para o transporte de água, do reservatório até ao consumidor.

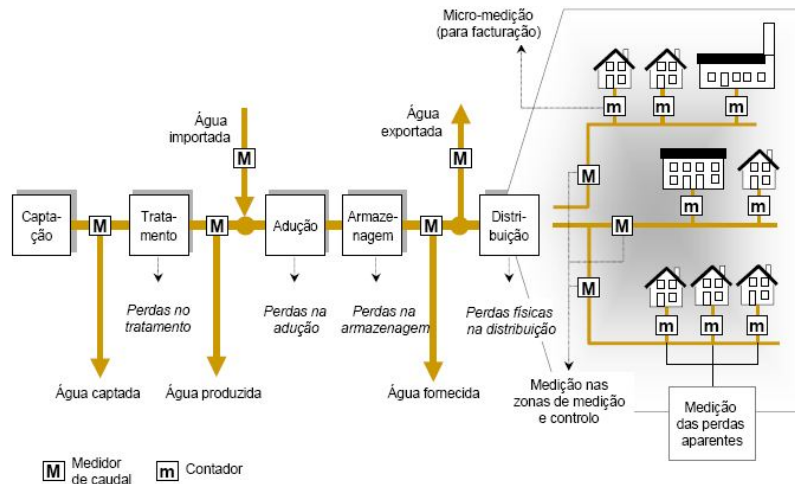


Figura 1 - Principais elementos dos sistemas de abastecimento de água (adaptado Coelho *et al.* 2006).

Segundo Mays (1999), os sistemas de abastecimento de água tem como função básica obter água de uma origem, tratá-la até uma qualidade aceitável e entregá-la ao consumidor na quantidade desejada e no tempo e local solicitado. O mesmo autor refere ainda que os sistemas de abastecimento integram seis componentes funcionais principais: captação da origem; adução de água bruta; armazenamento de água bruta; tratamento; armazenamento de água tratada e distribuição ao consumidor. Em todo este processo e conjunto de componentes está um valor económico inerente, nomeadamente, um custo energético, manutenção de infraestruturas e tratamento, cabendo ao gestor saber administrar o sistema de modo a que este se torne mais produtivo. Quando a água é armazenada a um nível (cota) superior à distribuição permite um menor gasto ao consumo energético, uma vez que a distribuição é feita graviticamente. O objetivo de qualquer entidade gestora é ter o mínimo custo possível na execução das operações (captação, tratamento, adução e distribuição) de modo a que a água produzida tenha associado o menor custo possível. Logo, é muito importante evitar as perdas de água que possam ocorrer por mau funcionamento das infraestruturas do sistema ou por consumos clandestinos. O bom funcionamento de qualquer sistema de distribuição de

água pressupõe que os consumidores tenham continuamente à sua disposição, nos locais de consumo, água potável em quantidade suficiente, à pressão adequada e com o menor custo possível (Alegre e Coelho, 2002).

Garantir que o sistema de abastecimento de água seja capaz de desempenhar adequadamente a sua missão sob as mais variadas condições operacionais, em particular aquelas que sejam expectáveis durante a sua vida útil, é o objetivo último da boa gestão técnica.

O projeto clássico de execução de sistemas de abastecimento de água é baseado na minimização de fatores de custo restringida pela satisfação de algumas condições simples de natureza hidráulica e, com menos incidência, de qualidade de água. Posteriormente, durante a exploração do sistema, procede-se a ações localizadas, tais como o controlo de perdas ou a otimização de operação, sendo provavelmente tratadas sem grande perceção do restante desempenho do sistema. Os métodos tradicionais já não são suficientes para avaliar adequadamente o desempenho dos sistemas de saneamento básico. A diversidade de objetivos faz com que seja genuinamente difícil abordar a globalidade de desempenhos dos sistemas de forma equilibrada. No entanto, a atual tendência de uma boa gestão é a de progressivamente ir tomando em consideração na mesma base todos os aspetos relevantes do desempenho dos sistemas, tanto para efeitos de gestão interna, como de prestação de contas às restantes entidades envolvidas.

A utilização sistemática de modelos de simulação é certamente uma ajuda técnica preciosa no estudo da resposta dos Sistemas de Abastecimento a cenários alternativos de consumos ou de condições operacionais (Coelho e Alegre, 2002). Os modelos de simulação hidráulica são os instrumentos computacionais mais utilizados e consagrados no campo do projeto e do diagnóstico do funcionamento de sistemas de distribuição de água, constituindo um complemento ao discernimento e experiência dos técnicos envolvidos (Alegre e Coelho, 2002).

### **2.1.2. Gestão de Sistemas de Abastecimento**

O serviço de abastecimento de água pode ser prestado por diferentes tipos de entidades gestoras em função do modelo de gestão, como se apresenta no Quadro 1:

Quadro 1 - Tipo de entidades gestoras e serviços de águas (www.ersar.pt).

Modelo de Governo	Prestação direta de serviço	Delegação do serviço	Concessão do serviço
Tipo de entidade	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Serviços Municipais</li> <li>• Serviços Municipalizados</li> <li>• Associações de Municípios</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Empresas Municipais</li> <li>• Empresas Intermunicipais</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concessionárias Municipais</li> <li>• Concessionárias Intermunicipais</li> </ul>

Para qualquer tipo de entidade gestora, para que possam atingir os seus objetivos de gestão têm a necessidade de procurar um elevado grau de eficiência e de eficácia. A eficiência mede até que ponto os recursos disponíveis são utilizados de modo otimizado para a produção do serviço. A eficácia mede até que ponto os objetivos de gestão definidos, específica e realisticamente, foram cumpridos (Alegre *et al*, 2005).

Para que tal seja possível é necessário que as infraestruturas existentes sejam adequadas, que os recursos naturais disponíveis sejam racionalmente utilizados e que este conjunto seja gerido com eficácia e sustentabilidade.

De acordo com Alegre *et al*. (2005), a gestão dos sistemas de abastecimento de água apresenta duas vertentes distintas: a gestão hidráulica e a gestão sanitária.

No âmbito da Gestão Hidráulica dos sistemas de abastecimento devem ser estabelecidos os objetivos de “quantidade de serviço” a atingir, que consiste em colocar à disposição do maior número possível de cidadãos da sua área de jurisdição a água de que eles necessitam:

1. Em quantidade suficiente;
2. À pressão adequada;
3. Com a qualidade satisfatória;
4. Sem interrupções;
5. Em condições de eficiência tão elevada quanto possível em termos do uso dos recursos naturais, humanos, tecnológicos e financeiros.

Para atingir esses objetivos as EG devem procurar adotar continuamente medidas conducentes à minimização do consumo dos recursos naturais (água, energia e reagentes), financeiros, técnicos e humanos disponíveis para a obtenção dos seus propósitos. A eficiência com que os recursos existentes são utilizados depende, entre

outros fatores, da forma como os sistemas são planejados, projetados, construídos e geridos, de modo a minimizar os desperdícios (Alegre *et al*, 2005).

A Gestão Sanitária dos sistemas de abastecimento consiste em garantir a qualidade da água para consumo humano fornecida pelo sistema respeitando as políticas de saúde pública. Até meados do século XX, a qualidade da água para consumo humano era avaliada essencialmente através das suas características organolépticas, tendo como base o senso comum de se exigir que ela se apresentasse límpida, agradável ao paladar e sem cheiro. No entanto, este tipo de avaliação foi-se revelando falível em termos da proteção de saúde pública contra microrganismos patogénicos e contra substâncias químicas perigosas presentes na água. Tornou-se, assim, imperativo estabelecer as características a que deveria obedecer uma água destinada ao consumo (Vieira e Morais, 2005). Atualmente essas características encontram-se estabelecidas no DL 306/2007, de 27 de Agosto, que define os padrões da qualidade da água para o consumo humano em termos de valores paramétricos, frequências de amostragem e métodos analíticos. Para cada sistema são definidos os respetivos Planos de Controlo de Qualidade da Água (PCQA), em que o número de amostras por ano (frequência de amostragem) aumenta com a dimensão do sistema (volume de água fornecido).

A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que as EG de sistemas de abastecimento público de água desenvolvam Planos de Segurança para garantir a qualidade da água, incorporando metodologias de avaliação e de gestão de riscos, bem como práticas de boa operação dos sistemas (Vieira e Morais, 2005).

Como instrumento auxiliar da gestão de sistemas de abastecimento destaca-se uma tecnologia de gestão, designada por Sistema de Telegestão (ST), que permite monitorizar e manobrar, remotamente, as principais instalações hidráulicas dos sistemas. Os Sistemas de Telegestão permitem uma melhor qualidade do serviço prestado e maior eficiência em três níveis de gestão:

- Gestão Técnico-operacional que corresponde ao tratamento instantâneo (em tempo real) dos parâmetros de exploração, garantindo, no caso dos sistemas de abastecimento de água uma alimentação permanente, uma estabilidade da qualidade da água, mesmo em condições adversas, e uma segurança do mesmo e, no caso dos sistemas de saneamento de águas residuais, um serviço de qualidade que minimize o impacto ambiental.



- Gestão económica que assegura um serviço nas melhores condições de rentabilidade, a otimização dos recursos humanos, materiais e dos gastos de energia eléctrica e, ainda, a racionalização de investimentos.
- Gestão estatística, realizada através da análise dos parâmetros ao longo de certo tempo, permite, não só melhorar as condições técnicas e económicas de exploração, como também dar indicações sobre:
  - ✓ Tempo de utilização dos equipamentos, seu estado de funcionamento e fiabilidade;
  - ✓ Necessidades de remodelação e ampliação dos sistemas em determinadas zonas;
  - ✓ Outras informações que permitam um adequado planeamento e tomada de decisões sobre futuros investimentos.

## 2.2. Modelos de Simulação

Os modelos de simulação são ferramentas que permitem, com uma margem de erro estimável, analisar e prever o comportamento hidráulico e de parâmetros de qualidade de água do sistema a partir das características dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados. Os modelos permitem assim a rápida e eficaz realização de análises de sensibilidade e a simulação de cenários variados, com suficiente aproximação, sem ser necessário interferir com o sistema em causa ou arriscá-lo a modos de operação desconhecidos. Os instrumentos computacionais são utilizados no campo do projeto e do diagnóstico de funcionamento de sistemas de transporte e distribuição de água, constituindo um complemento importante ao discernimento e experiência dos técnicos envolvidos (Coelho *e tal.*, 2006).

A simulação do comportamento do sistema pode ser utilizada para prever a sua resposta face a gamas alargadas de condições operacionais e ambientais. Os problemas podem assim ser antecipados e as soluções avaliadas antes de os investimentos serem realizadas (Coelho *e tal.*, 2006).

A aplicação de modelos matemáticos no saneamento básico está bastante divulgada e desenvolve-se rapidamente. Existem aplicativos para a simulação hidráulica como, por exemplo, WaterCAD desenvolvido pela *Haestad Methods*, que em Agosto de 2004, fundiu-se a *Bentley Systems*, e o EPANET da U.S. *Environmental Protection*

*Agency*<sup>2</sup>(EPA). Estes oferecem aos profissionais uma maior rapidez na execução dos modelos e análise com maior nível de detalhe.

O WaterCAD é um programa fácil de usar, que ajuda os engenheiros a projetar uma análise complexa dos sistemas de distribuição com tubagens sob pressão. Possui uma boa relação gráfica do WaterCAD (ambos na categoria Stand-Alone e Modo AutoCAD) o que torna mais fácil a colocação rápida de uma rede complexa de tubagens, reservatórios, bombas e mais (Haestad Methods, Inc., 2003).

Um dos simuladores mais atrativos para as entidades gestoras, consultores, investigadores académicos, estudantes portugueses e escolhido para modelação da presente tese é o EPANET 2.0. Trata-se de um simulador amplamente testado e credível, que beneficia há cerca de uma década de uma alargada comunidade de utilizadores em todo o mundo, fruto de uma filosofia transparente de distribuição gratuita tanto do programa como do seu código computacional (Loureiro e Coelho, 2004).

### **2.2.1. Caracterização do EPANET 2.0**

Segundo Loureiro e Coelho (2004) o EPANET é um programa de computador que permite executar simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade de água de sistemas de distribuição em pressão. A simulação estática permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos, como se deles fornecessem uma fotografia. Em complemento desta, a simulação dinâmica é utilizada em sistemas de distribuição de água, quando é efetuada uma simulação da evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de equilíbrio hidráulico obtida para sucessivos instantes. Este programa permite obter os valores do caudal em cada tubagem, da pressão em cada nó, da altura de água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas através da rede durante o período de simulação, subdividido em múltiplos passos de cálculo.

O EPANET foi concebido para ser uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição, melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano. Pode ser utilizado em diversas situações onde seja necessário efetuar simulações de sistemas de distribuição. O estabelecimento

---

<sup>2</sup> Agência para a Proteção do Ambiente

de cenários de projeto (ex: expansão de uma rede existente), a calibração de modelos hidráulicos, a análise do decaimento de cloro residual e a avaliação dos consumos constituem alguns exemplos. De acordo com Loureiro e Coelho (2004), o EPANET pode ajudar a analisar alternativas estratégicas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água através do sistema, através de, por exemplo:

- ✓ Alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens;
- ✓ Alteração de esquemas de funcionamento de grupos elevatórios e enchimento/esvaziamento de reservatórios de nível variável;
- ✓ Utilização de tratamento adicional, como seja a recloração;
- ✓ E seleção de tubagens para limpeza e substituição.

Segundo Loureiro e Coelho (2004) o EPANET 2.0 apresenta ambiente gráfico integrado que permite:

- ✓ Editar os dados descritivos da rede e dos cenários a modelar;
- ✓ Executar simulações hidráulicas e de qualidade da água;
- ✓ Calibrar o modelo e visualizar os resultados em vários formatos.

Segundo os mesmos autores o EPANET 2.0 pode ser utilizado para:

- ✓ Desenvolver programas de amostragem ou planos estratégicos para o estudo da perda de desinfetantes e formação de subprodutos;
- ✓ Realizar avaliações da exposição dos consumidores.
- ✓ Avaliar estratégias de aperfeiçoamento da qualidade de água, tais como a alteração da origem das águas dentro de um sistema multi-fontes;
- ✓ Modificar horários de bombeamento e enchimento/esvaziamento de reservatórios para redução de custos energéticos e tempos de percurso;
- ✓ Utilizar estações para intensificação da desinfecção em locais chave para manutenção dos resíduos alvo;
- ✓ Planear programas com custo-benefício para limpeza e reposição das tubagens.

Este programa pode também ser utilizado no planeamento e aperfeiçoamento da *performance* de um sistema hidráulico. O *software* é útil na colocação e dimensionamento de tubagens, bombas e válvulas, minimização energética, análise de marcos de incêndio, estudos de vulnerabilidade e instrução de operadores.

Para a modelação é necessário criar um novo projeto que considera a elaboração esquemática da rede de distribuição de água, designada por “Mapa da Rede”.

Para a elaboração deste projeto, o EPANET contém objetos físicos (Quadro 2), que podem ser visualizados na janela do Mapa da Rede, e objetos não físicos (Quadro 3), que envolvem informação relativa às condições de dimensionamento e operação.

Quadro 2 - Objetos Físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (Loureiro e Coelho, 2004).

	Objetos	Definição	Dados de Entrada	Resultados de Modelação
Nós	Junções	Pontos da rede onde os troços se ligam entre si e onde a água entra e sai da rede.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cota;</li> <li>• Consumo;</li> <li>• Qualidade inicial da água.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carga hidráulica total (nível de água no caso de RNF<sup>3</sup> e RNV<sup>4</sup>);</li> <li>• Pressão (altura piezométrica);</li> <li>• Qualidade da água</li> </ul>
	RNF	Considerados como nós especiais que representam um volume de armazenamento de água de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante, constitui assim, origens ou sumidouros de água externos à rede.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nível da Água;</li> <li>• Qualidade inicial da Água.</li> </ul>	(-)

<sup>3</sup> Reservatório de Nível Fixo.

<sup>4</sup> Reservatório de Nível Variável.

	RNV	<p>Considerados nós especiais da rede que possuem uma capacidade de armazenamento limitada e podendo o volume da água armazenado variar ao longo da simulação.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cota de fundo (onde a altura da Água é zero);</li> <li>• Diâmetro;</li> <li>• Altura da Água mínima;</li> <li>• Altura da Água máxima;</li> <li>• Altura de Água inicial para cenário a simular;</li> <li>• Qualidade de Água inicial.<sup>5</sup></li> </ul>	(-)
Troços	Tubagem	<p>São troços que transportam água entre vários pontos da rede. O EPANET considera que o escoamento ocorre em pressão em todas as tubagens, ao longo da simulação.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro;</li> <li>• Comprimento;</li> <li>• Coeficiente de rugosidade <sup>6</sup>(cálculo da perda de carga contínua);</li> <li>• Estado (aberto ou fechado);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal;</li> <li>• Velocidade;</li> <li>• Perda de carga.</li> </ul>

<sup>5</sup> A definição das alturas de água indicadas faz-se em relação ao ponto para o qual se indicou a cota do fundo do reservatório de nível variável.

<sup>6</sup> Os fatores de rugosidade (C,  $\epsilon$ , n) são coeficientes empíricos tabelados que exprimem o efeito da rugosidade do material no cálculo da perda de carga contínua de modo distinto.

	Bomba	São troços da rede que transferem energia para o escoamento, aumentando a sua carga hidráulica.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nó inicial e final;</li> <li>• Curva da Bomba (combinação de valores de carga hidráulica e caudal que definem a curva de funcionamento);</li> </ul>	(-)
	Válvulas	São troços que limitam a pressão ou o caudal num ponto particular da rede.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nó inicial e final;</li> <li>• Diâmetro;</li> <li>• Estado (aberto ou fechado).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal;</li> <li>• Perda de Carga.</li> </ul>

Quadro 3 - Objetos não Físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (Loureiro e Coelho, 2004).

Objetos		Definição
Curvas	Curva da Bomba	Representa uma relação entre altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento desta, para uma velocidade de rotação nominal.
	Curva de Rendimento	Relaciona o rendimento do grupo com o caudal bombeado. A curva é utilizada apenas para cálculos energéticos.
	Curva de Volume	Determina o modo como o volume de água armazenado num reservatório de nível variável, varia com o nível de água.
	Curva de Perda de Carga	Utilizada para descrever a perda de carga através de uma válvula e função do caudal.

Padrões Temporais	São constituídos por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, de forma a traduzir a sua variação no tempo.
Controlos	São um conjunto de instruções que estabelecem o modo como a rede opera ao longo do tempo. Estes especificam o estado dos troços selecionados em função do tempo, alturas de água num reservatório de nível variável e valores de pressão em pontos específicos da rede.

### 2.2.2. Capacidade de Modelação Hidráulica e Variáveis de Estado

O modelo de simulação hidráulica do EPANET calcula a carga hidráulica nos nós e o caudal nos troços, para um conjunto fixo de níveis nos RNF's, alturas nos RNV's e consumos para uma sucessão de pontos, ao longo do tempo. Em cada passo de cálculo, os níveis de água nos RNF e os consumos nos nós são atualizados, de acordo com o padrão temporal que lhes está associado, enquanto que a altura de água no RNV é atualizada em função do caudal de saída (Loureiro e Coelho, 2004).

Uma rede completamente caracterizada (ou seja, incluindo todas as tubagens, sem simplificações) e uma modelação fiável constituem pré-requisitos essenciais para a correta modelação de qualidade de água. O EPANET contém um conjunto de ferramentas de cálculo para apoio à simulação hidráulica, de que se destacam como principais características:

- ✓ Dimensão (número de componente) da rede a analisar ilimitada;
- ✓ Cálculo da perda de carga utilizando as fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning;
- ✓ Consideração das perdas de carga singulares em curvas, alargamentos, estreitamento, etc.;
- ✓ Modelação de bombas de velocidade constante ou variável;

- ✓ Cálculo de energia de bombeamento e do respetivo custo;
- ✓ Modelação dos principais tipos de válvulas, incluindo válvulas de seccionamento, de retenção, reguladoras de pressão e de caudal;
- ✓ Modelação de reservatórios de armazenamento e de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;
- ✓ Múltiplas categorias de consumo nos nós, cada uma com um padrão próprio de variação no tempo;
- ✓ Modelação da relação entre pressão e caudal efluente de dispositivos emissores (ex.: aspersores de rega, ou consumos dependentes da pressão);
- ✓ Possibilidade de basear as condições de operação do sistema em controlos simples, dependentes de uma só condição (ex.: altura de água num reservatório de nível variável, tempo), ou em controlos com condições múltiplas.

### **2.2.3. Capacidade de Modelação da Qualidade da Água e Variáveis de Estado**

Para além da modelação hidráulica, o EPANET também fornece o modelo de simulação de qualidade da água que é um modelo Lagrangeano para seguir o destino dos segmentos, à medida que estes se deslocam nas tubagens e se misturam nos nós, entre passos de cálculo com comprimento fixo. Os passos de qualidade de água são tipicamente menores do que os passos de cálculo hidráulico (ex.: minutos em vez de horas) para ter em conta os pequenos tempos de percurso que possam ocorrer no interior das tubagens.

Seguem-se as seguintes possibilidades fornecidas pelo EPANET relativamente à modelação da qualidade da água:

- ✓ Modelação do transporte de um constituinte não reativo (ex.: um traçador) através da rede ao longo do tempo;
- ✓ Modelação do transporte, mistura e transformação de um constituinte reativo, à medida que este sofre decaimento (ex.: cloro residual) ou crescimento (ex.: um subproduto da desinfeção) com o tempo;
- ✓ Modelação do tempo de percurso da água através da rede;



- ✓ Cálculo da percentagem de caudal que, com origem em determinado nó, atinge qualquer outro nó ao longo do tempo (ex.: cálculo da importância relativa de duas origens de água diferentes);
- ✓ Modelação de reações de decaimento de cloro no seio do escoamento e na parede da tubagem;
- ✓ Definição de limites para a transferência de massa na modelação de reações na parede;
- ✓ Permitir que as reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração limite;
- ✓ Aplicação à rede de coeficientes de reação globais, que podem ser modificados individualmente para cada tubagem;
- ✓ Possibilidade de relacionar o coeficiente de reação na parede com a rugosidade da tubagem;
- ✓ Definição de variação temporal da concentração ou de entrada de massa em qualquer ponto da rede;
- ✓ Mistura de água a partir de diversas origens;
- ✓ Determinação do tempo de percurso da água através de um sistema;
- ✓ Determinação da perda de cloro residual;
- ✓ Determinação do crescimento de subprodutos da desinfecção.

#### **2.2.4. Aplicação da Modelação de Sistemas de Distribuição de Água em Portugal**

Em Portugal, o desenvolvimento e a aplicação de modelos matemáticos de sistemas de distribuição de água iniciou-se na década de 80, com o modelo da rede de Almada, elaborado em 1981 pelo LNEC. Depois de alguns anos em que a atividade realizada se centrou essencialmente no ambiente científico e académico, as empresas de consultoria começaram a ganhar espaço de mercado na prestação deste tipo de serviços para as entidades gestoras. Numa fase inicial os requisitos computacionais eram consideráveis – os modelos eram utilizados em computadores centrais, inacessíveis à generalidade das entidades gestoras portuguesas – e os programas eram pouco amigáveis, requerendo conhecimentos de programação (Coelho *et al.*, 2006).

A situação atual é muito diferente, existindo uma grande acessibilidade ao *hardware* e *software* de base para o desenvolvimento deste tipo de modelos. De facto, qualquer

computador pessoal dos nossos dias tem capacidade para acomodar um modelo de uma rede de dimensões e complexidade consideráveis. Por outro lado, a par do *software* comercial, existe *software* de desenvolvimento de modelos que tem grande qualidade e está disponível gratuitamente, também em português. É o caso do programa EPANET, na versão elaborada e disponibilizada pelo LNEC, cujo manual de utilizador se encontra também publicado na série Guias Técnicos do IRAR (Instituto Regulador de Águas e Resíduos), atual ERSAR (Entidade Reguladora dos Serviços, Águas e Resíduos).

Esta evolução, contudo, só recentemente se começa a fazer sentir no seio das entidades gestoras. De facto, a realidade demonstra que só é possível tirar real partido da modelação matemática quando existe uma estrutura interna à entidade gestora que permita criar, atualizar e explorar os modelos de uma forma fiável e eficiente. Os modelos de “chave na mão”, desenvolvidos por terceiros, tendem a ser sistematicamente abandonados após períodos de vida útil curtos.

Pelo contrário, a internalização do conhecimento pelas entidades gestoras e o estabelecimento de procedimentos bem definidos e rotinados está a demonstrar ser uma via de grande sucesso, impulsionadora de inovação tecnológica em muitos outros domínios da gestão. Verifica-se que o desenvolvimento de modelos de simulação dos sistemas pode e deve ser um bom pretexto para integrar a informação arquivada nos diversos sistemas de informação eventualmente existentes (sistemas de informação geográfica, de gestão de clientes e faturação, de telegestão, de apoio à manutenção, etc.) e melhorar a qualidade dos dados disponíveis. O projeto intitulado Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água (INSAA, 2003-2006), promovido pelo LNEC e com a participação de nove entidades gestoras nacionais, tem constituído, assim o cremos, um excelente exemplo desta abordagem.

As principais vantagens da utilização de modelos de simulação matemática dos sistemas de abastecimento de água traduzem-se no apoio ao dimensionamento de novas redes, aos programas de reabilitação, ao licenciamento de novas ligações, ao controlo de perdas de água, ao controlo da qualidade da água nas redes e à gestão otimizada de energia (Coelho *et al.*, 2006).

Existem muitas dificuldades no controlo da qualidade da água em sistemas de distribuição, principalmente em estudar os fatores responsáveis pelo decaimento do cloro e a falta ou excesso de pressão nas redes. Assim, os simuladores hidráulicos

associados a modelos de qualidade da água e de satisfação das condições hidráulicas, têm sido empregues como ferramenta para subsidiar pesquisas nesta área.

### **2.3. Situação do Abastecimento de Águas na Região Autónoma dos Açores**

Segundo Porteiro J. *et al* (2005), a situação de referência da Região Autónoma dos Açores para 2005 era pouco favorável no que concerne à vertente do abastecimento de água, devido às elevadas perdas de água nos sistemas e aos resultados financeiros negativos, principalmente das entidades gestoras de menor dimensão. Esta caracterização baseou-se nos resultados do Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais – Açores, onde se analisaram parâmetros físicos e financeiros das 19 entidades gestoras, numa perspetiva de sustentabilidade ambiental e económica.

Em relação aos sistemas de abastecimento de água, as perdas de água constituem um dos principais problemas de gestão, do ponto de vista ambiental, operacional, económico-financeiro, entre outros. A fraca implementação de medição de volumes captados na maioria das EG da região, não permite conhecer a verdadeira dimensão do volume de perdas. Os dados apurados para as EG onde predominam captações por furo, apontam para valores de perdas entre 40 e 60 %. Estes valores são superiores à média nacional, de 40%, denotando o elevado esforço que as EG terão de desenvolver nesta área de modo a cumprirem a meta de reduzir as perdas de água para o valor de perdas aconselhado de 20% (Porteiro J. *et al*, 2005).

No que diz respeito à componente económico-financeira no sistema de abastecimento de água, ficou demonstrado que nos Açores e em termos agregados, as receitas de exploração anuais conseguem cobrir as despesas de investimento anuais, acrescidas dos custos de exploração, pelo que a sustentabilidade da gestão do sistema no arquipélago é aparentemente garantida, comprovada pelo VAL positivo. Todavia, a situação geral deve ser confrontada com uma análise mais fina (dados desagregados). Neste termos, das 19 EG consideradas, apenas 6 apresentam resultados positivos, sendo estas as EG com maior dimensão (principais libertadoras de fundos). Incluem-se quatro de São Miguel (CM da Ribeira Grande, CM da Lagoa, CM de Vila Franca do Campo e SMAS de Ponta Delgada), a CM de Vila do Porto e os SM de Angra do Heroísmo (Porteiro J. *et al*, 2005).

### **3. OBJECTIVOS**

Esta tese tem como objetivo avaliar o desempenho hidráulico e a qualidade da água na rede de distribuição da cidade de Angra do Heroísmo, através das variáveis pressão e concentração de cloro residual, com a utilização do modelo de simulação EPANET 2.0. Pretende-se também inventariar os pontos críticos do sistema e propor medidas de melhoria.

## 4. CARACTERIZAÇÃO DO CASO DE ESTUDO

Apesar de este estudo incidir sobre uma parte da rede de distribuição da cidade de Angra do Heroísmo, considera-se importante descrever de forma resumida o sistema geral de abastecimento do concelho, sendo posteriormente detalhada a zona específica em estudo.

### 4.1. Sistema de Distribuição da Água do Concelho de Angra do Heroísmo

O concelho de Angra do Heroísmo (Figura 2) localiza-se na ilha Terceira que pertence ao grupo central do arquipélago dos Açores.

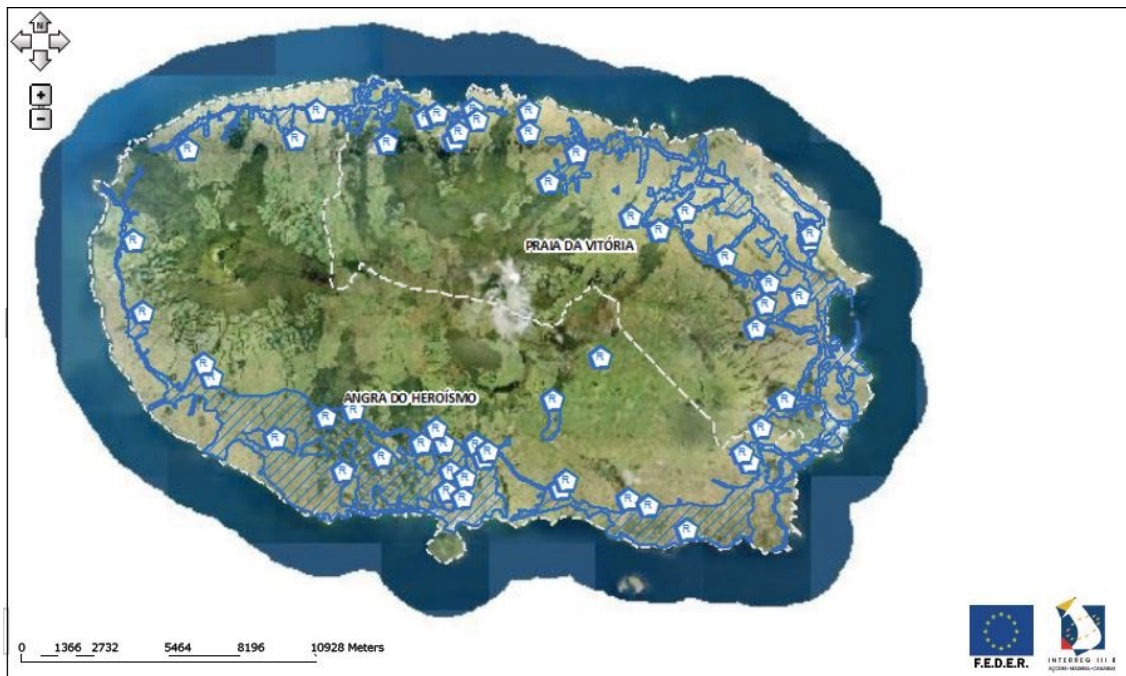


Figura 2 - Ilha Terceira com a delimitação do concelho de Angra do Heroísmo e Praia da Vitória e a rede de abastecimento e reservatórios das mesmas (<http://sig.srrn.azores.gov.pt/SRAM/site/SRIA/>).

É limitado a nordeste concelho da Praia da Vitória, ocupando uma superfície de 237,5 km<sup>2</sup>, distribuída por 19 freguesias: Altares, Doze Ribeiras, Feteira, Nossa Senhora da Conceição, Cinco Ribeiras, Porto Judeu, Raminho, Ribeirinha, Santa Bárbara, Santa Luzia, São Bartolomeu de Regatos, São Bento, São Mateus da Calheta, São Pedro, Vila de São Sebastião, Sé, Serreta, Terra Chã e Posto Santo. Segundo os dados de 2009 do Inventário Nacional de Sistemas de Abastecimento de Água e de Águas Residuais (INAG, 2011) o abastecimento de Água no Concelho de Angra do Heroísmo, serve uma população de 35116 habitantes, composta por dois tipos de serviço: domiciliário

relativo ao sistema Altares/Raminhos com 1380 habitantes, e misto relativo ao sistema de Angra do Heroísmo com 33736 habitantes.

O abastecimento de água ao concelho é garantido por 6 origens de água subterrânea (Cabrito, Nasce Água, Fonte da Telha, Serreta e Raminho) e uma origem de água superficial (Altares), como se pode verificar no esquema de funcionamento da rede de distribuição pública de água para consumo humano em Anexo. De 60 a 70% dos dias do ano a população é servida pelas nascentes e o restante por origem de furos, sendo estes utilizados só em casos de grandes necessidades, onde são usados em média anual, 5 dos 10 furos existentes na rede de distribuição de Angra do Heroísmo (Bettencourt, 2012).

Seguidamente descrevem-se as componentes que constituem o caso de estudo.

### 4.2. Caracterização do Caso de Estudo

As componentes que constituem o caso de estudo são a Estação de Tratamento de Água (ETA), o Reservatório da Cidade e a Rede de distribuição, que se descrevem em seguida:

#### ✓ Captação, ETA e Reservatório da Cidade

A origem deste sistema é a nascente da Nasce Água (Figura 3), que produziu no ano 2010 um volume de água de 1.547.141 m<sup>3</sup> (Bettencourt, 2012).



Figura 3 - Nascente da Nasce Água.

Desta origem a água é encaminhada para a ETA da Nasce Água (Figura 4) por intermédio de uma adutora de Fibrocimento com um diâmetro interno de 150 mm, onde

se efetua a desinfecção com cloro gasoso (Figura 5), com o Clorómetro de cloro gasoso (Figura 6). De seguida, a água é conduzida para o reservatório da Cidade, através de uma adutora de PVC com um diâmetro externo de 200 mm. Ao contrário do que seria de esperar, verifica-se um aumento de diâmetro de montante para jusante (150 mm da origem para a ETA e 200 mm da ETA para o reservatório), o que se justifica por serem sectores distintos da rede construídos em épocas diferentes, tendo sido o mais recente dimensionado para uma maior capacidade.



Figura 4 - Estação de Tratamento de Água (ETA) da Nasce Água.



Figura 5 - Tambor de cloro gasoso de 600 kg, garrafa de reserva de cloro e clorómetro.



Figura 6 - Clorómetro e garrafa de reserva de cloro gasoso.

O reservatório da Cidade (Figura 7) situa-se à cota do terreno de 95 m e é constituído por duas células independentes, onde a Oriental corresponde ao presente caso estudo. De forma retangular de 14,20 m de largura e 17,15 m de comprimento, com uma

capacidade de  $900 \text{ m}^3$ , e uma altura média de água de 3,70 m. Este fornece um volume anual de  $518,618 \text{ m}^3$ , sendo esse valor ponderado no ano de 2010.



Figura 7 - Reservatório da cidade: a) célula que abastece o caso de estudo e b) Câmara de manobras.

À saída do reservatório a água é transportada por uma adutora de ligação à rede, constituída por matérias e diâmetros diferentes. Uma primeira parte, mais antiga, é constituída por Fibrocimento de diâmetro interno de 175 mm, passando a uma segunda parte mais recende em PVC com diâmetro externo de 200 mm. Esta adutora não tem serviço de percurso.

### ✓ Rede de Distribuição

A rede de distribuição de água da cidade de Angra do Heroísmo caracteriza-se por se dispor em malhas e ramais, como se apresenta na Figura 8. O caso de estudo corresponde à rede de distribuição com origem no reservatório da Cidade e que se estende pelas freguesias da N. S. Conceição e São Bento, assinaladas com a cor azul na figura 8, desenvolvendo-se entre as cotas 74 e 2 m. O material que constitui as tubagens é na totalidade PVC, com diâmetro a variar entre 63 a 200 mm.

Segundo comunicação pessoal (Bettencourt, 2012) a rede de distribuição de Angra do Heroísmo foi 95% remodelada em 1992, tendo assim uma idade média de 20 anos.

Por norma, as tubagens encontram-se de 1 a 1,10 m de profundidade, no terreno. O comprimento total da rede de distribuição do caso de estudo é de 495.970 m. Relativamente aos pontos de junção ou nós da rede, estes são em cruzeta ou em (T), dependendo do numero de ligações que efetuam, quatro ou três respetivamente.



Existem duas Válvulas Redutoras de Pressão (VRP) localizadas, uma a meio da Rua Frei Diogo das Chagas e a outra na entrada para o Cais do Porto das Pipas, representadas na Figura 8.



Figura 8 - Rede de distribuição de água do caso em estudo (azul) e as duas VRP (preto).

## **5. METODOLOGIA PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO**

### **5.1. Fases do Planeamento do Modelo**

As principais fases do planeamento foram:

- ✓ Definição da zona a estudar inserida no subsistema de água à cidade, desenvolvido no capítulo 4;
- ✓ Levantamento de dados de cadastro, de faturação e operacionais relativo à zona a estudar;
- ✓ Definição das convenções a adotar na modelação;
- ✓ Definição das opções básicas de modelação, tais como:
  1. Descrição dos componentes físicos;
  2. Descrição de consumos e caudais;
  3. Descrição das regras de funcionamento.
- ✓ Calibração do Modelo.

### **5.2. Componentes Físicos do Sistema**

Para a execução deste trabalho foi necessário em primeiro lugar, recolher diferentes tipos de dados do reservatório e rede de distribuição de água junto à entidade gestora, tais como:

- ✓ A localização dos componentes da zona em estudo do subsistema de distribuição de água (reservatório, adutoras, válvulas e rede de distribuição);
- ✓ As características das tubagens de distribuição (diâmetro, comprimento e material);
- ✓ As características do reservatório (cota de implantação, dimensão);
- ✓ Características das válvulas: diâmetro, material e estado (aberto, fechado);
- ✓ Cotas dos nós.

### **5.3. Solicitações da Rede**

Para além da caracterização física da zona em estudo, foi também necessário recolher dados do funcionamento tais como:

- ✓ Registo de consumos domésticos e grandes consumidores nos contadores;
- ✓ Registo de caudal à saída do reservatório;

- ✓ Registo de cloro adicionado à água;

### **5.3.1. Dados de Faturação**

Os dados de faturação são um conjunto de dados relativos à faturação do cliente ou do local de consumo em causa, que incluem os consumos faturados nos últimos períodos de faturação, o código único do contador, a freguesia, o nome da rua, o número de polícia e o tarifário aplicado.

Um grande número de entidades gestoras em Portugal e noutros países, utiliza sistemas informatizados para a gestão de clientes onde se regista e faturação de consumos de água. Este tipo de gestão é adotada pelos Serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo, entidade gestora da zona em estudo, registando toda a informação relevante relativa aos clientes e aos locais de consumo de água do sistema de abastecimento. Os dados residem em base de dados, armazenadas na própria entidade gestora ou no centro de processamento de dados da empresa que presta o serviço.

Estes sistemas, que são utilizados essencialmente pelas unidades comerciais da entidade gestora, contêm todavia uma grande quantidade de informação relevante para fins de engenharia, que raramente é aproveitada na sua plenitude. No sentido de tirar o melhor partido possível dessa informação para a construção de modelos, é importante possuir um entendimento do tipo e estrutura dos dados contidos nestes sistemas, tais como os dados de faturação.

### **5.3.2. Tipos de Consumo e Distribuição de Consumos**

As solicitações de um sistema de abastecimento de água são os consumos de água por parte dos diversos grupos de utilizadores e as perdas físicas de água que ocorrem no conjunto de condutas e restantes componentes. A sua estimativa constitui uma tarefa mais difícil e habitualmente mais trabalhosa do processo de desenvolvimento de um modelo de simulação, uma vez que os consumos humanos têm um comportamento de natureza estocástica, tanto no tempo como no espaço, e são invariavelmente a maior fonte de incerteza associada ao modelo (Coelho *et al.* 2006).

De acordo com a Figura 9, o consumo de água numa rede de distribuição inclui o consumo – doméstico, comercial, industrial, as utilizações públicas de água para rega de espaços verdes ou lavagem de ruas, e as restantes utilizações autorizadas, bem como

eventuais utilizações não autorizadas – e as perdas de água devidas a fugas, roturas e extravasamentos.

Volume entrado no sistema [m <sup>3</sup> /ano]	Consumo autorizado [m <sup>3</sup> /ano]	Consumo autorizado facturado [m <sup>3</sup> /ano]	Consumo facturado medido [m <sup>3</sup> /ano]	Água facturada [m <sup>3</sup> /ano]
			Consumo facturado não medido [m <sup>3</sup> /ano]	
		Consumo autorizado não facturado [m <sup>3</sup> /ano]	Consumo não facturado medido [m <sup>3</sup> /ano]	Água não facturada (perdas comerciais) [m <sup>3</sup> /ano]
			Consumo não facturado não medido [m <sup>3</sup> /ano]	
	Perdas de água [m <sup>3</sup> /ano]	Perdas aparentes [m <sup>3</sup> /ano]	Uso não autorizado [m <sup>3</sup> /ano]	
			Erros de medição [m <sup>3</sup> /ano]	
		Perdas reais [m <sup>3</sup> /ano]	Perdas reais no tratamento [m <sup>3</sup> /ano]	
			Fugas no sistema de adução e distribuição [m <sup>3</sup> /ano]	
			Fugas e extravasamentos nos reservatórios [m <sup>3</sup> /ano]	
			Fugas nos ramais (a montante dos contadores) [m <sup>3</sup> /ano]	

Figura 9 - Componentes do balanço hídrico do sistema (adaptado Alegre et al. 2005).

Assim, assume particular importância o cuidado posto na obtenção das estimativas de consumo, e a adoção de métodos de quantificação e atribuição de consumos aos nós da rede que facilitem a sua atualização e flexibilizem o cálculo e a utilização do modelo.

Na realidade, a medição fiável dos principais volumes de água geridos deverá constituir uma parte integrante das funções de abastecer e distribuir água, não só para efeitos de modelação, mas sobretudo pelo incremento das capacidades de análise e gestão da oferta e da procura, incluindo a avaliação de perdas.

Um primeiro indicador importante é o consumo médio global. Existem várias formas de o determinar, das quais se referem como mais comuns as seguintes:

- ✓ Por macromedição, ou medição direta dos volumes de água fornecida à rede através de grupos elevatórios, reservatórios e/ou condutas adutoras;

- ✓ Por micromedição, ou medição dos volumes de água utilizados nos pontos de consumo;
- ✓ Por estimação, com base no tipo de ocupação urbanística, no número de habitantes servidos, nas indústrias abastecidas, no estado de conservação da rede, etc..

As duas primeiras formas são complementares e não alternativas, dado que só através da comparação entre os valores obtidos pela macromedição e pela micromedição é possível contabilizar as perdas do sistema de distribuição (perdas físicas e consumos não medidos), e atuar em conformidade. Na prática, é comum a existência de registos mensais de microconsumos, e a inexistência ou escassez de equipamento que permita quantificar com exatidão os volumes de água fornecidos à rede.

Embora, do ponto de vista da rede, os consumos estejam distribuídos ao longo das condutas, através dos ramais de entrega, e seja igualmente expectável que as fugas se distribuam de forma aproximadamente contínua, os modelos de simulação empregam habitualmente a simplificação justificável de representar o consumo como estando concentrado nos nós que delimitam as condutas.

É estipulado que os consumos que ocorrem em cada semi comprimento de uma conduta são concentrados no nó respetivo. Na Figura 10,  $c_1$  a  $c_5$  são os consumos que se verificam nos ramais domiciliários ligados ao longo da conduta, e  $q_i$  e  $q_f$  são os consumos acumulados nos nós inicial (i) e final (f), que delimitam a conduta. Os consumos  $c_1$  a  $c_3$  são atribuídos ao nó i, uma vez que estão mais próximos deste, em quanto que os consumos  $c_4$  e  $c_5$  são atribuídos ao nó f.

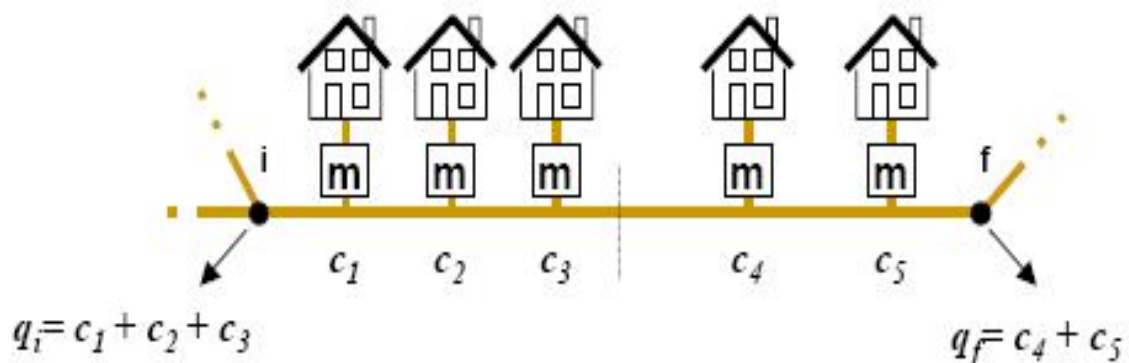


Figura 10 - Atribuição dos consumos na conduta aos nós inicial e final (Adaptado Coelho et al. 2006).

### 5.3.3. “Consumo Base” e “Grandes Consumidores”

#### ✓ Consumo Base

A forma habitual de especificar os consumos num modelo de simulação consiste em atribuir a cada nó um valor nominal, também designado por consumo base. O consumo base representa o consumo acumulado no nó.

O consumo base concentrado no nó foi calculado de acordo com os seguintes passos:

1. Um valor dimensional, ou seja uma estimativa (em unidades de caudal), para o período de quatro meses (de 1 de Julho a 31 de Outubro de 2011), do valor médio mensal do consumo em cada nó. A soma de todos estes valores é o consumo médio total da rede.
2. Um valor adimensional, expresso como fração do consumo médio total da rede, que é obtida dividindo o valor referido em (1.) pelo consumo médio total da rede, para o período em análise (de 1 de Julho a 31 de Outubro de 2011).

Não foi possível utilizar um período de tempo maior, por falta de dados de registos de contadores nos restantes meses do mesmo ano, devido a avarias ou erros de medição. Os cálculos efetuados são apresentados em anexo de formato digital.

#### ✓ Grandes Consumidores

Um grande consumidor, do ponto de vista hidráulico, é um local de consumo onde se verifica pelo menos uma das seguintes condições:

1. O consumo médio é suficientemente grande, por comparação com o caudal que circula na conduta a que está ligado, para a sua localização ao longo da conduta poder influenciar a perda de carga que nela se verifica; e/ou
2. O comportamento ao longo do tempo é suficientemente diferenciado dos que o rodeiam, para em certas horas do dia representar caudais significativamente diferentes e assim causar o mesmo efeito (influenciar a perda de carga ao longo da conduta).

São assim considerados como grandes consumidores os utilizadores de elevados volumes de água ao longo do período em estudo. Para a determinação destes consultou-se a base de dados dos serviços Municipalizados de Angra do Heroísmo que contém

todos os registos dos consumidores da zona em estudo, no período de Julho a Outubro de 2011.

Os dados recolhidos dos grandes consumidores para calibrar o programa de simulação através dos consumos mensais (Quadro 4) são referentes ao ano 2011 e são efetuados com base nos registos dos consumos faturados de 1 de Julho a 31 de Outubro do ano já referido. A importância dos seus consumos deve-se ao fato destes influenciarem o comportamento da rede de distribuição.

Os grandes consumidores selecionados foram os seguintes:

- Escola Secundária Padre Jerónimo Andrade;
- Estação de Tratamento de Águas Residuais (ETAR);
- Empresa Ideal de Panificação, Lda;
- Supermercado Guarita.

Quadro 4 - Consumos mensais dos contadores dos grandes consumidores da zona em estudo.

Entidade	Meses em estudo				Consumo (m <sup>3</sup> /dia)
	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	
Escola Secundária P.J. Andrade	144,0	144,0	238,0	129,0	5,37
ETAR	1556,0	3669,0	5758,0	6822,0	145,94
Empresa Ideal de Panificação	16505,0	16707,0	16869,0	17110,0	550,75
Supermercado Guarita	121,5	121,5	122,0	103,0	3,84

#### 5.4. Calibração do Modelo

Foi elaborado um plano de medições para calibração do modelo relativamente às variáveis pressão e cloro residual, que se apresenta de seguida:

- ✓ Pressão:

A metodologia adotada para a obtenção de dados de calibração consistiu na colocação de um manómetro (Figura 11) para a medição da pressão, em quatro pontos-chave da rede do caso de estudo.



Figura 11 - Manómetro.

Estes pontos foram selecionados na rede, devido a serem as situações mais críticas, onde se verificam mais problemas, tal como excesso ou falta de pressão. No Quadro 5 indicam-se os pontos onde se efetuaram as medições de pressão, para a calibração e na Figura VIII em anexo, indica-se a sua localização na rede de distribuição.

Quadro 5 - Indicação dos pontos de medição com os respetivos nós e cotas do terreno.

Pontos	Rua	Nó	Cota do Terreno
1	Avenida Conde Sieuve de Meneses, nº34	NODE24	69,51
2	Rua Dr. José Bruno Carreiro, nº30	NODE183	57,18
3	Rua Ciprião Figueiredo, nº9	NODE286	19,50
4	Entrada ao Porto das Pipas	NODE39	6,14

As primeiras medições foram efetuadas no dia 18 de Abril de 2013, com a ajuda e transporte de um assistente técnico disponibilizado pelos SMAH. Estas não foram feitas num período de 24 horas, pois ainda não se tinha estabelecido o período de medição, logo assim foram feitas apenas quatro medições, uma em cada ponto-chave da rede.

Posteriormente a esta medição surgiu uma alteração na rede, devido à instalação de VRP num ponto da mesma o que motivou a realização de uma segunda campanha de medição da pressão nos mesmos pontos referidos anteriormente.

Ao contrário das anteriores medições, esta campanha decorreu num período de 24 horas, com intervalos de 6 horas entre medições. Foi escolhido o percurso mais curto entre os pontos de medição para que o intervalo de tempo entre um ponto em relação ao outro fosse o mínimo possível. Por se tratar de um trabalho mais exaustivo, pois parte das medições eram noturnas, tive de as realizar sozinha com a ajuda de uma bicicleta e de uma lanterna (no período noturno).



Na passagem de cada ponto de amostragem, era colocado o manómetro com a ajuda de uma chave de fendas, efetuado o registo num caderno de campo e posteriormente retirado o mesmo e guardado para me dirigir ao ponto seguinte.

Durante a campanha de medição foram efetuadas 4 leituras diárias perfazendo um total de 20 leituras durante o período de amostragem. Os resultados das medições apresentam-se no Quadro 6 da secção 6.1.

✓ Cloro Residual:

Para se proceder à simulação da qualidade da água foi necessário considerar as reações de decaimento do cloro residual à medida que este se desloca ao longo da rede, tanto no seio do escoamento ( $k_b$ ), como na parede da tubagem ( $k_w$ ) (Figura 12), para se obter a constante de decaimento do mesmo.

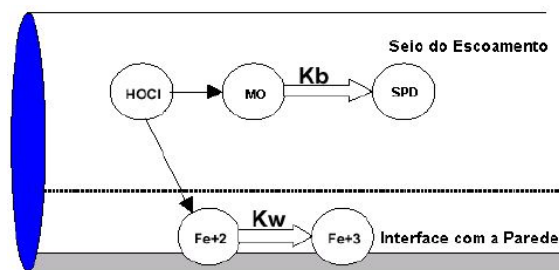


Figura 12 - Zonas de Reação no interior de uma tubagem. (Adaptado Loureiro e Coelho, 2004).

o **Determinação da constante cinética de decaimento no seio do escoamento ( $K_b$ )**

O avanço do conhecimento sobre o decaimento do cloro residual tem sido feito essencialmente na componente do consumo de cloro no seio da água, nomeadamente na sua quantificação do ponto de vista experimental.

Uma vez que o desaparecimento do cloro no seio da água não depende dos materiais das tubagens, mas somente das características da água, podem ser efetuados testes em laboratório para determinação das constantes cinéticas que caracterizam este decaimento.

Esta reação segue uma cinética de primeira ordem, expressa pela equação 1:

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (1)$$

em que C, representa a concentração de cloro residual total (mg/L), k, a constante de decaimento de primeira ordem (min<sup>-1</sup>) e t, o tempo de residência (min).

Da integração desta equação obtêm-se a expressão da equação 2:

$$C_t = C_0 e^{-kt} \quad (2)$$

em que, C<sub>t</sub> corresponde à concentração de cloro residual no tempo t, C<sub>0</sub>, a concentração inicial de cloro, e t, o tempo de residência. A linearização da equação 2, permite o cálculo da constante cinética de primeira ordem da reação, através da expressão da equação 3:

$$\log\left(\frac{C_t}{C_0}\right) = -kt \quad (3)$$

sendo o declive da reta igual à constante k.

Os testes laboratoriais para determinação do Kb (Coeficiente de reação no seio do escoamento), para posterior calibração do modelo, foram realizados na instalação de cloragem a montante do reservatório. De acordo com Coelho *et al.* (2006) adotou-se o seguinte procedimento para o cálculo desta constante:

1º Passo: Fez-se a colheita da água com a garrafa de mergulho (Figura 13) no local mais próximo da injeção do cloro (Figura 14) e mediu-se a temperatura da água;



Figura 13 - Garrafa de mergulho.



Figura 14 - Colheita da amostra de água.

2º Passo: Colocação da amostra de água numa série de garrafas de vidro não reativas do tipo Winkler (Figura 15);



Figura 15 - Garrafas não reativas do tipo Winkler, numeradas com os respectivos tempos de medição.

3º Passo: Análise do conteúdo em cloro residual de cada garrafa em diferentes intervalos de tempo pré-determinados, através do método analítico de análise química de DPD (Dietil-p-fenilenediamina) (Figura 16) com leitura através de um fotómetro Eutech instruments, clorímetro C201 (Figura 17);



Figura 16 - Reagente DPD adicionado numa amostra de água.



Figura 17 - Termómetro de Mercúrio e Fotómetro Eutech instruments, clorímetro C201.

○ **Determinação da constante cinética de decaimento devido ao efeito da parede da tubagem (Kw)**

A determinação, o mais precisa possível, dos parâmetros do decaimento devido às reações que ocorrem nas paredes dos componentes do sistema passa pela análise exaustiva em laboratório do comportamento da água em contacto com as tubagens da rede, no que diz respeito à variedade do material da tubagem, idade, diâmetro, temperatura, rugosidade e velocidade.

Esta determinação pode ser estimada recorrendo a medições diferenciais de cloro residual na rede, após o conhecimento das características do decaimento no seio da água.

No presente trabalho optou-se por realizar uma pesquisa bibliográfica de valores adotados para a constante Kw em tubagens de PVC com idade de 20 anos, tendo-se considerado os resultados obtidos por Hallam *et al.* (2002), que indicam para tubagens de PVC, um valor médio de Kw de  $0.09 \text{ h}^{-1}$  ( $0,0015 \text{ min}^{-1}$ ).

O avanço do conhecimento sobre o decaimento do cloro residual tem sido feito essencialmente na componente do consumo de cloro no seio da água, nomeadamente na sua quantificação do ponto de vista experimental.

Para uma melhor compreensão da evolução do teor de cloro residual no seio do escoamento em função da dosagem de cloro, temos a interpretação da Figura 18.

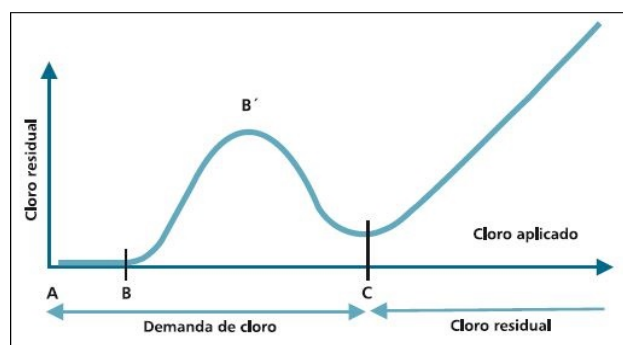


Figura 18 - Evolução do teor de cloro residual em função da dosagem de cloro (Opas, 1999).

- ✓ AB: o cloro introduzido na água é inteiramente consumido na oxidação da matéria orgânica. Enquanto esses compostos não forem destruídos, não ocorrerá desinfecção e o cloro residual será nulo.

- ✓ BB': o cloro combina-se com compostos nitrogenados, produzindo cloro residual combinado.
- ✓ B'C: o cloro oxida as cloroaminas formadas na fase anterior, reduzindo os teores de cloro residual combinado.
- ✓ C em diante: completada a oxidação do cloro residual combinado, elevam-se os teores de cloro residual livre, mais eficaz como desinfetante (cloração ao *break point*).

## 6. DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo apresenta-se a interpretação dos dados medidos e das simulações efetuadas no programa EPANET 2.0.

No decorrer da tese verificaram-se alterações no funcionamento da rede, nomeadamente a colocação de uma Válvula Redutora de Pressão (VRP) e a mudança de estado de algumas válvulas de seccionamento (VCT). Nesta circunstância optou-se por apresentar resultados de simulação para dois cenários distintos, tendo-se elaborado um ficheiro epanet.net para cada cenário:

Cenário I - sem VRP;

Cenário II - com VRP, estado das VCT atual.

Para cada cenário desenvolveram-se simulações hidráulicas para as variáveis Caudal, Velocidade de escoamento e Pressão, e simulações de qualidade no que diz respeito ao Cloro residual.

### 6.1. Interpretação dos Dados Medidos

#### 6.1.1. Consumos

Inicialmente foi preparada uma simulação baseada em três padrões de consumo, nomeadamente, o semanal, o Sábado e o Domingo (Figura 18).

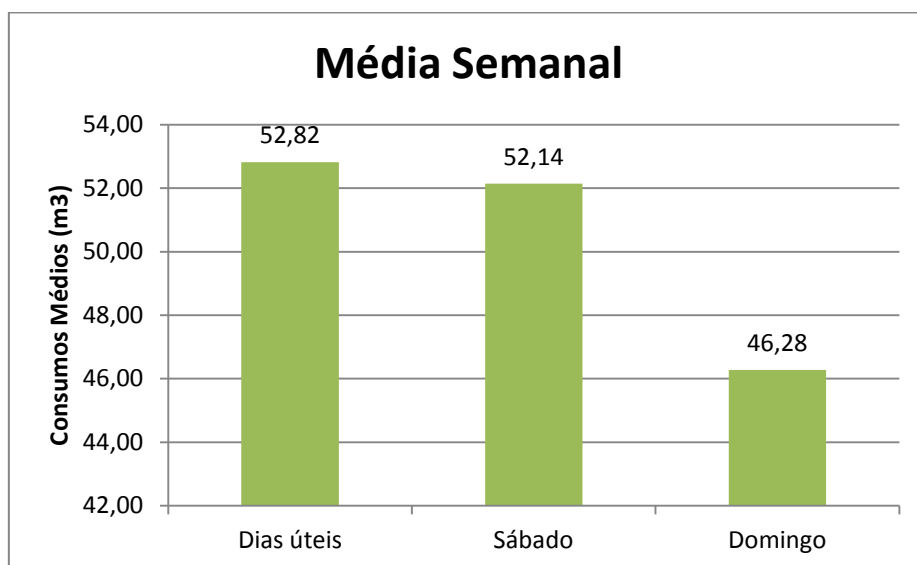


Figura 19 – Padrões de Consumos Médios Semanais.

No entanto, foi posteriormente substituída por apenas um padrão de consumo semanal, uma vez que os dados disponíveis fornecidos pela EG correspondentes apenas um mês (dados registados de 8 de Maio a 11 de Junho de 2012, resultantes do cálculo da média horária dos 24 dias úteis, 5 Sábados e 5 Domingos) terem sido considerados insuficientes para estabelecer as diferenças inicialmente previstas.

Na Figura 19 apresentam-se os valores de caudal registados à saída do reservatório, no período de 8 de Maio a 11 de Junho.

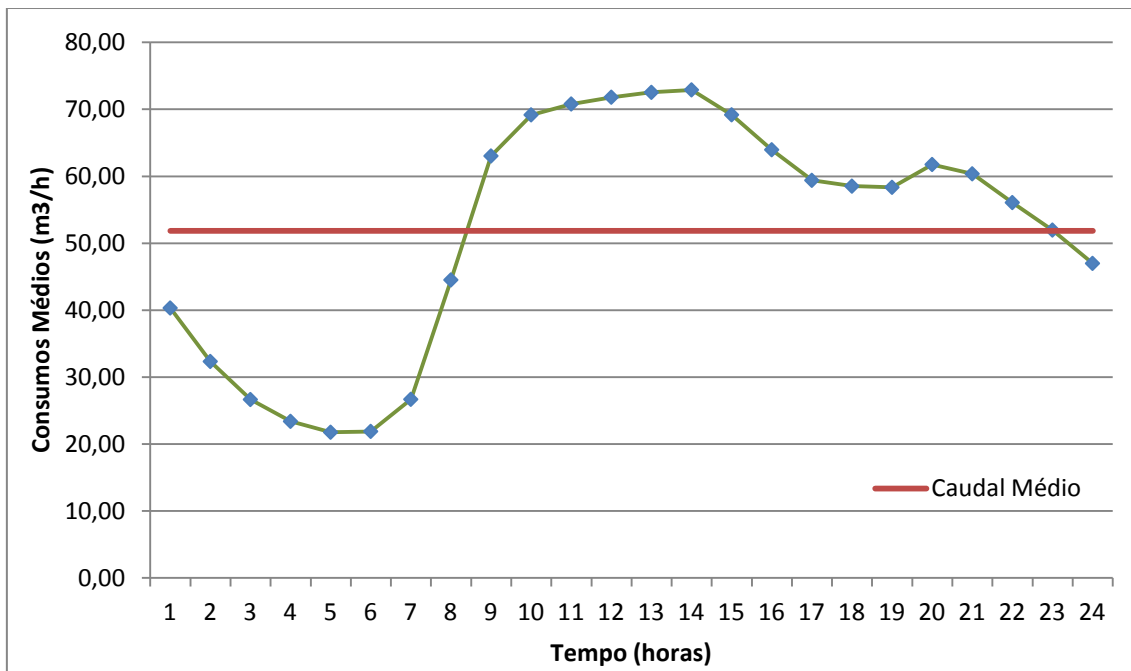


Figura 20 - Consumo de água semanal em m³/h, à saída do reservatório da Cidade.

Pela observação da Figura acima, podemos constatar que existe um padrão de consumo médio diário que é traduzido na ocorrência de dois picos de grande consumo durante o dia e uma diminuição acentuada de consumos durante a madrugada. Sendo assim, temos que, o consumo mais baixo ocorre à noite, às 5 horas com o valor de 22 m³/h. Como neste período horário a população encontra-se a dormir não se deveria verificar um consumo desta dimensão, mas dado a existir uma padaria na rede em estudo, que produz pão entre as 4 e as 6 da madrugada, considera-se que é o responsável pelo consumo registado às 5 horas. Os consumos mais elevados são registados às horas correspondentes ao almoço e jantar respetivamente no período das 12 às 14 horas com valor de 72 m³/h e 73 m³/h, e o segundo “pico” de caudal diário regista-se às 20 horas com o valor de 62 m³/h, são justificados estes registos de grande consumo de água, com a prática culinária da população.

### 6.1.2. Cloro Residual

A saída de campo para as medições de cloro residual efetuou-se no dia 12 de Outubro de 2012 na ETA da Nasce Água, no ponto de injeção do cloro gasoso. A água verificava uma temperatura de 12°C e o pH encontrava-se entre os valores 6,8 e 7,0. As determinações do cloro residual foram medidas em intervalos de tempo pré-definidos, que estão representados no Quadro 6.

Quadro 6 - Concentrações de cloro residual em mg/L medidos na ETA da Nasce Água e respetiva constante cinética.

Tempo (minutos)	Tempo Real	Concentração (mg/L)	Log (Ct/C0)
0	9h20m	1,13	0
3	9h23m	1,08	-0,019654688
5	9h38m	1,07	-0,023694666
10	9h38m	0,93	-0,084595495
15	9h53m	0,93	-0,084595495
20	10h18m	1,01	-0,04875707

Posteriormente, e de acordo com a equação 3, foi calculada a constante cinética para a obtenção do  $k = 0,0043$  como se pode verificar na Figura 20.

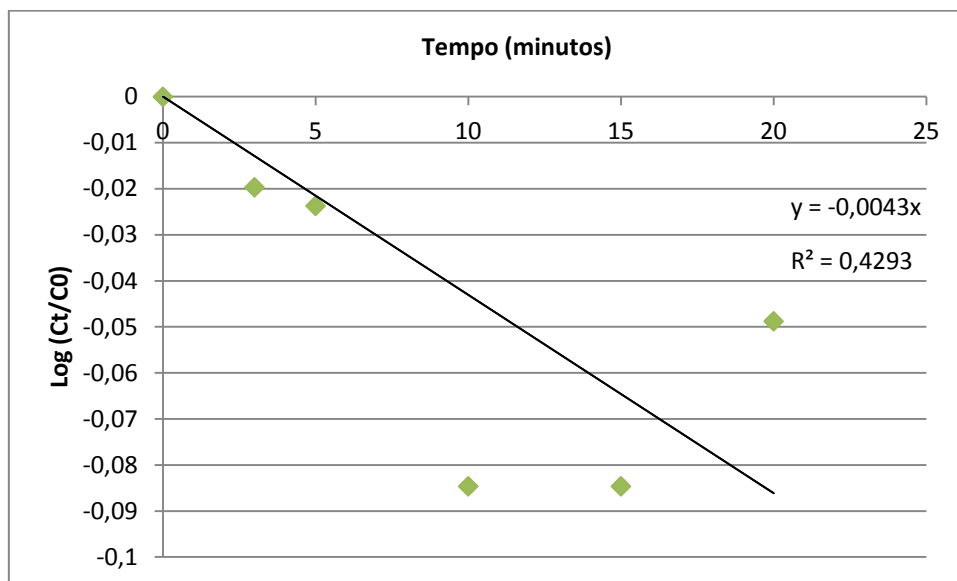


Figura 21 - Representação gráfica dos dados experimentais para obtenção da constante cinética  $K_b$ .



### 6.1.3. Pressão

A saída de campo para as medições da pressão efetuou-se nos dias 13 e 14 de Maio de 2013 nos 4 pontos seleccionados, com os registos representados no Quadro 7.

Quadro 7 -Valores dos registos da pressão, medidos nos pontos-chave da rede do caso de estudo para o primeiro e segundo cenário.

Cenário	Medições	NODE24		NODE183		NODE286		NODE39		Dia
		Hora	Pressão (Bar)	Hora	Pressão (Bar)	Hora	Pressão (Bar)	Hora	Pressão (Bar)	
I	1ª	10:30:00	2,9	10:36:00	3,0	10:55:00	7,0	11:00:00	7,5	18-04-2013
II	1ª	11:58:00	2,5	12:11:00	2,5	12:21:00	5,0	12:44:00	6,0	13-05-2013
	2ª	18:00:00	2,9	18:07:00	3,0	18:15:00	6,0	18:20:00	6,0	13-05-2013
	3ª	00:00:00	2,0	00:09:00	3,0	00:16:00	6,0	00:21:00	6,0	14-05-2013
	4ª	06:00:00	3,0	06:10:00	3,2	06:17:00	6,5	06:22:00	6,7	14-05-2013
	5ª	11:57:00	2,9	12:06:00	2,5	12:15:00	6,0	12:20:00	6,2	14-05-2013

### 6.2. Interpretação de Dados de Simulação

Como já foi referido, estabeleceu-se um padrão de consumo doméstico semanal, a partir do qual se realizou as simulações no modelo adotado.

A Figura 21 apresenta a variação horária (passo de tempo) dos consumos relativos ao período em estudo e os respetivos fatores multiplicativos. O consumo base por nó foi obtido de acordo com a metodologia descrita no capítulo 5 (ver consumos base, no CD em anexo).

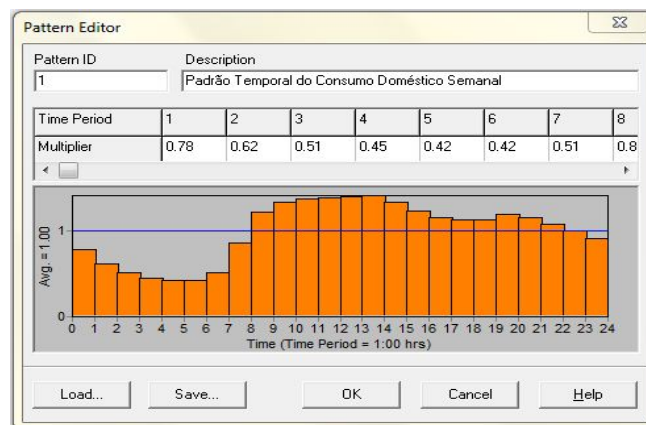


Figura 22 - Padrão temporal do consumo doméstico semanal, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

Para os grandes consumidores também deveriam ter sido feitos padrões temporais, pois a distribuição do consumo destes não é uniforme durante as 24 horas, assim os resultados iriam ser afetados e mais próximos da realidade.

Os resultados de simulação são apresentados nas secções seguintes através de diagramas de rede. Para expressar o funcionamento da rede de distribuição nas situações limite apresentam-se as variáveis em estudo para a hora de menor consumo (5h) e de maior consumo (14h), nos dois cenários

### **6.2.1. Simulação Hidráulica**

#### o Caudal

Pela observação da Figura 22, pode saber-se qual o sentido do escoamento nas malhas em cada um dos cenários através do gradiente de cor que indica o caudal transportado. Relativamente ao grande consumidor, Panificação, apresentado na Figura 22 a) com uma seta, verifica-se pela comparação desta Figura com a 22 b), uma mudança no sentido de escoamento nas malhas da rede relativamente à alimentação deste ponto: no Cenário I a alimentação do grande consumidor é feita através do circuito Norte, desde o reservatório, e passando por São Bento, Carreirinha e Avenida Jácome de Bruges todo assinalado a cor vermelha, correspondente ao caudal máximo, enquanto que com a situação atual das válvulas de seccionamento atual (Cenário II) a alimentação deste consumidor se processa pela zona sul da rede com saída do reservatório e passado pela rua do Desterro, Conceição, rua Jacinto Cândido e subida pela Avenida Infante D. Henrique. Esta situação verifica-se pelo facto de que nos dois cenários algumas VCT apresentarem estados diferentes (aberto ou fechado), mudando assim o sentido do escoamento.

Observando o Cenário I e II, verifica-se que no período de menor consumo, correspondente às 5:00 horas, o caudal à saída do reservatório é de 4,81 L/s e no período de maior consumo, correspondente às 14:00 horas, é de 15,23 L/s, o que corresponde ao caudal máximo.

## DISCUSSÃO DE RESULTADOS

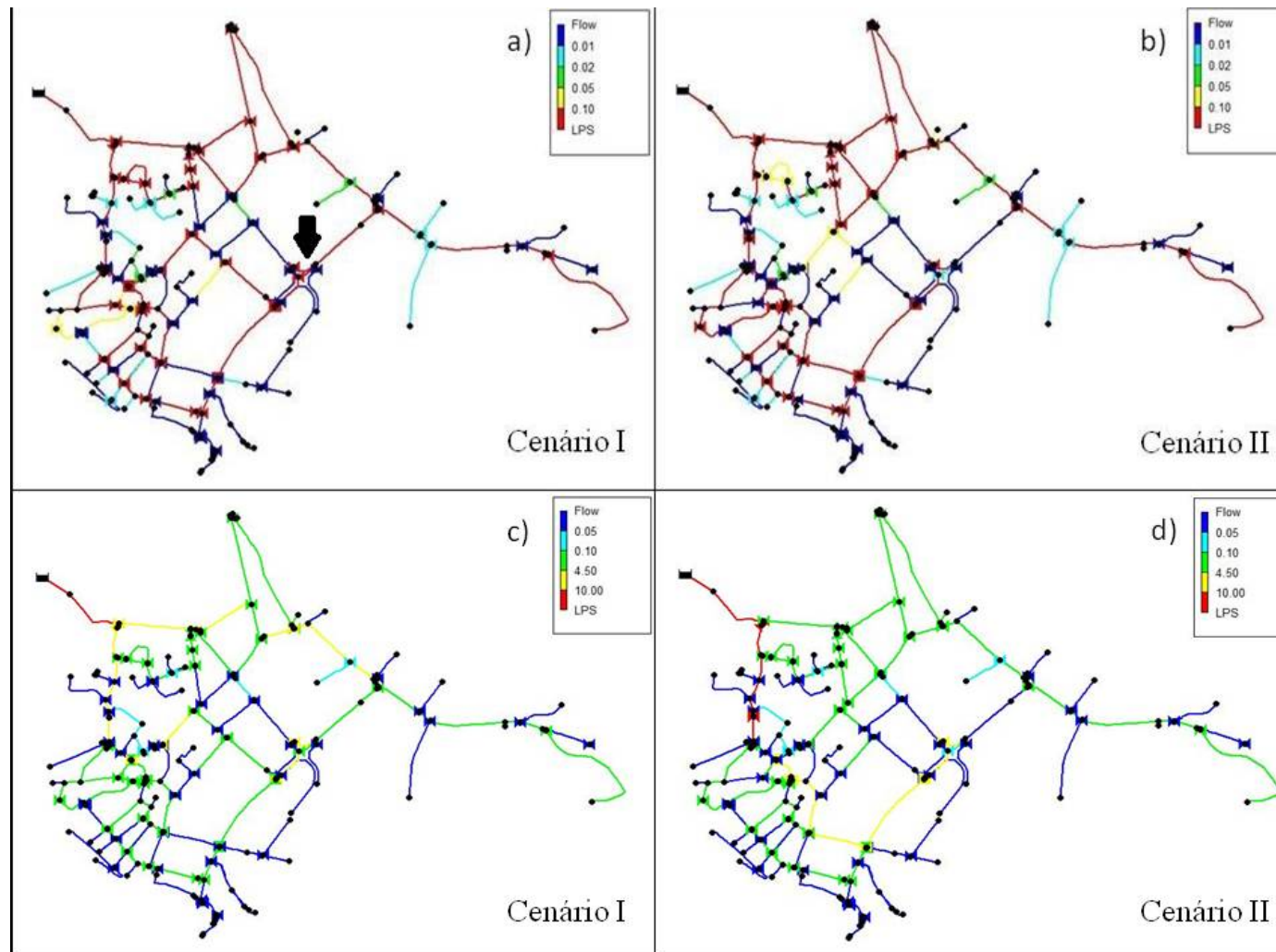


Figura 23 – Diagrama da rede para os caudais nos troços, para as 5h no cenário I e II (a e b)) e para as 14h no cenário I e II (c e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

Na hora de maior consumo (14:00 horas), alguns troços da rede apresentam caudais muito reduzidos numa ordem de grandeza dos 0,01 L/s, o que se poderá justificar pela situação das válvulas, que fechadas numa malha, esta funciona como extremos de um ramal, com caudais muito reduzidos, como é o caso da malha constituída pela rua Dr. Henrique Braz, a Avenida Álvaro Martins Homem, parte da Avenida Infante Dom Henrique e parte da rua do Guarita troços assinalados na Figura 22 d).

No que diz respeito ao troço da Panificação, às 5h verifica-se um caudal na ordem dos 2,68 L/s, e às 14h um caudal de 8,48 L/s, o que corresponde a um aumento de quatro vezes. Como foi referido anteriormente, a modelação efetuada não contempla o padrão temporal de consumo da Panificação, cujos picos de consumo de água ocorrem às 21:00 h e 5:00h. Assim sendo é de esperar que na realidade não exista uma variação tão acentuada de caudal entre as 5h e as 14h. Em relação à ETAR na hora de menor e maior consumo na rede o caudal consumido corresponde a 0,71 L/s e 2,25 L/s, respetivamente.

Os restantes grandes consumidores da rede estão também localizados na zona onde se observam os maiores consumos e também afetam a distribuição de caudal na rede, mas não de uma forma tão significativa.

- o Velocidade de Escoamento

Na análise das velocidades importa conhecer os diâmetros das tubagens da rede, uma vez que estes condicionam a velocidade e a perda de carga no escoamento. Observando a Figura 23, constata-se que existe uma conduta principal com diâmetros variam entre os 120 e 90 mm, que atravessa a zona com maior densidade populacional. Os restantes troços da rede são constituídos por tubagens de diâmetro compreendido entre os valores 60 e 90 mm, com exceção à Avenida Conde Sieuve de Meneses que apresenta um diâmetro de 180 mm.

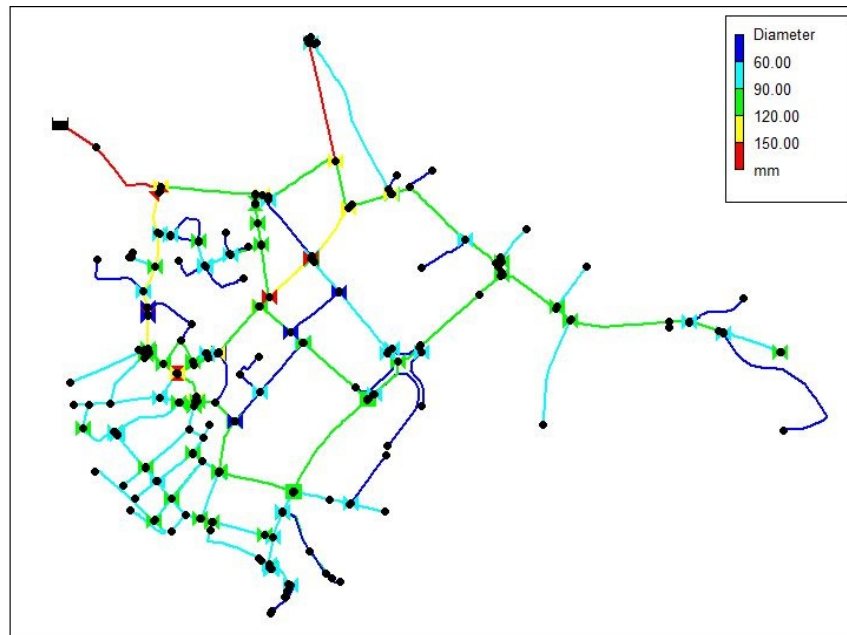


Figura 24 - Diagrama da rede ilustrando o diâmetro das tubagens, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

Segundo o Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de Agosto a velocidade de escoamento não deve exceder o valor calculado pela expressão:

$$V = 0,127 D^{0,4}$$

Onde V é a velocidade limite (m/s) e D o diâmetro da tubagem (mm).

Sendo assim, o limite de velocidade máxima para cada diâmetro que constitui a rede é o que se apresenta no Quadro 8.

Quadro 8 - Velocidade máxima em função do diâmetro da tubagem.

Diâmetro (mm)	Velocidade máxima (m/s)
60	0,65
90	0,77
120	0,86
150	0,94
180	1,01

Na Figura 24 apresentam-se os mapas da rede relativos à velocidade de escoamento para a hora de menor consumo nos cenários I e II e para a hora de maior consumo, também nos cenários I e II. Como é possível observar pela escala de variação de

velocidades, no canto superior direito das figuras, para os dois momentos de simulação foram escolhidas escalas diferentes, sendo que para a hora de maior consumo a escala foi associada aos valores máximos de velocidade (Quadro 8), para se poder observar em que troços, a velocidade excedia os valores máximos estabelecidos legalmente. Na hora de menor consumo constatou-se a existência de alguns troços com velocidades muito variando entre 0,01 m/s e 0,65 m/s.

Nas Figura 25 a) e b), correspondentes ao estado da rede às 5:00 horas nos cenários I e II, verifica-se o que já foi referido anteriormente para o caudal, ou seja, o percurso principal do escoamento no cenário atual (cenário II) para abastecer a Panificação foi desviado para sul, relativamente ao cenário I. Para esta hora do dia o modelo indica velocidades inferiores a 0,01 m/s nos troços de extremidade, (tanto em rede ramificada como em malhas com válvulas fechadas) o que poderá deteriorar a qualidade da água na medida em que o teor em cloro residual diminui na água estagnada. A zona da rede que abastece a Panificação, apresenta velocidades maiores que a restante rede, uma vez que o caudal transportado é superior nestes troços.

Às 14:00 horas (Figura 25 c) e d)), são registadas as velocidades com os valores mais elevados do dia, uma vez que o caudal observado naquele horário é o mais elevado. A esta hora o cenário mais desfavorável é o Cenário II, porque regista-se excesso de velocidade não só junto aos nós da Panificação e da ETAR, com as cores vermelho e amarelo respetivamente, como também nos troços de abastecimento aos mesmos. Esta situação é o resultado de distribuição de caudal excessivo pela zona sul da rede motivada pelo jogo de abertura e fecho das VCT do Cenário II.

Um facto crítico é que nos dois cenários e nas horas de maior e menor consumo, vários pontos encontram-se com velocidade muito reduzidas ou até mesmo nulas o que leva a potenciais problemas, tais como a acumulação de bolsas de ar e elevados tempos de retenção nas condutas, contribuindo para a deterioração da qualidade de água, como referido anteriormente.

## DISCUSSÃO DE RESULTADOS

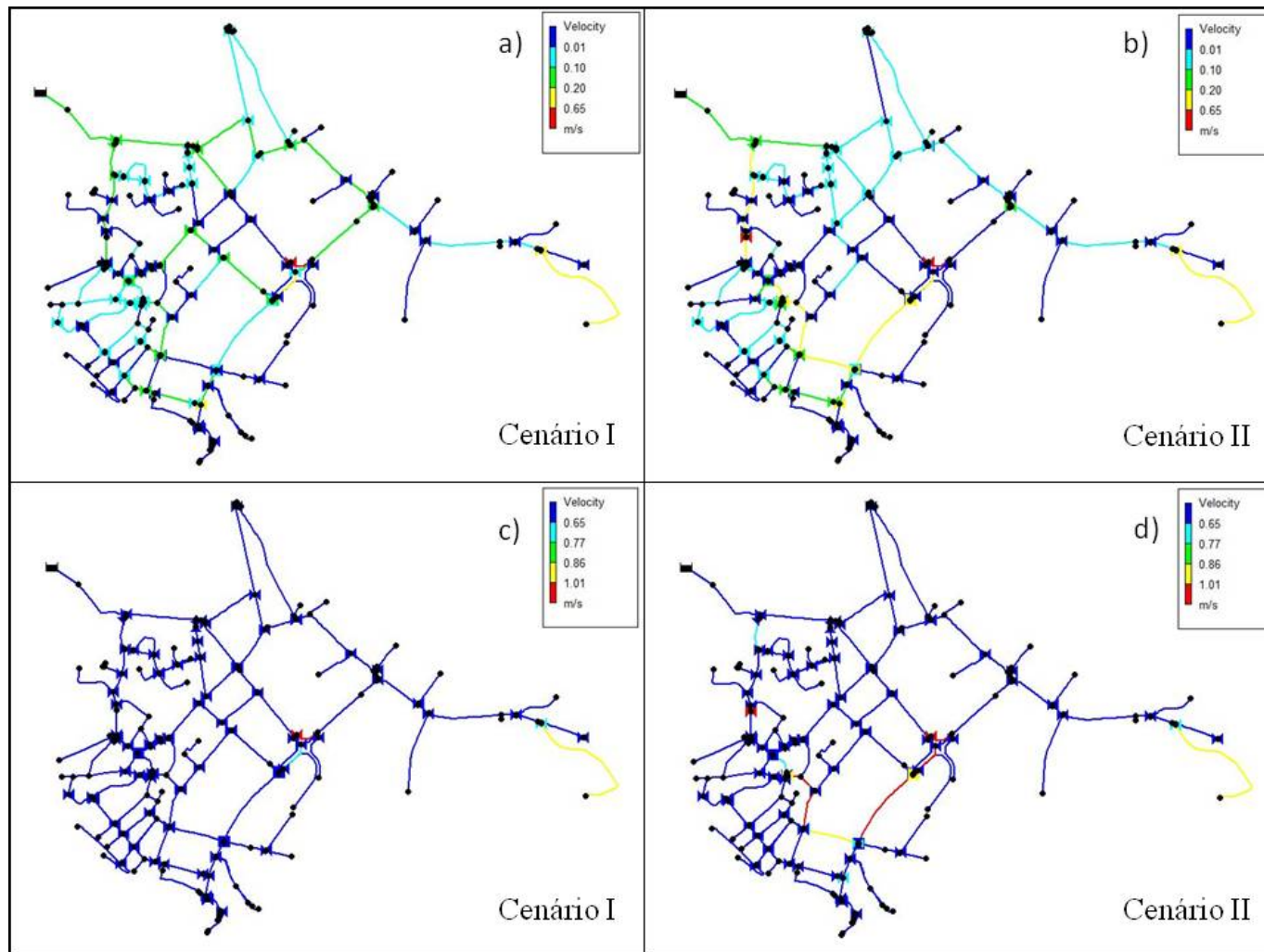


Figura 25 - Diagrama da rede para as velocidades nos troços, para as 5h no cenário I eII (a) e b)) e para as 14h no cenário I eII (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

o Pressão

No que diz respeito ao cálculo da perda de carga contínua verificada no sistema, esta foi efetuada no modelo de simulação através da fórmula de Hazen-Williams (Coelho, S., 2006):

$$hf = \frac{10,7 L}{C^{1,852} D^{4,87}} \times Q^{1,852}$$

Em que,

hf – perda de carga ao longo do comprimento da conduta (m);

C – coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams (mm);

Q – caudal (m<sup>3</sup>/s);

D - diâmetro interno da conduta (mm);

L – comprimento da conduta (m).

Além das perdas de carga contínuas fazem também parte do sistema as perdas de carga localizadas, que ocorrem devido às singularidades da rede, como por exemplo, válvulas e tubagens de diferentes diâmetros, curvas e aparelhos de medida (Rossman, L., 2002).

Apresenta-se de seguida o tratamento estatístico dos dados de pressão e o cálculo do erro entre os valores de pressão observados e simulados para cada um dos cenários considerados. Para o cenário I apenas foi realizada uma medição de pressão em cada um dos quatro pontos, apresentam-se na Figura 26

No tratamento estatístico dos dados de pressão (Figura 25) os resultados do tratamento estatístico com indicação do erro médio (Mean Error) e desvio padrão (RMS Error) para cada ponto. A relação entre os valores simulados e os observados é distinta nos quatro pontos de medição, como se pode observar na Figura 25 a) e b): no nó 24 (cota do terreno de 69 m) a pressão simulada e observada é sensivelmente igual, o que corresponde à situação desejável. Ao contrário, nos nós 183 e 286 o valor simulado é superior ao observado em 10 e 8 m.c.a., respetivamente, enquanto que no nó 39, situado no ponto mais baixo da rede (cota de terreno de 6 m) se verifica o oposto, o valor observado é muito superior ao valor simulado.



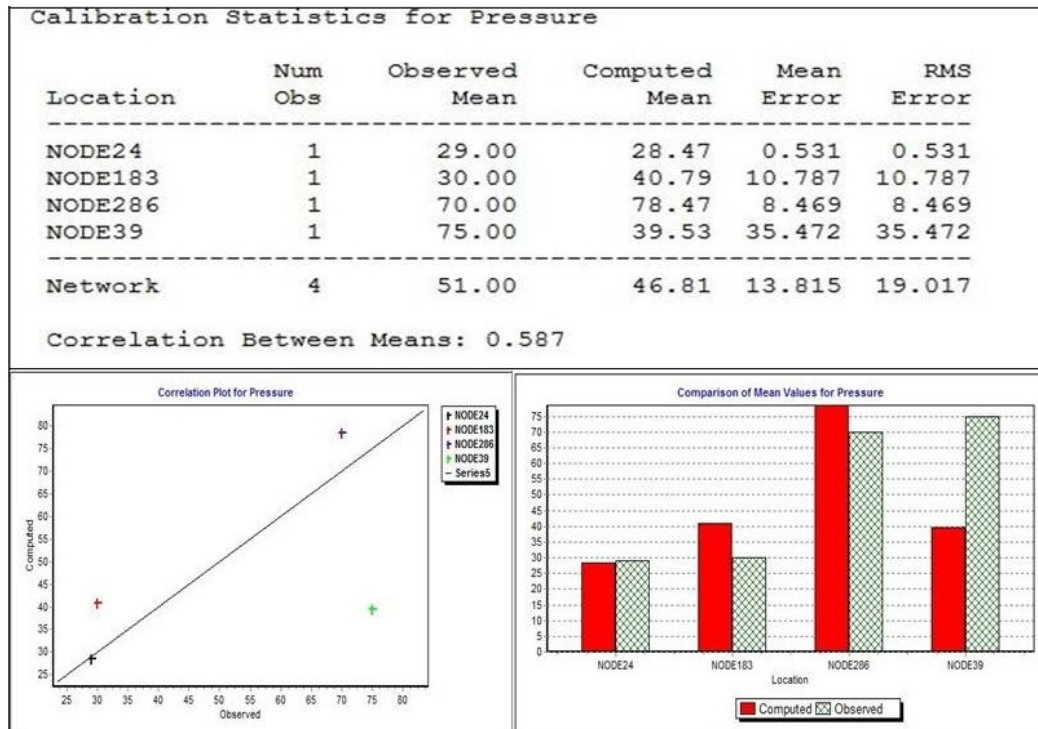


Figura 26 - Tratamento estatístico dos dados de calibração para a pressão semanal, no primeiro cenário, no modelo EPANET 2.0.

Outro facto a constatar é o das pressões observadas nas duas últimas localizações serem superiores a 60 m.c.a., valor estipulado no DR nº 23/95 de 23 de Agosto.

Como seria espectável a rede apresentou menor pressão nos pontos de calibração situados a cotas mais elevadas, a localização 24, correspondente ao manómetro instalado à cota 69,0 m e, a localização 183, correspondente ao manómetro instalado à cota 61,53 m.

O valor de pressão simulado para nó 39 não oferece confiança por ser demasiado reduzido para o ponto mais baixo da rede. Não considerando este ponto, parece não haver correlação entre os erros calculados e a localização topográfica dos pontos de calibração, pois os dois maiores erros localizam-se um num ponto alto e outro num ponto baixo.

O Cenário 2 constitui uma boa oportunidade para a comparação do melhoramento da eficiência da rede. Neste cenário foram feitas cinco observações em cada localização, apresentando-se o tratamento estatístico Figura 28. Não é possível comparar estes resultados com os do Cenário I, que resultam apenas de uma observação.

Os resultados do modelo apresentam maior fiabilidade nas localizações 24 e 286, que apresentam menor erro médio, de 3 m.c.a e 6.6 m.c.a. respetivamente. Ao contrário, as localizações 183 e 39, apresentam erros médios muito elevados. Apesar do erro médio da localização 39 ser três vezes superior à localização 286 constata-se que estes pontos de medição se encontram relativamente próximos (Figura IX em anexo). Esta situação poder-se-á justificar devido a uma perda de carga adicional no modelo motivada pela representação de três VRP no cadastro da rede, a montante da localização 39, o que na realidade é limitado a apenas uma VRP.

Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
NODE24	5	26.60	28.47	2.904	4.167
NODE183	5	28.40	40.79	12.394	12.720
NODE286	5	61.80	55.13	6.670	7.200
NODE39	5	59.00	39.53	19.472	20.079
Network	20	43.95	40.98	10.360	12.591
Correlation Between Means: 0.721					

Figura 27 - Tratamento estatístico dos dados de calibração para a pressão semanal, no segundo cenário, no modelo EPANET 2.0.

Os pontos com menor erro médio, entre médias observadas e médias simuladas, correspondem a nós pertencentes a malhas em que o caudal é mais regular. Verifica-se assim que o modelo não é tão fiável para as extremidades da rede como para as malhas.

Na Figura 29 apresenta-se a relação dos valores observados e simulados bem como a dispersão das medidas de pressão em cada localização. A flutuação de pressão na localização 39 é superior a todos os outros pontos, variando a pressão num dia de 49 m.c.a. a 65 m.c.a.. Esta situação não é desejável e indica um funcionamento inapropriado da VRP, que deveria diminuir estas oscilações.

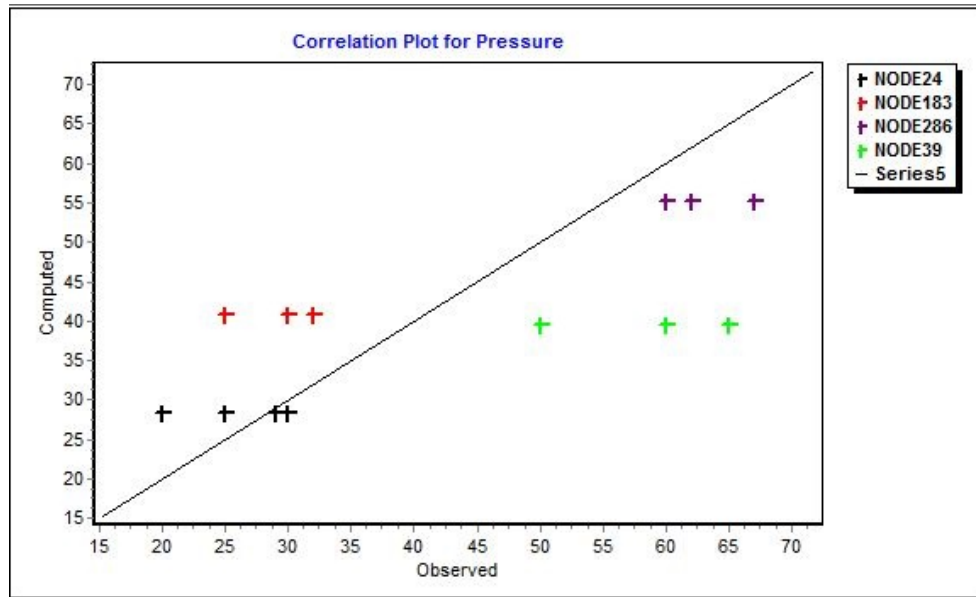


Figura 28 - Gráfico de correlação para a pressão (m), no segundo cenário, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

Uma observação mais perceptível da diferença dos valores observados e simulados pode ser vista na Figura 30.

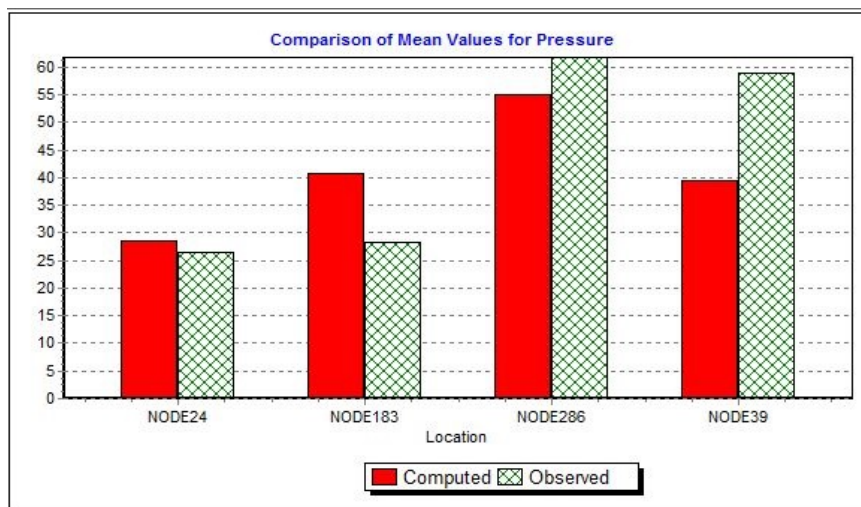


Figura 29 - Comparação dos valores médios de pressão observados e simulados, no segundo cenário, no modelo de simulação EPANET 2.0.

Nas figuras que se seguem (Figuras 31 e 32), apresentam-se os gráficos de isolinhas resultantes da simulação nos dois cenários, e que demonstram a variação das pressões na rede, na hora de menor consumo (5 horas) e de maior consumo (14 horas), ocorrente na semana.

Ao longo das 24 horas de simulação deveria se verificar uma variação significativa da pressão na rede de distribuição de acordo com a variação do consumo doméstico, pois quando o consumo aumenta a pressão na rede decresce e vice-versa.

Contudo é de salientar que essa situação não se verifica, em ambos os cenários, pois a pressão, não oscila significativamente, e quando se verifica essa situação, a variação é de forma tão pequena que se tornou necessário encontrar uma escala mais pequena para mostrar a variação de pressão ao longo do dia representada com os seguintes valores:

Quadro 9 – Legenda dos valores de pressão e respetivas cores.

Cor	Pressão (m.c.a.)
Azul-escuro	< 14
Azul-claro	]14 – 24[
Verde	]24 – 40[
Amarelo	]40 – 60[
Vermelho	> 60

No Quadro 9 os valores de representados a Vermelho e Azul-escuro correspondem aos valores regulamentados no DR 23/95 de 23 de Agosto para pressões máximas e mínimas respetivamente, em que a pressão máxima estática ou de serviço, em qualquer ponto de utilização não deve ultrapassar os 60m.c.a. e a mínima, em regra, não deve ser inferior a 10 m.c.a., no presente caso de estudo a pressão mínima é de 14 m.c.a., pois os edifícios a abastecer têm em média 1 piso (não incluindo o piso térreo).

Observando a Figura 31, constata-se facilmente que existe uma grande variação da pressão nos pontos mais baixos da rede de distribuição entre os dois cenários. Pode verificar-se também que os nós que se encontram com a cor vermelha, possuem excesso de pressão e as causas para tal registo de pressão, consistem essencialmente devido ao elevado desnível topográfico existente. Neste sentido, verifica-se assim a vantagem da colocação da VRP no cenário II, pois esta tem como função principal reduzir a pressão a jusante de um determinado nó, até um valor pré-definido (neste caso de 35 m.c.a.).

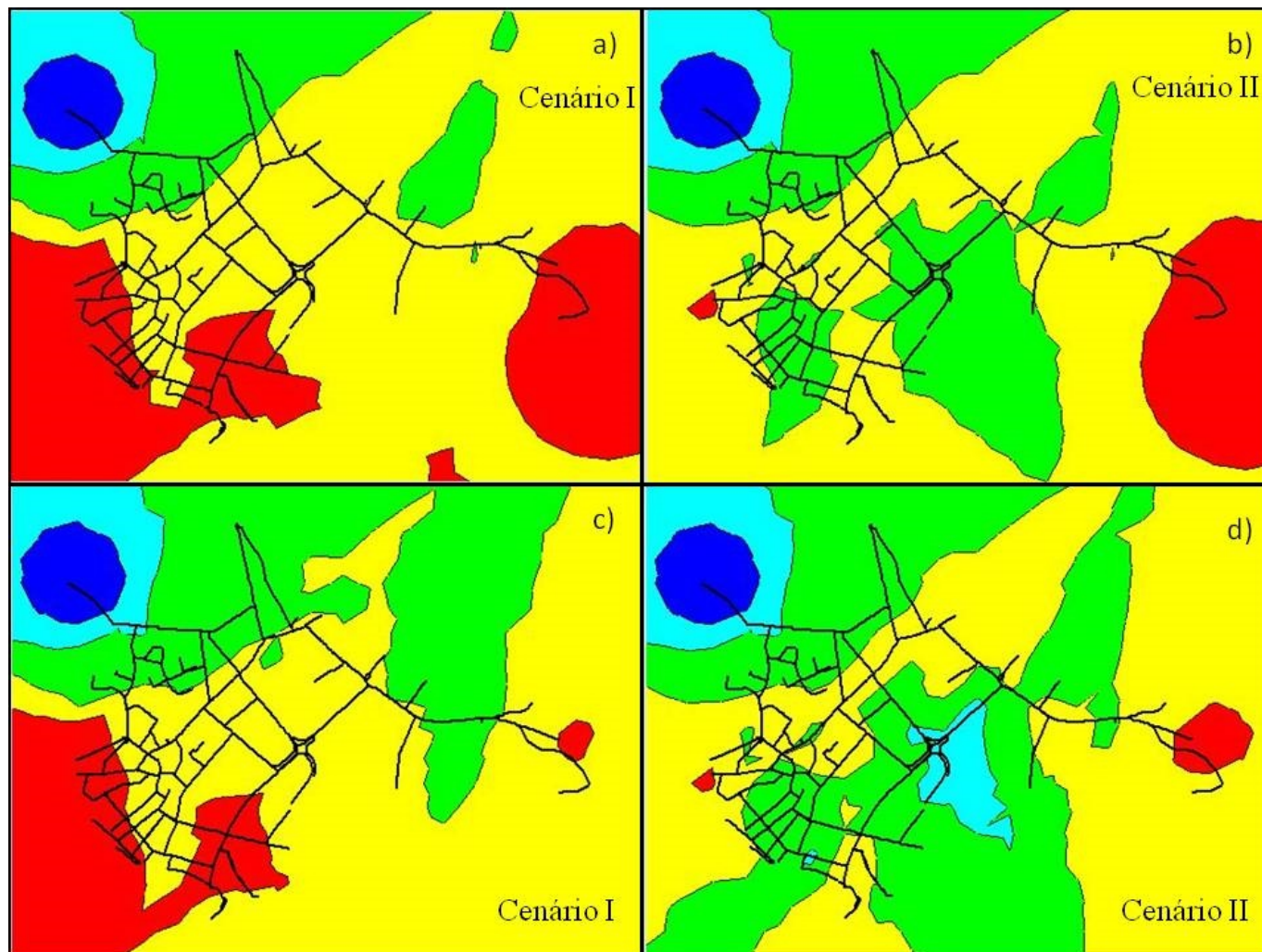


Figura 30 - Diagrama da rede para as pressões nos troços, para as 5h no cenário I e II (a) e b)) e para as 14h no cenário I e II (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

Segundo o DR 23/95 de 23 de Agosto, não são aceitáveis grandes flutuações de pressão em cada nó do sistema, impondo-se uma variação máxima ao longo do dia de 30 m.c.a. Podemos constatar que no cenário I, ao longo do dia as flutuações são mais acentuadas, este fato verifica-se através da mancha verde em que existe uma expansão relativamente acentuada da hora de menor consumo (5h) para a hora de maior consumo (14h), ao contrário do cenário II em que a variação de flutuações é reduzida ao longo do dia.

A instalação da VRP trás também outros benefícios tais como a redução do volume de água perdido através de fugas, redução do consumo relacionado diretamente com a pressão, redução da ocorrência de roturas, controlo da pressão que diminui a possibilidade de fadiga das condutas, inclusive nas redes domésticas de abastecimento e contribui também para um abastecimento constante à população.

### 6.2.2. Simulação da Qualidade da Água

Nesta rede foram determinados os parâmetros de qualidade de água calculando os parâmetros de decaimento no seio do escoamento e com as reações nas paredes das tubagens. Qualquer destes efeitos é diretamente dependente do tempo de percurso da água no interior do sistema e do tempo de residência no reservatório. A concentração de cloro à saída do reservatório é de 1,50 mg/L.

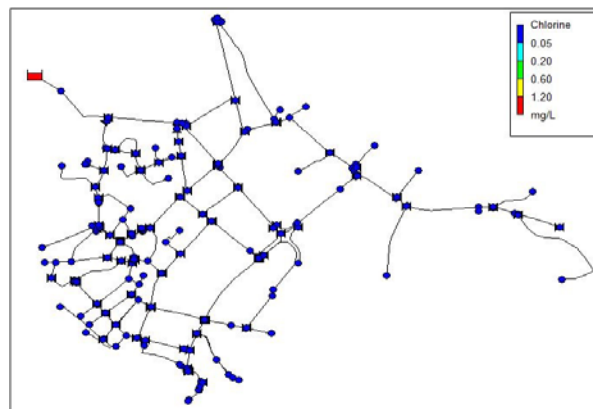


Figura 31 - Diagrama da rede ilustrando os intervalos de cloro residual nos diversos nós às 0:00 h, segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.

A Figura 33, corresponde ao início da simulação no tempo zero, em que não existe consumo, o que significa que a água não circula neste momento de simulação, verificando-se assim que o cloro residual é zero. Este é um caso preocupante pois neste momento não há poder desinfetante.



Foi considerado um tempo de simulação total de 24 horas, para que, de uma maneira adequada, fossem representadas as observações necessárias para a distribuição do cloro na rede, onde serão apresentadas as horas de menor e maior consumo, 5 e 14h, respetivamente.

A Figura 34 apresenta gráficos de isolinhas resultantes da simulação e que demonstram a variação do cloro na rede para diferentes situações de consumo, com a seguinte escala:

Quadro 10 - Legenda dos valores de concentração de cloro e respetivas cores.

Cor	Concentração de cloro (mg/L)
Azul-escuro	< 0,05
Azul-claro	[0,05 – 0,20]
Verde	[0,20 – 0,60]
Amarelo	[0,60 – 1,20]
Vermelho	> 1,20

Em que as zonas a verde correspondem aos patamares intermédios de cloro, correspondentes ao intervalo de concentração de cloro permitidas por lei numa rede pública.

Ao longo destas 24 horas de simulação verifica-se que o teor de cloro na rede de distribuição varia de acordo com a variação de consumo. À medida que o consumo aumenta, verifica-se um aumento gradual do teor de cloro, desde o reservatório até aos nós finais da rede de distribuição.

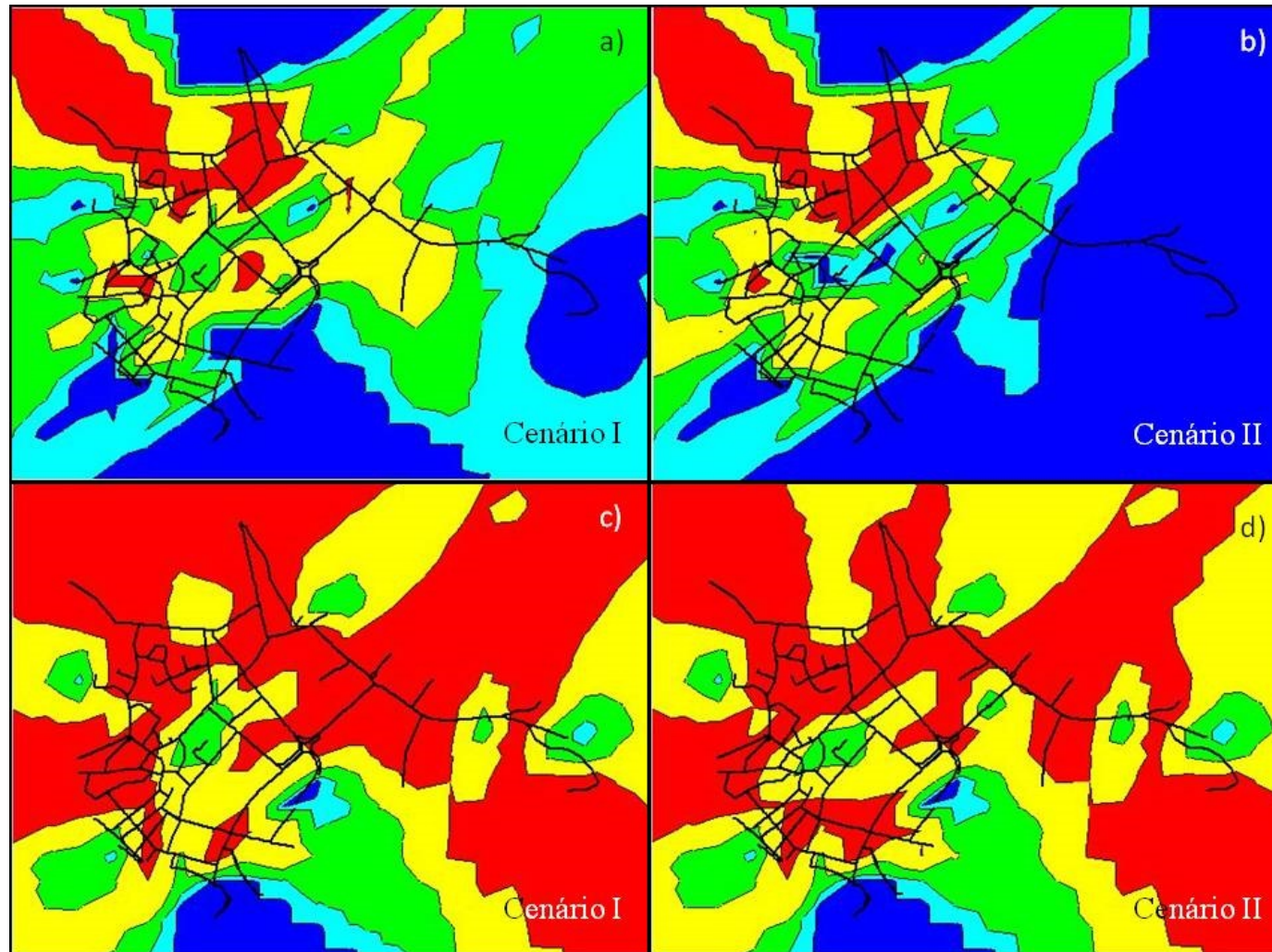


Figura 32 - Diagrama da rede para o cloro nos troços, para as 5h no cenário I eII (a) e b)) e para as 14h no cenário I eII (c) e d)), segundo o modelo de simulação EPANET 2.0.



O consumo às 5 horas é pequeno, e deveria ser verificada uma concentração de cloro residual mais reduzida, pois grande parte da rede não tem consumo a esta hora, mas a rede apresenta-se com uma distribuição de cloro já significativa, pelo fato da existência do grande consumo da Panificação a esta mesma hora. Em contrapartida às 14 horas, onde os consumos são maiores, praticamente todos os nós da rede possuem cloro residual, excetuando os pontos mais afastados do reservatório que estão com valores de concentração zero, o que indica que nestes não há poder desinfetante.

Através da simulação contínua no período de tempo escolhido, pode-se verificar que toda a rede encontra-se com poder desinfetante, excetuando dois troços finais em que a concentração de cloro é 0,0 mg/L, esta situação pode ser verificada pelo facto da rede ser longa e o cloro ser consumido antes de chegar aos pontos de consumo mais desfavoráveis, pois ocorrem sucessivamente diferentes reações químicas em que inicialmente o cloro reage com os compostos presentes na água e só depois é que permanece disponível para desempenhar o seu papel de desinfetante, essa quantidade de cloro necessária é designada por carência química de cloro e é este o parâmetro necessário para determinar a quantidade de cloro necessária.

Numa visão global ao longo da simulação nos dois cenários, observa-se que em grande parte dos nós, os valores de cloro residual encontram-se tanto acima como abaixo dos valores recomendados no DL 306/2007, de 27 de Agosto. Outro fato é que a distribuição do mesmo ao longo de toda a rede é mais rápida no cenário I, este fato pode ser verificar mais uma vez pelo estado das VCT, pois como à mudança de sentido de escoamento para o cenário II, estes troços podem ter, comprimentos e diâmetros diferentes que irão fazer com que a água circule de uma maneira mais rápida ou mais lenta.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Com base no trabalho desenvolvido verifica-se que o desempenho hidráulico da rede de distribuição de água no subsistema do reservatório da Cidade, da rede de distribuição de Angra do Heroísmo, apresenta algumas falhas, nomeadamente, no que se refere aos parâmetros caudal, pressão, velocidade de escoamento e cloro residual.

Quando é elaborado um projeto de distribuição de água para consumo público, existem questões fundamentais a ter em conta para que se possam manter em simultâneo os parâmetros hidráulicos e de qualidade da água da rede de distribuição, dentro de intervalos aceitáveis, quer em termos de abastecimento, quer em termos de salvaguarda dos equipamentos que constituem a rede.

O desempenho hidráulico e de qualidade aqui exposta, abrange um período de tempo muito restrito, correspondente a 4 meses (30 de Junho a 31 de Outubro), durante o qual o subsistema do reservatório da Cidade não apresentou grande variação entre os consumos semanais e os de fim-de-semana. Por terem sido considerados dados insuficientes para estabelecer dois padrões, considerou-se só um padrão semanal, para o qual se formulou o cenário I, apenas com uma VRP, e o cenário II com diferentes posições de válvulas de seccionamento e uma VRP adicional, que corresponde à situação atual de funcionamento da rede.

Mediante os resultados observados e medidos para a calibração do modelo EPANET 2.0, verificou-se que ocorrem consumos instantâneos relativamente altos à saída do reservatório da Cidade. Relativamente às pressões e para o cenário I os dois nós com cota mais baixa (NODE286 e NODE39), apresentaram pressões extremamente elevadas, superiores às permitidas pela legislação vigente (60 m.c.a.), no que diz respeito às cotas mais altas não foram registadas pressões inferiores às estipuladas pelo DL n.º23/95 de 23 de Agosto. No cenário II verificou-se uma melhoria relativamente à situação anterior mas nos locais de cota mais baixa verificaram-se ainda valores de pressão ligeiramente acima dos permitidos por lei.

Com base na utilização do modelo EPANET 2.0, os consumos são distribuídos de modos distintos nos dois cenários e, tanto nas horas de menor como de maior consumo encontram-se caudais muito reduzidos numa grandeza de 0,01 L/s, excetuando os troços

dos grandes consumidores em que os consumos são sempre relativamente mais elevados que a restante rede.

Deveria ser verificada uma diferença mais acentuada nas duas horas de simulação pois o consumo dos grandes consumidores não é constante ao longo do dia, onde deveria ter sido feito um padrão temporal para cada grande consumidor presente na rede de distribuição, o que iria afetar os resultados e estes se encontrarem mais próximos da realidade

Em termos de velocidade de escoamento verifica-se que a rede apresenta sempre tubagens com excesso de velocidade nas duas horas de simulação, considerando como velocidade os limites estipulados pelo Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de Agosto. O número de tubagens com excesso de velocidade varia de acordo com o consumo verificado na rede, ou seja, quando o consumo aumenta o número de tubagens com excesso de velocidade também aumenta. Essas tubagens tendem a ser as mais próximas do reservatório, apesar das velocidades também dependerem do seu diâmetro, essa situação pode-se verificar na zona dos grandes consumidores (Panificação e ETAR).

É de realçar que na situação de maior consumo, os dois cenários, a apresentam velocidades acima dos estipulados por lei, mas só no cenário II, o modelo indica que as adutoras que ligam o reservatório à Panificação, são as únicas tubagens com excesso de velocidade. Sendo assim, com a ajuda do modelo foi possível localizar esta zona crítica da rede de distribuição, que se sugere seja alvo de uma avaliação mais concreta, nomeadamente com atuação no terreno. Conclui-se que a posição das válvulas de seccionamento do cenário II não é favorável no que diz respeito às velocidades.

A pressão mínima é uma condição essencial para que um sistema hidráulico sob pressão possa satisfazer os consumos. Uma outra razão para ser desejável manter as pressões no sistema acima de determinados limites mínimos pretende-se com a necessidade de evitar pressões muito baixas ou até mesmo negativas que possam causar instabilidade hidráulica ou provocar a entrada na rede de água de material exterior, por sucção através de fendas das tubagens, com os perigos que representam para a qualidade de água que circula no ceio do escoamento.

Na rede em estudo, a zona em que foi verificada pressão baixa nos dois cenários foi a zona do reservatório, com a exceção de uma zona da rede com cota relativamente mais

elevada em que a pressão é relativamente baixa, mas não no limite inferior estipulado por lei.

A pressão máxima admissível é estabelecida em função da capacidade estrutural das tubagens e outros elementos que constituem a rede. A principal preocupação pretende-se com as fugas, um dos principais problemas enfrentados pelos sistemas de distribuição de água.

A rede de distribuição estudada tem uma tubagem com cerca de 95% remodelada em 1992, tendo assim uma idade média de 20 anos, pelo que é exetável que as condutas instaladas já apresentem algum estado de deterioração, tornando-se por isso mais suscitáveis à ocorrência de fugas. Além disso, a rede é bastante complexa, ou seja, apresentando na sua constituição um vasto conjunto de tubagens e acessórios que são potenciais zonas de perdas de carga, sobretudo quando operam com pressões elevadas.

No subsistema em estudo, no Cenário I verificou-se vários pontos críticos no que concerne às pressões elevadas, acima do valor legalmente estipulado. Como medidas de mitigação, para evitar pressões superiores à máxima nas horas de menor consumo, nomeadamente, no período noturno, foi colocada uma VRP na rede de distribuição correspondente ao Cenário II, em que podemos verificar a melhoria da pressão na mesma, logo houve uma otimização com a colocação da mesma.

Verifica-se também que no cenário II existem menos flutuações ao longo das 24 horas de simulação, o que é favorável pois flutuações elevadas de consumo manifestam efeitos de pressão significativos na rede. Outro benefício é a integridade física do material das tubagens.

A modelação de qualidade da água dos sistemas, nomeadamente no que se refere ao cloro residual, é um instrumento de grande utilidade técnica, desde que desenvolvido de acordo com uma metodologia correta por determinações laboratoriais e de campo seguindo procedimentos próprios como se verificou no seguinte trabalho.

Ao longo destas 24 horas de simulação verifica-se que o teor de cloro na rede de distribuição varia de acordo com a variação de consumo. À medida que o consumo aumenta, verifica-se um aumento gradual do teor de cloro, desde o reservatório até aos nós finais da rede de distribuição. No que diz respeito à hora de menor consumo (5h) verifica-se um poder desinfetante mais reduzido, pois nesta hora o consumo é reduzido.

Nos troços que transportam a água para a Panificação este fato não se verifica por haver um grande consumo a esta hora para a produção de pão. Em relação à hora de maior consumo verificam-se dois pontos críticos na rede em que não existe poder desinfetante com concentrações de 0,0 mg/L.

Uma das medidas que podem ser tomadas neste subsistema, visto maior parte dos nós mais afastados do reservatório terem um poder de desinfecção mais diminuto, é a introdução de pontos de rechloragem na rede.

A utilização do modelo de simulação EPANET 2.0 demonstrou ser muito prática, uma vez que permitiu avaliar teoricamente a rede de distribuição na vertente hidráulica e de qualidade de água, para além de ser um método economicamente rentável.

**REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Alegre, H., Coelho, S. (2002). Princípios Relevantes para a Eficiente Gestão Técnica de Sistemas de Abastecimento de Água. Comunicação apresentada no curso de formação sobre simulação de Sistemas Públicos de Abastecimento de Água. LNEC, Lisboa.
- Alegre, H., Coelho, S., Almeida, M., Vieira, P. (2005). Controlo de Perdas de água em sistemas públicos de adução e distribuição. Instituto Regulador de Águas e Resíduos, Instituto da Água & Laboratório Nacional de Engenharia Civil.
- Alves, A., Pinto, B. (2004). Economia da Água do Plano Nacional da Água. Instituto da Água. Ministério da Cidade. Ordenamento do Território e Ambiente. Lisboa.
- Araújo, L.S., Ramos H., Coelho S.T. (2006). Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management. *Water Resources Management*. 20: 133-149.
- Bettencourt H. (2012). Comunicação oral transmitida a 5 de Outubro de 2012.
- Clark, R., Rossman, L. A., Wyner L. J., (1995). Modeling Distribution System Water Quality: Regulatory Implications. *Journal of Water Resources Planning and management*.
- Coelho, S., Alegre H. (2002) A Avaliação do Desempenho Técnico de Sistemas de Saneamento Básico através da Simulação. Comunicação apresentada no curso de formação sobre simulação de sistemas Públicos de Abastecimento de Água. LNEC, Lisboa.
- Coelho, S., Loureiro, D., Alegre, H. (2006). Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Lisboa.
- Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de Agosto. *Diário da República n.º164 – I Série*. Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional. Açores.
- Decreto Regulamentar n 23/95 de 23 de Agosto. *Diário da República nº194 – I Série – B*. Diário da República.
- Haestad Methods, Inc., (2003). WaterCAD Urser's Guide.
- INAG (2011). Relatório do Estado do Abastecimento de Água e da Drenagem e Tratamento de Águas Residuais – Sistemas Públicos Urbanos. INSAAR 2010 (Dados 2009; Campanha 2010).
- Lei n.º 58/2005 de 29 de Dezembro. *Diário da República n.º 249 – I Série – A*. Assembleia da República.
- Loureiro, D., Coelho S.T., (2004). Manual do Utilizador EPANET 2.0 – Simulação Hidráulica e de Parâmetros de Qualidade em Sistemas de Transporte e Distribuição de Água (Tradução e Adaptação para língua Portuguesa). IRAR, LNEC, Lisboa. ISBN 972-99354-0-8.
- Mays, L., (1999). *Water Distribution Systems Handbooks*. Arizona. USA.

- Mendes, B., Oliveira, J.F.S. (2004). Qualidade da água para consumo humano. LIDEL. Lisboa.
- Organização Panamericana Da Saúde (OPAS). A desinfecção da água. Washington, DC: Opas, 1999 (Opas/HE/99/38).
- Porteiro, J., Quadros, S., Couto, G., Pimentel, P., Santos, N., (2005) O Abastecimento de Água e a Drenagem e Tratamento de Águas Residuais como Fatores de Sustentabilidade. Situação de Referência na Região Autónoma dos Açores. Açores.
- Rouhiainen C. J., Tade M. O., West G., (2003). Multi-objective Genetic Algorithm for optimal Scheduling of Chlorine Dosing in Water Distribution System. Computing and Control for the Water Industry.
- Rossman, L., (2002), Epanet 2.0 em Português – Manual do Utilizador. Tradução e Adaptação de D. Loureiro e S.T. Coelho. Manual, LNEC, Lisboa.
- Salgado, S., (2008). Estudo dos Parâmetros do Decaimento do Cloro Residual em Sistemas de Distribuição de Água Tratada Considerando Vazamento. Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos.
- Sekhar M.; (2001). Disinfection By-product Formation in the Water Distribution System of Morehead, Kentucky. Dissertação (Mestrado). University of Cincinnati. KY.
- Sousa, E., (2001). Saneamento Ambiental I, Sistemas de Distribuição de Água. Departamento de Engenharia Civil e Arquitectura, Secção de Hidráulica e dos Recursos Hídricos e Ambientais. Lisboa.
- Vieira, J., Morais, C. (2005). Plano de segurança de água para consumo humano em sistemas públicos de abastecimento. Instituto Regulador de Águas e Resíduos. Universidade do Minho. Lisboa.

**ANEXOS**

# Anexos



Serviços Municipalizados da Câmara Municipal de Angra do Heroísmo

ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO PÚBLICA DE ÁGUA PARA CONSUMO HUMANO

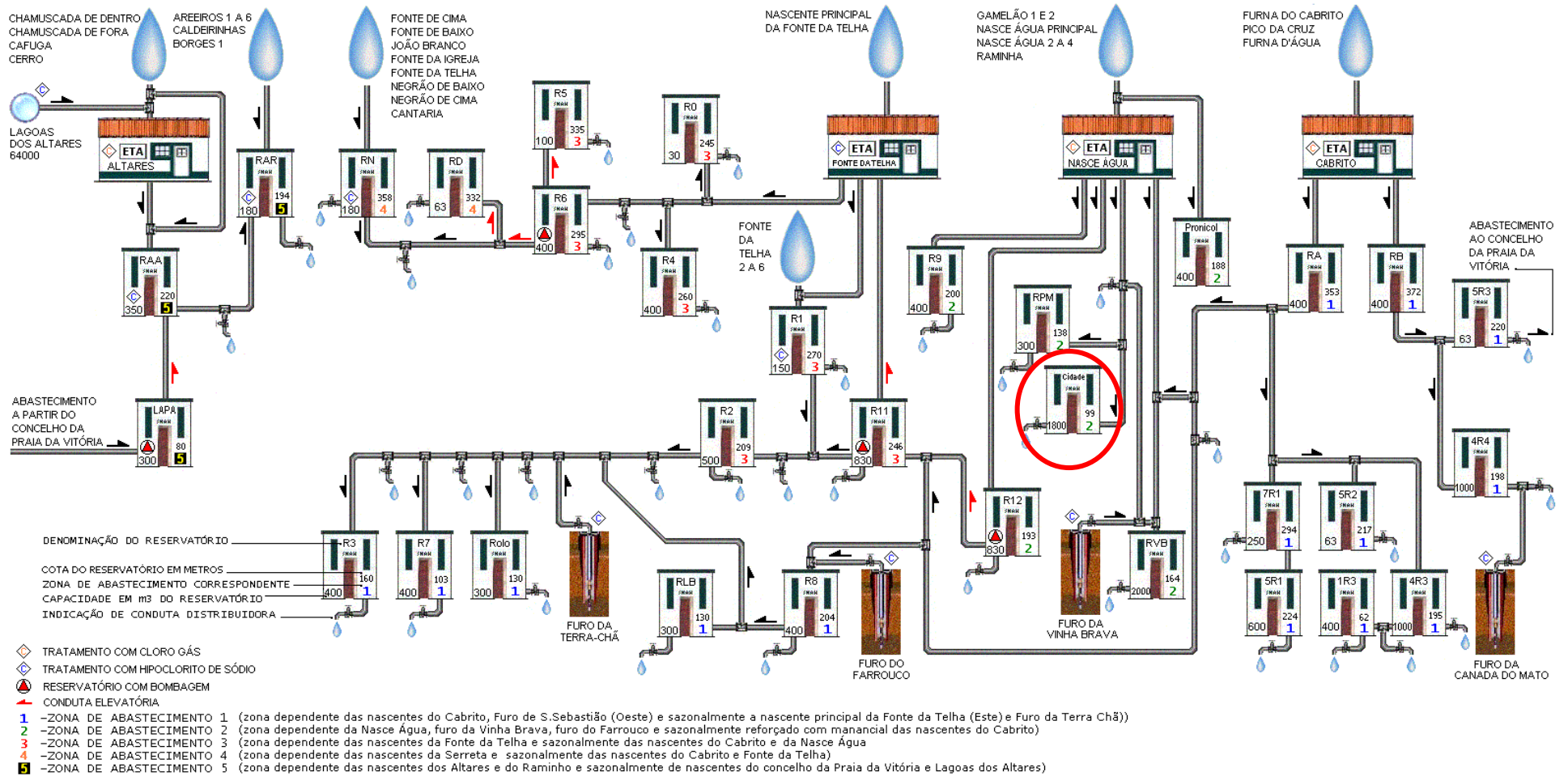


Figura I: Identificação do subsistema em estudo no Sistema de Abastecimento de água de Angra do Heroísmo

## ANEXOS



Figura II: Camaras de arejamento e Câmara de contacto de cloro da ETA da Nasce Água.



Figura III: Junção do cloro gasoso na tubagem para posterior entrada na camara de contacto.

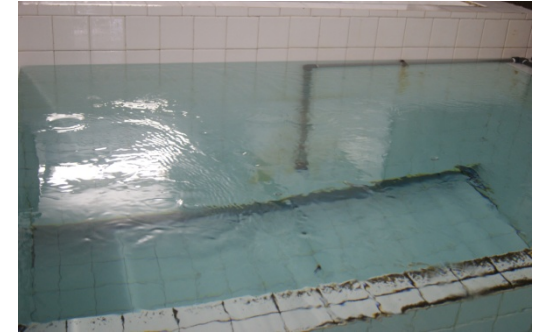


Figura IV: Injeção do cloro gasoso com água na camara de contacto.



Figura V: Entrada de água na camara de arejamento provinda da nascente.



Figura VI: Saída de água para o reservatório da cidade pela tubagem à direita..

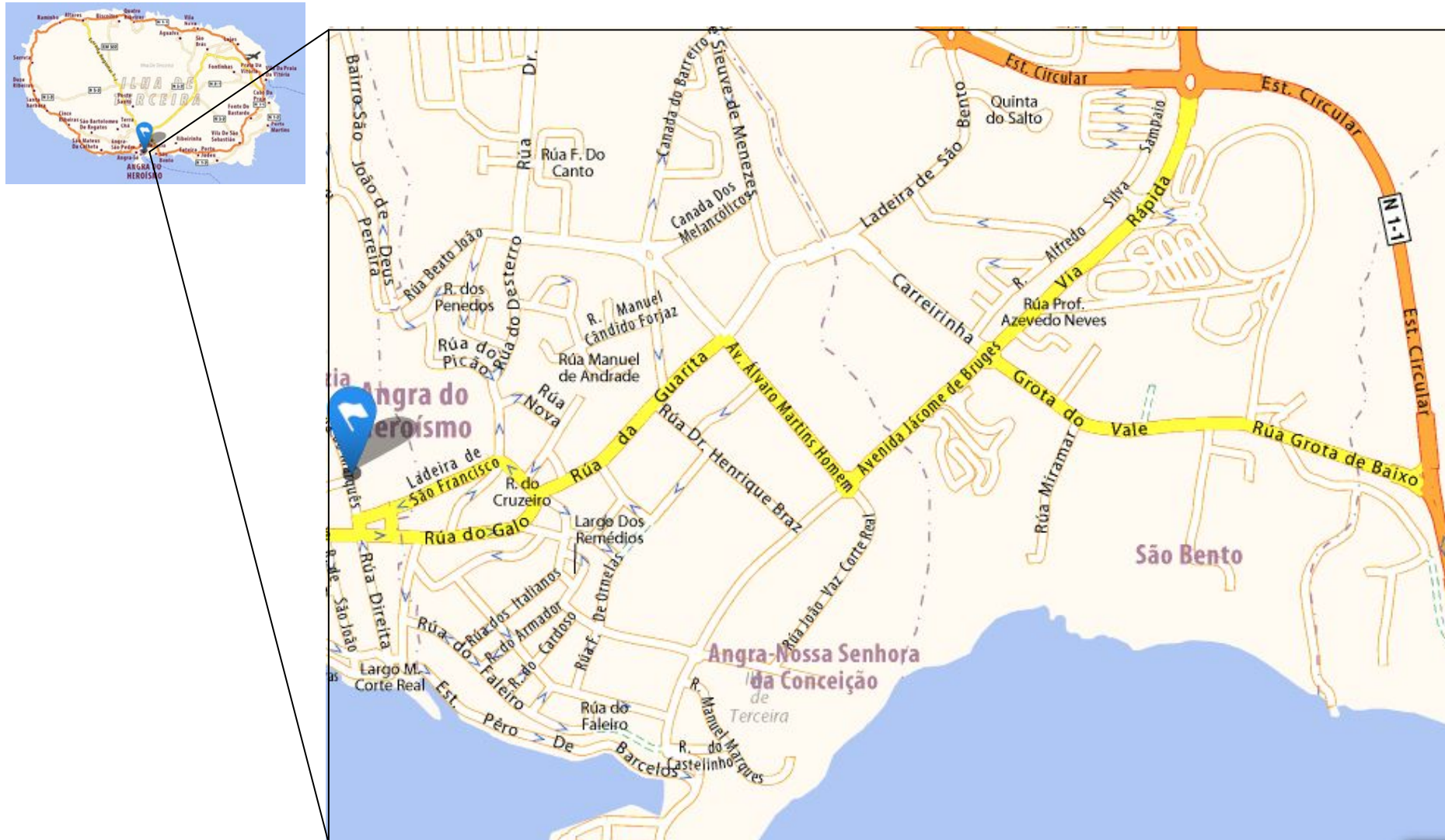


Figura VII: Mapa da Ilha Terceira com a zona do caso de estudo em Angra do Heroísmo.



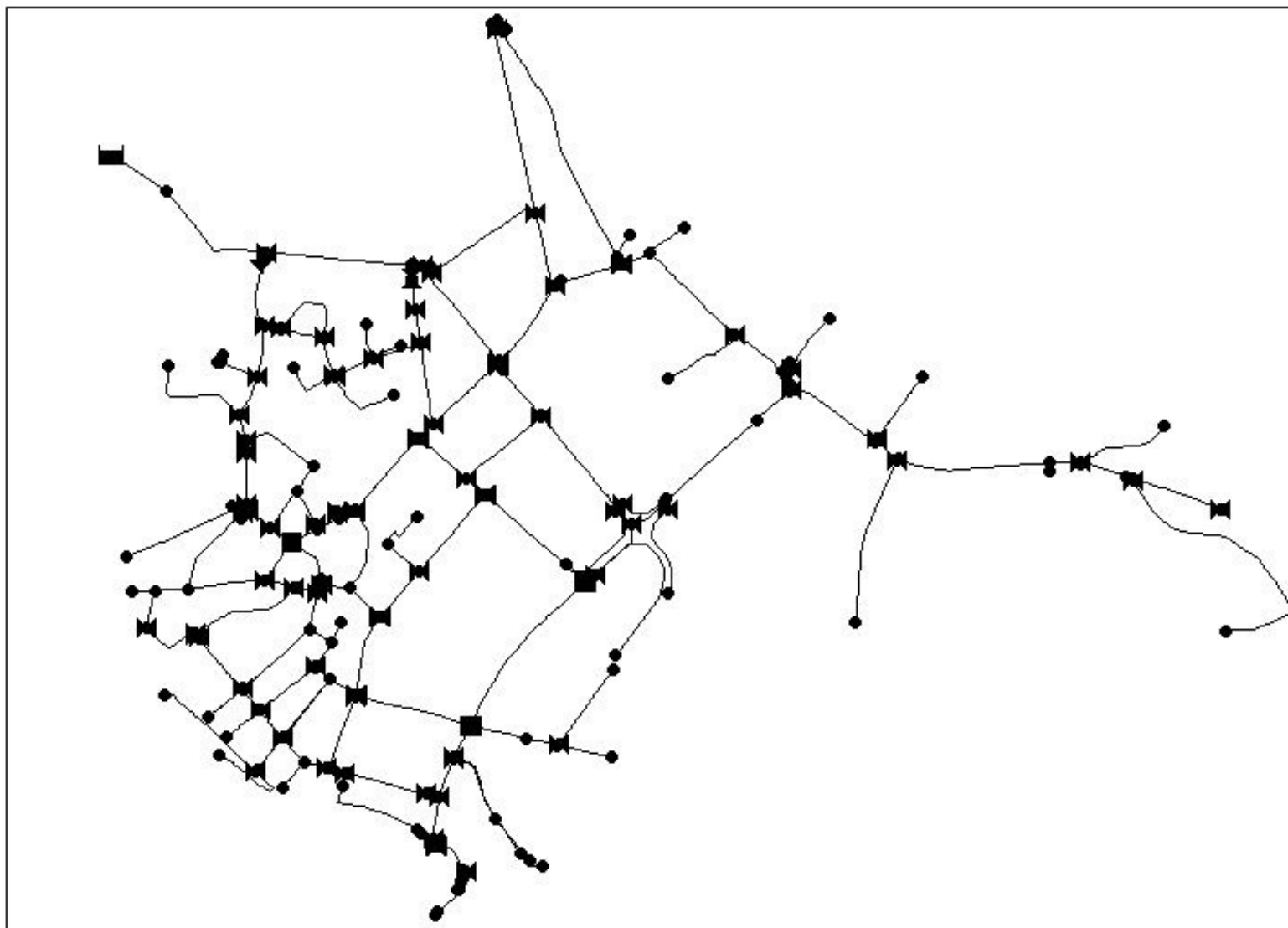


Figura VIII: Subsistema da rede de distribuição no formato do modelo EPANET 2.0.



Figura IX: Mapa da rede de distribuição do caso de estudo (azul) com a representação dos pontos de medição da pressão (preto) e reservatório (R).



Figura X: Manómetro na medição de pressão no NODE24.



Figura XI: Manómetro na medição de pressão no NODE183.



Figura XII: Manómetro na medição de pressão no NODE286.



Figura XIII: Manómetro na medição de pressão no NODE39.