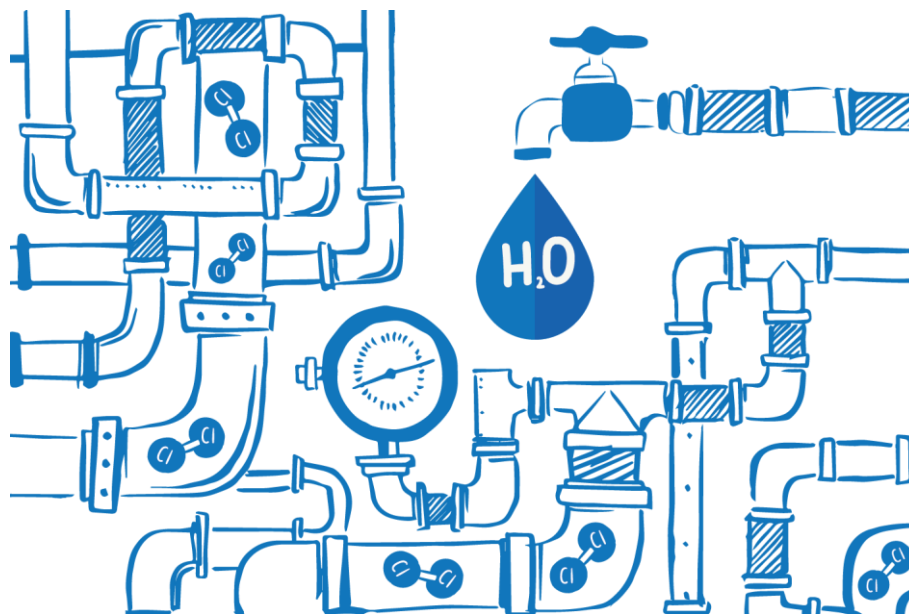




**ISEL**  
INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

**ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA**



## **Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água – Caso de Estudo Águas da Azambuja**

**LILIANA ISABEL PINTO NEVES**  
(Licenciada em Engenharia Química – Ramo Indústria)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Química e Biológica

Orientadora:

Professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Fernando Pereira Gomes

Vogais:

Professora Doutora Maria Helena Ferreira Marecos do Monte  
Professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

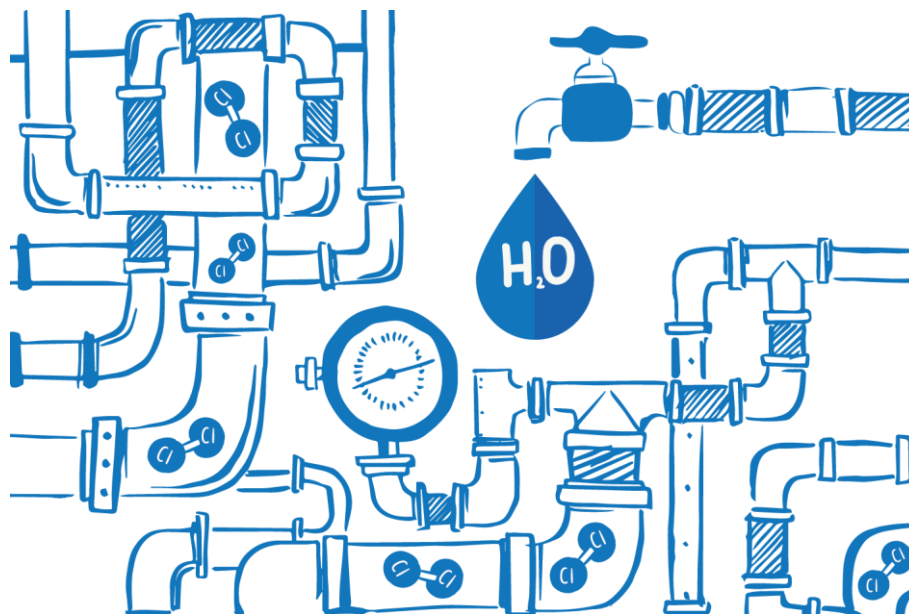
setembro de 2016





**ISEL**  
INSTITUTO SUPERIOR DE  
ENGENHARIA DE LISBOA

**ÁREA DEPARTAMENTAL DE ENGENHARIA QUÍMICA**



## **Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água – Caso de Estudo Águas da Azambuja**

**LILIANA ISABEL PINTO NEVES**  
(Licenciada em Engenharia Química – Ramo Indústria)

Trabalho Final de Mestrado para obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Química e Biológica

Orientadora:

Professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

Júri:

Presidente: Professor Doutor João Fernando Pereira Gomes

Vogais:

Professora Doutora Maria Helena Ferreira Marecos do Monte  
Professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

setembro de 2016



“Do mesmo modo que o metal enferruja com a ociosidade e a água parada perde sua pureza, assim a inércia esgota a energia da mente.”

Leonardo da Vinci



## **Agradecimentos**

À minha orientadora Prof.<sup>a</sup> Doutora Maria Teresa Santos, pela total disponibilidade, orientação, apoio e transmissão de conhecimentos ao longo de todo o trabalho.

À Águas da Azambuja, na pessoa do Administrador Eng.º Tiago Carvalho, por permitir o desenvolvimento deste trabalho no seio da empresa, facultando informações, dados internos e meios, necessários à sua realização.

Aos colegas das Águas da Azambuja, em particular ao João Peralta e ao Eng.º João Marques, pelo apoio e acompanhamento na parte operacional e de campanha e na parte técnica e do programa EPANET, respetivamente. Ainda ao Eng.º Gonçalo Delgado, que apesar de já não desempenhar funções na Águas da Azambuja, deu um importante contributo inicial, à Eng.<sup>a</sup> Isabel Pires pela compreensão, bem como a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para que fosse possível realizar este trabalho. À Catarina Sousa das Águas do Sado pelo esclarecimento de algumas dúvidas sobre o EPANET.

Ao Eng.º Vieira Gomes e ao Eng.º Luís Bucha, pela disponibilidade no acompanhamento das visitas às estações de tratamento de água da Asseiceira e de Vale da Pedra, respetivamente.

À minha família, em particular ao meu companheiro Bruno Pereira pelo apoio moral incondicional, pela paciência e por acreditar nas minhas capacidades. À minha irmã Verónica pelo apoio e pela força. E à minha mãe pela preocupação.

A todos aqueles que de alguma forma me apoiaram na realização deste trabalho, o meu agradecimento.



## Resumo

A qualidade da água, bem como a sua manutenção ao longo do sistema de distribuição é uma preocupação constante das entidades gestoras, como é o caso da AdAz – Águas da Azambuja, S.A..

A desinfecção da água com cloro é um dos métodos mais usados no tratamento de água destinada ao abastecimento público, pois promove a inativação de microrganismos patogénicos nocivos para a saúde humana. Uma das vantagens da utilização do cloro como agente desinfetante é a manutenção de um residual. No entanto, o cloro residual presente na água tratada reage ao longo do sistema de distribuição, com outras substâncias presentes nas paredes da tubagem e no seio da água, conduzindo ao seu decaimento.

O presente trabalho consistiu no estudo do decaimento do cloro numa parte do sistema de distribuição de Águas da Azambuja – Subsistema de Vila Nova da Rainha, por forma a otimizar um teor de desinfetante residual livre ao longo do sistema, garantindo a proteção sanitária da água até à torneira do consumidor. Para o efeito foi desenvolvido um modelo de simulação hidráulica e de qualidade da água para a rede em estudo recorrendo ao *software* EPANET 2.0. A calibração desse modelo foi realizada através de campanhas de medição de caudal, de pressão e da concentração de cloro em sete pontos previamente selecionados, tendo em conta distintas condições hidráulicas. Os resultados obtidos revelaram valores médios de cloro de 0,06 a 0,57 mg/L, tendo sido identificados pontos críticos da rede, cujos valores de cloro se encontravam abaixo do legalmente recomendado.

Nesse sentido, foram simulados três cenários de aumento de cloro residual (0,6, 0,8 e 1,0 mg/L) no reservatório. Os mesmos não constituíram solução para a situação. Foi ainda testado um quarto cenário de implementação de uma recloração (9 mg/L) num ponto estratégico entre dois dos pontos mais críticos, obtendo-se melhoria em ambos os pontos. Este cenário carece ainda de avaliação económica.

**Palavras-Chave:** Decaimento do cloro; Modelação; Qualidade da água; Sistemas de distribuição de água.



## Abstract

The water quality as well as its maintenance throughout the distribution system is a constant concern of management entities, as AdAz – Águas da Azambuja, S.A..

The water disinfection with chlorine is a method widely used in water treatment for public supply, because it promotes the inactivation of pathogenic microorganisms harmful to human health. One advantages of the chlorine use as a disinfectant agent is maintaining a residual in water that protects against contamination throughout the distribution network. However, the residual chlorine present in the treated water reacts along the distribution system, with other substances on the pipe walls and within the water, leading to its decay.

This work consists of the chlorine decay study in a part of the Águas da Azambuja water distribution system - Vila Nova da Rainha subsystem, in order to optimize a free residual disinfectant content throughout the system, guaranteeing health protection water to the consumer's tap. For this purpose was developed a hydraulic and water quality simulation model for the study network using the software EPANET 2.0. Calibration of this model was performed by flow, pressure and concentration of chlorine measurements, in seven points previously selected, taking into account different hydraulic conditions. The results showed average chlorine values from 0,06 to 0,57 mg/L. Critical points were identified in the network where the chlorine values were below the legally recommended.

Therefore, three scenarios were simulated with residual chlorine increase (0,6, 0,8 and 1,0 mg/L) in the reservoir, but did not constituted a solution. It was also tested a fourth scenario of rechlorination implementation (9 mg/L) in a strategic point between two of the most critical points. The fourth scenario results in improvement in both points, but still lacks of economic evaluation.

**Keywords:** Chlorine decay; Modeling; Water quality; Water distribution systems



## Índice

<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e motivação .....	1
1.2. Objetivos e metodologia .....	4
1.3. Estrutura do TFM.....	5
<b>2. Qualidade da água em sistemas de abastecimento .....</b>	<b>7</b>
<b>3. Desinfeção de água para consumo humano .....</b>	<b>23</b>
3.1. Aspetos gerais .....	23
3.2. Desinfeção de água potável com cloro .....	25
3.2.1. Aspetos gerais.....	25
3.2.2. Química do cloro na água.....	26
3.2.3. Otimização do processo de desinfeção com cloro.....	29
3.2.4. SPD da desinfeção com cloro .....	32
<b>4. Decaimento do cloro em SD.....</b>	<b>35</b>
4.1. Cinética do decaimento de cloro.....	35
4.2. Decaimento do cloro no seio do líquido .....	37
4.2.1. Aspetos gerais.....	37
4.2.2. Determinação da constante cinética de decaimento no seio da água ( $k_b$ )	41
4.3. Decaimento do cloro na parede.....	42
4.3.1. Aspetos gerais.....	42
4.3.2. Determinação da constante cinética de decaimento devido ao efeito de parede ( $k_w$ ).....	43
<b>5. Modelação .....</b>	<b>45</b>
5.1. Modelação de SD de água.....	45
5.2. Aplicação da modelação de SD de água em Portugal.....	46
5.3. EPANET .....	47
5.3.1. Aspetos gerais.....	47
5.3.2. Metodologia para construção de modelos .....	48
5.3.3. Modelação de qualidade da água.....	52
<b>6. Caso de Estudo.....</b>	<b>57</b>
6.1. Águas da Azambuja .....	57

6.2.	Subsistema de Vila Nova da Rainha - caracterização.....	58
6.3.	Construção do modelo .....	64
6.3.1.	Componentes físicos.....	64
6.3.2.	Componentes não-físicos.....	68
6.4.	Campanha de medição .....	73
6.4.1.	Campanha de medição de cloro.....	73
6.4.2.	Campanha de medição de caudal e pressão.....	79
6.5.	Calibração do modelo .....	82
6.5.1.	Aspetos gerais.....	82
6.5.2.	Calibração da pressão .....	83
6.5.3.	Calibração da qualidade da água .....	85
6.5.3.1.	Tempo de Percurso (Idade da água).....	85
6.5.3.2.	Determinação da constante cinética de decaimento do cloro no seio da água ( $k_b$ ).....	87
6.5.3.3.	Determinação da constante cinética de decaimento do cloro devido ao efeito de parede ( $k_w$ ) .....	89
<b>7.</b>	<b>Discussão de resultados e cenários .....</b>	<b>95</b>
7.1.	Discussão dos valores de caudal .....	95
7.2.	Discussão dos valores de velocidade de escoamento .....	96
7.3.	Discussão dos valores de pressão .....	97
7.4.	Discussão dos valores de cloro residual .....	99
7.5.	Simulação e discussão de cenários .....	102
<b>8.</b>	<b>Conclusões e propostas de trabalhos futuros.....</b>	<b>107</b>
	<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>111</b>
	<b>Anexos.....</b>	<b>121</b>
	Anexo I.....	123
	Anexo II.....	125
	Anexo III .....	127
	Anexo IV .....	129
	Anexo V.....	133
	Anexo VI.....	137
	Anexo VII.....	139

Anexo VIII.....	141
Anexo IX .....	151



## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> - Fileira típica de tratamento de água de origem superficial em Portugal (Rosa <i>et al.</i> , 2009).....	15
<b>Figura 2</b> - Fileira típica de tratamento de água de origem subterrânea em Portugal (Rosa <i>et al.</i> , 2009).....	16
<b>Figura 3</b> - Evolução do indicador água segura entre 1993 e 2015 (ERSAR, 2016).....	18
<b>Figura 4</b> – Dados relativos à água para consumo humano (Fernandes <i>et al.</i> , 2015).....	19
<b>Figura 5</b> – Evolução da qualidade da água para consumo humano, em 2015, no concelho de Azambuja (ERSAR, 2016b).....	19
<b>Figura 6</b> - Aspetos a considerar na gestão de riscos em SAA (Vieira e Morais, 2005)	21
<b>Figura 7</b> – Curva de cloragem ao <i>breakpoint</i> (Adaptada de Alves 2010).....	28
<b>Figura 8</b> - Definições de cloro residual (Vieira, 2004; Deborde & von Gunten, 2008; Black & Veatch, 2010; Alves 2010).....	29
<b>Figura 9</b> - Distribuição das espécies cloradas em solução aquosa em função do pH a 25 °C (Deborde & von Gunten, 2008).....	30
<b>Figura 10</b> - Decaimento na parede e no seio da água (adaptada de Vieira <i>et al.</i> , 2001)	35
<b>Figura 11</b> - Faseamento do desenvolvimento de um modelo (Coelho <i>et al.</i> , 2006).....	50
<b>Figura 12</b> - Comportamento dos segmentos segundo o método Langrageano (adaptada de Rossman e Boulos, 1996) .....	55
<b>Figura 13</b> - Freguesia de Vila Nova da Rainha e respetiva rede de distribuição de água .....	59
<b>Figura 14</b> – Fotografia aérea da ETA da Asseiceira (Águas de Portugal, 2016a) .....	60
<b>Figura 15</b> – Fileira de tratamento da ETA da Asseiceira .....	60
<b>Figura 16</b> – Exemplo de operações e processos da ETA da Asseiceira <b>a)</b> remineralização e correção da agressividade, <b>b)</b> coagulação/floculação, <b>c)</b> filtros de areia e <b>d)</b> filtro de areia em lavagem .....	61
<b>Figura 17</b> – Fotografia aérea da ETA de Vale da Pedra (Águas de Portugal, 2016b)...	62
<b>Figura 18</b> – Fileira de tratamento da ETA de Vale da Pedra.....	62
<b>Figura 19</b> – Exemplo de operações e processos da ETA de Vale da Pedra <b>a)</b> coagulação/floculação, <b>b)</b> decantação, <b>c)</b> filtração e <b>d)</b> cloragem .....	63
<b>Figura 20</b> - Reservatório de Vila Nova da Rainha .....	64

<b>Figura 21</b> - Exemplo dos dados de entrada introduzidos no EPANET 2.0: <b>a)</b> nos nós e <b>b)</b> nos troços .....	65
<b>Figura 22</b> - Padrão de consumo adimensional ajustado a 24 horas, carregado em EPANET .....	69
<b>Figura 23</b> - Bombas instaladas no reservatório de Vila Nova da Rainha.....	69
<b>Figura 24</b> – Caraterísticas das bombas instaladas no reservatório .....	70
<b>Figura 25</b> – Curva da Bomba no EPANET 2.0 .....	71
<b>Figura 26</b> – Caraterísticas das três bombas (B1, B2 e B3) no EPANET 2.0.....	71
<b>Figura 27</b> - Representação das três bombas e do RNF no EPANET 2.0 .....	72
<b>Figura 28</b> - Mapa da rede de distribuição construída no EPANET 2.0.....	72
<b>Figura 29</b> - Gráfico de isolinhas de cotas topográficas do sistema de abastecimento de água de Vila Nova da Rainha no EPANET 2.0.....	73
<b>Figura 30</b> - Localização dos sete pontos selecionados (Google earth).....	74
<b>Figura 31</b> – Rede de distribuição de água e pontos selecionados no modelo construído no EPANET 2.0.....	75
<b>Figura 32</b> – Fotografias dos pontos <b>a)</b> 1 e <b>b)</b> 2.....	75
<b>Figura 33</b> – Fotografias dos pontos <b>a)</b> 3a) e <b>b)</b> 3b) .....	76
<b>Figura 34</b> – Fotografias do Ponto 4 <b>a)</b> ponto de colheita, <b>b)</b> morada.....	76
<b>Figura 35</b> – Fotografias dos Pontos <b>a)</b> 5, <b>b)</b> 6 e <b>c)</b> 7 .....	77
<b>Figura 36</b> - Medidor <b>a)</b> Fotómetro portátil Hach e <b>b)</b> portátil de pH Hach .....	78
<b>Figura 37</b> – Medidor de caudal e pressão instalado à saída do reservatório .....	80
<b>Figura 38</b> – Resultado da medição em contínuo de caudal e de pressão à saída do reservatório de Vila Nova da Rainha.....	81
<b>Figura 39</b> – Pressão de serviço na bomba .....	82
<b>Figura 40</b> – Dados estatísticos da calibração da pressão, no EPANET 2.0.....	83
<b>Figura 41</b> – Gráfico de correlação dos valores de pressão reais e simulados, no EPANET 2.0.....	84
<b>Figura 42</b> – Comparação entre as médias de pressão medidas e simuladas, no EPANET 2.0 .....	84
<b>Figura 43</b> – Seleção da opção <i>Age</i> nas opções da qualidade no EPANET.....	85
<b>Figura 44</b> – Evolução do tempo de percurso nos pontos de amostragem 1, 2 e 4.....	86
<b>Figura 45</b> – Evolução do tempo de percurso nos pontos de amostragem 5, 6 e 7.....	86

<b>Figura 46</b> – Frasco de Winkler a) fotografia, b) recipiente para manutenção da temperatura.....	88
<b>Figura 47</b> – Dados experimentais para obtenção da constante cinética $k_b$ .....	89
<b>Figura 48</b> – Definição do tempo de simulação no EPANET.....	90
<b>Figura 49</b> – Seleção da opção <i>Cloro</i> nas opções da qualidade no EPANET .....	90
<b>Figura 50</b> – Relatório de calibração do cloro para o cenário A, no EPANET 2.0 .....	91
<b>Figura 51</b> – Relatório de calibração do cloro para o cenário B, no EPANET 2.0.....	92
<b>Figura 52</b> – Definição das opções da reação no EPANET.....	92
<b>Figura 53</b> – Relatório da reação.....	93
<b>Figura 54</b> – Representação do caudal na rede, na hora de maior consumo, no EPANET .....	95
<b>Figura 55</b> – Representação da velocidade na rede, na hora de maior consumo, no EPANET.....	97
<b>Figura 56</b> – Representação da pressão na rede, na hora de maior consumo, no EPANET .....	98
<b>Figura 57</b> – Representação da pressão na rede, na hora de menor consumo, no EPANET.....	99
<b>Figura 58</b> – Gráfico temporal do cloro nos pontos de amostragem 1, 2 e 4.....	100
<b>Figura 59</b> – Gráfico temporal do cloro nos pontos de amostragem 5, 6 e 7.....	100
<b>Figura 60</b> – Resultados para o cenário I.....	102
<b>Figura 61</b> – Resultados para o cenário II.....	103
<b>Figura 62</b> – Resultados para o cenário III .....	104
<b>Figura 63</b> – Localização do ponto de rechloragem no EPANET .....	105
<b>Figura 64</b> – Resultados para o cenário IV .....	105



## Índice de Tabelas

<b>Tabela 1</b> – Dados da qualidade da água da rede de abastecimento do concelho de Azambuja relativos ao 2º Trimestre de 2016.....	12
<b>Tabela 2</b> – Processos emergentes de desinfecção (Adaptada de Marecos do Monte & Albuquerque, 2010).....	25
<b>Tabela 3</b> - Modelos cinéticos propostos para descrever o decaimento de cloro (Adaptada de Vieira & Coelho, 2003 e Vieira <i>et al.</i> , 2004).....	38
<b>Tabela 4</b> - Programas de modelação hidráulica e de qualidade de água (Adaptada de USEPA, 2005).....	46
<b>Tabela 5</b> - Componentes físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (IRAR e LNEC 2004, Coelho <i>et al.</i> , 2006).....	51
<b>Tabela 6</b> - Componentes não-físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (IRAR e LNEC 2004, Coelho <i>et al.</i> 2006).....	52
<b>Tabela 7</b> - Coeficientes de rugosidade para condutas de abastecimento de água (Adaptado de IRAR e LNEC, 2004).....	67
<b>Tabela 8</b> – Pontos selecionados da rede de distribuição e respetiva localização .....	74
<b>Tabela 9</b> – Resultados da campanha de cloro residual livre nos pontos selecionados ..	79
<b>Tabela 10</b> - Medição de pressão nos pontos selecionados.....	80
<b>Tabela 11</b> - Dados para determinação da constante cinética de decaimento no seio da água.....	88
<b>Tabela 12</b> – Velocidade limite para as tubagens do caso em estudo .....	96
<b>Tabela 13</b> – Valores de cloro residual obtidos no âmbito do PCQA de AdAz .....	101



## Abreviaturas

AdAz – Águas da Azambuja, S.A.

CI – Controlo de Inspeção

CR1 – Controlo de Rotina 1

CR2 – Controlo de Rotina 2

DPD – N,N-dietil-p-fenilenediamina

EG – Entidade Gestora

EPA – *Environmental Protection Agency*

EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A.

ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos

ETA – Estação de Tratamento de água

GDWQ – Guidelines for Drinking Water Quality

GPI – Gestão Patrimonial de Infraestruturas

INSSAA – Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água

IRAR – Instituto Regulador de Águas e Resíduos

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MON – Matéria orgânica natural

OMS – Organização Mundial de Saúde (WHO)

PAC – Carvão ativado em pó

PCQA – Programa de Controlo da Qualidade da Água

PE – Ponto de Entrega

PSA – Plano de Segurança da Água

PVC – Policloreto de Vinilo

RASARP – Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal

RNF – Reservatório Nível Fixo (ou Reservoir)

RNV – Reservatório Nível Variável (ou Tank)

SAA – Sistema de Abastecimento de Água

SD – Sistema de Distribuição

SPD – Subprodutos de Desinfecção

TCV – Throttle Control Valve ou Válvula de borboleta (VB)

TFM – Trabalho Final de Mestrado

THM – Trihalomentanos

USEPA – Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América

UV – Ultravioleta

ZA – Zona de Amostragem

## Simbologia

$K$  – constante global de decaimento de primeira ordem

$k_b$  – Constante cinética de decaimento no seio da água

$k_w$  – Constante cinética de decaimento na parede da tubagem

$k_f$  – Coeficiente de transferência de massa entre o seio do líquido e a parede

m.c.a. – Metro Coluna de Água

$r$  – Velocidade de reação

$Sh$  – Número de Sherwood

$Sc$  – Número de Schmidt

$Re$  – Número de Reynolds

$\nu$  – Viscosidade cinemática da água

$C$  – Concentração de cloro no tempo

$C_0$  – Concentração inicial de cloro

$C_t$  – Concentração de cloro no instante  $t$

$R$  – Raio da tubagem

$D$  – Difusão molecular do cloro na água

$d$  – Diâmetro da tubagem

$L$  – Comprimento da tubagem

$V$  – Velocidade limite

$d_i$  – Diâmetro interno da tubagem



## **1. Introdução**

### **1.1. Enquadramento e motivação**

O presente Trabalho Final de Mestrado (TFM) insere-se no Mestrado em Engenharia Química e Biológica do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Aborda a temática do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água aplicado a um caso de estudo real, recorrendo à modelação através do *software* EPANET 2.0.

A desinfeção é de inquestionável importância no fornecimento de água potável segura (WHO, 2011). Os sistemas de abastecimento de água (SAA) potável são desinfetados principalmente para inativar microrganismos que são prejudiciais para a saúde humana, antes de a água chegar aos consumidores. Um objetivo secundário consiste em manter uma concentração residual ao longo do sistema de distribuição (SD) a um nível suficiente para inibir o crescimento microbiano e neutralizar uma possível contaminação (Fisher, 2011b).

Atualmente, existem vários processos de desinfeção, no entanto o cloro é o agente de desinfeção mais comumente aplicado. O cloro é um desinfetante muito eficaz, relativamente fácil de manusear, simples de dosar, medir e controlar, com custos relativamente mais baixos, e possui uma concentração residual razoavelmente prolongada (Brown, 2011; Fisher, 2011b).

Como a água circula através do SD, a sua qualidade sofre alterações provocadas por vários fatores (Black & Veatch, 2010), entre os quais a diminuição da concentração de cloro residual livre ao longo da rede de distribuição. Essa diminuição deve-se à sua reação com compostos presentes na água – decaimento no seio da água, ou com os materiais da tubagem – decaimento de parede, o que pode conduzir ao seu total desaparecimento, reduzindo a proteção microbiológica (Clark & Sivaganesan, 2002; IRAR, 2007).

A manutenção do cloro residual no SD é essencial para a proteção da saúde pública, sendo necessária a compreensão do funcionamento do sistema, bem como das condições que contribuem para o seu decaimento (Black & Veatch, 2010). O correto controlo de

cloro residual livre é perentoriamente importante para garantir a qualidade da água e satisfazer as necessidades dos consumidores (Nagatani, 2006).

Se por um lado a adição de desinfetante é microbiologicamente benéfica, reduzindo o risco de doenças infecciosas, por outro, ocorrem reações secundárias em que são formados Subprodutos de Desinfecção (SPD); alguns potencialmente nocivos (Clark & Sivaganesan, 2002; Boccelli *et al.*, 2003; Black & Veatch, 2010). Além disso, a concentração de desinfetante deve ser mantida a uma concentração que evite as queixas dos consumidores no que diz respeito ao sabor e odor da água (Boccelli *et al.*, 2003; IRAR, 2007; Fisher *et al.*, 2011a), Ahn *et al.*, 2012).

Assim, as Entidades Gestoras (EG) enfrentam a permanente preocupação de procurar um compromisso entre a eficácia do processo de desinfecção (inativação dos microrganismos), a minimização de formação de SPD e a garantia de um teor residual de desinfetante ao longo do SD (proteção sanitária).

A recomendação da Organização Mundial de Saúde (OMS) aconselha uma concentração de cloro residual livre na gama 0,2 - 0,5 mg/L.

Em Portugal, a legislação em vigor aplicável à qualidade da água para consumo humano (Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto) não estabelece um valor paramétrico para a concentração de cloro residual livre, mas recomenda que a concentração deste desinfetante se encontre compreendida entre 0,2 e 0,6 mg/L.

A adequada compreensão, caracterização e previsão do comportamento da qualidade da água em SD de água potável são essenciais para garantir o cumprimento das obrigações regulamentares e as expectativas do consumidor (Vasconcelos *et al.*, 1997).

Um adequado modelo geral de decaimento de cloro na água é um componente essencial para uma eficiente modelação da concentração de cloro em SD (Fisher, 2012). Este modelo deve basear-se na cinética das reações do parâmetro a modelar, caso este não seja conservativo, como acontece com o cloro. Muitas destas reações têm vindo a ser estudadas e modeladas por diversos autores há mais de 20 anos (Fisher, 2011b). Compreender a cinética do decaimento de cloro residual e os fatores que o influenciam é essencial para tarefas como a localização de instalações de cloragem, otimização de

dosagem, escolha de locais de recolha de amostras e respetivas frequências e controlo operacional das redes de água potável (Menaia, 2003).

Ao longo dos anos foram desenvolvidos vários programas de computador para modelação de redes de distribuição de água que incorporam um módulo para modelação de decaimento de cloro, no entanto há incerteza sobre o modelo cinético que deve ser usado para o mecanismo de decaimento (Powell, 2000a). O decaimento de cloro na água potável envolve um conjunto complexo de reações que é normalmente simplificado para cinética de primeira ordem para descrever o consumo de cloro em massa e na parede (Kastl *et al.*, 1999), no entanto têm sido propostas abordagens mais complexas, como uma segunda ordem paralela, modelo decaimento dois-reagentes (modelo 2R) (Monteiro *et al.*, 2014).

Contudo, um modelo de qualidade da água só é uma ferramenta confiável se prevê como um sistema real se comporta (Wu, 2006).

Para a implementação da modelação da qualidade da água nas EG de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA), que inclui a modelação do cloro, é necessário o desenvolvimento prévio de um modelo hidráulico, convenientemente testado e calibrado, que permita a rigorosa simulação do percurso da água e do tempo de permanência da água no sistema (Vieira *et al.*, 2001). A nível nacional, a Iniciativa Nacional para a Simulação de Sistemas de Abastecimento de Água (INSSAA), potenciou a implementação de modelos hidráulicos devidamente calibrados em algumas EG de SAA (Coelho *et al.*, 2007).

A motivação para a realização deste trabalho surge associada ao facto de exercer funções na AdAz - Águas da Azambuja, S.A., empresa concessionária da exploração e gestão dos sistemas públicos de distribuição de águas e drenagem de águas residuais do concelho de Azambuja, cuja missão é satisfazer as necessidades no domínio do abastecimento de água e saneamento de forma eficiente, garantindo o abastecimento em quantidade e qualidade, promovendo elevados índices de satisfação das populações, potenciando a sua atividade como ferramenta de apoio ao desenvolvimento económico e social a nível local e assegurando a preservação do ambiente (AdAz, 2016b).

Sendo a manutenção da qualidade da água ao longo dos sistemas de transporte e distribuição de água uma das principais problemáticas com que as EG se deparam, torna-se importante desenvolver estudos que permitam um maior conhecimento sobre o decaimento de cloro nos sistemas de abastecimento de água, que pode comprometer a qualidade da água para consumo humano, nomeadamente através de modelos que permitam prever a evolução das concentrações de cloro ao longo dos mesmos, e dessa forma encontrar soluções para minimizar os seus efeitos.

O recurso à modelação para o efeito constitui também uma mais-valia para a empresa na medida em que um modelo, após correta calibração, pode tornar-se um instrumento bastante útil, funcionando como uma ferramenta de apoio à gestão da rede de distribuição de água, planeamento, projeto, definição de regras de operação e/ou manutenção e permitindo efetuar simulações de uma forma rápida e eficaz, sem interferir fisicamente com o sistema, suplantando dessa forma o interesse específico do decaimento de cloro.

## **1.2. Objetivos e metodologia**

O presente trabalho tem como objetivo estudar o decaimento do cloro através da implementação da modelação de cloro residual num caso de estudo real – Subsistema de Vila Nova da Rainha, pertencente ao sistema de distribuição de Águas da Azambuja, S.A., por forma a otimizar um teor de desinfetante residual livre ao longo do sistema, garantindo a proteção sanitária da água até à torneira do consumidor.

A metodologia adotada para realizar este estudo consistiu na construção e calibração do modelo hidráulico e de qualidade da referida rede, utilizando como ferramenta de suporte o *software* EPANET 2.0, desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) e traduzido para língua portuguesa pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), um dos programas mais adequados e eficazes na simulação de sistemas de abastecimento. Embora atualmente se encontre disponível no mercado especializado uma grande variedade de *software* para modelação de sistemas de abastecimento de água, a motivação para a utilização do EPANET na execução do presente trabalho está relacionada com os seguintes fatores: é um programa de utilização livre e gratuita, de fácil acesso, que está traduzido em português, que se

adequa às necessidades de simulação do sistema em questão, que é fiável e bem documentado e cujo formato de dados é lido por muitos dos principais simuladores do mercado, pelo que os modelos desenvolvidos neste *software* podem eventualmente vir a ser transferidos com facilidade para outro *software*, se for opção da EG vir a adquirir numa fase posterior um simulador diferente.

Assim, o presente trabalho envolveu as seguintes etapas:

- levantamento e caracterização do subsistema de abastecimento escolhido;
- campanhas de medição de caudal, pressão e cloro residual em vários pontos da rede de distribuição;
- construção do modelo hidráulico do sistema em estudo no *software* EPANET 2.0;
- calibração do modelo hidráulico implementado no EPANET;
- construção do modelo de qualidade da água do sistema em estudo no *software* EPANET e respetiva calibração;
- aplicação do modelo simulado na avaliação do decaimento de cloro livre no SD de água;
- otimização do processo de desinfecção, previsão de potenciais problemas de degradação de qualidade e comparação de estratégias operacionais.

### **1.3. Estrutura do TFM**

O presente TFM está organizado em 8 Capítulos, sendo o primeiro este capítulo introdutório, no qual é apresentado o enquadramento do trabalho, os objetivos e a metodologia utilizada para os alcançar, bem como a organização do trabalho.

No Capítulo 2 são apresentados conceitos associados à qualidade da água em SAA, efetuando o enquadramento da principal legislação subjacente ao tema.

O Capítulo 3 aborda primeiramente a desinfecção de água para consumo humano de uma forma geral, incidindo depois na desinfecção com cloro.

No capítulo 4 é abordada a problemática do decaimento do cloro em SD de água, incluindo a sua cinética.

No Capítulo 5 é efetuada uma introdução à modelação em SD de água, incidindo em particular no programa EPANET 2.0, selecionado para a execução do presente trabalho.

O Capítulo 6 descreve o desenvolvimento do caso de estudo, nomeadamente a sua caracterização, calibração e modelação. É descrita a construção do modelo, desde o levantamento e caracterização da rede, as campanhas levadas a cabo para calibração do modelo hidráulico e de qualidade da água, bem como a determinação das constantes cinéticas de decaimento do cloro.

No Capítulo 7 são discutidos os resultados obtidos ao longo do trabalho, através das campanhas e da modelação, bem como cenários de simulação.

O Capítulo 8 sumaria as conclusões mais relevantes e apresenta propostas de trabalhos futuros.

### **Trabalhos publicados**

Neves, L. P., Santos, M. T., (2016), Estudo do decaimento de cloro em sistemas de abastecimento de água, comunicação em painel apresentada no Fórum de Engenharia Química e Biológica '16 – iFEQB'16, 18 e 19 de maio, ISEL (certificado de participação e poster apresentados no **Anexo I**).

Neves, L. P., Santos, M. T., (2016), Decaimento de cloro num sistema de abastecimento de água, comunicação em painel apresentada no XXII Encontro Luso-Galego de Química 2016, 9 a 11 de novembro, Instituto Politécnico de Bragança (certificado de participação e poster apresentados no **Anexo II**).

## 2. Qualidade da água em sistemas de abastecimento

O acesso a água potável segura é essencial para a saúde, um direito humano básico e um importante indicador de desenvolvimento a nível nacional, regional e local (Black & Veatch, 2010).

Em 28 de julho de 2010, a Assembleia Geral das Nações Unidas através da Resolução A/RES/64/292 declarou que a água limpa e segura é um direito humano essencial para gozar plenamente a vida e todos os outros direitos humanos, tendo os países membros a obrigação de promover todas as medidas necessárias para fazer cumprir esse direito.

Até ao início do século XX, a avaliação da qualidade da água para consumo humano era efetuada qualitativamente, de uma forma empírica, confiando essencialmente nas suas características organoléticas (Alves, 2010).

A utilização de água de má qualidade e os deficientes hábitos higiénicos faziam com que as doenças causadas por parasitas, bactérias, protozoários e vírus, relacionadas com a água fossem facilmente propagadas (Alves, 2010), no entanto apenas no início do século XX, após várias vagas de surtos epidémicos de cólera e febre tifóide na Europa, se associou o consumo de água com a saúde pública, desenvolvendo-se meios técnicos e legais para a desinfeção da água em sistemas públicos de abastecimento (Vieira e Morais, 2005).

As bases científicas que serviram de ponto de partida para o estabelecimento de práticas e protocolos para o controlo da qualidade da água surgem no contexto das investigações epidemiológicas desenvolvidas por John Snow, demonstrando a estreita ligação entre o consumo de água com contaminação fecal e um surto de cólera em Londres (Snow, 1855 citado por Vieira e Morais, 2005), da descoberta da existência de microrganismos por Louis Pasteur (1863) e dos avanços científicos nos métodos de deteção de microrganismos por Robert Cock, nomeadamente o isolamento do bacilo *Vibrio cholerae*, em 1883 (Vieira e Morais, 2005).

Em 1958 surge a primeira publicação da OMS relacionada especificamente com a qualidade da água para consumo humano – International Standards for Drinking Water, estabelecendo-se procedimentos de verificação da conformidade das características da

água abastecida com valores numéricos pré-estabelecidos (Normas), através de programas de amostragem do “produto-final” consumido. Em 1983-84, surge a publicação da primeira edição das Guidelines for Drinking Water Quality (GDWQ) (WHO, 2011).

Ao nível comunitário, a primeira Diretiva recaindo sobre a qualidade da água destinada ao consumo humano foi publicada em 1980 (Diretiva 80/778/EC). Este documento legal foi revogado pela Diretiva 98/83/EC, que se encontra atualmente em vigor, e que incorpora avanços técnicos e científicos, concentrando a obrigatoriedade de conformidade em parâmetros de qualidade essenciais.

Em Portugal, a Diretiva 98/83/CE, do Conselho, de 3 de novembro, foi transposta para o quadro jurídico nacional através do Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de setembro, posteriormente revogado pelo Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de Agosto. Atualmente, este encontra-se em revisão na sequência da Diretiva (UE) 2015/1787 da Comissão de 6 de outubro de 2015, que altera os anexos II e III da Diretiva 98/83/CE do Conselho relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano.

O Decreto-Lei n.º 243/2001 manteve aspetos fundamentais do anterior diploma, o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, que definia já o essencial das obrigações das EG, nomeadamente a apresentação do programa de controlo da qualidade da água (PCQA) para consumo humano, a frequência de amostragem de acordo com a população servida, a comunicação dos incumprimentos de valores paramétricos e de outras situações que comportassem risco para a saúde humana, a publicação trimestral dos resultados obtidos nas análises de demonstração de conformidade, a comunicação, até 31 de março de cada ano, dos dados analíticos da implementação do programa de controlo da qualidade da água relativos ao ano transato, a realização de análises preferencialmente em laboratórios de ensaios credenciados e os métodos analíticos de referência.

Relativamente ao anterior diploma legal, modificou a lista dos parâmetros a realizar, alterou alguns valores paramétricos, abordou de uma forma mais racionalizada o controlo de pesticidas, estabeleceu que o controlo da qualidade da água passava a ser feito na torneira do consumidor ou no ponto de utilização, no caso de indústrias alimentares, e definiu a necessidade de regulamentação das situações em que a gestão e

a exploração de um sistema de abastecimento público de água estão sob a responsabilidade de duas ou mais EG.

Contudo a alteração mais significativa foi a criação de uma autoridade competente, o Instituto Regulador de Águas e Resíduos (IRAR), atual Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), responsável pela coordenação da implementação do diploma.

Não existindo previsão de revisão, a curto ou médio prazo, da Diretiva 98/83/CE, houve necessidade de rever o Decreto-Lei n.º 243/2001, através do Decreto-Lei n.º 306/2007, pelos seguintes motivos:

- definição de uma abordagem mais racionalizada para as zonas de abastecimento com volumes médios diários inferiores a 100 m<sup>3</sup>, nomeadamente no que diz respeito à frequência de amostragem;
- garantir a desinfecção como processo de tratamento obrigatório para a redução da percentagem de incumprimentos dos valores paramétricos relativos aos parâmetros microbiológicos;
- definição e implementação de um programa de controlo operacional, uma vez que é essencial o controlo regular e frequente de todos os componentes do sistema de abastecimento, de modo a otimizar a qualidade da água;
- introdução de novos parâmetros no controlo de qualidade da água, considerando a existência, em algumas zonas do país, de águas com dureza elevada ou agressivas, ou com frequente aparecimento de florescências de cianobactérias;
- introdução de regras específicas para as EG dos sistemas de abastecimento particular (origens próprias por impossibilidade de ligação à rede pública).

O Artigo 2.º do Decreto-Lei n.º 306/2007 apresenta várias definições, entre as quais, a definição de água destinada ao consumo humano como:

“ i) Toda a água no seu estado original, ou após tratamento, destinada a ser bebida, a cozinhar, à preparação de alimentos, à higiene pessoal ou a outros fins domésticos, independentemente da sua origem e de ser fornecida a partir de uma rede de distribuição, de uma camioneta ou navio-cisterna, em garrafas ou outros recipientes, com ou sem fins comerciais;

ii) Toda a água utilizada numa empresa da indústria alimentar para fabrico, transformação, conservação ou comercialização de produtos ou substâncias destinados ao consumo humano, assim como a utilizada na limpeza de superfícies, objetos e materiais que podem estar em contato com os alimentos, excepto quando a utilização dessa água não afecta a salubridade de género alimentício na sua forma acabada”.

O mesmo artigo do mesmo Decreto-Lei, define ainda EG de sistema de abastecimento público como “a entidade responsável pela exploração e gestão de um sistema de água para consumo humano, através de redes fixas ou de outros meios de fornecimento de água, no âmbito das atribuições de serviço público”.

As obrigações inerentes ao controlo da qualidade da água diferem caso se trate de uma EG de abastecimento público em alta ou em baixa, sendo que uma EG pode ser cumulativamente responsável por sistemas em alta e em baixa (Simas *et al.*, 2005).

O referido artigo (do Decreto-Lei n.º 306/2007), define EG de sistema de abastecimento público em alta como “a entidade responsável por um sistema destinado, no todo ou em parte, ao represamento, à captação, à elevação, ao tratamento, ao armazenamento e à adução de água para consumo público”, e EG de sistema de abastecimento público em baixa, como “a entidade responsável por um sistema destinado, no todo ou em parte, ao armazenamento, à elevação e à distribuição de água para consumo público aos sistemas prediais, aos quais liga através de ramais de ligação”.

É ainda definido sistema de abastecimento como “o conjunto de equipamentos e infraestruturas que englobam a captação, o tratamento, a adução, o armazenamento e a distribuição da água para consumo humano”.

O Regulamento Geral dos Sistemas Públicos e Prediais de Distribuição de Água e Drenagem de Águas Residuais, parte integrante do Decreto Regulamentar n.º 23/95 de 23 de agosto, estabelece o conjunto de regras de dimensionamento e gestão de SAA.

A água destinada ao consumo humano deve respeitar os valores paramétricos dos parâmetros constantes das partes I, II e III do anexo I do Decreto-Lei n.º 306/2007.

Os parâmetros a analisar podem ser subdivididos em três grupos: Controlo de Rotina 1 (CR1), Controlo de Rotina 2 (CR2) e Controlo de Inspeção (CI).

O CR1 inclui os parâmetros microbiológicos e o desinfetante residual e é aquele que apresenta maior frequência de amostragem, em virtude dos eventuais perigos para a saúde pública, caso ocorra contaminação.

O CR2 compreende os parâmetros organoléticos e de natureza físico-química, para os quais as análises efetuadas são menos frequentes do que as do grupo CR1.

O CI engloba parâmetros considerados como substâncias indesejáveis e outros correspondentes a substâncias tóxicas e é aquele que tem menor frequência de amostragem.

Na **Tabela 1** apresentam-se, a título de exemplo, os dados de qualidade da água da rede de abastecimento do concelho de Azambuja, para o 2º Trimestre de 2016, onde se pode verificar que todos os parâmetros analisados no âmbito do PCQA cumprem na íntegra os valores paramétricos estabelecidos no Decreto-Lei n.º 306/2007.

**Tabela 1** – Dados da qualidade da água da rede de abastecimento do concelho de Azambuja relativos ao 2º Trimestre de 2016

Controlo	Pârametros	Unidades	Nº Analises Previstas	Nº Analises Realizadas	Nº Analises Conformes	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Paramétrico	% Análises Realizadas	% Análises Cumprem a Legislação
Controlo Rotina 1	Desinfetante Residual	mg/L	30	30	30	<0,10	0,69	---	100	100
	<i>Escherichia coli</i> ( <i>E. coli</i> )	Nº/100 mL	30	30	30	0	0	0	100	100
	Bactérias coliformes	Nº/100 mL	30	30	30	0	0	0	100	100
Controlo Rotina 2	<i>Clostridium perfringens</i>	Nº/mL	5	5	5	0	0	0	100	100
	Alumínio	µg/L	5	5	5	16	77	200	100	100
	Amónio	mg/L NH <sub>4</sub>	12	12	12	<0,10	<0,10	0,50	100	100
	Número de colónias a 22 °C	Nº/mL	12	12	12	0	85	Sem alteração	100	100
	Número de colónias a 37 °C	Nº/mL	12	12	12	0	59	Sem alteração	100	100
	Condutividade	µS/cm	12	12	12	112	983	2500	100	100
	Cor	mg/L PtCo	12	12	12	<6	<6	20	100	100
	pH	Unidades de pH	12	12	12	7,1	8,4	6,5-9,0	100	100
	Manganês	µg/L	12	12	12	<10	20	50	100	100
	Oxidabilidade	mg/L O <sub>2</sub>	12	12	12	<1	<2	5,0	100	100
	Cheiro a 25°C	Fator de diluição	12	12	12	<1	<1	3	100	100
	Sabor a 25°C	Fator de diluição	12	12	12	<1	<1	3	100	100
	Turvação	UNT	12	12	12	<0,80	1,2	4	100	100

Controlo	Pârametros	Unidades	Nº Análises Previstas	Nº Análises Realizadas	Nº Análises Conformes	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Paramétrico	% Análises Realizadas	% Análises Cumprem a Legislação
Controlo de Inspeção	Ferro	µg/L	2	2	2	<40	46	200	100	100
	Nitritos	mg/L NO <sub>2</sub>	2	2	2	<0,04	<0,04	0,50	100	100
	Benzo (a) pireno	µg/L	2	2	2	<0,0050	<0,0050	0,010	100	100
	Cálcio	mg/L	2	2	2	12	18	---	100	100
	Chumbo	µg/L	2	2	2	<3,0	9,6	10	100	100
	Cobre	µg/L	2	2	2	<0,1	<0,1	2,0	100	100
	Enterococos	Nº/100 mL	2	2	2	0	0	0	100	100
	Dureza Total	mg/L	2	2	2	59	271	---	100	100
	Magnésio	mg/L	2	2	2	2,2	9,2	---	100	100
	Níquel	µg/L	2	2	2	<6,0	<6,0	20	100	100
	Hidrocarb. Aromáticos Policíclicos (HAP)	µg/L	2	2	2	<0,08	<0,08	0,10	100	100
	- Benzo (b) Fluoranteno	µg/L	2	2	2	<0,02	<0,02	0,10	100	100
	- Benzo (k) Fluoranteno	µg/L	2	2	2	<0,02	<0,02	0,10	100	100
	- Benzo (g,h,i) Perileno	µg/L	2	2	2	<0,02	<0,02	0,10	100	100
	- Índeno (1,2,3-cd) pireno	µg/L	2	2	2	<0,02	<0,02	0,10	100	100
	Trihalometanos	µg/L	2	2	2	<0,70	54,9	100	100	100
	- Clorofórmio	µg/L	2	2	2	<0,30	38	100	100	100
	- Bromodiclorometano	µg/L	2	2	2	<0,10	11,1	100	100	100
	- Dibromoclorometano	µg/L	2	2	2	<0,10	5,48	100	100	100
	- Bromofórmio	µg/L	2	2	2	<0,20	0,29	100	100	100
- Radão	Bq/L	2	2	2	<10	<10	500	100	100	

O cumprimento dos valores paramétricos do Decreto-Lei n.º 306/2007 é verificado, nos abastecimentos em baixa, pela análise da água que sai das torneiras dos consumidores e nos abastecimentos em alta, pela análise da água que é entregue às EG em baixa nos pontos de entrega (PE).

Sendo a Estação de Tratamento de Água (ETA), a parte do sistema de abastecimento onde ocorre o tratamento da água captada na natureza, com vista à sua potabilização para posterior distribuição à população (Alves, 2010), é fundamental que as ETA sejam adequadamente projetadas, construídas, dimensionadas, operadas e mantidas, de forma a assegurar que a qualidade da água para consumo humano cumpre os valores paramétricos na torneira dos consumidores (Simas *et al.*, 2005).

O objetivo principal do tratamento de água potável é fornecer água que seja quimicamente e microbiologicamente segura para consumo humano (Clark & Sivaganesan, 2002).

Os processos de tratamento a aplicar variam consoante a origem e a qualidade da água. As águas superficiais são provenientes principalmente de rios ou albufeiras, pelo que apresentam variações qualitativas, consoante a época do ano e o estado de poluição da respetiva bacia hidrográfica. O tratamento de águas superficiais envolve normalmente mais processos do que o tratamento de águas subterrâneas, uma vez que geralmente as águas subterrâneas apresentam uma qualidade superior, sendo em muitos casos apenas necessária uma desinfeção (Simas *et al.*, 2005).

No Decreto-Lei 236/98, são definidas diferentes classes para as águas superficiais destinadas à produção de água para consumo humano, de acordo com a sua qualidade. Classe A1 para as águas que apresentam melhor qualidade, A2 para as intermédias e A3 para as que têm menor qualidade. No Anexo II do referido Decreto-Lei são indicados os tratamentos a aplicar, em função da categoria a que a água pertence:

- Classe A1 – tratamento físico e desinfeção;
- Classe A2 – tratamento físico e químico e desinfeção;
- Classe A3 – tratamento físico, químico de afinação e desinfeção.

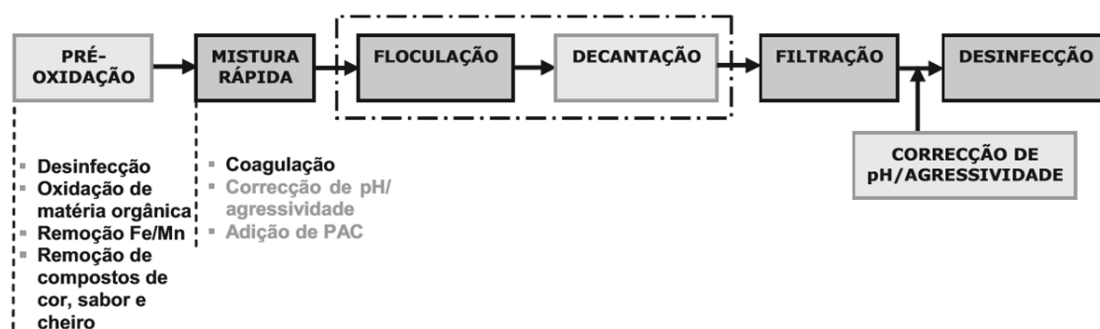
Para águas de classe A1, consideradas de boa qualidade, apenas é indicado um tratamento físico (filtração rápida ou lenta), seguido de desinfecção.

Para águas de classe A2, que apresentam já um nível de poluição significativo, é indicado tratamento físico-químico (podendo incluir uma pré-oxidação, uma coagulação/floculação, uma decantação, uma filtração rápida), seguido de desinfecção.

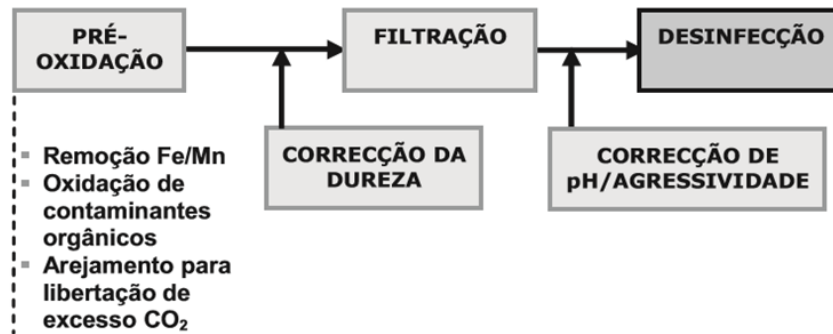
Para águas de classe A3, consideradas muito poluídas, é indicado para além do tratamento físico-químico, um tratamento de afinação (como por exemplo a utilização de carvão ativado), seguido de desinfecção (Simas *et al.*, 2005).

Quanto às águas subterrâneas, o Decreto-Lei n.º 236/98 estabelece que as mesmas serão consideradas aptas para utilização como origem de água para a produção de água para consumo humano se apresentarem qualidade superior ou igual à da categoria A1 das águas superficiais destinadas à produção de água para consumo humano. O tratamento a aplicar será o indicado para águas superficiais da categoria A1, com as devidas adaptações.

Existem muitas fileiras de tratamento variantes das sequências ditas convencionais. Assim, as fileiras de tratamento típicas das fases líquidas das ETA que processam água de origem superficial (**Figura 1**) e água de origem subterrânea (**Figura 2**) são distintas (Rosa *et al.*, 2009).



**Figura 1** - Fileira típica de tratamento de água de origem superficial em Portugal (Rosa *et al.*, 2009)



**Figura 2** - Fileira típica de tratamento de água de origem subterrânea em Portugal (Rosa *et al.*, 2009)

As fileiras típicas apresentam algumas variantes, uma vez que as ETA podem não ter instaladas todas as operações e/ou processos unitários indicados (Rosa *et al.*, 2009).

A água obtida dos níveis de tratamento que antecedem a desinfecção já deveria apresentar uma boa qualidade microbiológica para que a desinfecção final funcionasse como última barreira de segurança (OMS, 1996).

Para assegurar a qualidade da água nos sistemas de abastecimento público, é necessária a fiscalização do cumprimento do Decreto-Lei n.º 306/2007, sendo esta da responsabilidade da ERSAR para as EG.

A ERSAR tem por missão a regulação e a supervisão das atividades nos setores das águas, águas residuais e resíduos, incluindo o exercício de funções de autoridade competente para a coordenação e a fiscalização do regime da qualidade da água para consumo humano (ERSAR, 2016a).

O modelo de regulação da ERSAR é dirigido a todas as EG de sistemas públicos de abastecimento de água para consumo humano, das quais fazem parte os serviços municipais, os serviços municipalizados e intermunicipalizados, as juntas de freguesia e associações de utilizadores, as empresas municipais e intermunicipais e os sistemas concessionados municipais, intermunicipais e multimunicipais de água de abastecimento público.

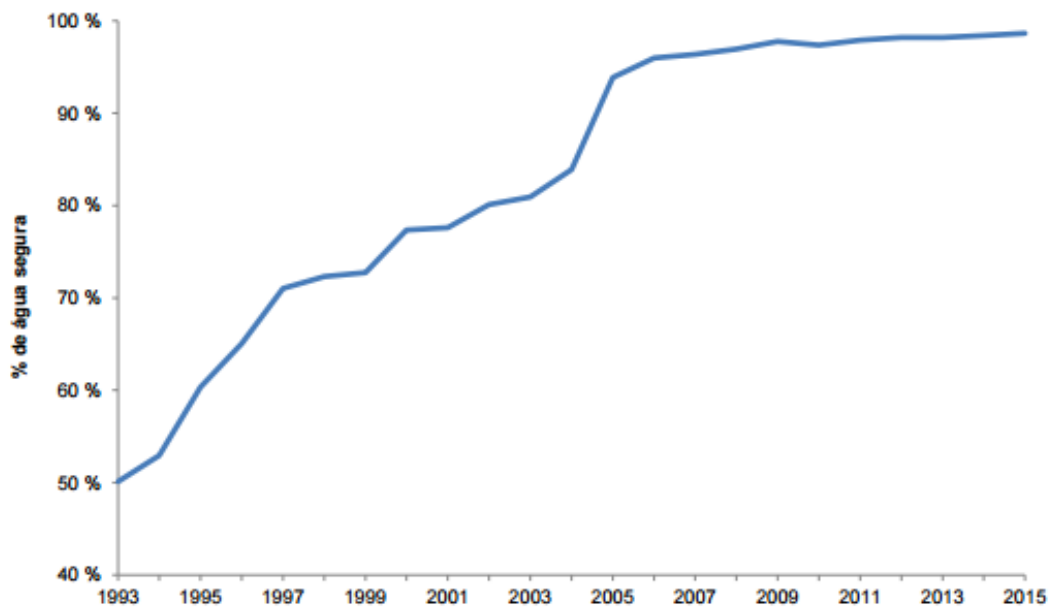
A realização do controlo nos sistemas de abastecimento público assenta nos seguintes pontos:

- elaboração por parte dos distribuidores de água, até 30 de setembro de cada ano, o respetivo PCQA, de acordo com o estipulado na legislação nacional, contemplando cerca de 50 parâmetros, sendo sujeito a avaliação e aprovação por parte da ERSAR;
- aplicação do PCQA pelas entidades distribuidoras durante o ano seguinte, sob fiscalização e supervisão da ERSAR. As autoridades de saúde asseguram complementarmente a vigilância sanitária;
- quando se verificam incumprimentos dos valores paramétricos, os laboratórios têm de fazer essa comunicação às EG até ao dia útil seguinte e estas têm o mesmo prazo, a contar da data em que tomam conhecimento, para comunicar esses incumprimentos à ERSAR e às autoridades de saúde respetivas;
- no final de cada ciclo, as entidades distribuidoras entregam os resultados do controlo de qualidade da água até 31 de março do ano seguinte. A ERSAR analisa, valida, processa e interpreta os resultados.

Anualmente, a ERSAR procede à avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores e ao controlo da qualidade da água para consumo humano, disponibilizando essa informação ao setor e aos utilizadores através da publicação do Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (RASARP).

O Volume 2 do RASARP (2016) sumaria a informação mais relevante referente à qualidade da água para consumo humano no ano de 2015, referenciada a 31 de dezembro, incidindo sobre os resultados do controlo da qualidade da água realizado pelo conjunto das EG de sistemas de abastecimento público de água de Portugal continental.

De acordo com a informação disponibilizada no referido relatório, o setor do abastecimento público de água em Portugal tem verificado uma evolução significativa nos últimos anos (**Figura 3**), especialmente nos níveis da qualidade da água fornecida na torneira dos consumidores, garantindo-se atualmente 99 % de água segura, quando em 1993 esse indicador se encontrava apenas nos 50 % (ERSAR, 2016).

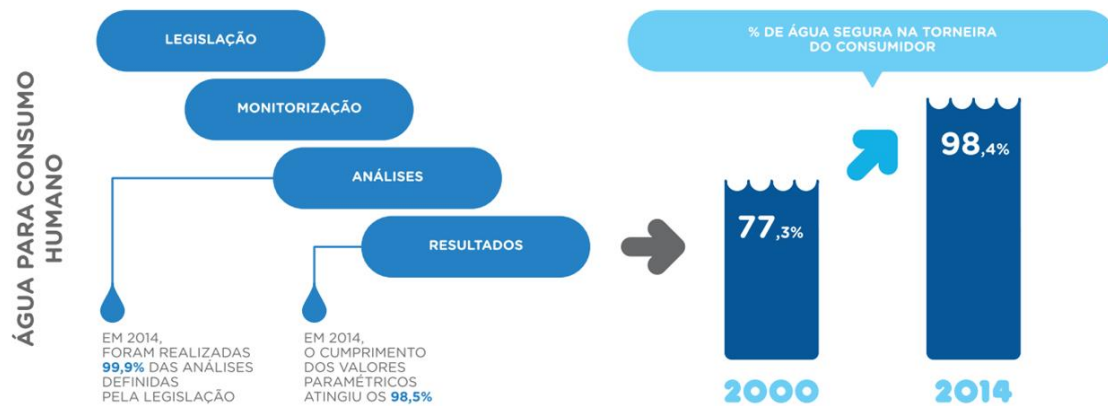


**Figura 3** - Evolução do indicador água segura entre 1993 e 2015 (ERSAR, 2016)

No entanto subsistem no sector da água alguns problemas a corrigir, nomeadamente no que diz respeito à monitorização dos valores de desinfetante residual na água tratada. Apesar de em Portugal se ter verificado uma evolução positiva, estando a maioria dos valores de desinfetante residual dentro do intervalo recomendado pela legislação nacional, verifica-se ainda a necessidade de melhorar o processo de doseamento, monitorização e controlo do mesmo. Uma vez que de acordo com RASARP 2015 (ERSAR, 2015), na avaliação por parâmetro, um dos que evidenciam menor percentagem de cumprimento dos valores paramétricos (abaixo de 98 %) continuam a ser as bactérias coliformes, por ineficiência da desinfeção. Alguns incumprimentos de parâmetros microbiológicos podem estar relacionados com a ausência de residual livre de desinfetante ou com a sua presença em concentrações insuficientes para garantir a existência de uma barreira sanitária, pelo que as EG devem promover medidas técnicas que garantam que os teores de desinfetante em toda a rede de distribuição se mantenham no intervalo recomendado no Decreto-Lei n.º 306/2007, fator essencial também para a aceitabilidade da água pelos consumidores.

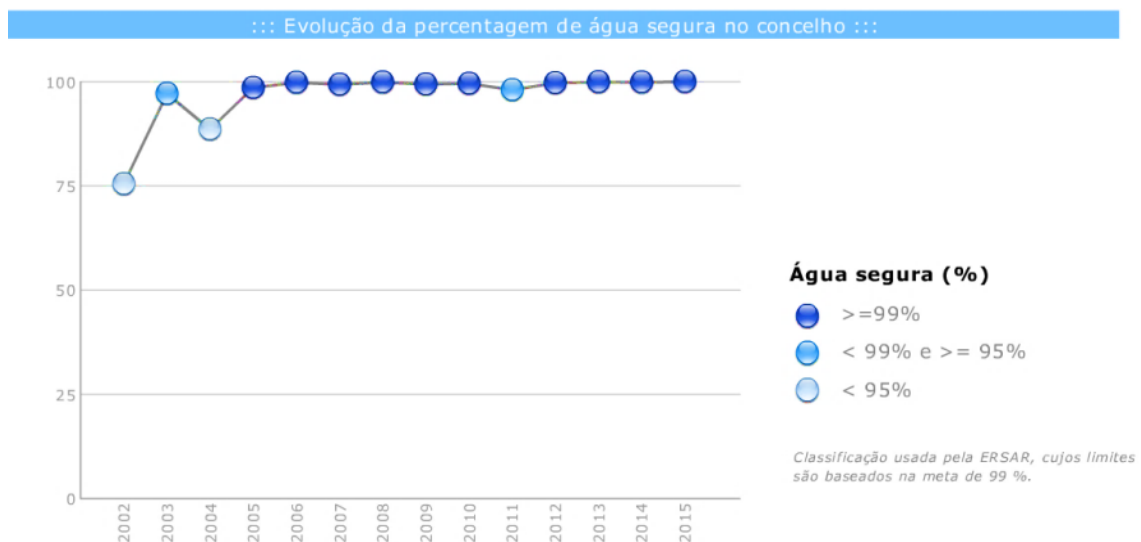
Em suma, tem-se registado, ano após ano, uma consolidação da melhoria da qualidade da água para consumo humano, mantendo-se em 2014 a tendência de melhoria no indicador água segura (água controlada e de boa qualidade), com o registo do valor de 98,41 % de água segura na torneira do consumidor. A realização de 99,9 % das análises

impostas pela legislação revela também um rigoroso controlo (**Figura 4**) (Fernandes *et al.*, 2015). De acordo com ERSAR (2016), em 2015 Portugal atingiu a meta de 99 % de água segura.



**Figura 4** – Dados relativos à água para consumo humano (Fernandes *et al.*, 2015)

De acordo com os dados da qualidade da água em baixa de 2015, apresentados no RASARP 2016, o concelho de Azambuja, já se encontra bem posicionado, apresentando uma percentagem de água segura de 100 % (**Figura 5**).



**Figura 5** – Evolução da qualidade da água para consumo humano, em 2015, no concelho de Azambuja (ERSAR, 2016b)

Nos anos 2013 e 2014, Águas da Azambuja foi distinguida pela ERSAR em parceria com o Jornal Água & Ambiente, através da atribuição de selos de qualidade. Em 2013 recebeu o selo de Qualidade exemplar da água para consumo humano e o Prémio de

Qualidade dos Serviços de Águas e Resíduos 2013. E em 2014 recebeu o selo de Qualidade exemplar da água para consumo humano e o selo de Qualidade de Abastecimento Público de Água (AdAz, 2016a).

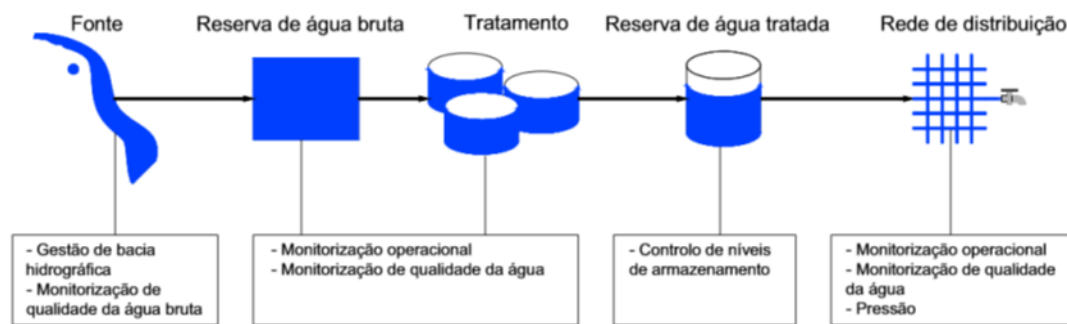
Águas da Azambuja é também considerada EG em alta relativamente a um ponto de entrega (Cercal-PE Cadaval), no qual, de acordo com os dados da qualidade da água em alta de 2015, divulgados no RASARP 2016, apresenta 100 % de água segura.

As EG devem ter também um programa de controlo operacional implementado em todas as partes do sistema, de modo a garantir o seu bom funcionamento e, através de uma observação permanente e contínua, ter a possibilidade de detetar e corrigir, em tempo útil, as deficiências que eventualmente ocorram, por forma a minimizar potenciais riscos para a saúde humana e a obter uma água de qualidade adequada para consumo humano, de abastecimento público (Simas *et al.*, 2005).

Internacionalmente é reconhecida e consensual a necessidade de desenvolvimento de uma abordagem de gestão preventiva, assegurando a qualidade da água para consumo humano (Simas, 2009).

A OMS recomenda, através da terceira edição das GDWQ (2004), que as EG de sistemas de abastecimento público de água desenvolvam planos de segurança para garantir a qualidade da água, integrando metodologias de avaliação e gestão de riscos, bem como práticas de boa operação dos sistemas. Segundo as GDWQ, um Plano de Segurança da Água para Consumo Humano (PSA), pode definir-se como um documento dinâmico que identifica e prioriza riscos plausíveis que podem verificar-se num sistema de abastecimento, desde a origem de água bruta até à torneira do consumidor, estabelece medidas de controlo para os reduzir ou eliminar e estabelece processos para verificar a eficiência da gestão dos sistemas de controlo e a qualidade da água produzida. A sua estrutura pode dividir-se fundamentalmente em três etapas: avaliação do sistema, monitorização operacional e planos de gestão.

Na **Figura 6** apresentam-se alguns aspetos a considerar na gestão de riscos de um SAA (Vieira e Morais, 2005).



**Figura 6** - Aspectos a considerar na gestão de riscos em SAA (Vieira e Morais, 2005)

No panorama nacional, perspetivando-se a inclusão desta abordagem de gestão preventiva através da implementação de PSA, na revisão da Diretiva 98/83/CE, tem vindo a ser promovido pela ERSAR, o desenvolvimento de PSA (Simas, 2009).

Também numa perspetiva de melhoria de qualidade do serviço prestado pelas EG e de permitir uma gestão sustentável das infraestruturas, a nível operacional, económico/financeiro e ambiental deve ser implementada a gestão patrimonial de infraestruturas (GPI) (Decreto-Lei n.º 194/2009, de 20 de agosto). Assim, a implementação de um plano de GPI é um instrumento essencial de apoio à gestão técnica, tendo um carácter essencialmente prático, permitindo uma manutenção preventiva, bem como ações de reparação e reabilitação do SD ao longo da sua vida útil (Alegre e Covas, 2010).



### **3. Desinfeção de água para consumo humano**

#### **3.1. Aspetos gerais**

O objetivo principal da desinfeção no tratamento de água para consumo humano é a inativação de microrganismos patogénicos. Estes microrganismos incluem bactérias, vírus e protozoários, que funcionam como agentes das doenças de origem hídrica. Segundo Alves (2010) todas as águas de abastecimento devem ser sujeitas ao tratamento de desinfeção, ainda que exista uma garantia de qualidade microbiológica.

De acordo com o estabelecido no Artigo 9.º do Decreto-Lei n.º 306/2007, compete à EG assegurar a eficácia da desinfeção e garantir, sem comprometer a desinfeção, que a contaminação por subprodutos da água seja mantida a um nível tão baixo quanto possível e não ponha em causa a sua qualidade para consumo humano.

A desinfeção da água pode ser efetuada recorrendo a diferentes mecanismos físicos (como a ebulição e a aplicação de radiação ultravioleta - UV) e químicos (aplicação de agentes oxidantes como o cloro, dióxido de cloro, monocloramina e ozono). A escolha do processo depende dos condicionalismos locais e da qualidade da água na origem, no entanto qualquer processo de desinfeção da água apresenta vantagens e desvantagens (IRAR, 2007).

A aplicação de radiação UV, apesar de ser muito eficaz na desinfeção da água, com elevado poder bactericida e de não produzir SDP, apresenta custos elevados e não mantém o poder desinfetante ao longo da rede.

O dióxido de cloro, embora revele um efeito oxidante muito grande e consequentemente útil na remoção de ferro, manganês, sulfuretos e amónia, apresenta a desvantagem de ser muito dispendioso, devido à complexidade da tecnologia envolvida e requerendo cuidados especiais de manuseamento efetuados por operadores especializados. Segundo Ammar *et al.* (2014) é um dos mais promissores desinfetantes embora normalmente usado como um desinfetante secundário.

A cloraminação é um processo em que o agente de desinfeção é a monocloramina ( $\text{NH}_2\text{Cl}$ ), embora tenha as vantagens de não produzir trihalometanos (THM) e de ter um poder desinfetante residual elevado, é menos eficaz em termos de desinfeção,

necessitando de um tempo de contato cerca de 100 vezes superior ao do cloro (Alegria *et al.*, 1998; IRAR, 2007).

O ozono, apesar de ser um desinfetante muito poderoso e de não originar a formação de THM, principal inconveniente da utilização do cloro, aquando de uma água com elevados teores em matéria orgânica natural (MON), apresenta as desvantagens de ser caro e de, sendo instável, não permanecer com ação residual na água tratada, condição essencial para garantir uma adequada desinfecção da água, pelo que é utilizado como pré-oxidante nas ETA, mantendo-se a utilização de cloro na desinfecção final (Alegria *et al.*, 1998; Simas *et al.*, 2005; IRAR, 2007).

O cloro é o desinfetante mais utilizado no tratamento da água potável (Black & Veatch, 2010), pois apresenta a capacidade de inativar eficazmente um vasto espetro de organismos patogénicos existentes nas águas, é económico e permite a manutenção de uma concentração residual na água. Existem, no entanto, desvantagens na utilização do cloro, nomeadamente, a sua capacidade de reagir com muitas substâncias orgânicas e inorgânicas naturalmente presentes na água, dando origem a SPD indesejáveis e o facto de elevadas doses conduzirem a problemas de sabor e odor (Alves, 2010).

Nos últimos anos tem sido prosseguida uma solução de combinação de dois processos de desinfecção, nomeadamente como novos processos avançados de oxidação. A análise sintetizada da aplicabilidade dos processos de desinfecção emergentes é apresentada na **Tabela 2** (Marecos do Monte & Albuquerque, 2010).

**Tabela 2** – Processos emergentes de desinfecção (Adaptada de Marecos do Monte & Albuquerque, 2010)

Processos	Caraterísticas do processo
UV / Ácido peracético (C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>3</sub> )	<ul style="list-style-type: none"><li>• Maior segurança na aplicação.</li><li>• Não forma compostos prejudiciais.</li><li>• Elevada eficiência na inativação de bactérias e fungos.</li><li>• Dependente do pH.</li></ul>
Ozono (O <sub>3</sub> ) / UV	<ul style="list-style-type: none"><li>• Inativação de um largo espectro de microrganismos.</li><li>• Redução do ozono necessário.</li></ul>
O <sub>3</sub> / Peroxono (H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"><li>• Não forma compostos prejudiciais.</li><li>• Elevada eficiência na água tratada por microfiltração.</li></ul>
UV / H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Processo avançado de oxidação mais utilizado na remoção de matéria orgânica dissolvida que na desinfecção.</li></ul>

## 3.2. Desinfecção de água potável com cloro

### 3.2.1. *Aspetos gerais*

A desinfecção de água potável com cloro tem tido um enorme impacto sobre a saúde pública, minimizando doenças transmitidas pela água. A cloragem no abastecimento de água começou por volta do início do século XX. A primeira utilização de cloro como um processo contínuo no tratamento de água foi, provavelmente, na pequena cidade de Middelkerke, Bélgica, em 1902. Ao longo do século XX, o uso de cloro para a desinfecção de água potável tornou-se mais comum e os seus benefícios tornaram-se evidentes. No entanto, os potenciais impactos na saúde da exposição prolongada a SPD clorados não foram reconhecidos até aos anos 1970 (Black & Veatch, 2010).

O processo de desinfecção da água com cloro representa assim um dilema. A desinfecção química reduz o risco de doenças infecciosas, mas a interação entre desinfetantes químicos e materiais precursores na água pode resultar em SPD potencialmente nocivos. O consumo de cloro resulta na formação de SPD e na perda de cloro residual reduzindo a proteção contra bactérias potencialmente patogénicas (Clark & Sivaganesan, 2002).

Contudo, segundo a OMS, os riscos para a saúde destes SPD são pequenos em comparação com os riscos associados a uma desinfecção inadequada, e é importante que a eficácia da desinfecção não seja comprometida na tentativa de controlar tais SPD. A formação desses subprodutos pode ser controlada através da otimização do sistema de tratamento (WHO, 2011).

### ***3.2.2. Química do cloro na água***

O cloro é utilizado na desinfecção recorrendo tipicamente a uma de três formas: cloro gasoso ( $\text{Cl}_2$ ), hipoclorito de sódio ( $\text{NaClO}$ ) ou hipoclorito de cálcio ( $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ ). A escolha da forma de cloro a utilizar é função da quantidade necessária de desinfetante, das condições existentes no local (por exemplo, espaço disponível e eletricidade), da facilidade de operação, das condições de segurança (armazenamento e manipulação) e do custo associado (instalação e exploração). O cloro gasoso utiliza-se geralmente em instalações de tratamento de grande dimensão (devido a ser o mais económico), o hipoclorito de sódio quando se trata de pequenas instalações (devido a ser o mais fácil de usar) e o hipoclorito de cálcio tem pouca utilização, mas normalmente é aplicado quando não existe eletricidade no local de injeção. Qualquer que seja a solução adotada é aconselhada a construção de reservatórios, de modo a garantir o adequado tempo de contacto mínimo exigido entre o desinfetante e a água a tratar (IRAR, 2007).

O cloro gasoso quando adicionado à água hidrolisa-se rapidamente, formando ácido hipocloroso ( $\text{HOCl}$ ) conforme a reação representada pela **Expressão 1** (Clark & Sivaganesan, 2002; Deborde & von Gunten, 2008).

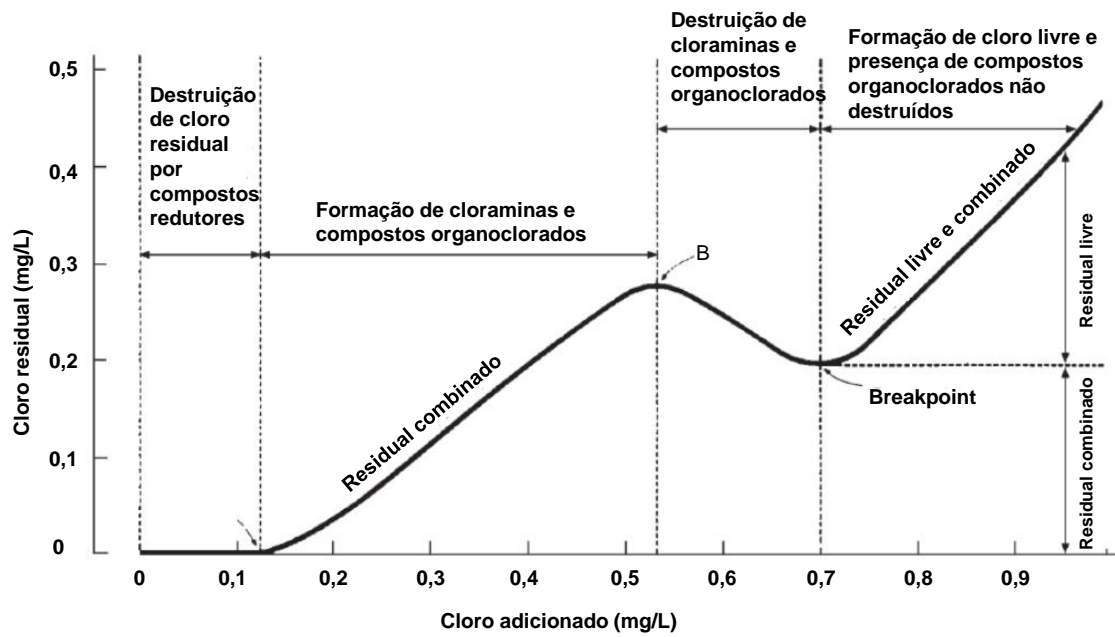


O ácido hipocloroso resultante, é um ácido fraco que se dissocia em solução aquosa de acordo com a **Expressão 2**, originando o ião hipoclorito ( $\text{ClO}^-$ ).



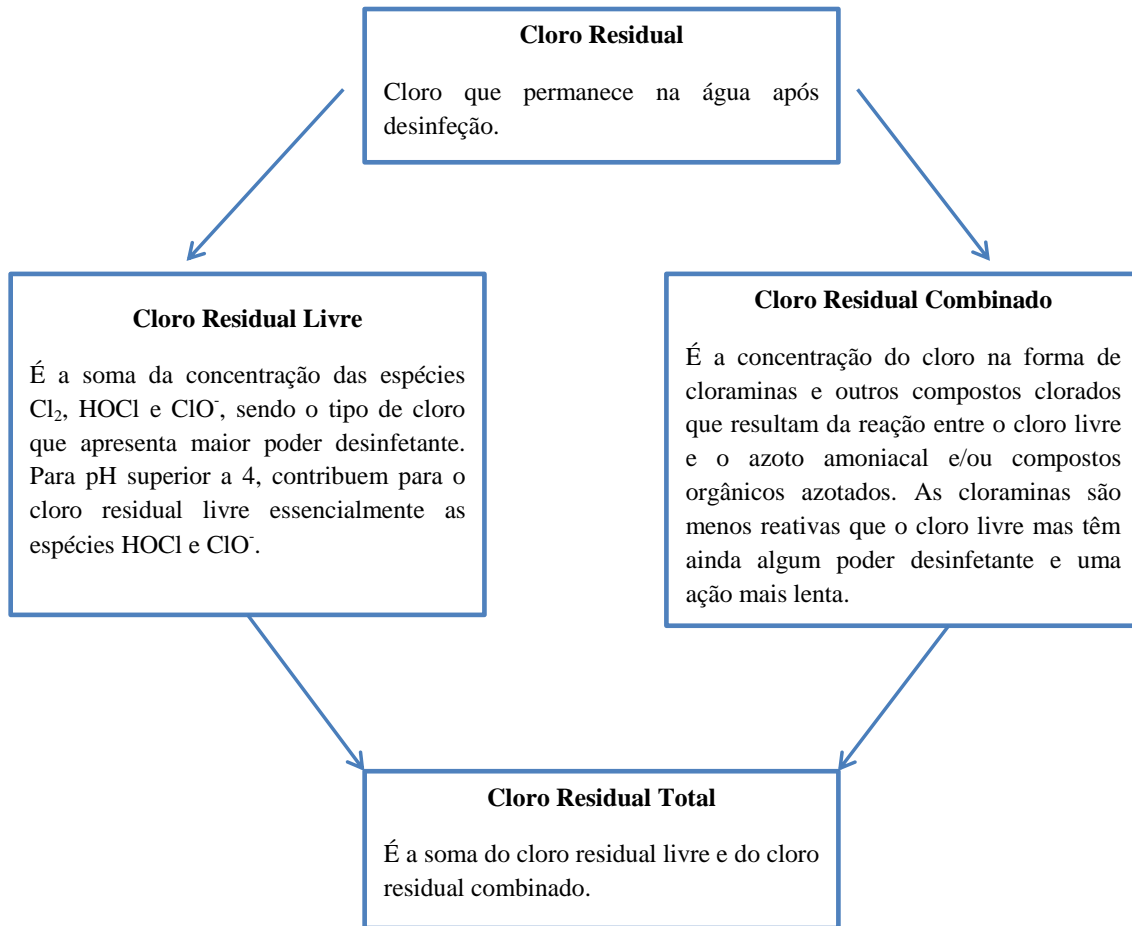
Quando o cloro é adicionado à água, reage inicialmente com os compostos presentes na água e só depois é que permanece disponível para desempenhar a função de desinfetante. Denomina-se carência química de cloro, a quantidade de cloro necessária para reagir com a matéria orgânica, amónia, compostos azotados e outros compostos oxidáveis, como o ferro e o manganês (IRAR, 2007). Desta forma, a desinfeção só estará assegurada caso a dose de cloro adicionada ultrapasse o chamado ponto crítico ou *breakpoint*, conforme representado na **Figura 7**, permitindo a existência de cloro residual livre. Na curva de cloragem ao *breakpoint* apresentada na **Figura 7**, é possível diferenciar quatro fases:

1. Carência química de cloro – as doses iniciais reagem com a matéria orgânica e inorgânica facilmente oxidável.
2. Formação de cloraminas – o cloro adicionado reage com a amónia presente na água, originando cloraminas, que têm capacidade desinfetante. Esta forma de cloro denomina-se cloro residual combinado.
3. Destruição das cloraminas – o cloro adicionado reage com as cloraminas, destruindo-as e reduzindo o cloro residual combinado disponível.
4. Formação de cloro residual livre – a partir de uma determinada dose de cloro deixa de ocorrer destruição de cloraminas (*breakpoint*) e todo o cloro adicionado origina ácido hipocloroso e ião hipoclorito em solução, a que se dá o nome de cloro residual livre.



**Figura 7** – Curva de cloragem ao *breakpoint* (Adaptada de Alves 2010)

A água para consumo humano deve conter continuamente cloro residual livre ou combinado, ou outros agentes desinfetantes, de modo a combater possíveis contaminações (Alves, 2010). A **Figura 8** sumaria as definições de cloro residual.



**Figura 8** - Definições de cloro residual (Vieira, 2004; Deborde & von Gunten, 2008; Black & Veatch, 2010; Alves 2010)

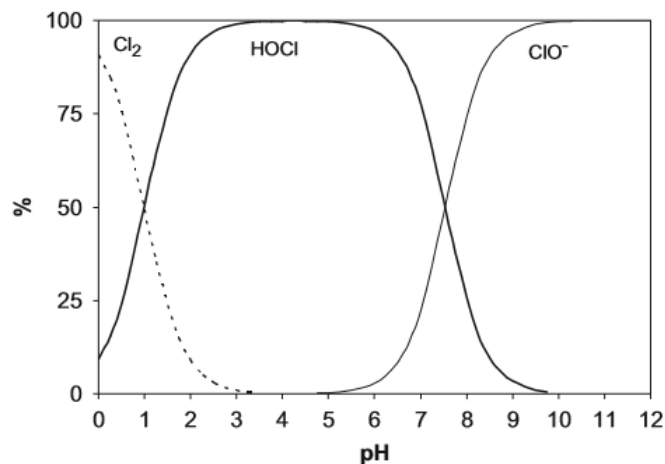
### ***3.2.3. Otimização do processo de desinfecção com cloro***

De modo a otimizar o processo de desinfecção com cloro, garantindo um teor de cloro residual livre ao longo do SD, é necessário um adequado controlo operacional, tendo em conta os parâmetros que influenciam a eficácia da desinfecção.

Existem vários fatores que podem influenciar o processo de desinfecção com cloro: o pH, a temperatura, a turvação, o tempo de contato, a concentração de cloro, o estado de conservação das condutas e a extensão da rede.

Sob condições típicas de tratamento de água, em que o pH está numa gama entre 6 e 9, o ácido hipocloroso e o ião hipoclorito são as principais espécies de cloro.

Assim, na água são observadas diferentes distribuições das espécies de cloro dependendo da temperatura e do pH (**Figura 9**), verificando-se que a pH 6, uma solução de cloro é cerca de 95 % HOCl, enquanto a pH 9 contém cerca de 95 % ClO<sup>-</sup>.



**Figura 9** - Distribuição das espécies cloradas em solução aquosa em função do pH a 25 °C (Deborde & von Gunten, 2008)

As concentrações relativas das duas espécies químicas podem influenciar fortemente a desinfecção, pois ambas têm poder desinfetante, mas o ácido hipocloroso é geralmente muito mais eficaz como desinfetante que o ião hipoclorito. (Black & Veatch, 2010; Clark & Sivaganesan, 2002).

O ácido hipocloroso é denominado de cloro ativo por se tratar da espécie mais ativa no mecanismo de desinfecção, sendo o seu efeito germicida cerca de 100 vezes superior ao do ião hipoclorito (IRAR, 2007).

A um pH baixo corresponde uma desinfecção mais eficaz, devido à predominância da espécie HOCl, enquanto a um pH alto predomina a espécie ClO<sup>-</sup>, o que conduz a uma perda da eficácia da desinfecção (Black & Veatch, 2010). Segundo a OMS (OMS, 1996), a desinfecção pelo cloro é mais eficaz a pH < 8, sendo que uma água com pH > 8, só poderá ser desinfetada eficazmente por supercloragem, resultando na formação de SPD.

Quanto à temperatura da água, esta tem um efeito significativo sobre a inativação da maioria dos organismos. Embora o seu aumento conduza a uma ligeira diminuição da proporção de HOCl em relação a ClO<sup>-</sup>, bem como da estabilidade do cloro na água, o

seu poder germicida aumenta devido à influência da temperatura na cinética de inativação patogénica, pelo que quanto mais baixa for a temperatura, menor a eficiência da desinfeção (IRAR, 2007; Black & Veatch, 2010).

No que diz respeito à turvação, segundo a OMS (OMS, 1996), é fundamental que a turvação da água produzida no tratamento que antecede a desinfeção final não exceda, em média, 1 NTU (unidade de turvação calculada em termos de percentagem de luz refletida pelas partículas contidas numa dada amostra de água).

Relativamente ao tempo de contato, que decorre entre a injeção do cloro e a utilização da água, a OMS (OMS, 1996), considera que 30 minutos é o tempo de contato mínimo para garantir uma desinfeção satisfatória, para uma concentração de cloro residual livre na água de 0,5 mg/L e para águas com turvação inferior a 0,5 NTU (condições ótimas de desinfeção). Os sistemas de desinfeção (reservatórios) devem, por isso, ser concebidos de forma a permitir uma boa interface de contato entre o desinfetante e a água.

O doseamento da concentração de cloro deve ser estabelecido em função do teor de cloro residual livre pretendido na rede de distribuição, tendo em conta a resistência dos microrganismos que se pretendem eliminar. Antes da instalação de um sistema de desinfeção, deve ser avaliada a carência química de desinfetante de modo a determinar a quantidade de cloro necessária (IRAR, 2007).

A USEPA (WHO, 2011) desenvolveu orientações para avaliar a eficácia da desinfeção de água potável face à resistência dos microrganismos que se pretendem eliminar, introduzindo o conceito CT, dado pelo produto entre a concentração residual de desinfetante, expressa em mg/L, e o tempo real de contato entre o desinfetante e os microrganismos, expresso em minutos. Existem tabelas específicas para cada microrganismo, em função do tipo de desinfetante, da temperatura e do pH da água (Clark & Sivaganesan, 2002; IRAR, 2007; Black & Veatch, 2010).

Por forma a garantir a injeção da correta quantidade de cloro, a mesma deve ser ajustada ao caudal de água a tratar, pelo que se privilegia o doseamento em modo automático em função deste.

É importante ter em conta também que elevados valores de cloro residual livre conferem sabor e cheiro à água, podendo conduzir a queixas por parte dos consumidores (Fisher *et al.*, 2011a). De acordo com a OMS, para valores superiores a 0,3 mg/L, os consumidores mais sensíveis podem detetar sabor e cheiro na água. Concentrações excessivas de cloro residual podem também causar corrosão dos sistemas de distribuição (Alves, 2010, Ahn *et al.*, 2012).

No que diz respeito ao estado de conservação das condutas, importa considerar que o tipo de material, revestimento interno e idade da tubagem, a velocidade de escoamento, o tempo de residência, bem como a acumulação de sedimentos e o desenvolvimento de biofilmes, são parâmetros que influenciam o consumo do cloro residual livre, potenciando o desenvolvimento microbiológico e a consequente contaminação da rede de distribuição. O desprendimento do biofilme existente nas tubagens provocado por variações de caudal e alterações no sentido da distribuição, pode causar, por si só, alterações microbiológicas.

Relativamente à extensão da rede, se a mesma for muito extensa, deve ser avaliada a necessidade de instalação de postos de rechloragem, de forma a garantir um teor residual em todos os pontos da rede, dado que a concentração de cloro residual livre diminui ao longo da rede de distribuição. Deve ainda ser efetuada a monitorização regular do teor de cloro residual livre, por zona de abastecimento, em pontos da rede de distribuição, incluindo pontos intermédios, pontos de extremidade de rede, pontos de baixo consumo, recorrendo a equipamentos de medição portátil devidamente calibrados.

Também são previstos e implementados, planos de ação regulares, bem como planos de higienização e desinfeção da rede e dos reservatórios existentes (IRAR, 2007).

#### ***3.2.4. SPD da desinfeção com cloro***

A reação do cloro com a MON existente na água bruta (na sua maioria ácidos húmicos e fúlvicos) origina a formação de SPD halogenados como:

- THM, tais como clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano e bromofórmio;

- ácidos haloacéticos (AHA), tais como ácido monocloraacético, ácido dicloroacético, ácido tricloroacético, ácido monobromoacético e ácido dibromoacético.

Os principais fatores que afetam a formação desses SPD são:

- pH, a valores de pH elevados, ocorre hidrólise de diversos SPD halogenados, pelo que a sua formação atinge o máximo em meio alcalino;
- tempo de contato entre o desinfetante e a água, quanto maior o tempo de contato, maior a probabilidade de formação de SPD;
- temperatura, quando a temperatura aumenta, as reações são mais rápidas conduzindo à maior probabilidade de formação de SPD;
- concentração e propriedades da MON, com aumento da concentração da MON, a formação de SPD aumenta. As propriedades da MON desempenham também um importante papel na formação de SPD;
- concentração de cloro e de cloro residual, com o aumento da dose de cloro e residual, a formação de AHA torna-se maior que a formação de THM. No entanto, a formação limitada de alguns outros SPD continua devido a reações de hidrólise;
- concentração de brometo, na presença de iões brometo (Br), são formados mais SPD derivados de bromo (Nikolaou, 1999).

De modo a limitar ao máximo as reações secundárias que dão origem a SPD indesejáveis, a desinfecção deve ser realizada em águas de boa qualidade química (com baixa carência química de cloro). Nesse sentido, podem adotar-se os seguintes procedimentos (Alegria, 1998; IRAR,2007):

- dar preferência a origens de água com baixos teores de MON;
- assegurar um pré-tratamento adequado por forma a minimizar a MON precursora da formação de SPD;
- efetuar avaliações periódicas da qualidade da água na origem, nomeadamente a concentração da MON, o pH e a variação térmica da água;
- controlar as dosagens de cloro adicionadas à água a tratar, efetuando ajustes na estratégia de tratamento.

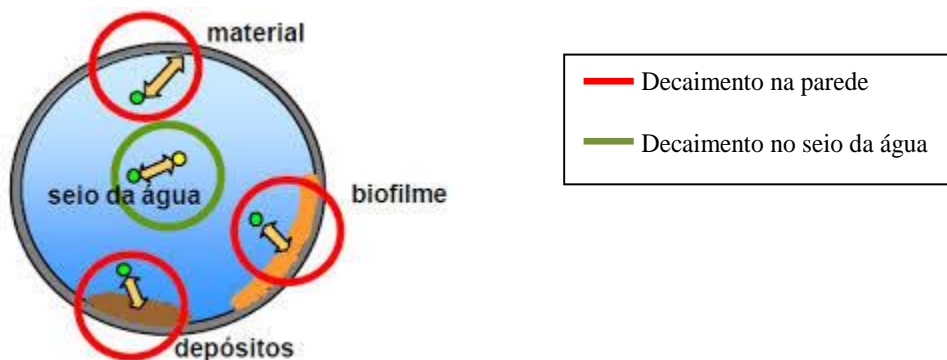
De acordo com o Decreto-Lei n.º 306/2007, sempre que possível, sem que, no entanto, se comprometa a desinfecção, deve ser reduzida a concentração em compostos organoclorados na água. Os compostos especificados são: clorofórmio ( $\text{CHCl}_3$ ), bromofórmio ( $\text{CHBr}_2$ ), dibromoclorometano ( $\text{CHBr}_2\text{Cl}$ ) e bromodiclorometano ( $\text{CHBrCl}_2$ ). O valor máximo de THM de 100  $\mu\text{g/L}$ , correspondente à soma das concentrações dos compostos especificados, deve ser respeitado.

## 4. Decaimento do cloro em SD

### 4.1. Cinética do decaimento de cloro

O cloro não é uma substância conservativa (Ramos *et al.*, 2010) e tem elevado potencial reativo. Quando o cloro é adicionado à água, reage com materiais ou partículas dissolvidas, e a sua concentração irá diminuir ao longo do tempo (Black & Veatch, 2010).

As espécies químicas que resultam da dissolução de cloro na água – ácido hipocloroso e íão hipoclorito – participam em várias reações com compostos de natureza orgânica e inorgânica. Estas reações são geralmente categorizadas em dois tipos: decaimento no seio do líquido e decaimento na parede (**Figura 10**). O primeiro corresponde às reações entre o cloro e outros compostos existentes na água e o segundo corresponde às reações entre o cloro e a parede das tubagens (Vieira & Coelho, 2003; Vieira *et al.*, 2004; Powell *et al.*, 2000a; Fisher *et al.*, 2011a).



**Figura 10** - Decaimento na parede e no seio da água (adaptada de Vieira *et al.*, 2001)

No seio do líquido, o cloro reage com espécies inorgânicas presentes na água tratada e facilmente oxidáveis, tais como amoníaco, ferro, manganês, sulfuretos, nitritos, cianetos, e com compostos menos reativos como os orgânicos (aminoácidos, proteínas, fenóis, etc.), resultantes da MON.

O cloro também decai devido à interação com as paredes das tubagens, designando-se por decaimento de parede, que inclui reações com o material das tubagens (por exemplo, devido a fenómenos de corrosão), com biofilmes e com sedimentos

acumulados. Este decaimento é uma função principalmente das características da tubagem: material, revestimento interno, idade, diâmetro e presença de biomassa depositada (Vieira & Coelho, 2003; Vieira *et al.*, 2004).

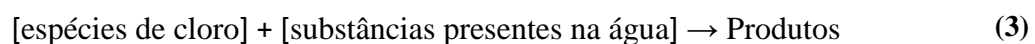
Existem vários fatores que afetam a velocidade e a extensão do decaimento das concentrações de cloro residual na água, tais como o conteúdo orgânico e inorgânico da água, a concentração inicial de cloro adicionado, a idade e o material das tubagens (Clark, 2011), as condições hidráulicas do escoamento (Stoianov & Aisopou, 2014; Kim *et al.*, 2015), a quantidade de biofilme, a temperatura (Monteiro *et al.*, 2015; Speight & Boxall, 2015) e o tempo de percurso da água (Powell *et al.*, 2000a; Menaia *et al.*, 2003; IRAR, 2007; Ramos *et al.*, 2010), sendo que a importância relativa dos diversos fatores é variável (Kiene *et al.*, 1998).

O decaimento de cloro é caracterizado por uma fase inicial, com uma taxa de decaimento alta seguida por uma segunda fase com uma taxa de decaimento mais lenta (Fisher *et al.*, 2011a, Fisher *et al.*, 2011b, Ramos *et al.*, 2010).

Vários investigadores têm realizado estudos para o desenvolvimento de modelos para prever o decaimento de cloro na água potável (Fisher *et al.*, 2011b; Powell *et al.*, 2000 b; Clark & Sivaganesan, 2002).

O decaimento de cloro na água potável envolve um conjunto complexo de reações que normalmente é simplificado para cinética de primeira ordem em modelos de qualidade da água de sistemas de distribuição (Kastl *et al.*, 1999).

A modelação é baseada na reação global apresentada na **Expressão 3**.



Todos esses compostos teriam um mecanismo de reação diferente, com alguns a reagir muito mais rapidamente do que outros. É impraticável modelar todas essas reações separadamente, pelo que todos os mecanismos de decaimento propostos são inevitavelmente simplificações (Powell *et al.*, 2000b).

Devido a esta complexidade e ao facto de a composição exata das substâncias presentes na água permanecer desconhecida, os modelos desenvolvidos adotaram uma abordagem em que as reações individuais que levam ao decaimento de cloro não são consideradas

separadamente, mas como um todo, com uma lei cinética global que representa o decaimento do desinfetante (Vieira *et al.*, 2004).

O método mais simples para representar o decaimento do cloro devido às reações no seio da água e nas paredes das tubagens é definir uma constante de decaimento única  $K$  como a soma das duas constantes de decaimento, conforme a **Expressão 4** (Powell *et al.*, 2000a; Powell *et al.*, 2000b; Hallam *et al.*, 2002).

$$K = k_b + k_w \quad (4)$$

Em que:

$K$  - constante global de decaimento de primeira ordem;

$k_b$  - constante de decaimento no seio da água;

$k_w$  - constante de decaimento na parede da tubagem.

## 4.2. Decaimento do cloro no seio do líquido

### 4.2.1. Aspetos gerais

O modelo cinético clássico para descrever a reação de cloro incluído na maioria dos modelos de qualidade da água é um modelo de primeira ordem no que diz respeito ao cloro de acordo com a **Expressão 5**, cuja integração resulta na **Expressão 6**.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (5)$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (6)$$

Onde:

$C$  - concentração de cloro no tempo  $t$ ;

$C_0$  - concentração inicial de cloro;

$k$  - constante de decaimento de primeira ordem.

Uma lei de velocidade deste tipo significa que a velocidade da reação é proporcional à concentração do cloro. Assim, de acordo com este modelo, a concentração de cloro decai exponencialmente ao longo do tempo (Powell *et al.*, 2000b; Clark & Sivaganesan, 2002; Vieira & Coelho, 2003; Vieira *et al.*, 2004).

O modelo de decaimento de primeira ordem tem sido muito utilizado devido à sua simplicidade e à razoável precisão para representar o decaimento de cloro em sistemas de abastecimento de água (Nejjari *et al.*, 2014).

No entanto, este modelo de primeira ordem simples, embora seja largamente utilizado na modelação de cloro, mostra-se muitas vezes inadequado para prever com exatidão do decaimento ao longo de um SD real (Fisher *et al.*, 2011b).

Assim, atualizando esta descrição de primeira ordem simplista de decaimento de cloro, outros estudos propuseram as leis cinéticas apresentadas na **Tabela 3**.

**Tabela 3** - Modelos cinéticos propostos para descrever o decaimento de cloro (Adaptada de Vieira & Coelho, 2003 e Vieira *et al.*, 2004)

Modelo	Forma diferencial ( $dC/dt =$ )	Forma integrada ( $C =$ )	Parâmetros ajustáveis
Primeira Ordem	$-kC$	$C_0 e^{(-kt)}$	$k$
Ordem $n$	$-kC^n$	$(kt(n-1) + (1/C_0)^{(n-1)})^{-1/(n-1)}$	$k, n$
Primeira ordem limitada	$-k(C-C^*)$	$C^* + (C_0 - C^*) e^{(-kt)}$	$k, C^*$
Primeira ordem paralela	$-k_1C_1, -k_2C_2$ com $C_{1,0} = C_0 \cdot x$ $C_{2,0} = C_0 (1-x)$	$C_0 \cdot x e^{(-k_1 t)} + C_0 (1-x) e^{(-k_2 t)}$	$k_1, k_2, x$

Um dos modelos apresentados é o modelo de ordem  $n$  em relação ao cloro (**Expressão 7**).

$$\frac{dC}{dt} = -KC^n \quad (7)$$

Uma lei cinética de ordem  $n$  significa que a velocidade da reação é proporcional à potência de ordem  $n$  da concentração de cloro (Vieira & Coelho, 2003 e Vieira *et al.*, 2004). O expoente  $n$  toma valores superiores ou iguais a 1, não necessariamente inteiros. Quando  $n$  toma o valor 2, diz-se que a cinética é de segunda ordem em relação ao cloro. Um modelo de segunda ordem descreve um decaimento inicial mais rápido, o que pode reproduzir melhor o comportamento de uma água recém-clorada (Powell *et al.*, 2000b).

O modelo de primeira ordem limitada assume que uma fração da concentração de cloro inicial,  $C^*$ , mantém-se inalterada e apenas o restante,  $C_0 - C^*$ , decai exponencialmente de acordo com a lei de primeira ordem (Vieira *et al.*, 2004).

Este modelo assume que o cloro irá decair até um nível limite e não mais. Tal mecanismo pode existir se o decaimento de cloro é limitado por um teor de matéria orgânica suficiente para reagir com todo o cloro (Powell *et al.*, 2000b).

O modelo de primeira ordem paralela assume dois componentes para a reação, cada um com decaimento de acordo com a lei de primeira ordem: a fração  $x$  da concentração inicial,  $x C_0$ , decai exponencialmente com uma constante de velocidade  $k_1$  e o restante,  $(1 - x) C_0$ , decai exponencialmente também, mas com uma constante de velocidade diferente  $k_2$  (Vieira *et al.*, 2004).

Este modelo cinético permite uma boa descrição do decaimento de cloro em águas onde se verifica a existência de duas fases distintas de decaimento. Uma primeira fase caracterizada por uma elevada taxa de decaimento seguida de uma segunda fase com uma taxa de decaimento mais lenta.

Modelos mais recentes consideram que a velocidade de decaimento do cloro depende não só da concentração de cloro, mas também da concentração e do tipo de substâncias presentes na água (Powell *et al.*, 2000b e Fisher *et al.*, 2011b).

O modelo de segunda ordem global é o único modelo cinético que tem em conta a concentração das substâncias, o que, em teoria, deve dar a este modelo uma vantagem ao modelar águas com um teor de matéria orgânica baixo, em que o cloro não é o reagente limitante (Powell *et al.*, 2000b).

Segundo Deborde e von Gunten (2008), as reações de oxidação dos compostos orgânicos pelo cloro são geralmente de segunda ordem.

O modelo de segunda ordem paralela proposto por Kastl *et al.* (1999) constitui uma variante do modelo de segunda ordem global, de modo a descrever o decaimento de cloro quando ocorrem duas fases distintas, à semelhança do modelo de primeira ordem paralela. Kastl *et al.* (1999) consideraram que um esquema que envolve duas reações

paralelas de compostos orgânicos com cloro é necessário e suficiente para satisfazer os requisitos de modelação de decaimento do cloro com precisão.

Têm sido desenvolvidos vários estudos de modo a perceber qual o modelo cinético adequado para descrever o decaimento do cloro (Kastl *et al.*, 1999; Powell *et al.*, 2000b; Clark & Sivaganesan, 2002; Fisher *et al.*, 2011b). Enquanto Powell *et al.* (2000b) concluíram que, para fins de modelação de rede geralmente é razoável supor cinética de primeira ordem para o decaimento de cloro, uma vez que a melhoria do ajuste de modelos mais complexos em relação ao modelo de primeira ordem simples é marginal, Kastl *et al.* (1999) consideram necessário um modelo de segunda ordem paralela. Já de acordo com Vieira *et al.* (2004) e Ramos *et al.* (2010), o modelo de primeira ordem paralela parece proporcionar melhores ajustes e maior flexibilidade de utilização em modelos de simulação de qualidade da água nas redes.

Uma vez que o aumento de complexidade dos modelos pode inviabilizar a sua aplicação pelas EG de sistemas de abastecimento de água, o método mais pragmático é assumir decaimento de primeira ordem.

No entanto, nos estudos mais recentes é apontada a necessidade de incorporar nos modelos os fatores que influenciam o decaimento do cloro, nomeadamente a temperatura (Fisher *et al.*, 2011b; Monteiro *et al.*, 2015; Speight & Boxall, 2015), e a concentração inicial de cloro (Fisher *et al.*, 2012), a concentração de MON (Brown *et al.*, 2011) e as condições hidráulicas de escoamento (Menaia *et al.*, 2003; Stoianov & Aisopou, 2014; Kim *et al.*, 2015).

Apesar dos programas de modelação de qualidade terem vindo a incorporar as leis cinéticas sucessivamente apresentadas por vários autores, mantém-se o uso quase generalizado da cinética de primeira ordem. Um exemplo é o programa EPANET, que permite a utilização de cinéticas de ordem zero, de 1ª ordem, de ordem  $n$  e de  $n$  limitada, ficando ao critério do utilizador a aplicação do modelo que melhor se aplique ao seu sistema (Vieira, 2002).

Para a utilização de formulações que incluam diversos fatores poderá ser utilizado o programa EPANET-MSX (EPANET Multi-Species Extension, 2008) que é uma extensão do EPANET versão padrão (2000) e permite modelar qualquer sistema de

múltiplas espécies químicas interativas (Fisher *et al.*, 2001b; Monteiro *et al.*, 2014; Suse *et al.*, 2014).

#### 4.2.2. Determinação da constante cinética de decaimento no seio da água ( $k_b$ )

A determinação da constante cinética que caracteriza o decaimento no seio da água pode ser efetuada a partir de ensaios em laboratório, chamados “teste de garrafa”, dado que esse decaimento depende somente das características da água (Coelho *et al.*, 2006, Ahn *et al.*, 2012, Monteiro *et al.*, 2014).

Assim, pode estimar-se o valor da constante cinética de decaimento no seio da água  $k_b$  para reações de primeira ordem, colocando uma amostra de água numa série de garrafas de vidro não reativas e analisando o conteúdo de cada garrafa em diferentes intervalos de tempo pré-determinados. Como a reação é de primeira ordem, a linearização da **Expressão 6**, permite o cálculo da constante cinética de primeira ordem, através da **Expressão 8**.

$$\log \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (8)$$

Em que a representação gráfica dos valores de  $\log (C_t/C_0)$  em função do tempo, permite obter uma linha reta onde  $C_t$  é concentração no instante  $t$  e  $C_0$  é a concentração no instante inicial, sendo o valor de  $k_b$  estimado a partir do declive da reta (IRAR e LNEC, 2004).

Segundo Beleza (2005) não existe um “valor padrão” para a constante cinética de decaimento do cloro no seio da água, pelo que este pode apresentar diferenças consideráveis de água para água, devido à variação de diversos fatores como a origem da água, o local, a natureza geológica, a captação (água subterrânea ou superficial), possíveis contaminações, operações e/ou processos de tratamento, temperatura em que ocorrem as reações, entre outros.

### 4.3. Decaimento do cloro na parede

#### 4.3.1. Aspetos gerais

No decorrer do processo de transporte da água nas tubagens, as substâncias dissolvidas podem ser transportadas para junto da parede da tubagem e reagir com materiais que lá se encontrem, como produtos de corrosão ou biofilme (IRAR e LNEC, 2004; Coelho *et al.*, 2006).

Rossmann *et al.* (1994) apresentaram um modelo para o decaimento de cloro que assenta na transferência de massa entre o seio do escoamento e a parede da tubagem. Considerando leis cinéticas de 1ª ordem, tanto para as reações no seio da água como para as reações da parede da tubagem, a velocidade de reação ( $r$ ) na tubagem pode ser traduzida pela **Expressão 9**:

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (9)$$

Em que:

$k_w$  – constante de decaimento na parede da tubagem (comprimento/tempo);

$k_f$  – coeficiente de transferência de massa entre o seio líquido e a parede (comprimento/tempo);

$C$  – concentração do desinfetante;

$r$  – velocidade de reação;

$R$  – raio da tubagem.

O coeficiente de transferência de massa é usualmente expresso em termos do número adimensional de Sherwood ( $Sh$ ) (**Expressão 10**).

$$k_f = Sh(D/d) \quad (10)$$

Em que:

$D$  – difusão molecular do cloro na água (comprimento<sup>2</sup>/tempo);

$d$  – diâmetro da tubagem;

$Sh$  – número adimensional de Sherwood.

O  $Sh$  depende das condições hidráulicas de escoamento, podendo ser expresso em função do regime de escoamento: laminar ( $Re < 2.300$ ) obtido pela **Expressão 11** e turbulento ( $Re > 2.300$ ) de acordo com a **Expressão 12** (Clark *et al.*, 2010).

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 (d/L) Re Sc}{1 + 0,04 [(d/L) Re Sc]^{2/3}} \quad (11)$$

$$Sh = 0,0149 Re^{0,88} Sc^{1/3} \quad (12)$$

Em que:

$L$  – comprimento da tubagem;

$Re$  – número de Reynolds;

$Sc$  – número de Schmidt.

O número de Schmidt é dado pela divisão da viscosidade cinemática da água ( $\nu$ ) pela difusão molecular do cloro na água (**Expressão 13**).

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (13)$$

#### ***4.3.2. Determinação da constante cinética de decaimento devido ao efeito de parede ( $k_w$ )***

A constante cinética de decaimento devido ao efeito de parede  $k_w$  é característica de cada tubagem, sendo influenciada pelo material, diâmetro interno e idade da tubagem e pela existência de corrosão ou de biofilme (Hallam *et al.*, 2002).

Segundo Clark (2011), o decaimento de parede é menor em tubagens de PVC do que em tubagens de ferro fundido dúctil sem revestimento interno. De acordo com IRAR e LNEC (2004), não é exetável um consumo de parede significativo em tubagens de plástico relativamente novas, para os desinfetantes comuns, como o cloro.

Para uma determinação dos parâmetros do decaimento devido às reações que ocorrem com as paredes dos componentes do sistema, o mais aproximada possível, seria necessária uma análise exaustiva em laboratório do comportamento da água em contato com tubagens retiradas da rede, em variedade de materiais, idades e condições representativas da rede em estudo. No entanto, esse tipo de análise implica custos

significativos, que não são viáveis na utilização da modelação de qualidade de água corrente.

Contudo, após o conhecimento das características do decaimento no seio da água, é possível obter estimativas viáveis, uma vez que deduzindo ao decaimento total, a parcela de decaimento no seio da água, obtida por intermédio de cinética determinada laboratorialmente para condições semelhantes, obtém-se a parcela do decaimento devida à interação com a parede (**Expressão 4**) (Hallam *et al.*, 2002; IRAR e LNEC, 2004).

Assim, aplicando ao modelo o valor da constante cinética de decaimento no seio da água determinado experimentalmente, o valor da constante cinética de decaimento devido ao efeito de parede  $k_w$  pode ser obtido indiretamente por comparação com dados de calibração obtidos a partir de medições de campo, isto é, recorrendo a um método de tentativa-erro para determinar que valores dessa constante conduzem a uma maior aproximação entre as medições de campo e os resultados da simulação (Haider *et al.*, 2015).

Para reações de primeira ordem,  $k_w$  pode estar compreendido entre 0 e um máximo de 1,5 m/d (IRAR e LNEC, 2004).

## 5. Modelação

### 5.1. Modelação de SD de água

A modelação de SD de água é uma ferramenta que conjuga o conhecimento científico no âmbito da água e seus tratamentos com métodos numéricos e tecnologias informáticas, de modo a estimar o comportamento real do sistema. Assim os programas de simulação têm capacidade de replicar matematicamente a dinâmica de um SD de água (Machell *et al.*, 2010).

Os modelos de simulação de redes de distribuição de água são usados rotineiramente para investigações operacionais e para fins de projeto de rede.

O *software* de simulação está em uso generalizado na indústria da água para análise estratégica de fornecimento, definição de estratégias de controlo, extensões de rede e planeamento de manutenção. Estão disponíveis vários programas que permitem às empresas de água construir modelos de simulação, sendo que os mais populares incluem EPANET, AQUIS, Info Works Ws e SynerGEE Water. Estes programas de simulação possibilitam a implementação de modelos matemáticos de uma rede de distribuição de água que combinam as leis físicas que regem as redes com as equações que relacionam a pressão e caudal para cada elemento operacional (Machell *et al.*, 2010). Na **Tabela 4** são apresentados diversos programas de modelação hidráulica e de qualidade de água, respetiva empresa e relação com o EPANET.

Os modelos de simulação são instrumentos computacionais que permitem, analisar e prever, com uma margem de erro estimável, o comportamento hidráulico e de parâmetros de qualidade da água do sistema, a partir das características dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados, constituindo assim uma forma rápida e eficaz de realização de análises de sensibilidade e a simulação dos cenários mais variados, com suficiente aproximação, sem ser necessário interferir com o sistema em causa ou comprometer-lo com modos de operação desconhecidos. Permitem ainda a antecipação de problemas, bem como a avaliação das soluções antes dos investimentos, através da simulação do comportamento do sistema face a gamas alargadas de condições operacionais e ambientais (Coelho *et al.*, 2006).

**Tabela 4** - Programas de modelação hidráulica e de qualidade de água (Adaptada de USEPA, 2005)

<b>Programa de modelação</b>	<b>Empresa</b>	<b>Baseado no EPANET</b>
AQUIS	Seven Technologies	-
EPANET	USEPA	X
InfoWater H2ONET/H2OMAP	MWHSoft	X
InfoWorks WS	Wallingford Software	-
MikeNet	DHI, Boss International	X
Pipe2000	University of Kentucky	-
PipelineNet	SAIC, TSWG	X
SynerGEE Water	Advantica	-
WaterCAD/WaterGEMS	Haestad Methods	X
STANET	Fisher-Uhrig Engineering	-
Wadiso	GLS Eng. Software	X

## 5.2. Aplicação da modelação de SD de água em Portugal

Em Portugal, o modelo da rede de Almada, elaborado pelo LNEC em 1981, deu início ao desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos de SD de água. Seguiram-se alguns anos em que essa atividade se encontrou centralizada essencialmente no âmbito académico e científico e somente depois as empresas de consultoria começaram a ganhar espaço de mercado na prestação deste tipo de serviços para as EG. Numa fase inicial os programas eram pouco amigáveis e pouco acessíveis à generalidade das EG portuguesas.

Atualmente a situação é bastante diferente, existindo uma grande acessibilidade ao *hardware* e *software* de base para o desenvolvimento deste tipo de modelos, visto que os computadores atuais têm já capacidade para suportar um modelo de uma rede de dimensões e complexidade consideráveis. Além do *software* comercial, existe também *software* de desenvolvimento de modelos com grande qualidade e disponível gratuitamente, também em português, como é o caso do programa EPANET, na versão elaborada e disponibilizada pelo LNEC (Coelho *et al.*, 2006).

O EPANET é um dos simuladores mais atrativos para as EG, consultores, investigadores, académicos e estudantes portugueses, e também o utilizado no presente trabalho. A filosofia transparente de distribuição gratuita tanto do programa como do seu código computacional faz com que beneficie de uma alargada comunidade de utilizadores em todo o mundo, sendo um simulador amplamente testado e credível (IRAR e LNEC, 2004).

No entanto, no seio das EG, apenas recentemente se começa a refletir essa evolução. A realidade comprova que só é possível tirar os devidos benefícios da modelação matemática quando o desenvolvimento dos modelos assenta em procedimentos internos da EG bem definidos, que permitam construir, atualizar e explorar modelos fiáveis e eficientes, conduzindo tendencialmente ao abandono dos modelos desenvolvidos por terceiros.

O desenvolvimento de modelos de simulação dos sistemas pode e deve constituir um bom motivo para integrar a informação arquivada nos diversos sistemas internos de informação eventualmente existentes (sistemas de informação geográfica, de gestão de clientes e faturação, de telegestão, de apoio à manutenção, etc.), melhorando a qualidade dos dados disponíveis (Coelho *et al.*, 2006). Esse desenvolvimento deverá seguir uma abordagem estruturada e sistemática, garantindo o melhor aproveitamento possível do esforço e recursos investidos, ao longo da vida útil do modelo. Entre 2003 e 2006, o LNEC promoveu o programa INSSAA, cujo objetivo foi promover a utilização de ferramentas de simulação para apoio à gestão operacional dos sistemas, tendo constituído um bom exemplo dessa abordagem (Coelho *et al.*, 2007).

## **5.3. EPANET**

### ***5.3.1. Aspetos gerais***

O EPANET é um programa de computador criado para constituir 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. Possibilita a execução de simulações estáticas e dinâmicas do comportamento hidráulico e de

qualidade da água de sistemas de distribuição em pressão. A simulação estática permite reproduzir as características do sistema simulado para um dado cenário de consumos. A simulação dinâmica é utilizada quando é efetuada uma simulação da evolução do sistema ao longo do tempo, através de uma sequência de equilíbrio hidráulico obtida para sucessivos instantes (IRAR e LNEC, 2004).

O EPANET pode ser utilizado em diversas situações nas quais seja necessário realizar simulações de SD. O estabelecimento de cenários de projeto, como a 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. Permite apoiar na análise de estratégias alternativas de gestão, de modo a melhorar a qualidade da água ao longo do sistema, recorrendo à simulação de situações como:

- alterações na utilização de origens de água num sistema com múltiplas origens;
- utilização de tratamento adicional, como a recloração;
- seleção de tubagens para limpeza e substituição.

No EPANET uma rede é constituída por tubagens, nós (junções das tubagens), bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo e/ou reservatórios de nível variável. 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 ao longo da rede, durante o período de simulação.

Em ambiente Windows, o EPANET apresenta um ambiente integrado para editar dados de entrada da rede, executar simulações hidráulicas e de qualidade da água e visualizar os resultados em vários formatos (como mapas de rede, tabelas de dados, gráficos) (IRAR e LNEC, 2004).

### ***5.3.2. Metodologia para construção de modelos***

O modelo de um sistema de abastecimento de água parte de uma representação esquemática da rede, na qual existe um conjunto de nós, cuja posição é definida através de coordenadas planimétricas e de uma cota, ligados por troços que representam os

componentes físicos: tubagens, válvulas e bombas. As entradas e saídas de caudal da rede (abastecimento e consumo, respetivamente) acontecem nos nós.

A malha da rede – conjunto de troços ligados entre si sucessivamente formando um circuito fechado – é um conceito importante no comportamento dos sistemas. As redes de distribuição de água podem classificar-se, relativamente ao seu traçado, em:

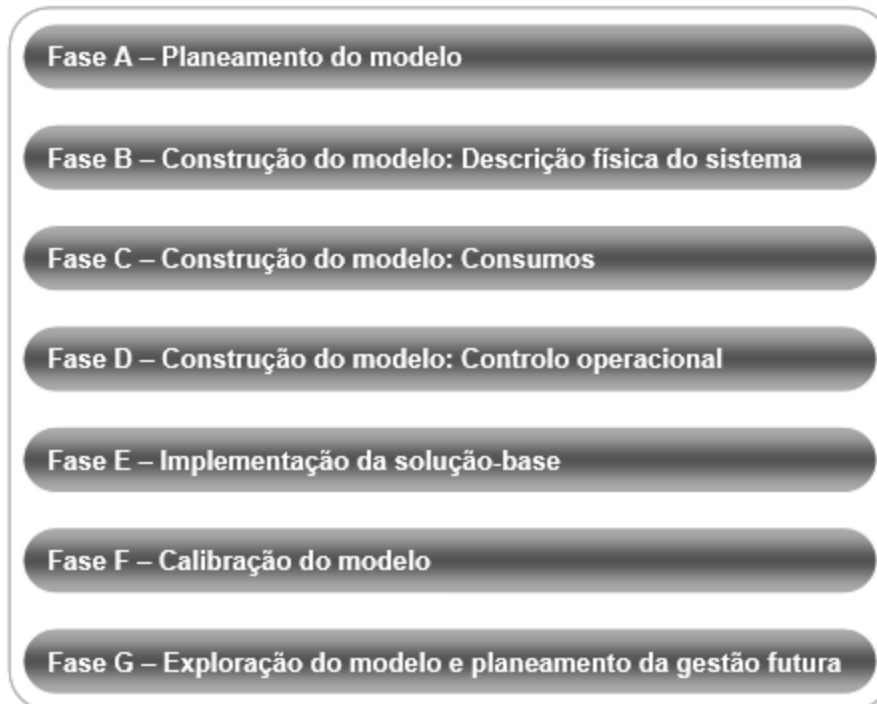
- redes malhadas (ou emalhadas);
- redes ramificadas;
- redes mistas.

As redes designam-se malhadas se incluem malhas, nesses casos o escoamento é bidirecional. Nas redes ramificadas, existe uma conduta principal longitudinal que se ramifica, não existindo malhas, nesses casos o escoamento é, normalmente, unidirecional, exceto se existir mais do que um ponto de alimentação do sistema (reservatório ou estação elevatória). As redes dizem-se mistas, se são constituídas por uma conjugação de redes malhadas e ramificadas, sendo nesses casos o escoamento, simultaneamente, bidirecional e unidirecional (Sousa, 2001; Coelho *et al.*, 2006).

A modelação de um SD de água no EPANET é efetuada geralmente de acordo com os passos seguintes (IRAR e LNEC, 2004):

- 1 – desenhar uma representação esquemática do SD (mapa da rede) ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um ficheiro de texto;
- 2 – editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
- 3 – descrever as condições de operacionalidade do sistema;
- 4 – selecionar um conjunto de opções de simulação;
- 5 – executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
- 6 – visualizar os resultados da simulação.

O faseamento aconselhado por Coelho *et al.* (2006) para o desenvolvimento de um modelo de simulação é o apresentado na **Figura 11**.



**Figura 11** - Faseamento do desenvolvimento de um modelo (Coelho *et al.*, 2006)

Assim, a construção de um modelo de simulação no EPANET envolve os componentes físicos que constituem o SD (**Tabela 5**), e os componentes não físicos (**Tabela 6**), que correspondem aos parâmetros operacionais.

**Tabela 5 - Componentes físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (IRAR e LNEC 2004, Coelho *et al.*, 2006)**

		TIPO				
		Nó		Troço		
<b>ELEMENTO</b>	Nó	Reservatório Nível Fixo (RNF)	Reservatório Nível Variável (RNV)	Tubagem	Bomba	Válvula de Controlo
<b>FUNÇÃO</b>	Ponto de ligação entre dois ou mais troços; saída (consumo) ou entrada (abastecimento) de água no sistema.	Armazenamento a partir de um nível de água fixo e com uma capacidade ilimitada; fornece ou recebe água do sistema.	Armazenamento com capacidade limitada e nível de água variável, em função do balanço dos caudais de entrada e saída; fornece ou recebe água do sistema.	Transporte de água entre dois nós.	Fornecimento de energia ao escoamento entre dois nós, aumentando a carga hidráulica.	Regulação do caudal ou da carga hidráulica entre dois nós.
<b>DADOS DE ENTRADA</b>	Cota; Consumo; Qualidade inicial da água.	Nível de Água; Qualidade inicial da água.	Cota do fundo (altura de água = zero); Diâmetro (ou curva de volume, se a forma não for cilíndrica); Altura de água mínima; máxima e inicial para o cenário a simular; Qualidade da água inicial.	Nó inicial e final; Diâmetro; Comprimento; Coeficiente de rugosidade; Estado (aberto, fechado ou contendo uma válvula de retenção; Coeficiente de reação no seio do escoamento e Coeficiente de reação na parede (para a simulação de qualidade).	Nó inicial e final; Curva da bomba.	Nó inicial e final; Diâmetro; Parâmetro de controlo na válvula; Estado.
<b>RESULTADOS DE SIMULAÇÃO</b>	Carga hidráulica (nível de água no caso de RNF e RNV); Pressão (altura piezométrica); Qualidade da água.	(-)	Carga hidráulica (nível de água); Qualidade da água.	Caudal; Velocidade; Perda de carga; Fator de resistência; taxa de reação média e concentração média para o parâmetro de qualidade da água simulado;	Caudal bombeado; Altura de elevação.	Caudal; Perda de carga.

**Tabela 6** - Componentes não-físicos do modelo de simulação EPANET 2.0 (IRAR e LNEC 2004, Coelho *et al.* 2006)

Componentes	Definição	
Curva da Bomba	Representa uma relação entre a altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento desta, para uma velocidade de rotação nominal.	
Curvas	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 a altura de água.
	Curva de Perda de Carga	É utilizada para descrever a perda de carga através de uma Válvula Genérica (VG), em função do caudal.
Padrões Temporais	São constituídos por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, por 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 seleccionados em função do tempo, alturas de água num reservatório de nível variável e valores de pressão em pontos específicos da rede.	

### 5.3.3. Modelação de qualidade da água

A completa caracterização da rede e uma modelação hidráulica fiável são requisitos fundamentais para a correta modelação de qualidade da água (IRAR e LNEC, 2004).

Os modelos de qualidade da água surgiram no fim da década de 80, na sequência do sucesso atingido pelos modelos hidráulicos, alcançando a sua atual maturidade a partir do fim da década de 90 (Coelho *et al.*, 2006).

O EPANET apresenta as seguintes possibilidades no que respeita à modelação da qualidade da água (IRAR e LNEC, 2004):

- modelação do transporte de um constituinte não reativo (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 (como o cloro residual) ou crescimento (como um SPD) 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;
- 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, com possibilidade de modificação individual 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 SPD.

O modelo de qualidade da água acrescenta ao modelo hidráulico, equações que traduzem o transporte, mistura e transformação da concentração de substâncias que se

comportem como estando dissolvidas na água. As equações utilizadas no EPANET para um modelo de qualidade da água baseiam-se na conjugação dos princípios da conservação da massa com leis cinéticas de reação.

Segundo Coelho *et al.* (2006), os modelos simulam três processos fundamentais. Dois dos quais se devem ao movimento da água, e conseqüentemente à hidráulica do sistema: o transporte por advecção em tubagens e a mistura nos nós de junção.

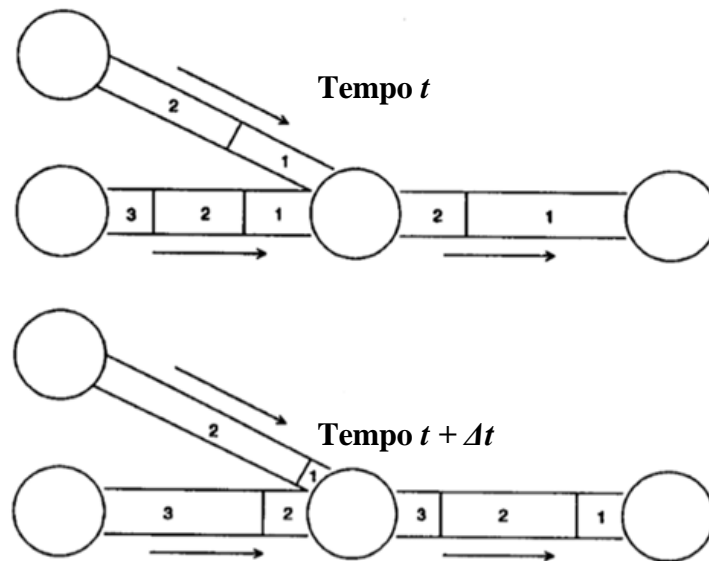
A modelação do processo de advecção é efetuada essencialmente pelas equações que representam o equilíbrio hidráulico, mais especificamente pelos valores do caudal ou da velocidade de escoamento em cada troço.

A modelação do processo de mistura nos nós, que tem lugar em qualquer nó com entrada de mais do que um caudal, contando com um eventual caudal de abastecimento exterior, assume que a mistura é completa e instantânea, respeitando o princípio de conservação da massa.

O terceiro processo, que afeta substâncias não-conservativas (como o cloro), resulta em mudanças na concentração da substância enquanto é transportada ao longo do escoamento. É o efeito conjunto da transformação inerente ao contato e permanência dessa substância na água que circula no sistema. Este pode ser devido a reações da substância com ela própria, com a água e com outras substâncias nela presentes, com o material das paredes das tubagens e órgãos de armazenamento, e com o biofilme, sedimentos e partículas existentes no interior do sistema. Assim, o processo de transformação pode resultar em decaimento, crescimento ou transformação noutra substância.

O EPANET utiliza o método Lagrangeano para seguir o destino de parcelas de água (modelados como segmentos), à medida que estas se deslocam nas tubagens e se misturam nos nós, entre passos de cálculo com comprimento fixo.

O tamanho dos segmentos varia à medida que o tempo avança. O tamanho do segmento mais a montante na tubagem aumenta com a entrada de água, enquanto uma igual diminuição de tamanho ocorre no segmento mais a jusante à medida que a água abandona a tubagem, e o tamanho dos segmentos intermédios mantém-se inalterado, conforme **Figura 12** (Rossman e Boulos, 1996).



**Figura 12** - Comportamento dos segmentos segundo o método Langrangeano (adaptada de Rossman e Boulos, 1996)

No final de cada passo de cálculo é atualizada a qualidade da água em cada segmento refletindo qualquer reação que possa ter ocorrido ao longo do passo de cálculo. Em seguida, é calculada a concentração da água em cada nó, tendo em conta que a água que entra em cada nó proveniente de parcelas de água de várias tubagens com caudal é misturada com o caudal externo (caso exista), sendo a contribuição do volume proveniente de cada segmento o produto do caudal na tubagem pelo passo de cálculo. Posteriormente são adicionadas, aos valores de qualidade nos nós, contribuições de origens externas. Por fim são criados novos segmentos em tubagens a jusante de nós ou reservatórios, sendo o volume do segmento o produto do caudal nessa tubagem pelo passo de cálculo e a concentração no novo segmento igual à nova concentração no nó.

O processo repete-se para cada passo de cálculo de qualidade da água. No início, cada tubagem da rede é constituída por um único segmento com concentração igual à concentração inicial no nó de montante (IRAR e LNEC, 2004; Coelho *et al.*, 2006).



## 6. Caso de Estudo

### 6.1. Águas da Azambuja

A sociedade Águas da Azambuja, S.A. (AdAz), com sede em Azambuja, foi constituída em 10 de março de 2009 em resultado da adjudicação do Concurso Público Internacional lançado pelo Município de Azambuja em abril de 2007 para a Concessão da exploração e gestão conjunta dos serviços municipais de distribuição de água para consumo público e de recolha e rejeição de águas residuais no concelho, por um período de 30 anos.

A AdAz é detida pela AQUAPOR (75 %) e pela ECOBREJO (25 %). As valências e *know-how* na área da distribuição de água e de recolha de efluentes, diretamente aos consumidores finais, concentram-se no acionista maioritário AQUAPOR, uma vez que está presente em várias concessionárias e empresas de serviços, algumas com mais de 20 anos de atividade no setor das águas (AdAz, 2016b).

A AdAz é responsável pela distribuição de água e pela drenagem de efluentes diretamente aos consumidores finais (sistema em baixa), enquanto a produção de água para consumo humano e o tratamento de efluentes são da responsabilidade de Águas de Lisboa e Vale do Tejo (sistema em alta).

Atualmente, Azambuja dispõe de cerca de 283 km de rede de distribuição de água de abastecimento e 139 km de rede de drenagem de águas residuais. A taxa de cobertura do sistema de abastecimento de água é de 98 %, enquanto na drenagem e tratamento de efluentes se observa uma taxa de cobertura de 78 % (AdAz, 2016b).

A população do concelho de Azambuja aproxima-se dos 22.000 habitantes, que se traduzem num universo de 9.874 clientes, dos quais 88 % são domésticos.

No município de Azambuja, a Águas de Lisboa e Vale do Tejo é responsável, desde novembro de 2004, pelo abastecimento "em alta" dos reservatórios municipais que servem as populações.

## 6.2. Subsistema de Vila Nova da Rainha - caracterização

Para efetuar o presente estudo foi selecionado o subsistema de Vila Nova da Rainha por se tratar de um sistema mais estável ao nível de pressão na rede e que apresenta poucas ocorrências no que diz respeito a avarias e/ou roturas, que poderiam condicionar o estudo.

Vila Nova da Rainha (**Figura 13**) é uma freguesia do concelho de Azambuja com 24,9 km<sup>2</sup> de área e 926 habitantes (Censos 2011), que se situa a 7,5 km da vila de Azambuja.

Neste subsistema o consumo de água é maioritariamente doméstico, com pouco comércio e sem indústria. As habitações são essencialmente moradias, existindo casos pontuais de prédios com um máximo de 3 pisos. Existe uma escola primária e um complexo desportivo que são considerados os pontos de maior consumo. Importa salientar também a existência de jardins com consumos elevados, mas apenas em períodos sazonais.

A rede de abastecimento de água em estudo tem cerca de 8 km de comprimento, 372 ramais e 406 clientes ativos, aos quais foi faturado um volume total de 38.125 m<sup>3</sup> em 2015.

A mesma é composta por um conjunto de tubagens subterrâneas em Policloreto de Vinilo (PVC) com diâmetros nominais compreendidos entre 63 e 160 mm, que asseguram a distribuição da água em pressão. As tubagens encontram-se a aproximadamente 1 m de profundidade, no terreno, protegidas por almofadas de proteção constituídas por areias de pequena granulometria, pó de pedra calcária e *tout venant*, e por rede e fita sinalizadora com fio condutor, de modo a facilitar a deteção das tubagens com equipamento de prospeção magnético. A rede de águas residuais encontra-se a uma profundidade de 1,5 m.



**Figura 13** - Freguesia de Vila Nova da Rainha e respetiva rede de distribuição de água

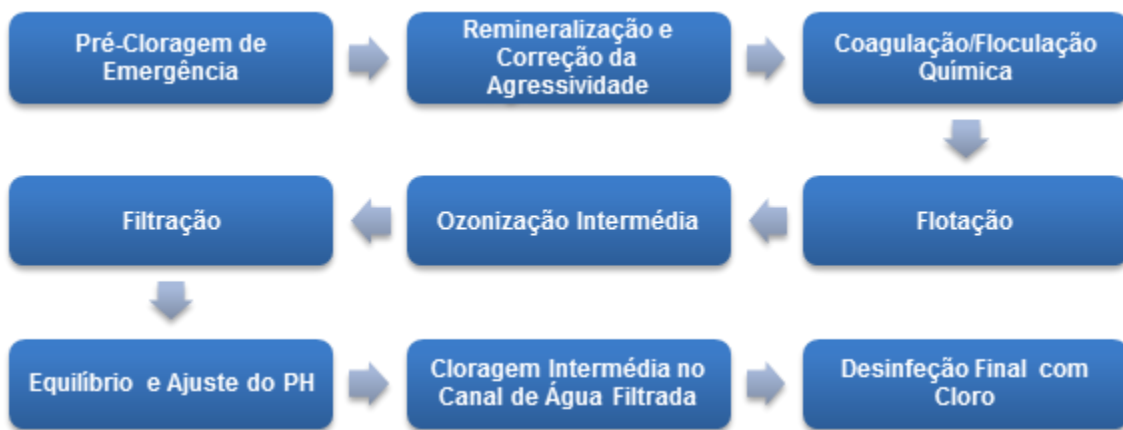
Quanto ao traçado classifica-se como uma rede mista, pois é maioritariamente malhada (ou emalhada) e outra parte do traçado é ramificada.

A adução de água ao Reservatório de Vila Nova da Rainha é uma mistura proveniente de duas origens distintas: captações superficiais de Castelo do Bode e de Valada do Ribatejo, sendo o fornecimento dessa água efetuado pela EG em alta Águas de Lisboa e Vale do Tejo. De acordo com informação dessa entidade, a água fornecida ao referido ponto de entrega (PE) tem origem nas ETA de Asseiceira e de Vale da Pedra, em proporções muito variáveis que podem incluir a totalidade de cada uma destas origens, ou seja, em determinadas situações pode ser entregue água procedente exclusivamente de uma única ETA.

A ETA da Asseiceira (**Figura 14**) produz anualmente cerca de 160 milhões m<sup>3</sup> de água, para consumo humano (Águas de Portugal, 2016a), sendo constituída pela fileira de tratamento apresentada na **Figura 15**.

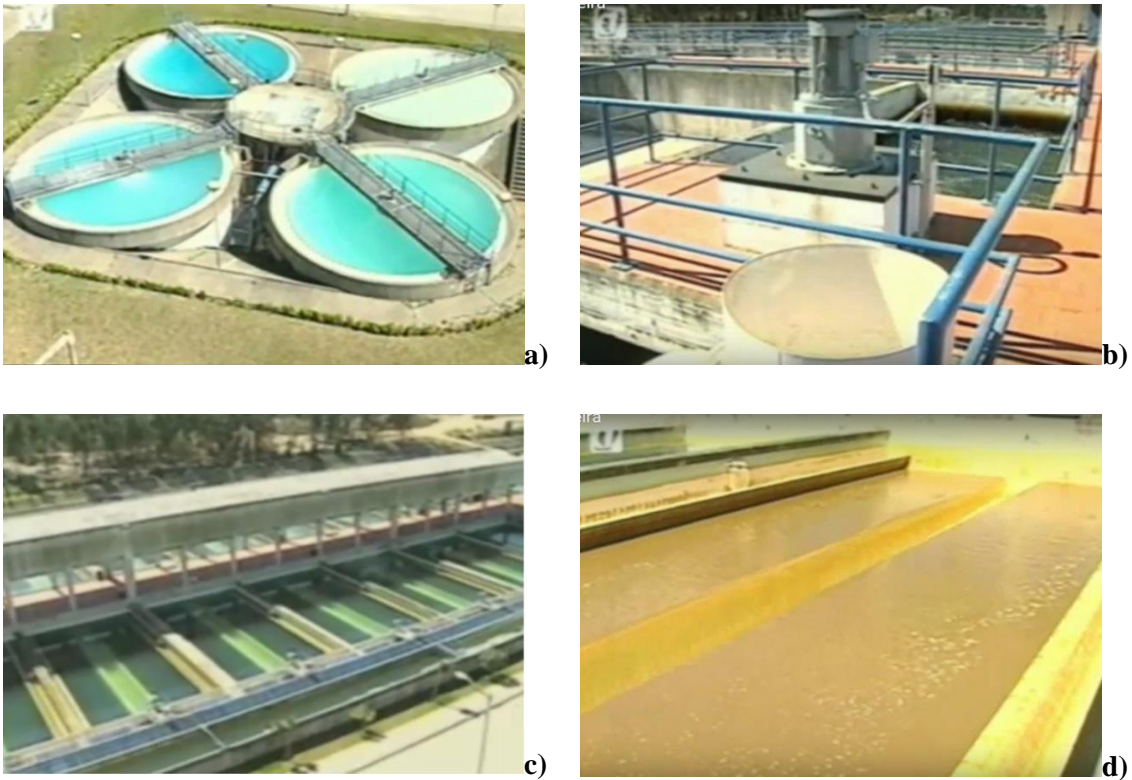


**Figura 14** – Fotografia aérea da ETA da Assêiceira (Águas de Portugal, 2016a)



**Figura 15** – Fileira de tratamento da ETA da Assêiceira

Na **Figura 16** são apresentados exemplos das operações e processos de tratamento da ETA da Assêiceira.



**Figura 16** – Exemplo de operações e processos da ETA da Asseiceira **a)** remineralização e correção da agressividade, **b)** coagulação/floculação, **c)** filtros de areia e **d)** filtro de areia em lavagem

A ETA de Vale da Pedra (**Figura 17**) tem uma capacidade nominal atual de 240.000 m<sup>3</sup>/d (Águas de Portugal, 2016b), estando atualmente a sofrer obras recuperação e ampliação. A fileira de tratamento da ETA de Vale da Pedra é apresentada na **Figura 18**.



**Figura 17** – Fotografia aérea da ETA de Vale da Pedra (Águas de Portugal, 2016b)



**Figura 18** – Fileira de tratamento da ETA de Vale da Pedra

Na **Figura 19** são apresentados exemplos das operações e processos de tratamento da ETA de Vale da Pedra.



a)



b)



c)



d)

**Figura 19** – Exemplo de operações e processos da ETA de Vale da Pedra **a)** coagulação/floculação, **b)** decantação, **c)** filtração e **d)** cloragem

O Reservatório de Vila Nova da Rainha (**Figura 20**) foi construído em 1995 em betão armado, é constituído por uma célula e tem uma capacidade de 150 m<sup>3</sup>. É um reservatório apoiado, de secção circular e situa-se à cota de soleira de 35 m. O tipo de revestimento interior é pintura e o controlo de nível é efetuado por boia. Não tem cloragem, nem possui vedação, mas tem porta em ferro com chave. A última desinfeção efetuada ao reservatório foi em janeiro de 2015.



**Figura 20** - Reservatório de Vila Nova da Rainha

Uma parte da rede distribuição é anterior à construção do reservatório, pois anteriormente a rede era abastecida diretamente por conduta da Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A. (EPAL), pelo que essa parte da rede terá uma idade média de 30 anos.

### **6.3. Construção do modelo**

#### **6.3.1. Componentes físicos**

O desenvolvimento do modelo no *software* EPANET 2.0 foi efetuado com base na metodologia apresentada no **Capítulo 5.3.2** do presente trabalho.

O EPANET modela um SD de água como sendo um conjunto de troços ligados a nós. Os troços representam as tubagens, bombas e válvulas de controlo. Os nós representam junções, reservatórios de nível fixo (RNF) e/ou reservatórios de nível variável (RNV) (IRAR e LNEC, 2004).

A rede de distribuição foi exportada do *AutoCad* para o EPANET, no entanto a versão disponível em *AutoCad* encontrava-se desatualizada, pelo que foi necessário proceder às

respetivas alterações e atualizações através da consulta das plantas cadastrais existentes na AdAz.

Com a exportação do *AutoCad* para o EPANET, apenas se convertem os nós com as respetivas coordenadas e os troços com o seu comprimento. Assim, foi necessário acrescentar manualmente alguns nós e troços que se encontravam em falta no *AutoCad*, confirmar o comprimento dos troços e inserir a restante informação nos nós e nos troços, assim como os restantes elementos que constituem a rede.

Nos nós foram inseridos a cota topográfica e o consumo base respetivo (**Figura 21 a**). Nos troços foram confirmados os comprimentos e inseridos o diâmetro interno e o coeficiente de rugosidade, conforme exemplo da **Figura 21 b**).

Property	Value
*Junction ID	Ponto1
X-Coordinate	-40029.22
Y-Coordinate	4488.44
Description	
Tag	
*Elevation	36.5
Base Demand	0.006622517
Demand Pattern	P_2010
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	
Source Quality	
Actual Demand	#N/A
Total Head	#N/A
Pressure	#N/A
Quality	#N/A

a)

Property	Value
*Pipe ID	23
*Start Node	109
*End Node	Ponto1
Description	
Tag	
*Length	782.79
*Diameter	57
*Roughness	140
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	
Flow	#N/A
Velocity	#N/A
Unit Headloss	#N/A
Friction Factor	#N/A
Reaction Rate	#N/A
Quality	#N/A
Status	#N/A

b)

**Figura 21** - Exemplo dos dados de entrada introduzidos no EPANET 2.0: **a)** nos nós e **b)** nos troços

A rugosidade das condutas é uma das principais incógnitas na construção de um modelo, e conseqüentemente um dos principais fatores de incerteza. Como primeira aproximação deve ser adotado para o coeficiente de rugosidade um valor em função das características do material da conduta e do seu provável estado de conservação, e nos termos da fórmula considerada para o cálculo da perda de carga contínua, uma vez que

o *software* apresenta várias opções para esse efeito, como as fórmulas de Hazen-Williams, de Chezy-Manning ou de Darcy-Weisbach (Coelho *et al.*, 2006).

Dado que todas as tubagens são em PVC, foi considerado um único coeficiente de rugosidade = 140, tendo em conta a lei de resistência adotada (Fórmula de Hazen Williams) (**Tabela 7**).

**Tabela 7** - Coeficientes de rugosidade para condutas de abastecimento de água (Adaptado de IRAR e LNEC, 2004)

<b>Material</b>	<b>Hazen-Williams Coeficiente <math>C</math></b>	<b>Chezy-Manning Coeficiente <math>n</math></b>	<b>Darcy-Weisbach <math>k</math> (mm)</b>
<b>Materiais cimentícios</b>			
Fibrocimento	140	0,011 – 0,013	0,4 – 1,2
Betão	130	0,011 – 0,013	0,3 – 3,0
<b>Materiais plásticos</b>			
Policloreto de baixa, média ou alta densidade	140 - 150	0,009 – 0,011	$1,5 \times 10^{-3}$
Policloreto de vinilo	140 - 150	0,009 – 0,011	$1,5 \times 10^{-3}$
Poliéster reforçado com fibra de vidro	140 - 150	0,009 – 0,011	$1,5 \times 10^{-3}$
<b>Materiais metálicos</b>			
Ferro fundido não revestido	120 - 130	0,012	0,226
Ferro fundido revestido	130 - 140	0,013	0,102
Aço	140 - 150	0,010 – 0,012	$2,8 \times 10^{-3} - 5,8 \times 10^{-3}$

Foram inseridas no modelo as válvulas de seccionamento instaladas na rede de distribuição em estudo, num total de 67 válvulas tipo TCV (Throttle Control Valve ou Válvula de borboleta, VB), nas quais foi introduzida a informação do diâmetro, bem como o estado (aberto ou fechado) de acordo com o circuito da água.

As válvulas de borboleta têm a função de regular ou interromper o escoamento nas seções onde se encontram instaladas (Coelho *et al.*, 2006).

Foi colocado um RNF pois a variação do nível de água ao longo das 24 h é irrelevante para o caso em estudo, admitindo que se mantêm níveis próximos da sua capacidade útil.

### **6.3.2. Componentes não-físicos**

Para além dos componentes físicos, o EPANET permite também a definição de três categorias de informação sobre a rede que descrevem o comportamento e os aspetos operacionais de um SD de água: curvas, padrões e controlos (IRAR e LNEC, 2004).

#### **Consumos**

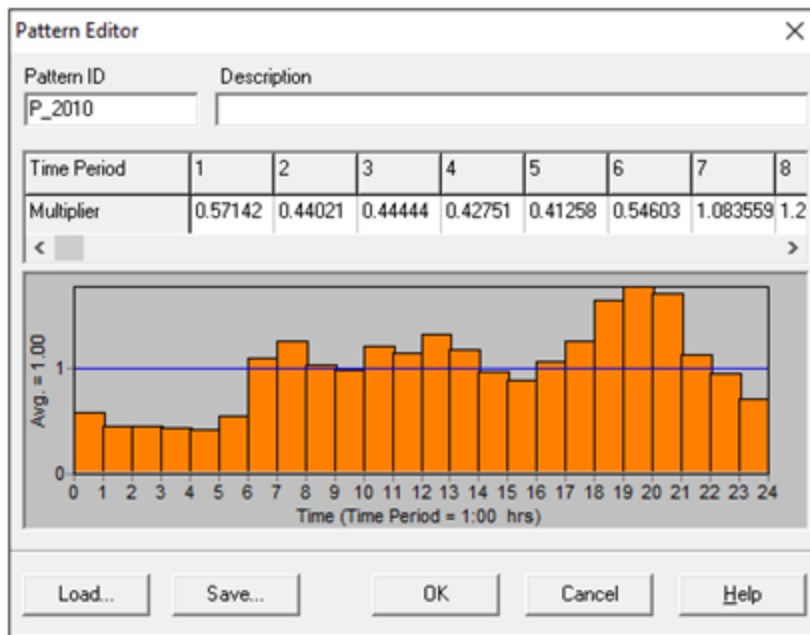
A alocação de consumos foi efetuada com base na informação dos dados de faturação de AdAz disponíveis.

O caudal médio inserido no fator de consumo – 1,46 L/s, foi estimado tendo em conta os volumes aduzidos entre fevereiro e abril de 2016 (aproximadamente constantes = 3.777 m<sup>3</sup>/mês), período em que foi realizada a campanha de medição de cloro em campo.

O consumo global foi distribuído uniformemente em todos os nós assumindo a homogeneidade da rede, pois de acordo com a informação disponibilizada por AdAz, trata-se de uma zona relativamente homogénea, não existindo grandes diferenças em termos de magnitude dos consumos.

#### **Padrão de Consumo**

Foi utilizado um padrão de consumo adimensional ajustado a 24 h (**Figura 22**), que traduz o perfil de consumo, disponibilizado por AdAz, onde se podem verificar picos de consumo por volta das 8 h da manhã, à hora de almoço e de jantar, sendo este último mais acentuado. Observando-se também caudais noturnos muito baixos.



**Figura 22** - Padrão de consumo adimensional ajustado a 24 horas, carregado em EPANET

### Curva das bombas

No reservatório existem 3 bombas (hidropressoras), conforme **Figura 23**, que asseguram o fornecimento da água a Vila Nova da Rainha, funcionando em alternância.



**Figura 23** - Bombas instaladas no reservatório de Vila Nova da Rainha

A **Figura 24** apresenta as características das bombas instaladas no reservatório, através das quais foi possível consultar os dados técnicos do fabricante (Xilem, 2016) e retirar a informação sobre a curva característica das bombas.



**Figura 24** – Características das bombas instaladas no reservatório

De acordo com o fabricante (Xilem, 2016) as siglas SV4603/2F110T têm o seguinte significado:

SV – Referência à série;

46 – Débito nominal em  $\text{m}^3/\text{h}$ ;

03/2 – Número de turbinas (3 turbinas totais das quais 2 são maquinadas);

F – Versão Standard, Flanges circulares in-line;

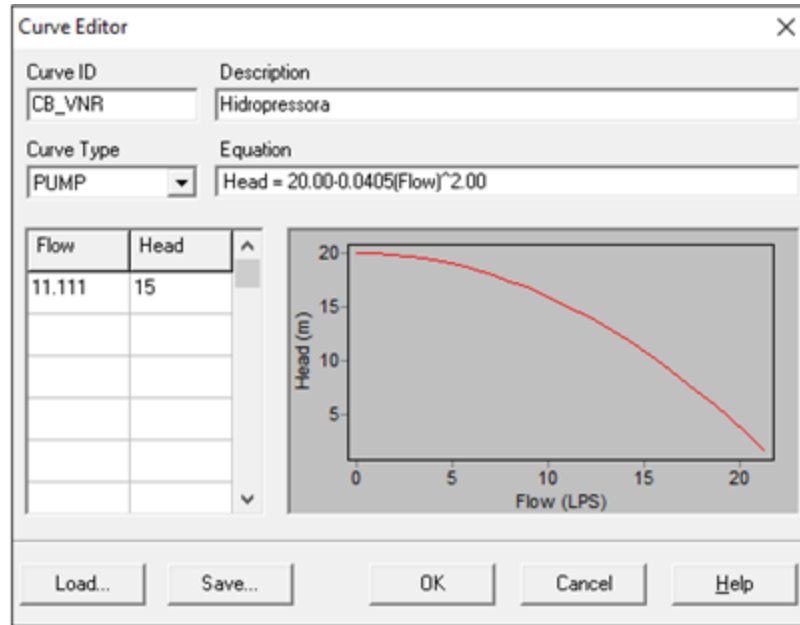
110 – Potência nominal do motor kW x 10;

T – Trifásica.

Pode-se verificar ainda através da **Figura 24** que a pressão máxima de funcionamento da bomba é 1.600 kPa, que equivale a 163,20 m.c.a..

Para se definir uma curva com um ponto é suficiente fornecer um único par de valores de caudal/altura de elevação, correspondente ao ponto ótimo de funcionamento da bomba (IRAR e LNEC, 2004).

Consultando os dados técnicos do fabricante para a bomba em questão verificou-se que o ponto ótimo de funcionamento da bomba acontece para um caudal de  $40 \text{ m}^3/\text{h}$  (11,111 L/s), ao qual corresponde uma altura de elevação de 15 m (**Anexo III**), sendo assim possível obter a curva da bomba representada na **Figura 25**.

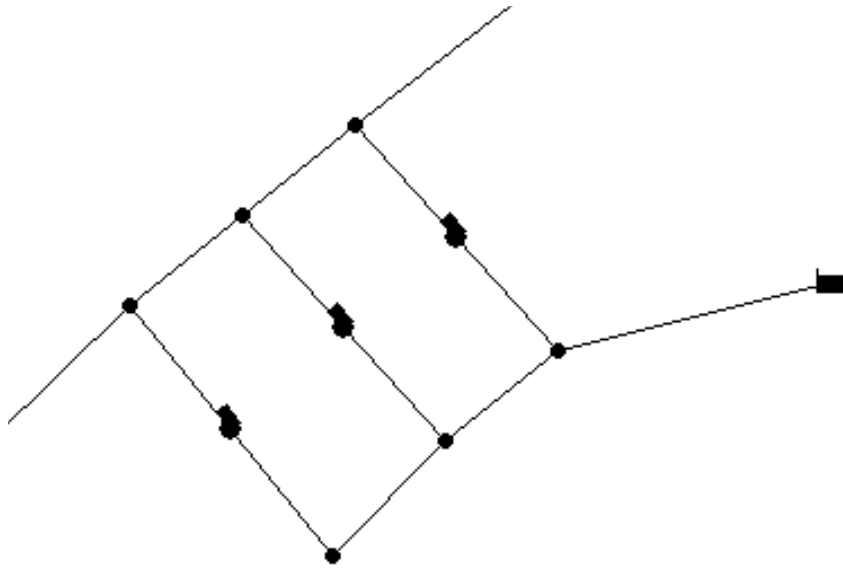


**Figura 25** – Curva da Bomba no EPANET 2.0

Desta forma introduziram-se os dados relativos às bombas (B1, B2 e B3) no EPANET (Figura 26 e Figura 27), sendo que apenas uma se encontra no estado aberto (B1).

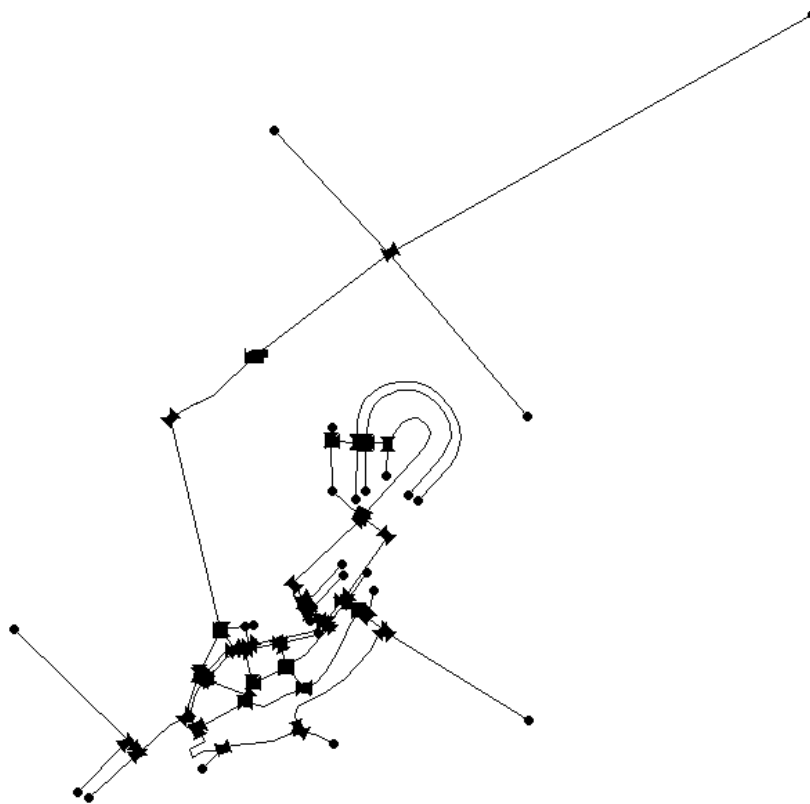
Pump B1_VNR		Pump B2_VNR		Pump B3_VNR	
Property	Value	Property	Value	Property	Value
*Pump ID	B1_VNR	*Pump ID	B2_VNR	*Pump ID	B3_VNR
*Start Node	7	*Start Node	24	*Start Node	59
*End Node	21	*End Node	51	*End Node	80
Description	Hidropressora	Description	Hidropressora	Description	Hidropressora
Tag	VNR	Tag	VNR	Tag	VNR
Pump Curve	CB_VNR	Pump Curve	CB_VNR	Pump Curve	CB_VNR
Power		Power		Power	
Speed		Speed		Speed	
Pattern		Pattern		Pattern	
Initial Status	Open	Initial Status	Closed	Initial Status	Closed
Effic. Curve		Effic. Curve		Effic. Curve	
Energy Price		Energy Price		Energy Price	
Price Pattern		Price Pattern		Price Pattern	

**Figura 26** – Características das três bombas (B1, B2 e B3) no EPANET 2.0



**Figura 27** - Representação das três bombas e do RNF no EPANET 2.0

Deste modo foi possível obter o mapa da rede em EPANET 2.0 correspondente à rede de distribuição em estudo representado na **Figura 28**.



**Figura 28** - Mapa da rede de distribuição construída no EPANET 2.0

As cotas altimétricas da área em estudo variam entre 8 e 43,5 m. A variação altimétrica da área em estudo é apresentada na **Figura 29** através do mapa de isolinhas de cotas topográficas da rede de distribuição, extraído do *software* EPANET 2.0.



**Figura 29** - Gráfico de isolinhas de cotas topográficas do sistema de abastecimento de água de Vila Nova da Rainha no EPANET 2.0

## 6.4. Campanha de medição

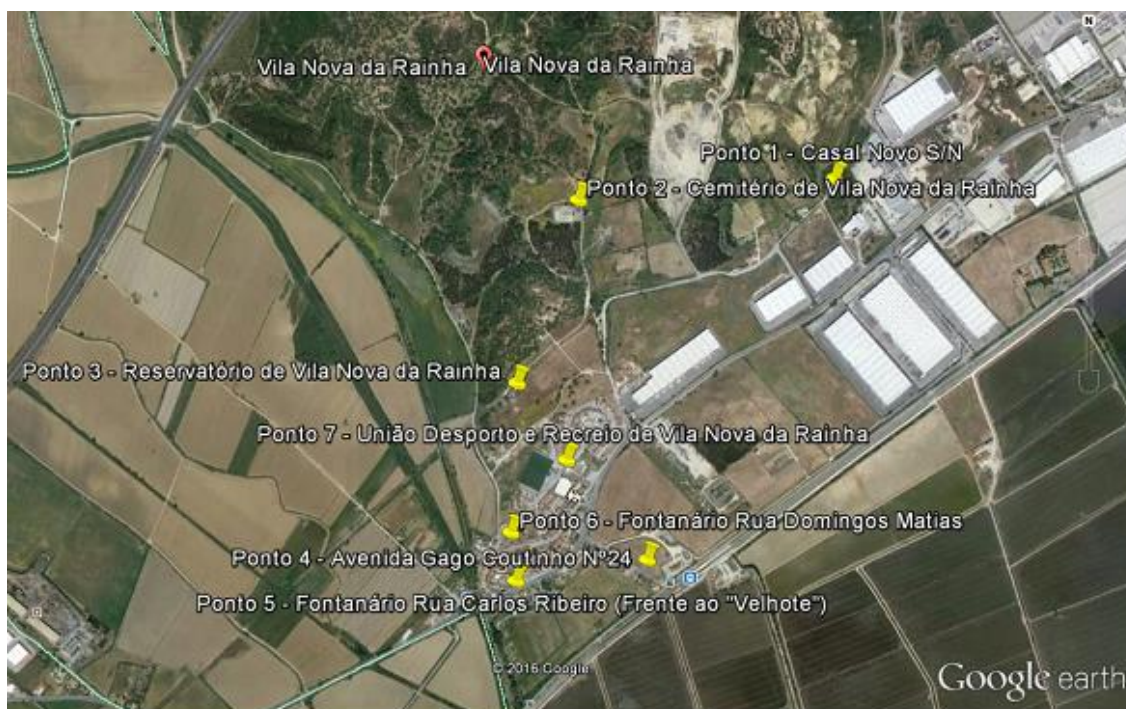
### 6.4.1. Campanha de medição de cloro

De modo a calibrar o modelo no que diz respeito à qualidade da água, foi necessário levar a cabo uma campanha de medição de cloro. Para tal foram seleccionados sete pontos da rede de distribuição (**Tabela 8**), com base nas condições hidráulicas do sistema (extremos de rede, pontos intermédios, pontos de maior e menor consumo). Na **Figura 30** é apresentado o mapa de localização dos pontos seleccionados e na **Figura 31** exibem-se toda a rede de distribuição e os referidos pontos, no EPANET 2.0.

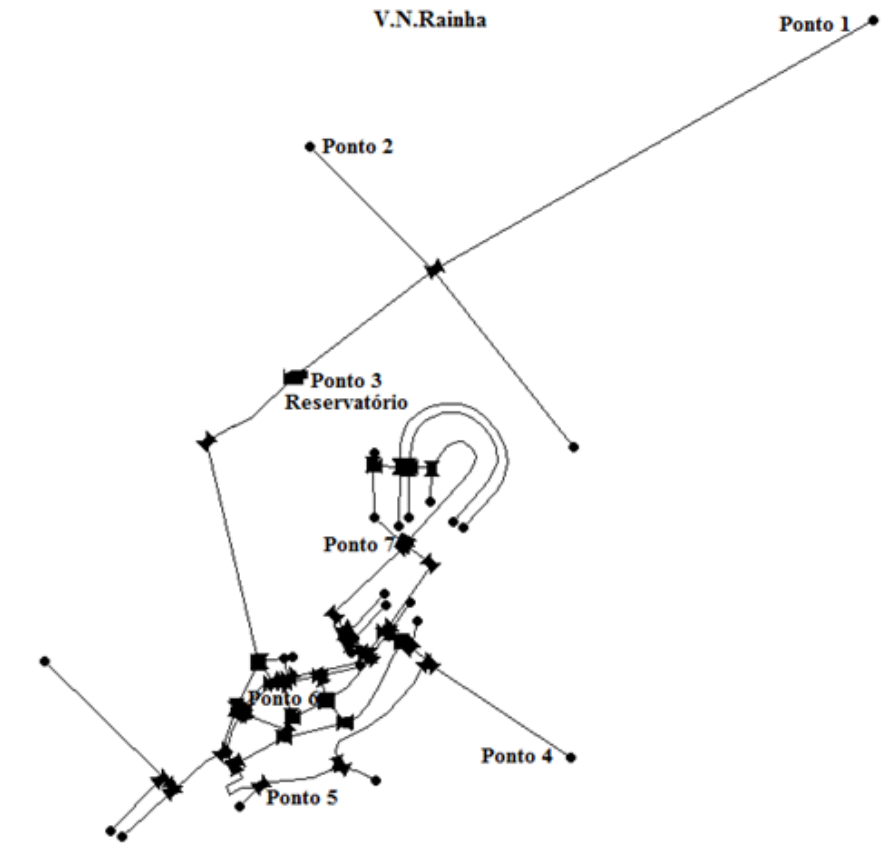
A definição dos pontos de amostragem é essencial no processo de calibração do modelo, uma vez que pode afetar significativamente a sua precisão (Xie *et al.*, 2015).

**Tabela 8** – Pontos selecionados da rede de distribuição e respetiva localização

Ponto	Local
1	Casal Novo S/N
2	Cemitério
3 a)	Reservatório Ponto Entrega
3 b)	Reservatório
4	Av. Gago Coutinho N° 24
5	Fontanário Rua Carlos Ribeiro (Restaurante "O Velhote")
6	Fontanário Rua Domingos Matias ("1949")
7	UDR - União Desporto e Recreio de Vila Nova da Rainha



**Figura 30** - Localização dos sete pontos selecionados (Google earth)



**Figura 31** – Rede de distribuição de água e pontos selecionados no modelo construído no EPANET 2.0

Os pontos 1 e 2 correspondem a pontos de extremidade de rede, com pouco consumo (Figura 32).



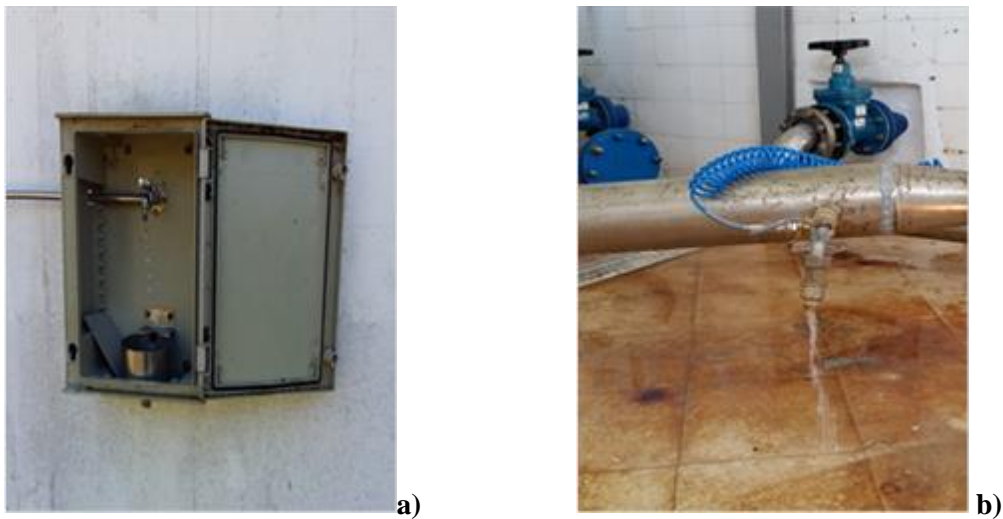
a)



b)

**Figura 32** – Fotografias dos pontos a) 1 e b) 2

O ponto 3a) é o PE da entidade em alta (no exterior do reservatório) e o ponto 3b) situa-se no interior do reservatório (**Figura 33**).



**Figura 33** – Fotografias dos pontos a) 3a) e b) 3b)

O ponto 4 trata-se de uma casa particular, numa rua com consumo doméstico situada em extremidade de rede (**Figura 34**).



**Figura 34** – Fotografias do Ponto 4 a) ponto de colheita, b) morada

Os pontos 5, 6 e 7, são pontos intermédios/de percurso. O ponto 5 é um fontanário localizado junto a um restaurante com consumo, o ponto 6 é um fontanário localizado junto de uma padaria e o ponto 7 é um complexo desportivo considerado como grande consumidor (**Figura 35**).



a)



b)

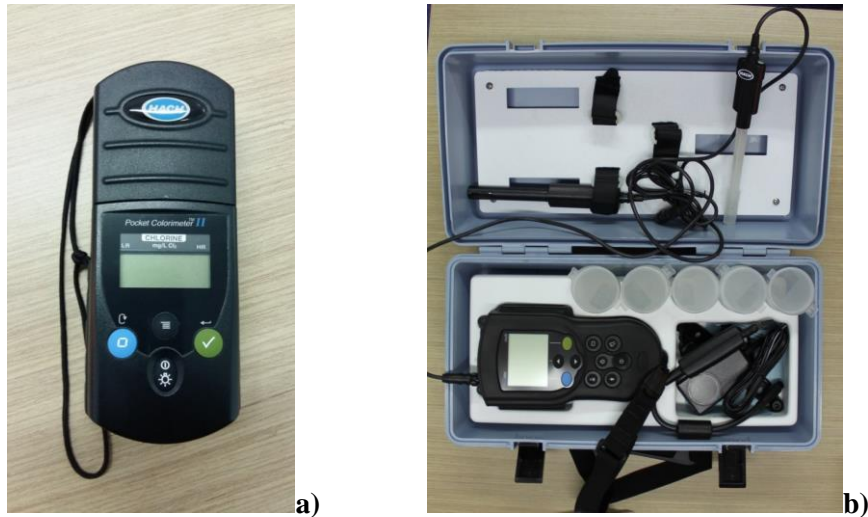


c)

**Figura 35** – Fotografias dos Pontos a) 5, b) 6 e c) 7

Em campo foram realizadas determinações de cloro residual livre e total, em todos os pontos selecionados, através do método colorimétrico DPD (N,N-dietil-p-fenilenediamina) usando fotómetro portátil Hach (**Figura 36a**), acompanhadas de medição de pH e temperatura através de medidor portátil da marca Hach (**Figura 36 b**). De cada medição foram efetuadas três leituras concordantes.

O procedimento do método colorimétrico e respetiva calibração são apresentados no **Anexo IV**.



**Figura 36** - Medidor a) Fotómetro portátil Hach e b) portátil de pH Hach

O método colorimétrico DPD permite diferenciar entre as várias espécies de cloro, nomeadamente entre o cloro livre e o cloro combinado, pelo que é uma técnica amplamente utilizada, especialmente para medições de campo. No método colorimétrico DPD realiza-se um ensaio em branco para corrigir automaticamente pequenas quantidades de turvação ou cor. Podem ser usados espectrofotómetros portáteis especificamente calibrados para uso com o método DPD (Black & Veatch, 2010).

Esta técnica envolve a adição de um reagente a uma amostra de 10 mL de água. O reagente reage com qualquer cloro livre para produzir uma coloração rosa, cuja intensidade é medida pelo colorímetro para determinar a concentração de cloro livre (Powell *et al.*, 2000b).

A campanha de medição de cloro foi realizada durante cerca de 2,5 meses, sendo que as colheitas foram efetuadas de modo a abranger os vários dias da semana, mediante a disponibilidade de meios. A colheita das amostras nos locais foi sempre executada com uma purga prévia da água de pelo menos 1 min.

Os resultados obtidos para os pontos do SD dessa caracterização são apresentados no **Anexo V**. A partir desses resultados foram calculados: o mínimo, a média, o máximo e o desvio padrão (**Tabela 9**).

**Tabela 9** – Resultados da campanha de cloro residual livre nos pontos selecionados

Ponto	Cloro (mg/L)			
	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
1	0,01	0,06	0,15	0,03
2	0,01	0,06	0,17	0,03
3a)	0,51	0,57	0,68	0,04
3b)	0,28	0,40	0,51	0,06
4	0,04	0,14	0,28	0,06
5	0,05	0,13	0,28	0,06
6	0,13	0,29	0,42	0,06
7	0,06	0,24	0,43	0,11

#### **6.4.2. Campanha de medição de caudal e pressão**

Por forma a efetuar a calibração do modelo hidráulico foram necessários dados de caudal e pressão.

Uma vez que a empresa não possui telegestão em funcionamento para o subsistema em estudo, não existem dados de registo em contínuo nem de caudal, nem de pressão na rede.

Nesse sentido, foi realizada pela equipa técnica na data de início da campanha de medição de cloro (15/02/2016), medição de pressão através de manómetro em todos os pontos selecionados para a campanha, à exceção do Ponto 3 (reservatório), para o qual existiu posteriormente medição em contínuo. De acordo com informação da parte operacional, e tal como já referido no **Capítulo 6.2** do presente trabalho, trata-se de um sistema estável a nível de pressão na rede. As medições de pressão (**Tabela 10**) tiveram início às 10 horas, pelo que foi essa a hora considerada para o ficheiro em EPANET.

**Tabela 10 - Medição de pressão nos pontos selecionados**

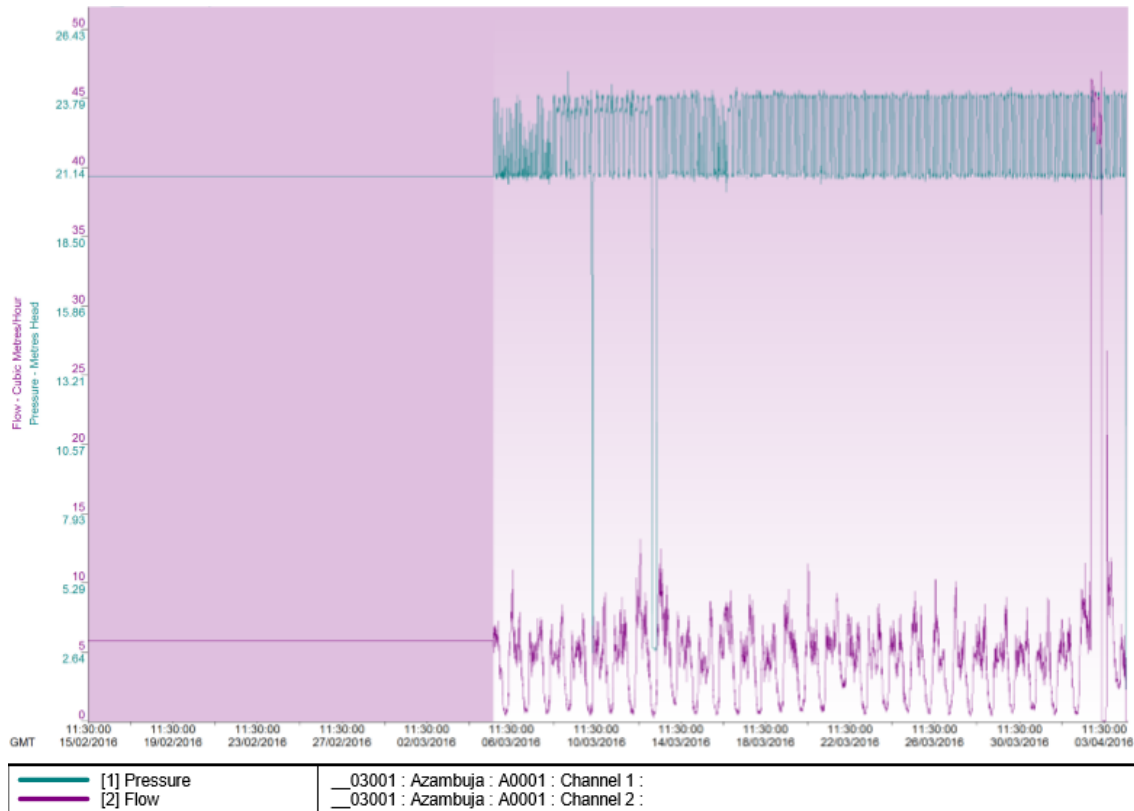
Ponto	Nó (EPANET)	Pressão (kg/cm <sup>2</sup> )	Pressão (m.c.a.)
1	Ponto1	2,05	20,5
2	Ponto2	1,35	13,5
4	Ponto4	4,15	41,5
5	Ponto5	4,15	41,5
6	Ponto6	3,95	39,5
7	Ponto7	3,35	33,5

Os valores medidos foram acrescidos de 1,5 m.c.a. para compensar a profundidade da rede (aproximadamente 1 m, tal como referido no **Capítulo 6.2**) e a elevação do terreno até ao ponto de medição (aproximadamente 0,5 m).

Com o objetivo de efetuar uma melhor caracterização do caudal e da pressão foi instalado à saída do reservatório um medidor de caudal e de pressão acoplados a um *datalogger* para registo dos dados em contínuo (**Figura 37**), durante um mês, compreendido no período da campanha de medição de cloro.


**Figura 37 – Medidor de caudal e pressão instalado à saída do reservatório**

Como resultado da medição em contínuo de caudal e de pressão à saída do reservatório obteve-se o gráfico apresentado na **Figura 38**.



**Figura 38** – Resultado da medição em contínuo de caudal e de pressão à saída do reservatório de Vila Nova da Rainha

Do gráfico da **Figura 38** foi possível verificar que:

- nos valores de caudal - registaram-se valores entre os 1 e os 12 m<sup>3</sup>/h.  
No dia 03/04/2016 ocorreu uma rotura, pelo que o pico de caudal que se registou nesse dia diz respeito ao restabelecimento do abastecimento;  
O cálculo do caudal médio através dos volumes aduzidos apresentou um valor 5,25 m<sup>3</sup>/h, valor semelhante ao valor médio de caudal apresentado no gráfico da **Figura 42**;
- nos valores de pressão - registaram-se valores entre os 21,14 e os 23,79 m.c.a. à saída do reservatório. Confirmando-se que, efetivamente não há grande variação de pressão à saída do reservatório.

Na **Figura 39** apresenta-se a medição da pressão na bomba cujo valor é 2,15 bar, correspondente a 21,92 m.c.a.. As bombas possuem um dispositivo HYDROVAR acoplado que permite manter uma pressão constante.

O valor registado encontra-se compreendido dentro da gama obtida através do gráfico da **Figura 38**.



**Figura 39** – Pressão de serviço na bomba

## 6.5. Calibração do modelo

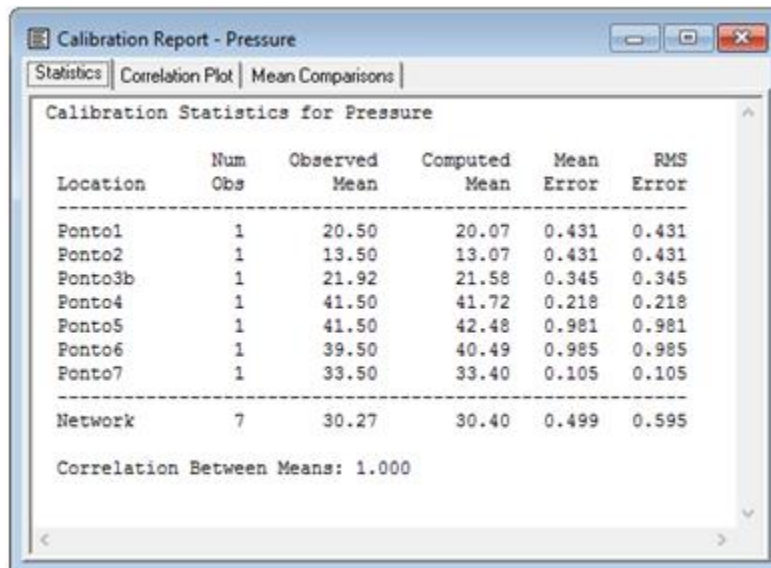
### 6.5.1. Aspetos gerais

De um modo geral, a calibração de um modelo de qualquer sistema físico pode ser definida como o processo de aferição e validação do modelo para diversas condições de funcionamento criteriosamente selecionadas, de forma a permitir que a sua utilização seja suficientemente fiável no âmbito da análise pretendida, uma vez que o modelo calibrado deve permitir reproduzir o comportamento do sistema relativamente a variáveis que não são objeto de medição, quer para situações de funcionamento semelhantes às selecionadas para calibração, quer para situações distintas. O processo de ajuste é efetuado com base na comparação entre resultados do modelo e resultados de medições realizadas no sistema físico (Coelho *et al.*, 2006).

### 6.5.2. Calibração da pressão

No que diz respeito à calibração da pressão, foi criado um ficheiro texto, com extensão *.DAT* (**Anexo VI**) com os valores de pressão medidos em campo nos pontos seleccionados, que foi carregado no *software* EPANET.

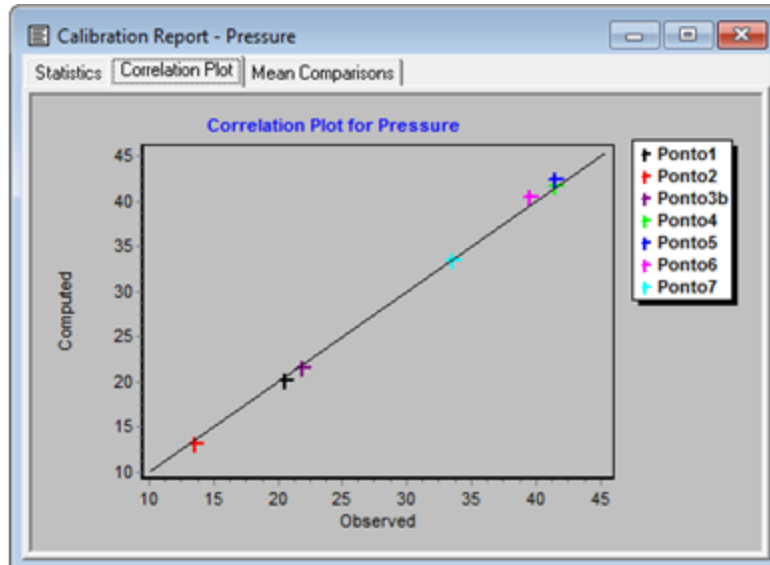
Extraíu-se do EPANET um relatório de calibração da pressão que apresenta a comparação entre os valores reais e os valores simulados pelo modelo nos respetivos pontos, através da apresentação dos dados estatísticos erro médio absoluto, desvio padrão e correlação entre as médias (**Figura 40**), do gráfico de correlação entre os valores de pressão reais e simulados (**Figura 41**) e do gráfico de comparação entre os valores médios de pressão medidos e simulados (**Figura 42**).



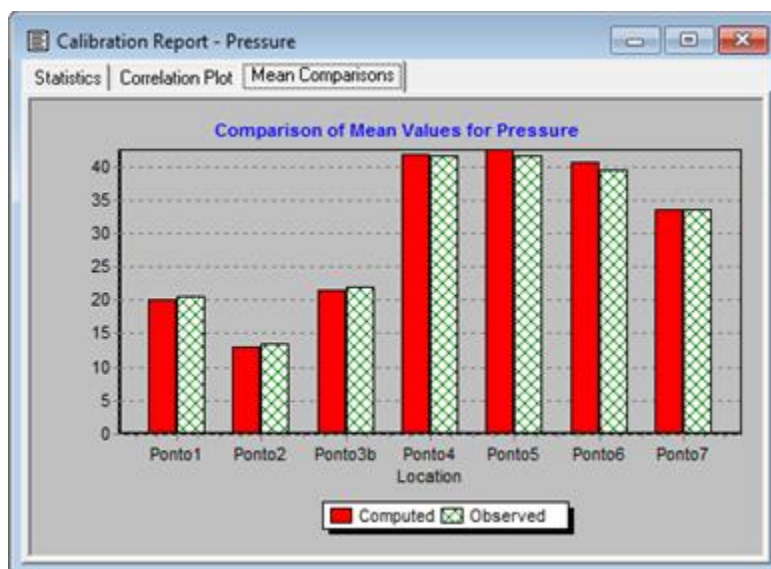
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	1	20.50	20.07	0.431	0.431
Ponto2	1	13.50	13.07	0.431	0.431
Ponto3b	1	21.92	21.58	0.345	0.345
Ponto4	1	41.50	41.72	0.218	0.218
Ponto5	1	41.50	42.48	0.981	0.981
Ponto6	1	39.50	40.49	0.985	0.985
Ponto7	1	33.50	33.40	0.105	0.105
Network	7	30.27	30.40	0.499	0.595

Correlation Between Means: 1.000

**Figura 40** – Dados estatísticos da calibração da pressão, no EPANET 2.0



**Figura 41** – Gráfico de correlação dos valores de pressão reais e simulados, no EPANET 2.0



**Figura 42** – Comparação entre as médias de pressão medidas e simuladas, no EPANET 2.0

Tendo em conta que a correlação entre as médias dos valores medidos e simulados é de 1, pode-se considerar que o modelo simulado se encontra calibrado relativamente à pressão, ou seja, pode-se considerar que o modelo reflete o comportamento da pressão na rede de distribuição em estudo.

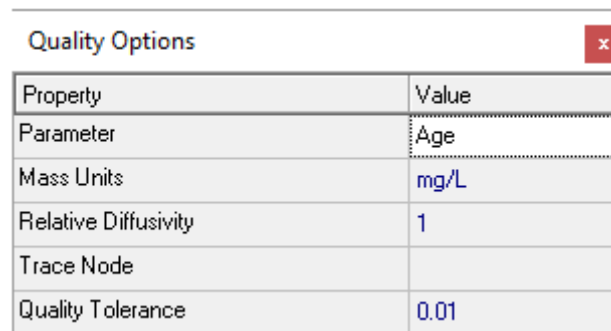
### 6.5.3. Calibração da qualidade da água

#### 6.5.3.1. Tempo de Percurso (Idade da água)

Uma vez calibrado o modelo hidráulico, foi possível avançar para a calibração do modelo da qualidade da água.

Para que um modelo de qualidade da água seja adequadamente estabelecido é necessário verificar o tempo de percurso (também designado por tempo de residência ou idade da água), uma variável hidráulica através da qual é possível verificar a duração mínima necessária para a inicialização da rede com valores ciclicamente estáveis (Coelho *et al.*, 2006).

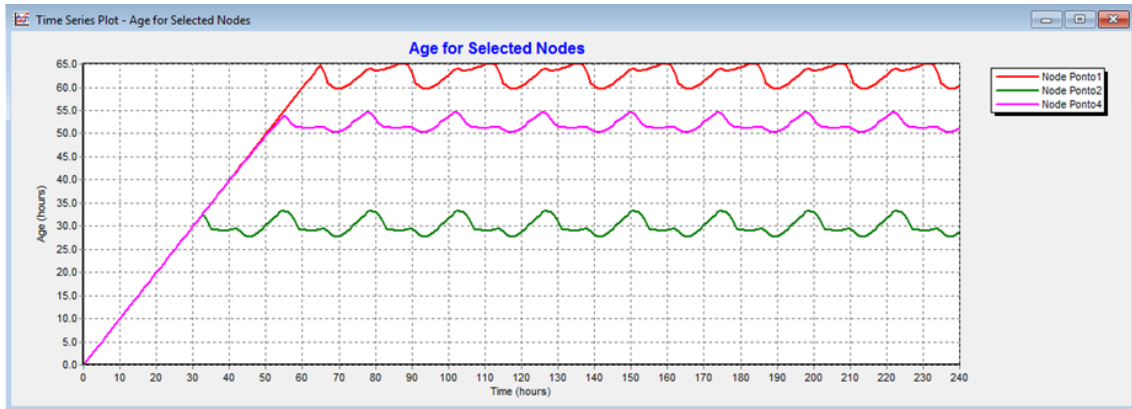
A simulação da idade da água foi efetuada no EPANET, selecionando o parâmetro *Idade (Age)*, nas opções da qualidade, conforme **Figura 43**.



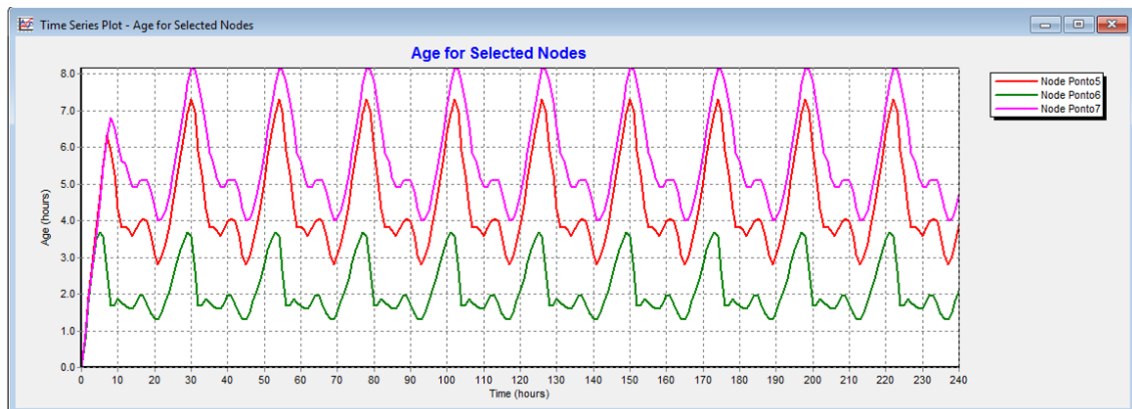
Property	Value
Parameter	Age
Mass Units	mg/L
Relative Diffusivity	1
Trace Node	
Quality Tolerance	0.01

**Figura 43** – Seleção da opção *Age* nas opções da qualidade no EPANET

Correu-se a simulação por um período de tempo suficiente para que existisse estabilização da rede, 240 horas. Tendo-se obtido os gráficos das **Figura 44** e **Figura 45**, para os pontos selecionados na campanha.



**Figura 44** – Evolução do tempo de percurso nos pontos de amostragem 1, 2 e 4



**Figura 45** – Evolução do tempo de percurso nos pontos de amostragem 5, 6 e 7

Os gráficos temporais mostram que o tempo de percurso máximo é de 65 horas, pelo que só deverão ser considerados significativos em toda a rede os resultados de simulação obtidos depois desse tempo, apesar da maior parte dos nós poder atingir a estabilidade antes. É possível visualizar ainda um período inicial em que o valor do tempo de percurso aumenta, desde o valor zero até ao ponto em que chega ao nó a primeira água que efetuou todo o percurso desde a origem. A partir desse ponto verificam-se ciclos repetíveis e aproximadamente estáveis.

### 6.5.3.2. *Determinação da constante cinética de decaimento do cloro no seio da água ( $k_b$ )*

O EPANET considera as reações de cloro no seio da água e na parede através das respetivas constantes cinéticas.

Dado que o decaimento de cloro no seio da água depende somente das características da mesma, a constante cinética que caracteriza esse decaimento,  $k_b$ , é específica para cada água, sendo necessária a sua determinação de modo a obter uma maior aproximação da simulação ao sistema real. Essa determinação foi efetuada através do “teste de garrafa”.

Como não existe um procedimento padrão para a execução desse teste, adaptaram-se os princípios do procedimento descrito em Coelho *et al.* (2006), às condições disponíveis.

O “teste de garrafa” foi realizado no dia 22/06/2016 de acordo com o seguinte procedimento:

1. Preparação das amostras em frascos de vidro escuro do tipo Winkler, completamente cheios e hermeticamente fechados. Estes frascos foram submetidos a uma preparação prévia de modo a eliminar a carência de cloro do material;
2. Manutenção dos frascos a uma temperatura constante (**Figura 46**);
3. Ao fim de intervalos de tempo pré-determinados, abertura dos frascos para determinação da concentração do cloro residual, através do fotómetro portátil Hach;
4. Representação gráfica dos valores da concentração de cloro em função do tempo.

A recolha das amostras foi efetuada no reservatório de Vila Nova da Rainha.

A água no interior dos frascos de Winkler encontrava-se à temperatura de 20,5 °C e pH 8,02.



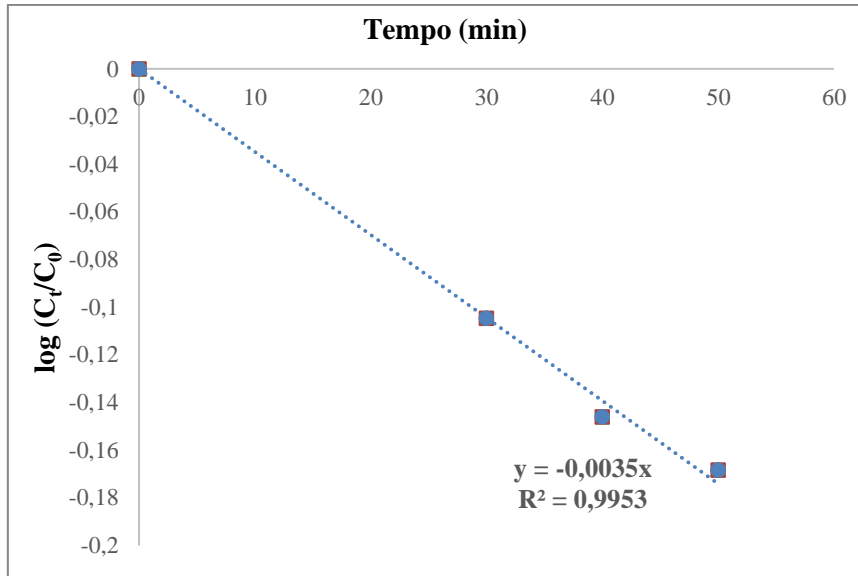
**Figura 46** – Frasco de Winkler **a)** fotografia, **b)** recipiente para manutenção da temperatura

As determinações de cloro residual foram efetuadas de acordo com os intervalos de tempo apresentados na **Tabela 11**.

**Tabela 11** - Dados para determinação da constante cinética de decaimento no seio da água

Tempo (min)	[cloro residual] (mg/L)	log (C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub> )
0	0,28	0
10	0,24	Desprezado
20	0,22	Desprezado
30	0,22	-0,1047354
40	0,20	-0,1461280
50	0,19	-0,1684044

Assim, aplicando a **Expressão 8 (Capítulo 4.2.2)**, é possível obter a constante cinética de decaimento no seio da água através do declive da reta,  $k_b = - 0,0035/\text{min} = - 5/\text{d}$ , conforme representação gráfica da **Figura 47**.



**Figura 47** – Dados experimentais para obtenção da constante cinética  $k_b$

### 6.5.3.3. *Determinação da constante cinética de decaimento do cloro devido ao efeito de parede ( $k_w$ )*

Uma vez que não é possível determinar experimentalmente a constante cinética de decaimento associada à parede das condutas  $k_w$ , foi necessário calibrá-la no processo de simulação utilizando a constante  $k_b$  no EPANET, através de um processo iterativo de tentativa-erro, onde se ajustou o valor constante de decaimento na parede por forma a reduzir a diferença entre os valores simulados de cloro e os valores reais medidos em campo.

Após o tratamento estatístico dos valores obtidos em campo nos pontos selecionados para a campanha, foi definido um período para a simulação de 1.800 horas (**Figura 48**), por forma a conseguir abranger o máximo de valores reais para comparação com os simulados e simultaneamente garantir uma estabilização do sistema através de uma simulação longa.

Property	Hrs:Min
Total Duration	1800:00
Hydraulic Time Step	0:05
Quality Time Step	0:05
Pattern Time Step	1:00
Pattern Start Time	0:00
Reporting Time Step	1:00
Report Start Time	0:00
Clock Start Time	12:00 AM
Statistic	NONE

**Figura 48** – Definição do tempo de simulação no EPANET

Nas opções da qualidade foi selecionado o parâmetro *Cloro* (**Figura 49**).

Property	Value
Parameter	Cloro
Mass Units	mg/L
Relative Diffusivity	1
Trace Node	
Quality Tolerance	0.01

**Figura 49** – Seleção da opção *Cloro* nas opções da qualidade no EPANET

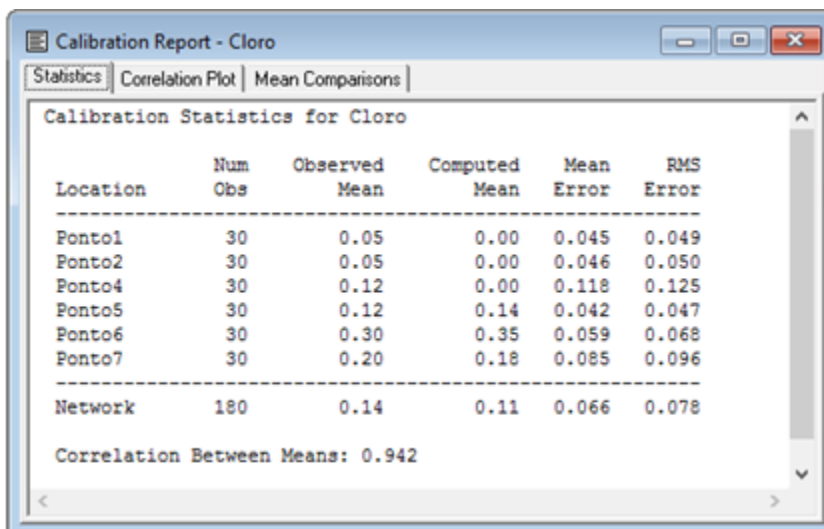
Definiu-se o valor de cloro no reservatório, em *Qualidade Inicial (Initial Quality)*, de 0,57 mg/L (valor médio obtido nas medições de campo).

Foi criado um ficheiro texto, com extensão *.DAT* (**Anexo VII**) com os valores de cloro medidos em campo nos pontos selecionados, que foi carregado no EPANET. Nas opções da reação foi selecionada primeira ordem para ambas as reações (no seio da água e na parede), foi introduzido o valor da constante cinética de decaimento no seio da água, determinado experimentalmente através do teste de garrafa,  $k_b = -5/d$ , seguindo-se a introdução e simulação de vários valores para a constante cinética de decaimento de parede  $k_w$ , na tentativa de obter a maior aproximação entre os valores de cloro reais e simulados. Foram testados valores entre - 0,010 e - 0,150 m/d.

Em cada simulação, extraiu-se do EPANET um relatório de calibração que apresenta a comparação entre os valores observados em campo e os valores simulados pelo modelo nos respetivos pontos. Ao efetuar estas simulações, com as condições definidas inicialmente, verificou-se que o programa devolvia valores zero de cloro para as extremidades de rede, o que não correspondia ao observado no sistema real. Analisando as condições carregadas inicialmente, verificou-se que essa situação poderia estar relacionada com a aproximação efetuada a nível dos consumos, pressupondo a uniformização da distribuição do consumo global em todos os nós, conjugada com a simplificação da rede pela agrupação de consumidores nos nós.

Assim, esta situação conduziu à necessidade de testar a simulação de dois cenários de calibração distintos:

- cenário A - iguais consumos nos nós (**Figura 50**);
- cenário B - ajuste dos consumos nos pontos de amostragem, recorrendo aos dados de consumo disponíveis na AdAz (**Figura 51**).



Calibration Report - Cloro

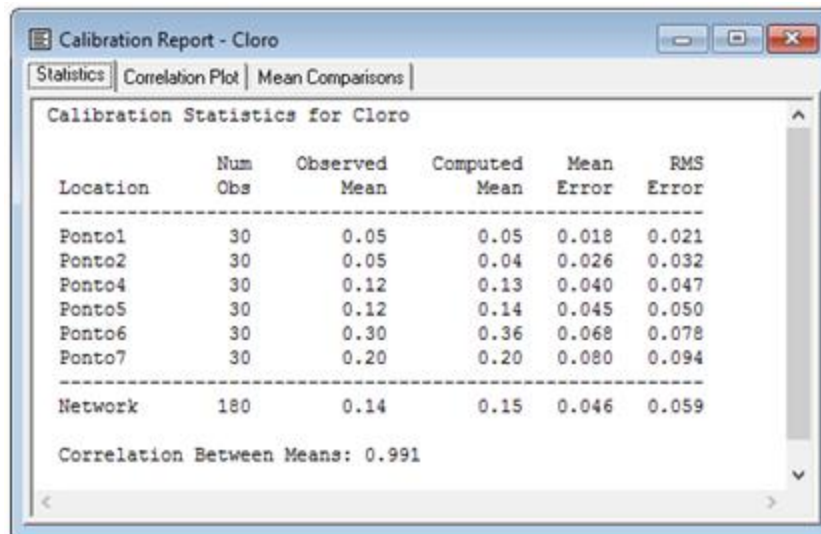
Statistics | Correlation Plot | Mean Comparisons

Calibration Statistics for Cloro

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	30	0.05	0.00	0.045	0.049
Ponto2	30	0.05	0.00	0.046	0.050
Ponto4	30	0.12	0.00	0.118	0.125
Ponto5	30	0.12	0.14	0.042	0.047
Ponto6	30	0.30	0.35	0.059	0.068
Ponto7	30	0.20	0.18	0.085	0.096
Network	180	0.14	0.11	0.066	0.078

Correlation Between Means: 0.942

**Figura 50** – Relatório de calibração do cloro para o cenário A, no EPANET 2.0



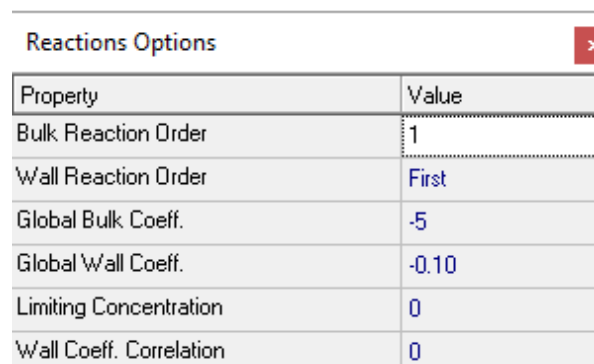
Calibration Statistics for Cloro						
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	
Ponto1	30	0.05	0.05	0.018	0.021	
Ponto2	30	0.05	0.04	0.026	0.032	
Ponto4	30	0.12	0.13	0.040	0.047	
Ponto5	30	0.12	0.14	0.045	0.050	
Ponto6	30	0.30	0.36	0.068	0.078	
Ponto7	30	0.20	0.20	0.080	0.094	
Network	180	0.14	0.15	0.046	0.059	

Correlation Between Means: 0.991

**Figura 51** – Relatório de calibração do cloro para o cenário B, no EPANET 2.0

Verificou-se que a situação dos valores zero de cloro foi ultrapassada através do cenário B, com o ajuste dos consumos nos pontos de amostragem selecionados, obtendo-se uma maior aproximação entre os valores reais e os simulados.

Em ambos os cenários, considerou-se que o valor de  $k_w = -0,10$  m/d (**Figura 52**), era o que proporcionava um melhor ajuste entre os valores de cloro medidos em campo e os simulados.

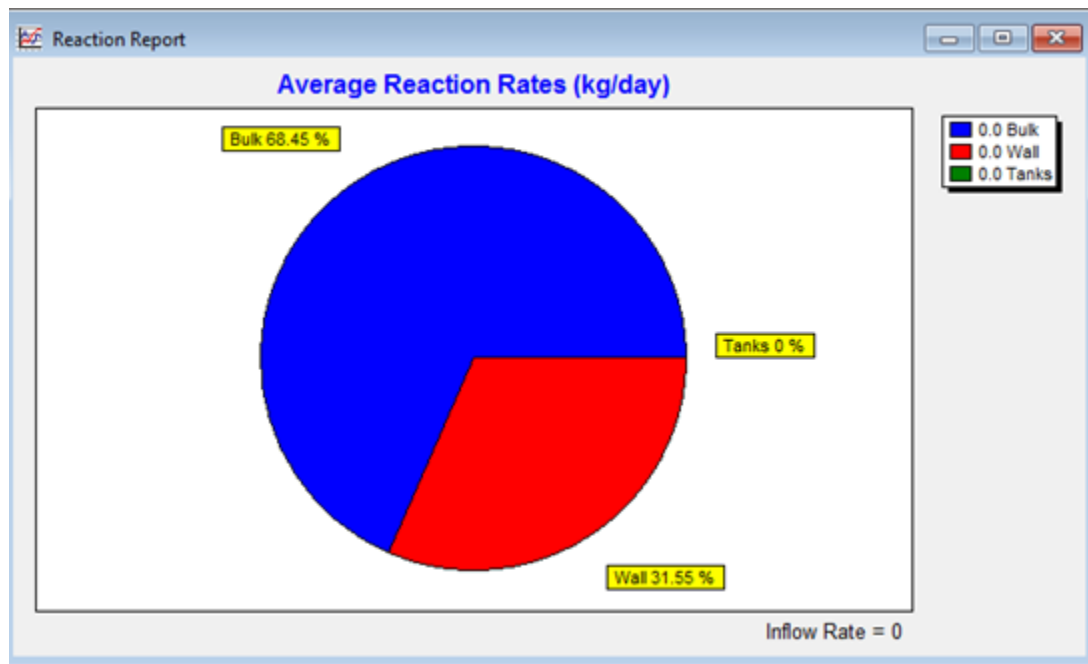


Property	Value
Bulk Reaction Order	1
Wall Reaction Order	First
Global Bulk Coeff.	-5
Global Wall Coeff.	-0.10
Limiting Concentration	0
Wall Coeff. Correlation	0

**Figura 52** – Definição das opções da reação no EPANET

Foi criado um relatório da reação para a simulação, selecionando a opção Relatório, Reação, obtendo-se o gráfico da **Figura 53**, onde é possível visualizar, em termos médios, as parcelas correspondentes ao decaimento do cloro no seio da água (68,45 %) e ao decaimento na parede das tubagens (31,55 %). A parcela correspondente ao

decaimento no Tank (RNV) é nula uma vez que o reservatório instalado foi um RNF, conforme indicado no **Capítulo 6.3.1.** do presente trabalho.



**Figura 53** – Relatório da reação

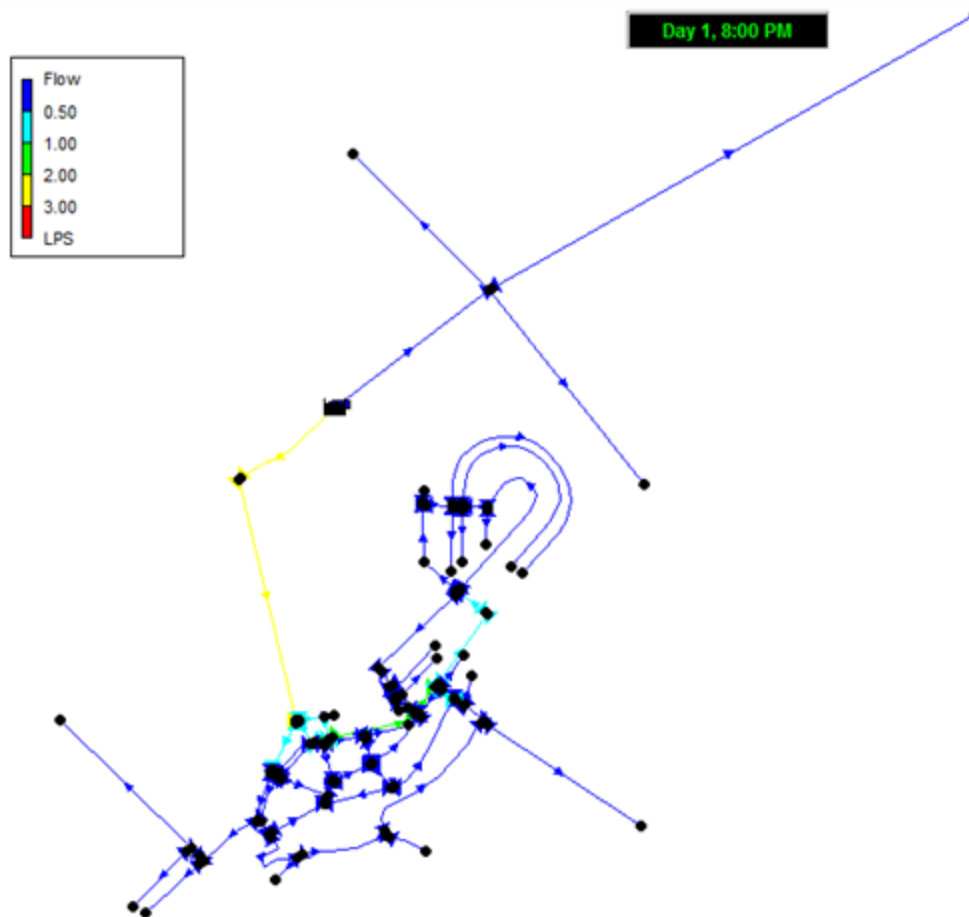
Após todo o processo de calibração do modelo da rede de distribuição efetuado no EPANET foi possível extrair o relatório de dados apresentado no **Anexo VIII**.



## 7. Discussão de resultados e cenários

### 7.1. Discussão dos valores de caudal

Efetuada a análise dos valores de caudal na hora de maior consumo, observa-se que os troços que transportam maior caudal são os que representam as condutas principais da rede. Verifica-se também que as extremidades de rede apresentam valores de caudal mais baixos, como era expectável, o que pode promover a degradação da qualidade da água nesses locais (**Figura 54**).



**Figura 54** – Representação do caudal na rede, na hora de maior consumo, no EPANET

## 7.2. Discussão dos valores de velocidade de escoamento

De modo a analisar os valores de velocidade é necessário ter em conta os diâmetros internos das tubagens da rede, que no caso em estudo se encontram entre os 57 e os 144,6 mm.

De acordo com o Decreto Regulamentar n.º 23/95, a velocidade limite ( $V$ ) é dada pela **Expressão 14**.

$$V = 0,127 \times d_i^{0,4} \quad (14)$$

Em que:

$V$  – velocidade limite (m/s);

$d_i$  - diâmetro interno da tubagem (mm).

Assim, o cálculo da velocidade limite para as tubagens do caso em estudo é apresentado na **Tabela 12**.

**Tabela 12** – Velocidade limite para as tubagens do caso em estudo

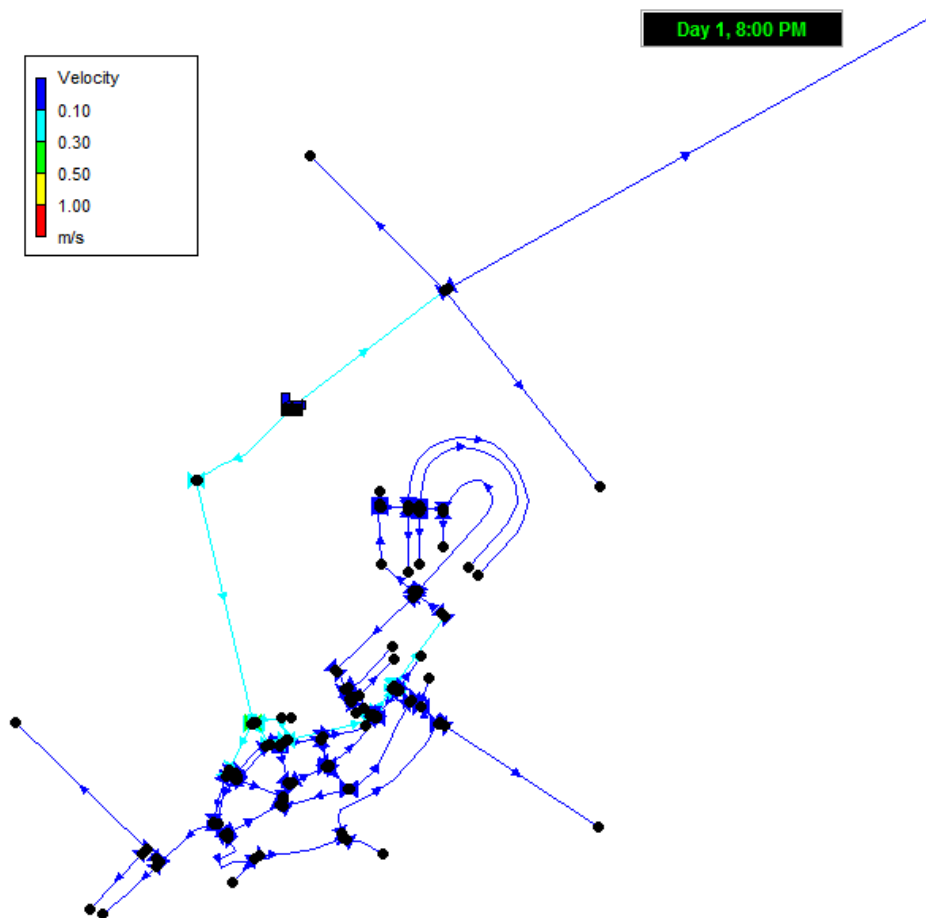
<b>Diâmetro Nominal (mm)</b>	<b>Espessura para PVC PN10 (mm)</b>	<b>Diâmetro Interno (mm)<sup>1</sup></b>	<b>Velocidade Limite (m/s)</b>
63	3,0	57,0	0,64
90	4,3	81,4	0,74
110	5,3	99,4	0,80
125	6,0	113,0	0,84
160	7,7	144,6	0,93

<sup>1</sup> calculado subtraindo duas vezes a espessura (**Anexo IX**) ao diâmetro nominal.

Segundo o Decreto Regulamentar n.º 23/95, a velocidade não deve ser inferior a 0,30 m/s e nas condutas onde não seja possível verificar este limite devem prever-se dispositivos adequados para descarga periódica.

Verificam-se valores de velocidade muito baixos na rede, mesmo à hora de maior consumo, conforme representado na **Figura 55**, apresentando a maioria das tubagens velocidade inferior a 0,30 m/s.

Os baixos valores de velocidade de escoamento verificados devem-se provavelmente aos baixos consumos e ao sobredimensionamento da rede.



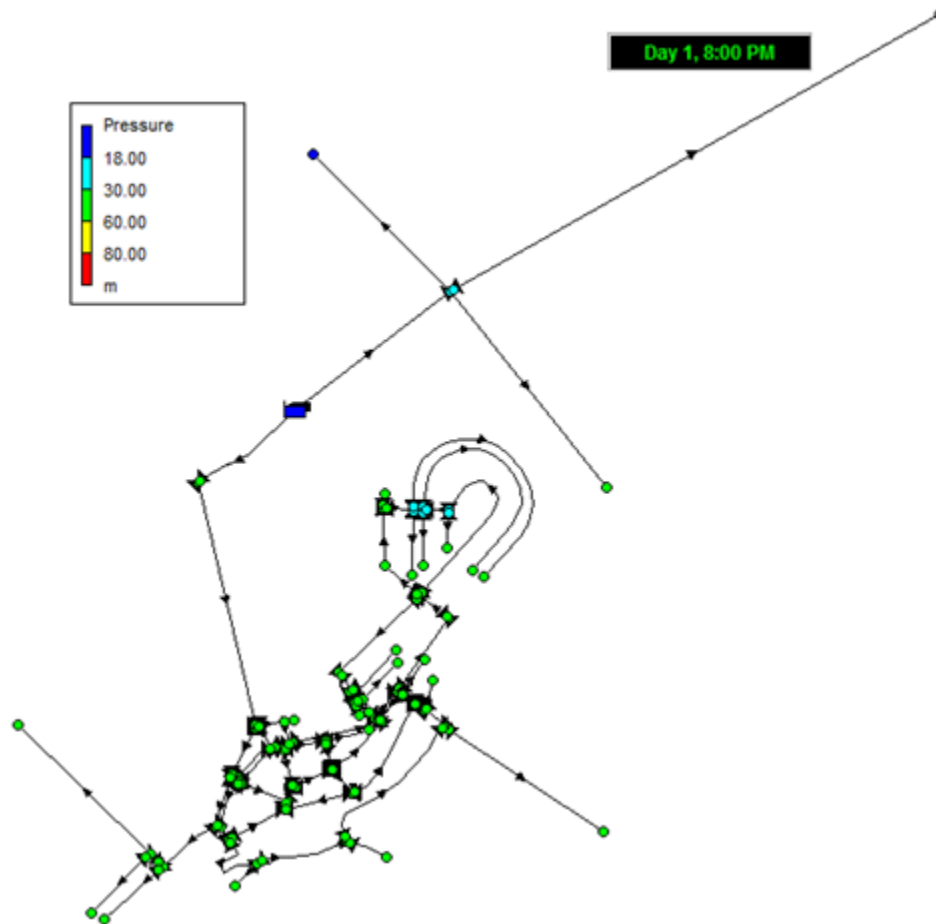
**Figura 55** – Representação da velocidade na rede, na hora de maior consumo, no EPANET

### 7.3. Discussão dos valores de pressão

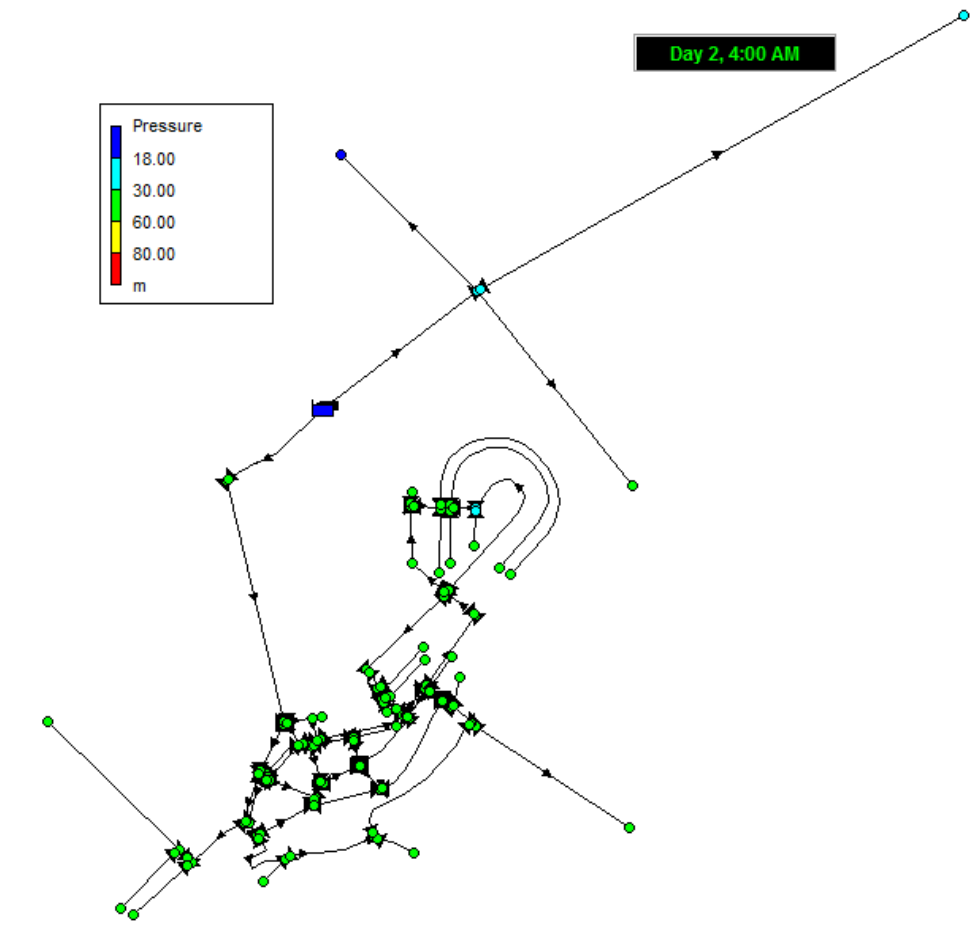
De acordo com o Decreto Regulamentar n.º 23/95, a pressão máxima em qualquer ponto de utilização não deve ultrapassar os 600 kPa (61,18 m.c.a.) medida ao nível do solo. E a pressão mínima em kPa ( $H$ ) deverá ser igual a  $100 + 40 n$ , em que  $n$  é o número de piso acima do solo, incluindo o piso térreo.

Considerando que a maioria das habitações tem dois pisos acima do solo, a pressão mínima a garantir é de 180 kPa (18,36 m.c.a.). Assim, efetuando a simulação da pressão no sistema na hora de maior consumo, verifica-se que a mesma apresenta, na sua maioria, valores superiores ao mínimo regulamentar (**Figura 56**).

Relativamente ao valor para a pressão máxima (61,18 m.c.a.), efetuando a simulação da pressão na rede na hora de menor consumo, verifica-se que o mesmo não é ultrapassado (Figura 57).



**Figura 56** – Representação da pressão na rede, na hora de maior consumo, no EPANET

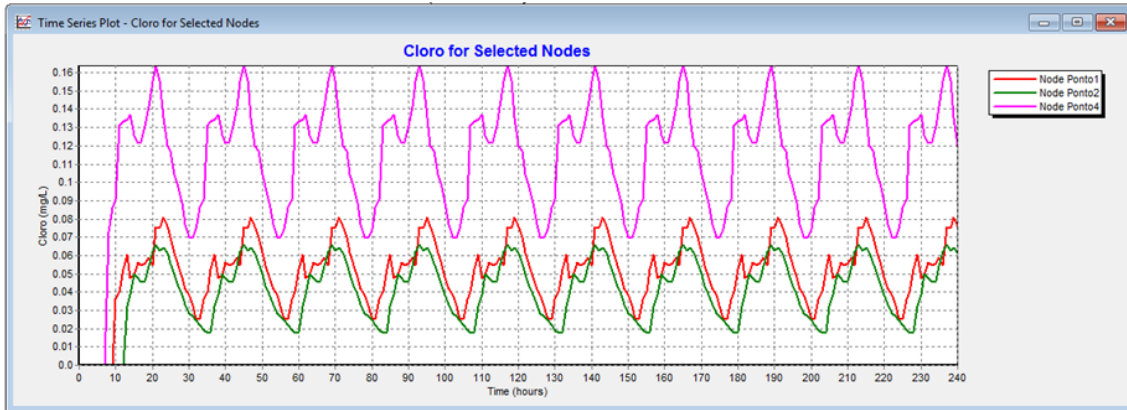


**Figura 57** – Representação da pressão na rede, na hora de menor consumo, no EPANET

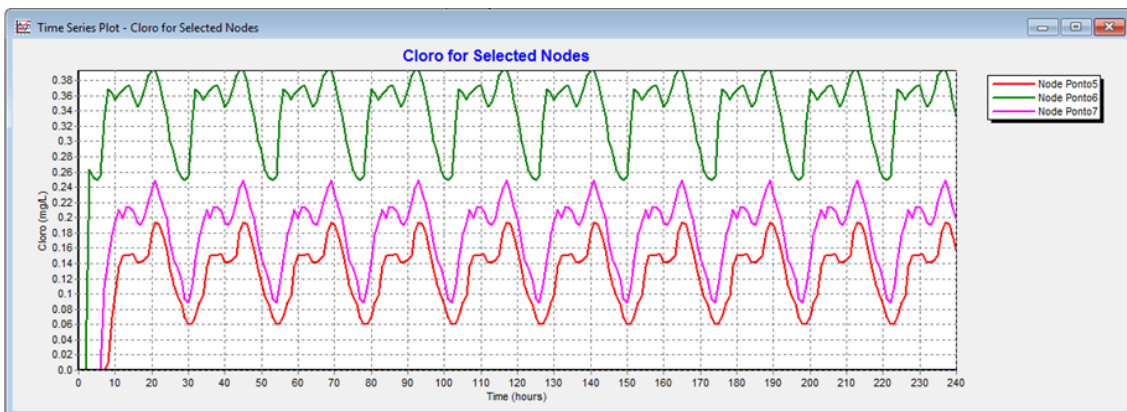
#### **7.4. Discussão dos valores de cloro residual**

Neste ponto discutem-se os valores de cloro residual obtidos através do programa de simulação EPANET, através da campanha de medição de cloro e os resultados históricos de AdAz.

Os gráficos da evolução do cloro ao longo do tempo nos nós correspondentes aos pontos de amostragem seleccionados foram extraídos do EPANET (**Figura 58 e Figura 59**).



**Figura 58** – Gráfico temporal do cloro nos pontos de amostragem 1, 2 e 4



**Figura 59** – Gráfico temporal do cloro nos pontos de amostragem 5, 6 e 7

Nos dois pontos mais desfavoráveis da rede (Pontos 1 e 2), pontos de extremidade de rede, com menor velocidade de escoamento, maior tempo de percurso e pouco consumo, verificam-se baixos valores de cloro (**Figura 58**).

O Ponto 4 (**Figura 58**), apesar de extremidade de rede, apresenta valores de cloro superiores aos dos pontos 1 e 2, devido à existência de consumo, ainda que inferiores ao recomendado.

Verifica-se que os pontos de percurso entre o reservatório e as extremidades de rede (Pontos 5, 6 e 7) (**Figura 59**) registam valores de cloro na gama dos valores recomendados no Decreto-Lei n.º 306/2007 (0,2 - 0,6 mg/L).

Através dos resultados da campanha de medição de cloro é possível evidenciar também um decaimento de cloro entre o ponto de entrega (Ponto 3a)) e o primeiro ponto de adução à rede medido no interior do reservatório (Ponto 3b)), fruto, provavelmente, do tempo de retenção no reservatório – aproximadamente 1,2 d. Este resultado foi obtido considerando o caudal médio de  $126,1 \times 10^3$  L/d e o volume do reservatório de  $150 \times 10^3$  L.

Na campanha de medição de cloro verificou-se que os valores de cloro total apresentaram-se sempre superiores aos de cloro livre evidenciando a existência de combinação de cloro livre com outras substâncias.

Analisando o histórico de valores de cloro residual obtidos no âmbito do PCQA de AdAz ao longo dos anos, em pontos pertencentes à zona de amostragem (ZA) onde está inserido o subsistema de Vila Nova de Rainha (ZA C. Baixo/VNR/ZI) (**Tabela 13**), verifica-se que os mesmos são, de uma forma geral, baixos, encontrando-se maioritariamente inferiores ao legalmente recomendado.

**Tabela 13** – Valores de cloro residual obtidos no âmbito do PCQA de AdAz

Mês/Ano	Cloro Residual (mg Cl <sub>2</sub> /L)					
	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Janeiro	<0,10	<0,10	0,23	0,10	<0,10	0,20
Fevereiro	<0,10	0,46	0,61	<0,10	<0,10	<0,10
Março	0,18	<0,10	0,14	0,17	<0,10	0,21
Abril	<0,10	<0,10	<0,10	0,30	<0,10	0,17
Maio	<0,10	<0,10	0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Junho	0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10
Julho	-	<0,10	0,14	0,11	<0,10	0,13
Agosto	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	0,11
Setembro	<0,10	<0,10	<0,10	0,19	<0,10	<0,10
Outubro	0,43	0,25	0,15	0,11	0,10	-
Novembro	<0,10	0,15	<0,10	<0,10	0,21	-
Dezembro	0,19	<0,10	<0,10	0,12	0,13	-

## 7.5. Simulação e discussão de cenários

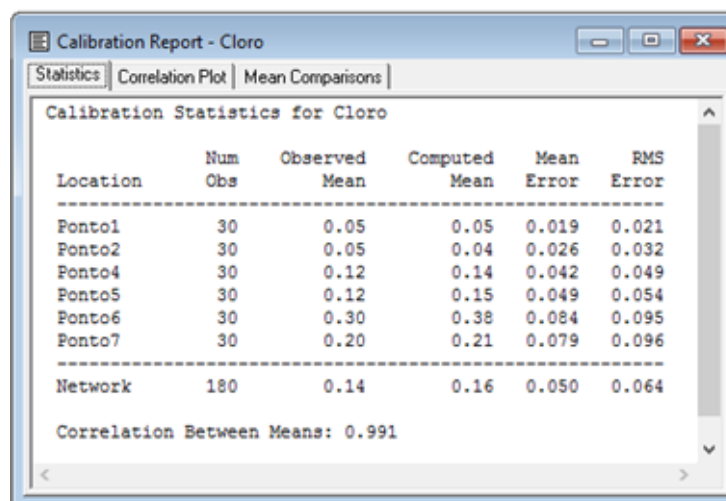
Uma vez que se verificou que existem efetivamente valores de cloro residual abaixo do recomendado, em pontos de extremidade de rede, efetuou-se a simulação em EPANET de cenários de aumento do valor de cloro no reservatório, de modo a prever o comportamento no sistema real, no sentido de encontrar uma solução para a situação.

Assim foram considerados três cenários de aumento do cloro no reservatório:

- cenário I – 0,60 mg/L (valor idêntico ao do reservatório);
- cenário II – 0,80 mg/L;
- cenário III – 1 mg/L.

### Cenário I

Simulando o aumento de cloro no reservatório para 0,60 mg/L (**Figura 60**), verificou-se que a alteração no valor de cloro nos pontos críticos não apresenta expressão relativamente ao cenário inicial, em que o valor de cloro no reservatório era de 0,57 mg/L.



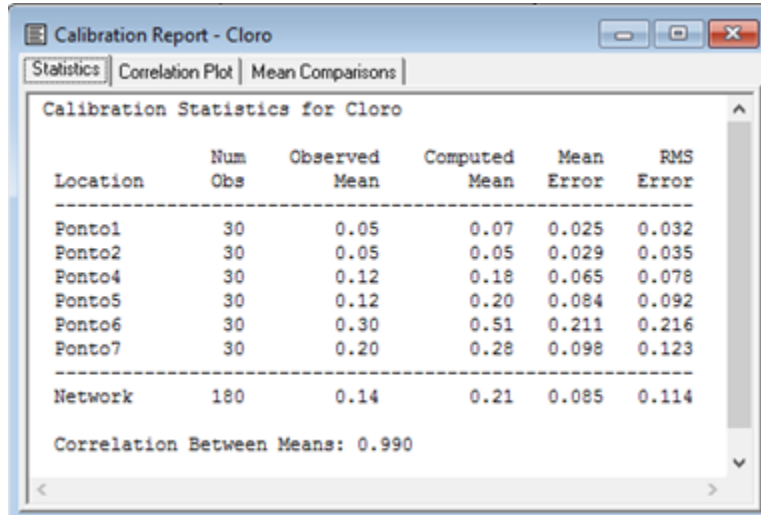
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	30	0.05	0.05	0.019	0.021
Ponto2	30	0.05	0.04	0.026	0.032
Ponto4	30	0.12	0.14	0.042	0.049
Ponto5	30	0.12	0.15	0.049	0.054
Ponto6	30	0.30	0.38	0.084	0.095
Ponto7	30	0.20	0.21	0.079	0.096
Network	180	0.14	0.16	0.050	0.064

Correlation Between Means: 0.991

**Figura 60** – Resultados para o cenário I

## Cenário II

Neste cenário foi testada uma concentração de cloro no reservatório de 0,80 mg/L, cujos resultados são apresentados na **Figura 61**. Verifica-se que os pontos 1 e 2 continuam baixos, mas o ponto 4 sofre um aumento ficando mais próximo do recomendado.



Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	30	0.05	0.07	0.025	0.032
Ponto2	30	0.05	0.05	0.029	0.035
Ponto4	30	0.12	0.18	0.065	0.078
Ponto5	30	0.12	0.20	0.084	0.092
Ponto6	30	0.30	0.51	0.211	0.216
Ponto7	30	0.20	0.28	0.098	0.123
Network	180	0.14	0.21	0.085	0.114

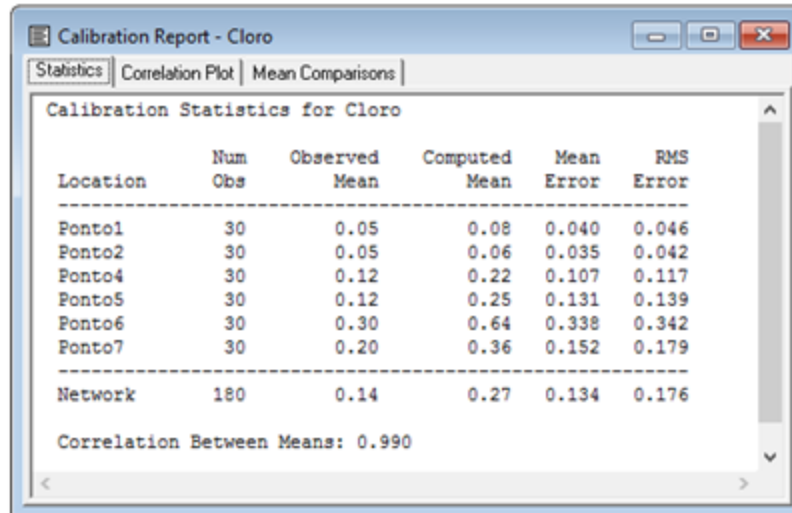
Correlation Between Means: 0.990

**Figura 61** – Resultados para o cenário II

## Cenário III

Simulando o aumento de cloro no reservatório para 1 mg/L (**Figura 62**), verificou-se que apesar de superiores, os valores nos pontos de extremidade continuam abaixo do mínimo recomendado (0,2 mg/L).

Além disso, desta forma existiriam pontos ao longo da rede, cujo valor de cloro residual ultrapassaria o máximo recomendado (0,6 mg/L), como por exemplo o ponto 6. A concentração de cloro em excesso pode resultar no aumento da formação de SPD indesejáveis e pode conferir sabor e cheiro à água, conduzindo a queixas por parte dos consumidores, tal como referido no **Capítulo 1.1** do presente trabalho.



Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	30	0.05	0.08	0.040	0.046
Ponto2	30	0.05	0.06	0.035	0.042
Ponto4	30	0.12	0.22	0.107	0.117
Ponto5	30	0.12	0.25	0.131	0.139
Ponto6	30	0.30	0.64	0.338	0.342
Ponto7	30	0.20	0.36	0.152	0.179
Network	180	0.14	0.27	0.134	0.176

Correlation Between Means: 0.990

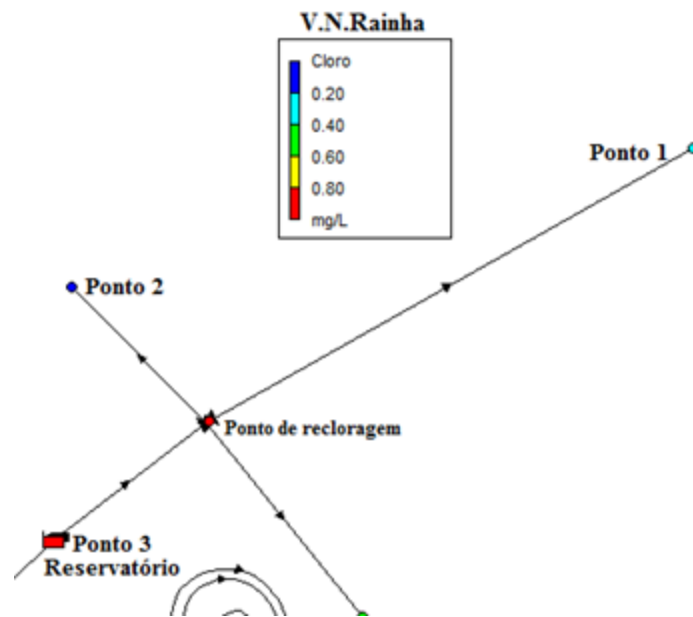
**Figura 62** – Resultados para o cenário III

Dos três cenários testados nenhum se mostrou adequado para os pontos 1 e 2.

Assim, foi testado um quarto cenário de introdução de um ponto de recloração próximo de dois dos pontos mais problemáticos em termos de decaimento do cloro.

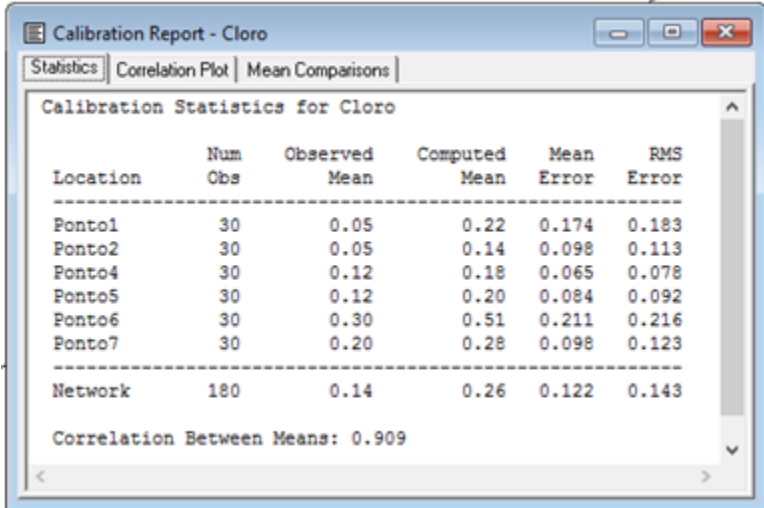
#### **Cenário IV**

Neste cenário foi simulada a instalação de recloração localizada num ponto estratégico entre o pontos 1 e 2 (**Figura 63**), por forma a tentar encontrar uma solução conjunta para ambos os locais, minimizando os custos.



**Figura 63** – Localização do ponto de rechloragem no EPANET

Na **Figura 64** apresentam-se os resultados do cenário IV, tendo-se verificado que, com a adição de um reforço de concentração de 9 mg/L de cloro, adicionada à massa líquida no ponto de rechloragem, o ponto 1 passa a cumprir o valor mínimo recomendado e o valor do ponto 2 aumenta significativamente. O ponto 2 está localizado no cemitério em que o consumo se destina apenas à limpeza e manutenção, pelo que não compensará investir numa solução individual.



Calibration Report - Cloro

Statistics | Correlation Plot | Mean Comparisons

Calibration Statistics for Cloro

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	30	0.05	0.22	0.174	0.183
Ponto2	30	0.05	0.14	0.098	0.113
Ponto4	30	0.12	0.18	0.065	0.078
Ponto5	30	0.12	0.20	0.084	0.092
Ponto6	30	0.30	0.51	0.211	0.216
Ponto7	30	0.20	0.28	0.098	0.123
Network	180	0.14	0.26	0.122	0.143

Correlation Between Means: 0.909

**Figura 64** – Resultados para o cenário IV



## 8. Conclusões e propostas de trabalhos futuros

Assegurar a qualidade da água para consumo humano é uma das grandes preocupações atuais.

O trabalho desenvolvido consistiu na construção e calibração de um modelo de simulação hidráulico e de qualidade da água de um SD de água real (AdAz), no *software* EPANET 2.0. O modelo de qualidade da água depende da adequada calibração do modelo hidráulico.

Na implementação da rede de distribuição no EPANET verificou-se que os registos informáticos dos componentes da rede do caso de estudo encontravam-se desatualizados, pelo que foi necessário proceder às respetivas atualizações. A atualização frequente dos registos informáticos internos de cada EG é pertinente para permitir monitorizar e gerir de forma eficaz um SD, assim o presente trabalho constituiu um contributo nesse sentido.

A calibração do modelo foi efetuada recorrendo a campanhas de medição de caudal e pressão e de cloro residual. Para tal foram previamente selecionados sete pontos da rede de distribuição em estudo. Relativamente aos valores de caudal, foram realizadas medições apenas à saída do reservatório, sendo os restantes valores obtidos por aproximação através de registos mensais dos consumos de água existentes na EG.

As medições de pressão foram realizadas nos sete pontos selecionados, tendo-se verificado que o sistema é estável a nível de pressão na rede, cumprindo os limites regulamentares.

Os resultados obtidos na campanha de medição de cloro, realizada nos sete pontos selecionados, revelaram a existência de alguns pontos críticos no sistema, com baixas concentrações de cloro residual livre (abaixo do limite legal recomendado – 0,2 mg/L), podendo resultar na redução da barreira de segurança contra a contaminação.

A calibração do modelo da rede de distribuição revelou-se uma tarefa mais complexa devido à inexistência de telegestão.

Para o desenvolvimento do modelo de qualidade da água foi necessária a determinação da constante de decaimento no seio da água por via experimental, tendo sido obtido o valor de  $k_b = - 5/d$ .

Relativamente à constante de decaimento devido ao efeito de parede, a dificuldade na realização de procedimentos laboratoriais para a sua determinação, uma vez que está relacionada com as características da tubagem que variam ao longo da rede, levaram a que o seu valor fosse estimado por um processo iterativo de tentativa-erro com base no valor da constante de decaimento no seio da água, tendo resultado no  $k_w = - 0,10$  m/d.

Após construção e calibração do modelo foram simulados três cenários de aumento de cloro no reservatório, contudo os mesmos não constituíram solução para a situação dos pontos mais críticos, pois as concentrações de cloro encontravam-se abaixo dos valores recomendados. Assim foi testado um quarto cenário com uma recloração junto de dois dos pontos mais desfavoráveis (1 e 2), tendo-se obtido melhorias nesses locais. Tal cenário carece ainda de estudo económico de modo a avaliar a viabilidade da sua aplicação.

Globalmente os baixos valores de cloro em extremidades de rede podem ser justificados com o baixo consumo, correspondendo a velocidades de escoamento baixas e tempos de percurso elevados (indicadores de sobredimensionamento da rede), condições favoráveis à degradação da qualidade da água.

O presente trabalho no âmbito do decaimento do cloro permitiu obter um modelo da rede de distribuição que pode ser utilizado pela EG como uma importante ferramenta de gestão do SD, nomeadamente no que concerne ao estudo de outros parâmetros de qualidade como por exemplo os THM, bem como na definição de estratégias operacionais e de manutenção.

No sentido de melhorar o SD estudado sugerem-se algumas medidas:

- medição contínua de cloro residual livre acoplada a um aparelho de injeção de cloro;
- inclusão dos pontos mais desfavoráveis da rede em termos de cloro, nos pontos de amostragem do PCQA, para uma melhor monitorização;

- fiscalização para identificação de intrusão indevida de água de outra origem que não a de abastecimento público no SD, através da medição de pH, de condutividade e de cloro, de modo a evitar a contaminação da água;
- realização de descargas pontuais nos locais mais desfavoráveis com reutilização da água libertada, de modo a aumentar a velocidade de escoamento e consequentemente diminuir o decaimento de cloro;
- implementação de rotina de higienização nas infraestruturas e no reservatório e purga na rede.

Como perspetivas de trabalhos futuros propõe-se:

- alargar a aplicação deste estudo a todo o SD de água de AdAz, contribuindo dessa forma para uma melhor gestão da rede de distribuição do concelho, dando prioridade às zonas mais críticas;
- a simulação de outros cenários, como a instalação de postos de recloração em outro(s) ponto(s) da rede, medida que pode revelar-se dispendiosa necessitando de estudo económico;
- a simulação da formação de THM na rede.



## Referências Bibliográficas

Águas da Azambuja S.A., (2016a), acessido a 15/01/2016, em:  
<http://www.aguasdaazambuja.pt/pages/7-qualidade-da-agua?locale=pt>

Águas da Azambuja S.A., (2016b), acessido a 15/01/2016, em:  
<http://www.aguasdaazambuja.pt/pages/25-a-empresa?locale=pt>

Águas de Portugal, (2016a), acessido a 07/02/2016, em:  
<http://www.adp.pt/pt/?id=61&img=6&bl=2>

Águas de Portugal, (2016b), acessido a 08/05/2016, em:  
<http://www.adp.pt/pt/comunicacao/noticias/?id=69&idn=72>

Ahn, J. C., Lee, S. W., Choi, K. Y., Koo, J. Y., (2012). *Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system*. Sustain. Environ. Res., 22 (1), 31 – 38

Alegre, H., Covas, D., (2010), Guia Técnico 16 - *Gestão patrimonial de infra-estruturas de abastecimento de água*, ERSAR. ISBN: 978-989-8360-04-5, disponível em:  
[https://poseur.portugal2020.pt/media/4039/guia\\_tecnico\\_16.pdf](https://poseur.portugal2020.pt/media/4039/guia_tecnico_16.pdf)

Alegria A., Jorge de Sousa, I, Almeida Santos, S., Cavaco, M. A., Coimbra, M. F., Cruz, V., Hespanhol, I., Mateus, I., Santos, Elsa Poças, (1998). *Trihalometanos - análise da situação em Portugal*, Comissão Especializada da Qualidade de Água - Associação Portuguesa de Distribuição e Drenagem de Água – Portugal, 1 - 15

Alves, C., (2010). *Tratamento de Águas de Abastecimento*, 3ª ed., Publindústria - Edições Técnicas, Porto

Ammar, T.A., Abid, K.Y., El-Bindary, A.A., El-Sonbati, A.Z., (2014). *Chlorine dioxide bulk decay prediction in desalinated drinking water*. Desalination 352, 45 – 51.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.08.010>

Beleza, J.M.B.B., (2005). *Simulação das concentrações de cloro residual e trihalometanos em redes de distribuição de água para consumo humano*. Dissertação de

Mestrado. Departamento de Engenharia Química. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto

Black & Veatch Corporation, (2010). *White's handbook of chlorination and alternative disinfectants* - 5th ed, John Wiley & Sons, Inc. ISBN 978-0-470-18098-3

Boccelli DL, Tryby ME, Uber JG, Summers RS, (2003). *A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions*. Water Research 37:2654-2666

Brown, D., Bridgeman, J., West, J.R., (2011). *Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems*. Rev. Environ. Sci. Bio/Technology 10, 79 – 99. doi:10.1007/s11157-011-9229-8

Clark, R.M., (2011). *Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies*. Front. Earth Sci., 5(4), 334 – 340. doi: 10.1007/s11707-011-0194-x

Clark, R.M., Sivaganesan, M., (2002). *Predicting chlorine residuals in drinking water: Second order model*. J. Water Resour. Plan. Manag. 128, 152 – 161. doi:10.1061/(ASCE)07339496(2002)128:2(152)

Clark, R.M., Yang, Y.J., Impellitteri, C.A., Haught, R.C., Schupp, D.A., Panguluri, S., Krishnan, E.R., (2010). *Chlorine Fate and Transport in Distribution Systems: Experimental and Modeling Studies*. Journal American Water Works Association 105, 144 – 155

Coelho, S. T., Loureiro, D., Alegre H., (2006). Guia Técnico 04 - *Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água*. IRAR, LNEC, ISBN 972-99354-8-3, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSítio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSítio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao&BookTypeID=1&BookCategoryID=1>

Coelho, S.T., Loureiro, D., Alegre, H., (2007). *A iniciativa inicial para a simulação de sistemas de abastecimento de água (INSSAA): a implementação de capacidades de*

modelação, em: I Conferência INSSAA – Modelação de Sistemas de Abastecimento de Água Barcelos, 1 – 13

Deborde, M., von Gunten, U., (2008). *Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment - Kinetics and mechanisms: A critical review*. Water Res. 42, 13 – 51. doi:10.1016/j.watres.2007.07.025

Decreto Regulamentar n.º 23/95, de 23 de agosto, Diário da República, I Série – B, n.º 194

Decreto-Lei 194/2009, de 20 de agosto, Diário da República N.º 161, Série I-A

Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de setembro, Diário da República N.º 206, Série I-A

Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, Diário da República N.º 176, Série I-A

Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, Diário da República N.º 164, 1ª Série

Diretiva (UE) 2015/1787 da Comissão de 6 de Outubro de 2015, Jornal Oficial da União Europeia n.º L 260 de 07/10/2015, 6 – 17

Diretiva 98/83/CE do Conselho, de 3 de novembro de 1998, Jornal Oficial das Comunidades Europeias n.º L 330 de 05/12/1998, 32 – 54

ERSAR, (2015). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2015)*, Volume 2 – Controlo da qualidade da água para consumo humano, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSítio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&BookCategoryID=1&BookTypeID=3>

ERSAR, (2016), *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2016)*, Volume 2 – Controlo da qualidade da água para consumo humano, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSítio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&BookCategoryID=1&BookTypeID=3>

ERSAR, (2016a), acessido a 17/06/2016, em:  
<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?GenericContentId=0&SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cQuemSomos%5cMissao&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cQuemSomos>

ERSAR, (2016b), acessido a 01/09/2016, em:  
[http://www.ersar.pt/xCelcius/ShowXCelcius\\_PopUp.aspx?FileName=/lib/14/11179A154D812059C5DBF44C03463B97111D1.swf](http://www.ersar.pt/xCelcius/ShowXCelcius_PopUp.aspx?FileName=/lib/14/11179A154D812059C5DBF44C03463B97111D1.swf)

Fernandes, A. C., Guerra, M. D., Ribeiro, R., Rodrigues, S., (2015). *Relatório do estado do ambiente 2015*, Agência Portuguesa do Ambiente

Fisher, I., Kastl, G., Sathasivan, A., (2011a). *Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems*. Water Res. 45, 4896 – 4908. doi:10.1016/j.watres.2011.06.032

Fisher, I., Kastl, G., Sathasivan, A., (2012). *A suitable model of combined effects of temperature and initial condition on chlorine bulk decay in water distribution systems*. Water Res. 46, 3293–3303. doi:10.1016/j.watres.2012.03.017

Fisher, I., Kastl, G., Sathasivan, A., Jegatheesan, V., (2011b). *Suitability of Chlorine Bulk Decay Models for Planning and Management of Water Distribution Systems*. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 41, 1843–1882. doi:10.1080/10643389.2010.495639

Haider, H., Haydar, S., Sajid, M., Tesfamariam, S., Sadiq, R., (2015). *Framework for optimizing chlorine dose in small- to medium-sized water distribution systems: A case of a residential neighbourhood in Lahore, Pakistan*. Water SA Vol. 41 No. 5, 614 – 623. ISSN 1816-7950 (On-line). <http://dx.doi.org/10.4314/wsa.v41i5.04>

Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F., Powell, J.C., Spencer, I., (2002). *The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems*. Water Res. 36, 3479–3488. doi:10.1016/S0043-1354(02)00056-8

Instituto Nacional de Estatística, Censos 2011, acessido a 17/01/2016, em:  
<http://mapas.ine.pt/map.phtml>

IRAR, LNEC, (2004). Guia Técnico 05 - *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), Lisboa. ISBN 972-99354-0-8, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao&BookTypeID=1&BookCategoryID=1>

Kastl, G.J., Fisher, I.H., Jegatheesan, V., (1999). *Evaluation of chlorine decay kinetics expressions for drinking water distribution systems modelling*. J. water supply Res. Technol. - AQUA 48, 219 – 226

Kiene, L., Lu, W., Levi, Y., (1998). *Relative importance of the phenomena responsible for chlorine decay in drinking water distribution systems*. Water Sci. Technol. 38, 219 – 227. doi:10.1016/S0273-1223(98)00583-6

Kim, H., Kim, S., Koo, J., (2015). *Modelling Chlorine Decay in a Pilot Scale Water Distribution System Subjected to Transient*. Procedia Engineering 119, 370 – 378. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.897

Machell, J., Mounce, S. R., Boxall, J. B., (2010). *Online modelling of water distribution systems: a UK case study*. Drinking Water Engineering and Science, 3, 21 – 27

Marecos do Monte, M. H., Albuquerque, A., (2010). Guia Técnico 14 – *Reutilização de águas residuais*, ERSAR. ISBN: 978-989-8360-01-4, disponível em: <http://www.ersar.pt/Website/viewcontent.aspx?name=Guia14>

Menaia, J.F., Coelho, S.T., Lopes, A., Fonte, E., Palma, J., (2003). *Dependency of bulk chlorine decay rates on flow velocity in water distribution networks*. Water Sci. Technol. Water Supply 3, 209 – 214

Monteiro, L., Figueiredo, D., Dias, S., Freitas, R., Covas, D., Menaia, J., Coelho, S.T., (2014). *Modeling of chlorine decay in drinking water supply systems using EPANET MSX*. Procedia Engineering 70, 1192 – 1200. doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.132

Monteiro, L., Viegas, R. M. C., Covas, D. I. C., Menaia, J., (2015). *Modelling chlorine residual decay as influenced by temperature*. Water and Environment Journal 29, 331 – 337. doi:10.1111/wej.12122

Nagatani, T., Yasuhara, K., Murata, K., Takeda, M., Nakamura, T., Fuchigami, T., Terashima, K., (2006). *Residual Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System*. The 7th International Symposium on Water Supply Technology, Yokohama 2006, 1 - 11

Nejjari, F., Puig, V., Pérez, R., Quevedo, J., Cugueró, M. A., Sanz, G., Mirats, J. M., (2014). *Chlorine decay model calibration and comparison: application to a real water network*. Procedia Engineering 70, 1221 – 1230. doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.135

Nikolaou, A. D., Kostopoulou, M. N., Lekkas, T. D., (1999). *Organic by-products of drinking water chlorination*. Global Nest: the Int. J. Vol 1, No 3, 143 - 156

Organização Mundial de Saúde, (1996). *Desinfecção da água*. Gabinete Regional da Europa

Politejo, (2016), acessido a 28/01/2016, em:  
[http://politejo.com/pdf/catalogos/Catalogo\\_Tecnico\\_Comercial\\_de\\_Tubos\\_PVC.pdf](http://politejo.com/pdf/catalogos/Catalogo_Tecnico_Comercial_de_Tubos_PVC.pdf)

Powell, J.C., Hallam, N.B., West, J.R., Forster, C.F., Simms, J., (2000a). *Factors which control bulk chlorine decay rates*. Water Res. 34, 117 – 126. doi:10.1016/S0043-1354(99)00097-4

Powell, J.C., West, J.R., Hallam, N.B., Forster, C.F., Simms, J., (2000b). *Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay*. J. Water Resour. Plan. Manag. 126, 13 – 20. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(2000)126:1(13)

Ramos, H.M., Loureiro, D., Lopes, A., Fernandes, C., Covas, D., Reis, L.F., Cunha, M.C., (2010). *Evaluation of Chlorine Decay in Drinking Water Systems for Different Flow Conditions: From Theory to Practice*. Water Resour. Manag. 24, 815 – 834. doi:10.1007/s11269-009-9472-8

Recomendação IRAR n.º 05/2007 - *Desinfecção da água destinada ao consumo humano*, 2007, IRAR

Rosa, M. J., Vieira, P., Menaia J., (2009). *Guia Técnico 13 – O tratamento de água para consumo humano face à qualidade da água de origem.*, IRAR, LNEC. ISBN: 978-989-95392-7-3, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao&BookTypeID=1&BookCategoryID=1>

Rossman, L.A., Boulos, P.F., (1996). *Numerical methods for modeling water quality in distribution systems: A comparison.* J. Water Resour. Plan. Manag. 122, 137–146. doi:10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:2(137)

Rossman, L.A., Clark, R.M., Grayman, W.M., (1994). *Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems.* J. Environ. Eng. 120, 803–820. doi:10.1061/(ASCE)07339372(1994)120:4(803)

Simas, L., Gonçalves, P., Lopes, J. L., Alexandre, C., (2005). *Guia Técnico 6 – Controlo da qualidade da água para consumo humano em sistemas públicos de abastecimento*, IRAR. ISBN 972-99354-6-7, disponível em:

<http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?SubFolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao%5cPublicacoesIRAR&Section=MenuPrincipal&FolderPath=%5cRoot%5cContents%5cSitio%5cMenuPrincipal%5cDocumentacao&BookTypeID=1&BookCategoryID=1>

Simas, L., *Qualidade da água para consumo humano*, Revista Segurança e Qualidade Alimentar, 28, N.7, dezembro 2009, Sequali, disponível em: <http://www.infoqualidade.net/SEQUALI/PDF-Sequali-07/Page%2026-29.pdf>, acedido em maio de 2016

Sousa, E., (2001). *Saneamento Ambiental I, Sistemas de Distribuição de Água.* Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura, Secção de Hidráulica e dos Recursos Hídricos e Ambientais. Lisboa

Speight, V. & Boxall, J., (2015). *Current perspectives on disinfectant modelling.* Procedia Engineering 119, 434 – 441. doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.906

- Stoianov, I.& Aisopou, A., (2014). *Chlorine decay under steady and unsteady-state hydraulic conditions*. Procedia Engineering 70, 1592 – 1601
- Suse, A., Yoshikawa, M., Junior, E. L., (2014). *Simulação da qualidade de água em redes de distribuição empregando o EPANET-MSX*. Revista DAE N.º197, 32 – 41. doi: <http://dx.doi.org/10.4322/dae.2014.126>
- U. S. Environmental Protection Agency, (2005). *Water Distribution System Analysis: Field Studies, Modeling and Management - A Reference Guide for Utilities*. No. EPA/600/R-06/028. U. S. Environmental Protection Agency Office, Cincinnati, Ohio.
- Vasconcelos, J.J., Rossman, L.A., Grayman, W.M., Boulos, P.F., Clark, R.M., (1997). *Kinetics of chlorine decay*. J. – Am. Water Work. Assoc. 89, 54 – 65
- Vieira P., Coelho, S. T., (2003). *Practical Conditions for the use of a first order chlorine decay model in water supply*. Advances in Water Supply Management – Maksimović, Butler & Memon (eds), Swets & Zeitlinger, Lisse, ISBN 90 5809 608 4, 405 - 414
- Vieira, J; Morais, C., (2005). Guia Técnico 07 - *Planos de segurança de água para consumo humano*. ERSAR. ISBN: 972-99354-5-9, disponível em: <http://www.ersar.pt/website/ViewContent.aspx?FolderPath=%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CMenuPrincipal%5CDocumentacao&BookID=998&SubFolderPath=%5CRoot%5CContents%5CSitio%5CMenuPrincipal%5CDocumentacao%5CPublicacoesexternas&Section=MenuPrincipal&GenericContent>
- Vieira, P. A., (2002). *Decaimento do Cloro em Sistemas de Distribuição Para Consumo Humano*. Tese de Mestrado. Departamento de Ciências e Engenharia do Ambiente. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa
- Vieira, P., Coelho, S.T., Loureiro, D., (2004). *Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply*. J. Water Supply Res. Technol. - Aqua 53.7, 453 – 467
- Vieira, P., Coelho, S.T., Praça, P., (2001). *Controlo do residual de cloro em sistemas de transporte e distribuição de água*. Actas do Encontro Nac. Entidades Gestoras, 1 – 20

World Health Organization, (2011). *Guidelines for drinking-water quality*, 4th ed. Geneva

Wu, Z.Y., (2006). *Optimal calibration method for water distribution water quality model*. J. Environ. Sci. Heal. Part A Toxic/Hazardous Subst. Environ. Eng. 41, 1363 – 1378. doi:10.1080/10934520600657115

Xie X., Zeng, B., Nachabe, M., (2015). *Sampling design for water distribution network chlorine decay calibration*. Urban Water Journal, Vol. 12, No. 3, 190 – 199. <http://dx.doi.org/10.1080/1573062X.2013.831911>

Xilem, (2016), acedido a 01/03/2016, em:  
<http://documentlibrary.xylemappliedwater.com/wp-content/blogs.dir/22/files/2012/07/ssv-td-pt.pdf>



## **Anexos**



**Anexo I – Comprovativo da participação no Fórum de Engenharia Química e  
Biológica '16 – iFEQB'16 e apresentação da comunicação em painel**



**CERTIFICADO DE PARTICIPAÇÃO**

Certifica-se que Liliana Neves esteve presente no **FÓRUM de Engenharia Química e Biológica'16 - iFEQB'16**, que decorreu no dia 18 e 19 de Maio de 2016, no ISEL – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

Lisboa, de Maio de 2016  
A Comissão Organizadora

*para ciência*



ORDEM  
DOS ENGENHEIROS  
REGIÃO SUL



ORDEM DOS  
ENGENHEIROS  
TÉCNICOS



## ESTUDO DO DECAIMENTO DE CLORO EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Neves, L. P.<sup>1\*</sup>, Santos, M. T.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Área Departamental de Engenharia Química, ISEL - Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007 Lisboa, Portugal.  
\*lilianapintoneves@gmail.com

### RESUMO

O objetivo do presente trabalho é estudar o decaimento de cloro num sistema público de abastecimento de água, através da implementação da modelação de cloro residual, utilizando como ferramenta de suporte o software EPANET 2.0, por forma a otimizar um teor de desinfetante residual livre ao longo do sistema.

### INTRODUÇÃO

A qualidade da água, bem como a sua manutenção ao longo do sistema de distribuição é uma preocupação constante das entidades gestoras, como é o caso da AdAz - Águas da Azambuja, S.A.

Os sistemas de abastecimento de água potável são desinfetados para inativar microrganismos e para manter uma concentração residual ao longo do sistema de distribuição, de modo a não prejudicar a saúde humana. O cloro (Cl) é o desinfetante mais utilizado para atingir estes objetivos, devido ao seu baixo custo e alta eficácia [1]. A concentração de Cl residual livre presente na água tratada diminui gradualmente ao longo da rede de distribuição à medida que este reage, e.g. com os compostos presentes na água ou com o material da tubagem. Esta situação pode levar ao total desaparecimento do Cl residual livre, aumentando as probabilidades de contaminação microbiológica [2].

Assim é importante desenvolver estudos que permitam um maior conhecimento sobre a problemática do decaimento de Cl nos sistemas de abastecimento de água, nomeadamente através de modelos que permitam prever a evolução das [Cl] ao longo dos mesmos, e dessa forma encontrar soluções para minimizar os seus efeitos. O recurso à modelação através do EPANET 2.0 [3], desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), deve-se ao facto de este ser um programa de utilização livre e gratuita, fiável e bem documentado, que se adequa às necessidades de simulação do sistema em estudo.

### METODOLOGIA

A metodologia adotada para realizar o presente trabalho consistiu na construção e calibração do modelo de simulação hidráulico e de qualidade da água para a rede em estudo -Subsistema de Vila Nova da Rainha, pertencente ao sistema de distribuição de Águas da Azambuja, recorrendo ao EPANET 2.0.

Relativamente à construção do modelo hidráulico, a rede de distribuição foi exportada do *AutoCad* para o EPANET, no entanto a versão disponível em *AutoCad* encontrava-se desatualizada, pelo que foi necessário proceder às respetivas alterações e atualizações.

De modo a calibrar o modelo foi necessário levar a cabo uma campanha de medição. Para tal foram selecionados 7 pontos da rede de distribuição (Figura 1), com base nas condições hidráulicas do sistema, caudal e velocidade (extremos de rede, pontos intermédios, pontos de maior e menor consumo). Foram realizadas determinações de Cl residual e total através do método colorimétrico DPD usando fotómetro de bolso *Hach*, acompanhadas de medição de pH através de medidor de pH *Hach* (Figura 2). Foi também instalado à saída do reservatório um medidor de caudal e de pressão acoplados a uma *datalogger* para registo de dados em contínuo.



Figura 1 – Localização dos sete pontos selecionados

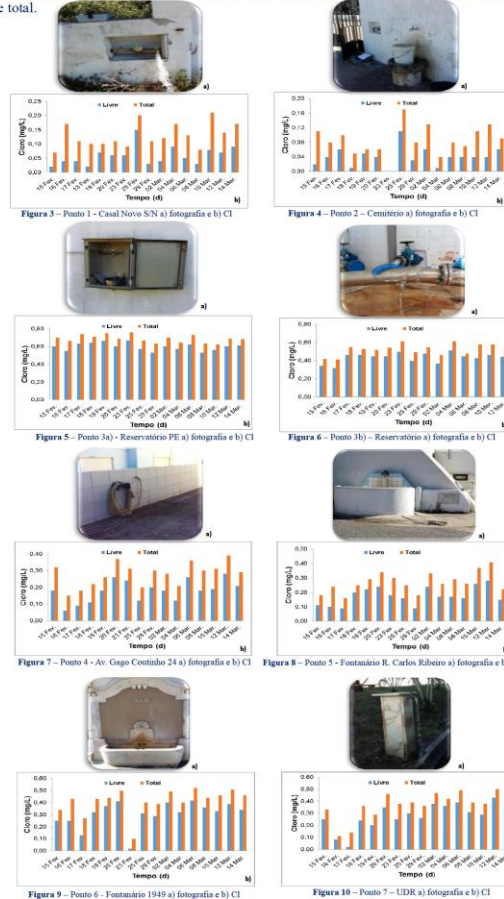


Figura 2 – Equipamento de determinação de a) pH b) de Cl e c) reagentes

AGRADECIMENTOS  
À AdAz - Águas da Azambuja, S.A.

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Nas Figuras 3 a 10 apresentam-se alguns registos da campanha de medição de cloro livre e total.



Os dois pontos mais desfavoráveis da rede (Pontos 1 e 2) são de extremidade, com menor velocidade, maior tempo de retenção e ausência de consumo (Figuras 3 e 4). Evidencia-se um acentuado decaimento de Cl entre o ponto de entrega (Ponto 3a)) e o primeiro ponto de adução à rede (Ponto 3b)), resultado do tempo de retenção no reservatório. Os pontos de percurso entre o reservatório e as extremidades de rede (Pontos 5, 6 e 7) registam valores de Cl na gama dos valores recomendados no *Decreto-Lei n.º 306/2007* (0,2-0,6 mg/L). O ponto 4, apesar de extremidade de rede, apresenta valores de Cl razoáveis devido à existência consumo.

### CONCLUSÕES E CRÍTICAS

Apesar deste trabalho ainda se encontrar em desenvolvimento já é possível concluir que existe efetivamente decaimento de cloro residual ao longo do sistema de distribuição, sendo portanto de todo o interesse a incorporação de um modelo de simulação para otimizar o teor de desinfetante residual livre no sistema, por forma a minimizar possíveis efeitos indesejáveis, nomeadamente no que diz respeito à degradação da qualidade da água.

### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fisher, I., Kastl, G., Sathuviam, A., Jegatheesan, V., 2011. *Sustainability of Chlorine Bulk Decay Models for Planning and Management of Water Distribution Systems*. Crit. Rev. Environ. Sci. Technol. 41, 1843-1882.
- [2] Recomendação IRAR n.º 05/2007 - Desinfecção da água destinada ao consumo humano, 2007. IRAR.
- [3] Loureiro, D., Coelho S.T., 2004. *Manual do Utilizador EPANET 2.0 - Simulação Hidráulica e de Parâmetros de Qualidade em Sistemas de Transportar e Distribuição de Água*. IRAR, INEC, Lisboa.

**Anexo II – Comprovativo de participação no XXII Encontro Luso-Galego de Química  
2016 e apresentação da comunicação em painel**



## CERTIFICADO

Certifica-se que

**Liliana Isabel Pinto Neves**

apresentou a Comunicação em Painel intitulada

**Decaimento de cloro num sistema de abastecimento de água**

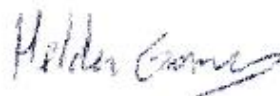
no XXII Encontro Luso-Galego de Química, realizado no Instituto Politécnico de Bragança, de  
09/11/2016 a 11/11/2016.

---

**Pe' A Comissão Organizadora**

*Instituto Politécnico de Bragança,*

*11 de Novembro de 2016*



## Decaimento de cloro num sistema de abastecimento de água

L. P. Neves<sup>1, 2\*</sup>, M. T. Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Área Departamental de Engenharia Química, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Instituto Politécnico de Lisboa, R. Conselheiro Emídio Navarro 1, 1959-007, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup> AdAz - Águas da Azambuja, S.A., R. Teodoro José da Silva, Edifício Atrium Azambuja, 37, 2050-335 Azambuja, Portugal

\*lilianapintoneves@gmail.com

### Resumo

O objetivo do presente trabalho é estudar o decaimento de cloro no Subsistema de abastecimento de água de Vila Nova da Rainha (Águas da Azambuja), com recurso à modelação - EPANET 2.0.

### Introdução

A qualidade da água ao longo dos sistemas de distribuição (SD) é uma das principais preocupações que as entidades gestoras (EG) de água enfrentam permanentemente [1].

O cloro (Cl) residual presente na água tratada reage com outros compostos presentes nas paredes das tubagens ou no seio da água, ao longo do SD, levando à diminuição da sua concentração, podendo conduzir ao seu total desaparecimento, aumentando assim a probabilidade de contaminação microbiológica [2].

É necessário um adequado modelo de decaimento de cloro na água, para apoiar as EG no eficaz planeamento/gestão da desinfeção em SD [3], assim torna-se pertinente a realização do presente trabalho no seio da EG.

### Metodologia

#### Etapas desenvolvidas:

- Levantamento da rede distribuição para atualização da versão disponível em AutoCad e seleção de sete pontos - extremos de rede, pontos intermédios, pontos de maior e menor consumo (Figura 1).
- Campanhas de medição de pressão, caudal e cloro (Tabela 1) nos pontos selecionados.
- Construção e calibração do modelo de simulação hidráulico e de qualidade da água do Subsistema de Vila Nova da Rainha, recorrendo ao programa de simulação - EPANET 2.0 [4].

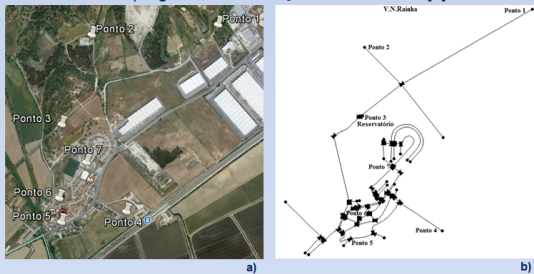


Figura 1 – Pontos selecionados a) no Google Earth; b) no EPANET

#### Métodos analíticos:

- Cl (residual e total) - método colorimétrico DPD com fotómetro portátil Hach (Figura 2a);
- pH - medidor de pH Hach (Figura 2b)).
- Caudal e pressão - medidor de caudal e de pressão acoplados a um datalogger para registo de dados em contínuo.



Figura 2 – Equipamento de determinação de a) pH b) de Cl

#### Referências Bibliográficas

- Vieira, P., Decaimento do cloro em sistemas de distribuição de água para consumo humano, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, 2002.
- Recomendação IRAR n.º 05/2007 - Desinfeção da água destinada ao consumo humano, IRAR, 2007.
- Fisher, I.; Kastl, G.; Sathasivan, A., Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems, Water Research 45, 4096-4098, 2011.
- Loureiro, D.; Coelho, S. T., Manual do Utilizador EPANET 2.0 – Simulação Hidráulica e de Parâmetros de Qualidade em Sistemas de Transporte e Distribuição de Água. IRAR, LNEC, Lisboa, 2004.

Tabela 1 – Campanha de medição de Cl residual

Ponto	Cl (mg/L)			
	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
1	0,01	0,06	0,15	0,03
2	0,01	0,06	0,17	0,03
3a)	0,51	0,57	0,68	0,04
3b)	0,28	0,40	0,51	0,06
4	0,04	0,14	0,28	0,06
5	0,05	0,13	0,28	0,06
6	0,13	0,29	0,42	0,06
7	0,06	0,24	0,43	0,11

### Apresentação e Discussão de Resultados

Após construção e calibração do modelo do sistema em estudo, no EPANET, avaliou-se o decaimento de cloro nos pontos 1 a 7. Nas Figuras 3 e 4 apresenta-se a evolução do Cl nos referidos pontos.

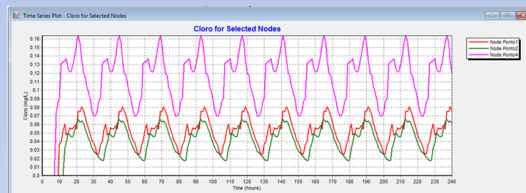


Figura 3 – Cloro nos pontos 1, 2 e 4

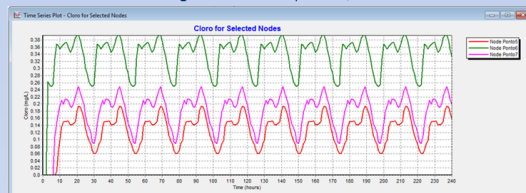


Figura 4 – Cloro nos pontos 5, 6 e 7

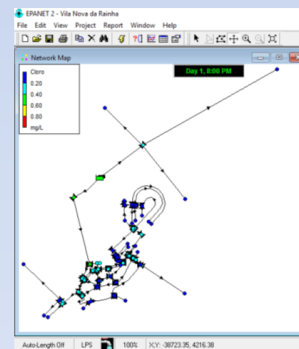


Figura 5 – Modelação do Cl na rede

Nos pontos 1, 2 e 4 - extremos de rede - verificaram-se baixos valores de Cl.

Os pontos 5, 6 e 7 - pontos intermédios - apresentaram valores de Cl entre 0,2 a 0,6 mg/L, conforme recomendado no Decreto-Lei n.º 306/2007.

Na Figura 5 apresenta-se a modelação do Cl na rede de distribuição em estudo.

### Conclusões e Críticas

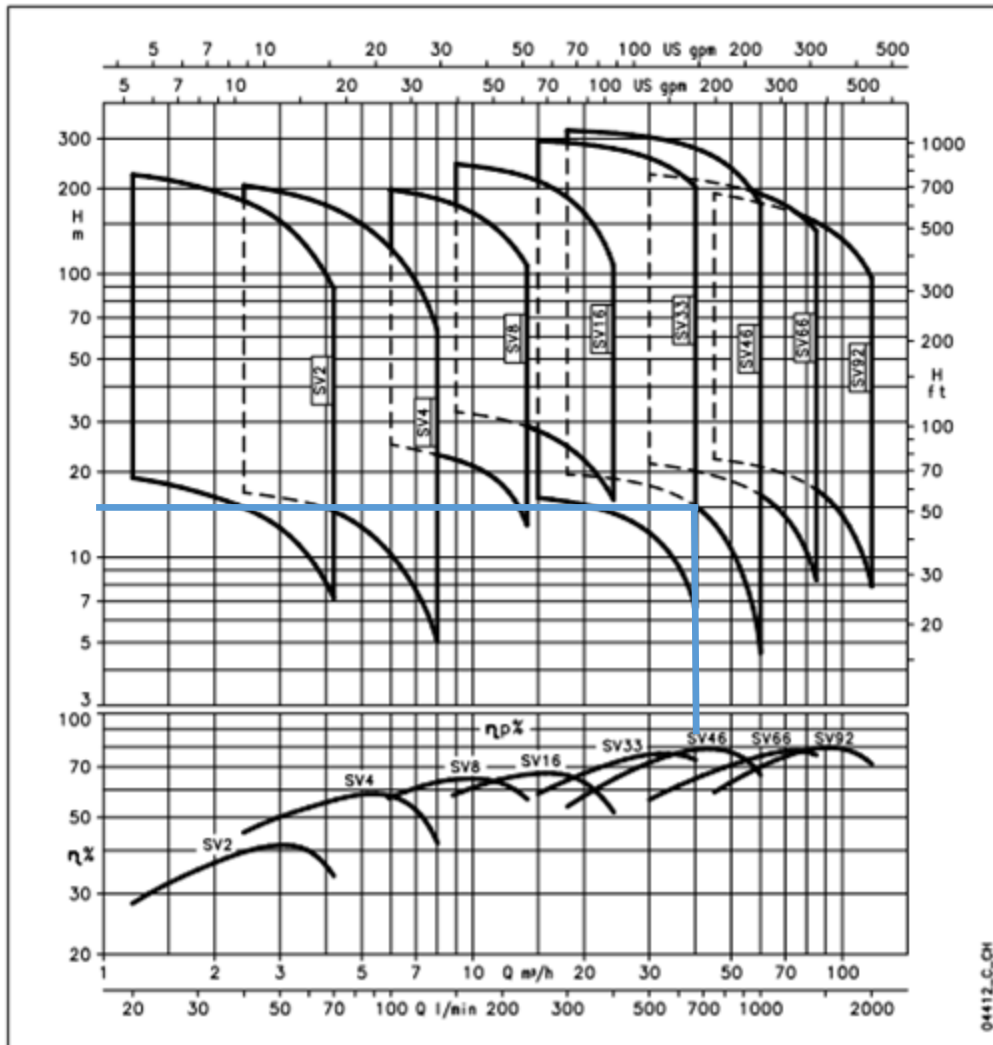
Foi possível construir e calibrar um modelo hidráulico e de qualidade da água de uma sistema de abastecimento real no programa EPANET 2.0. Sendo que o mesmo se revelou uma importante ferramenta no que concerne ao estudo do decaimento de cloro ao longo da rede e pode constituir um instrumento bastante útil na gestão do SD.

**Agradecimentos**  
À Águas da Azambuja, S.A.

**Anexo III** – Ponto ótimo de funcionamento da bomba em questão de acordo com o fabricante (Xilem, 2016)

 **LOWARA**

**CAMPO DOS RENDIMENTOS HIDRÁULICOS SÉRIE SV 50 Hz,  
2 PÓLOS (~2900 min<sup>-1</sup>)**





## Anexo IV – Procedimento do método colorimétrico e calibração do fotómetro

### HPT 310 Cloro, Livre e Total

Baixo range, 0.02–2.00 mg/L

**Escopo de aplicação:** Para testar o total de cloro ou o cloro livre presente na água, em águas tratadas e águas de estuários

#### ! Preparação para o Teste

#### Antes de começar o teste:

Analise as amostras imediatamente. Não armazene para fazer análises posteriores.

Inverta as garrafas do reagente lentamente. Agite as garrafas suavemente, para garantir a adição do volume correto da solução.

É importante misturar as soluções A e B antes de adicionar a amostra. Não adicione os reagentes à amostra da etapa 3. Se o limite do teste for excedido, dilua a amostra com um volume definido de água de alta qualidade, livre de cloro e repita o teste. Poderá ocorrer uma perda de cloro devido à diluição. Multiplique o resultado pelo fator de diluição.

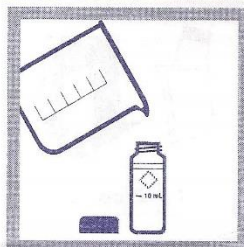
Não execute a etapa 6 se você quiser determinar somente o total de cloro.

Para DR 5000, DR 3800, DR 2800, e DR 2700: usar a célula quadrada (número de catálogo 2495402) com o programa 80.

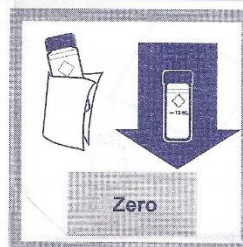
#### Método Liquid DPD

1. Seleccionar channel LR no Pocket Colorimeter™ II.

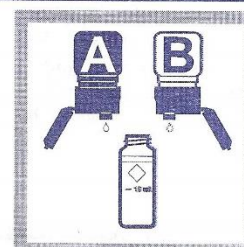
Para outros instrumentos de HACH seleccionar programa 80 (para DR/8XX: programa 9), pressionar INICIAR.



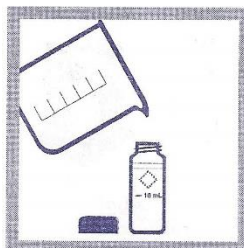
2. **Preparação do branco:** Encher uma célula de amostra redonda com 10 mL da amostra.



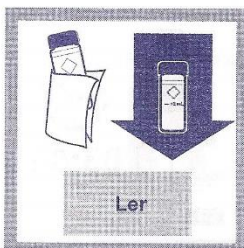
3. Limpar o branco e inseri-lo no suporte de célula. Pressionar ZERO. A tela exibirá: 0.00 mg/L Cl<sub>2</sub>



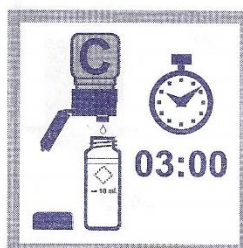
4. **Amostra Preparada:** Adicionar 3 gotas de solução A e mais 3 gotas de solução B em uma segunda célula.



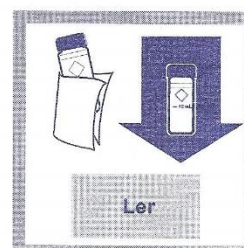
5. Encher a segunda célula redonda até à marca de 10 ml da amostra. (amostra preparada). A presença de cloro é indicada pelo desenvolvimento de uma coloração rosa.



6. Em 1 minuto após adicionar a amostra limpar a amostra preparada e insira-a no suporte de célula. Pressionar LER. Os resultados são dados em mg/L Cl<sub>2</sub>, livre



7. Para a determinação do cloro total, adicionar 3 gotas de solução C em a amostra preparada. Misturar suavemente. Aguardar 3 minutos.



8. Limpar a amostra preparada e insira-a no suporte de célula. Pressionar LER. Os resultados são dados em in mg/L Cl<sub>2</sub>, total

**VERIFICAÇÃO DE FOTÓMETRO DE CLIENTES, PARA LEITURA DE CLORO RESIDUAL**

 Identificação do Laboratório: LUSÁGUA - Serviços Ambientais, S.A. - Laboratório LUSÁGUA

 Identificação do Cliente: Águas da Azambuja S.A.

Designação do Equipamento: \_\_\_\_\_

 Cliente: Fotómetro Hach

 Modelo: Pocket Colorimeter II

 Código de Inventário: Fotómetro Azambuja (S/ Código Interno)

 N° de Série: 10010E142425

 Gama de Trabalho: 0,1mg/L Cl - 2mg/L Cl

 Código Equipamento do LL: FQM21

 Padrões Utilizados: 0,10mg/L      0,22mg/L (MRC)      0,91mg/L (MRC)      1,65mg/L (MRC)

Valore de Referência (mg/L Cl)	Equipamento LL (mg/L Cl)	Aceitação Padrões	Desvio Médio	Desvio Padrão	Aceitação Desvio Médio	Coefficiente de Variação	Aceitação Coeficiente de Variação
Lq	0,10	Sim	0,00444	0,00577	Sim	6,2%	Sim
	0,09						
	0,09						
Padrão 1	0,20	Sim	0,00444	0,00577	Sim	2,9%	Sim
	0,19						
	0,20						
Padrão 2	0,90	Sim	0,00444	0,00577	Sim	0,6%	Sim
	0,89						
	0,89						
Padrão 3	1,66	Sim	0,00444	0,00577	Sim	0,3%	Sim
	1,65						
	1,65						

Valore de Referência (mg/L Cl)	Equipamento Cliente (mg/L Cl)	Aceitação Padrões	Desvio Médio	Desvio Padrão	Aceitação Desvio Médio	Coefficiente de Variação	Aceitação Coeficiente de Variação
Lq	0,09	Sim	0,00444	0,00577	Sim	6,0%	Sim
	0,10						
	0,10						
Padrão 1	0,22	Sim	0,00667	0,01000	Sim	4,8%	Sim
	0,20						
	0,21						
Padrão 2	0,90	Sim	0,00667	0,01000	Sim	1,1%	Sim
	0,91						
	0,92						
Padrão 3	1,66	Sim	0,01111	0,01528	Sim	0,9%	Sim
	1,63						
	1,65						



**VERIFICAÇÃO DE FOTÓMETRO DE CLIENTES, PARA LEITURA DE CLORO RESIDUAL**

Identificação do Laboratório: LUSÁGUA - Serviços Ambientais, S.A. - Laboratório LUSÁGUA

Identificação do Cliente: Águas da Azambuja S.A.

Designação do Equipamento

Cliente: Fotómetro Hach

Modelo: Pocket Colorimeter II

Código de Inventário: Fotómetro Azambuja (S/ Código Interno)

Nº de Série: 10010E142425

Gama de Trabalho: 0,1 mg/L Cl - 2 mg/L Cl

Critério de aceitação do padrão (limites do fornecedor\*):

Concentração padrão	Limite Inferior	Média	Limite Superior
Lq ( $\leq 20\%$ )	0,09	0,10	0,11
Padrão 1*	0,13	0,22	0,31
Padrão 2*	0,81	0,91	1,01
Padrão 3*	1,51	1,65	1,79

Critérios de aceitação:

Desvio Médio (mg/L Cl)	Aceitação Coeficiente de Variação	
	Lq	Restantes Padrões
5%	10%	5%

Estado do Equipamento:

Conforme



Não conforme



O Técnico Responsável e Função:

Rosa Ramos - R.T. Auost.

Data de Execução da Verificação:

15-02-2016

Obs:

Padrões Comerciais do Laboratório Luságua - Ident.26353-00,Lote A4365, validade 12/2016.  
Padrão Lq (0,10 mg/L CL) preparado pelo Laboratório Luságua a 15-02-2016.



**Anexo V** – Exemplos de resultados da campanha de medição de cloro e respetivas folhas de registo

<b>DATA: 19/02/2016</b>					
<b>Ponto</b>	<b>Cl Livre (mg/L)</b>	<b>Cl Total (mg/L)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Observações</b>
1	0,07	0,10	14,4	7,80	
2	0,05	0,06	13,8	7,70	
3 a)	0,66	0,75	13,1	7,80	
3 b)	0,46	0,53	13,2	7,90	
4	0,18	0,26	14,6	7,80	
5	0,22	0,29	13,2	7,80	
6	0,37	0,44	12,9	7,80	
7	0,20	0,29	13,5	7,71	

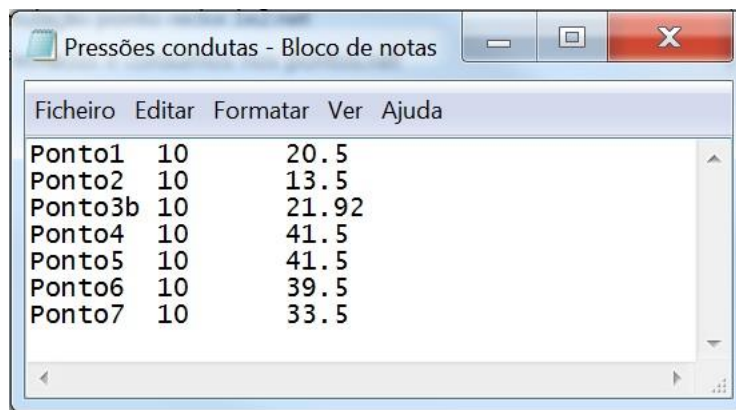
<b>DATA: 20/02/2016</b>					
<b>Ponto</b>	<b>Cl Livre (mg/L)</b>	<b>Cl Total (mg/L)</b>	<b>Temperatura (°C)</b>	<b>pH</b>	<b>Observações</b>
1	0,06	0,11	14,0	7,75	
2	0,04	0,06	13,3	7,55	
3 a)	0,60	0,69	13,3	7,80	
3 b)	0,45	0,52	13,3	7,74	
4	0,26	0,37	14,2	7,84	
5	0,24	0,34	11,5	7,80	
6	0,41	0,50	13,0	7,82	
7	0,35	0,46	14,2	7,79	

Data	Ponto 3 b)	
	Cl Livre (mg/L)	Cl Total (mg/L)
15/02/2016	0,34	0,42
16/02/2016	0,32	0,41
17/02/2016	0,46	0,55
19/02/2016	0,46	0,53
20/02/2016	0,45	0,52
23/02/2016	0,45	0,54
25/02/2016	0,50	0,61
29/02/2016	0,40	0,49
02/03/2016	0,48	0,55
04/03/2016	0,37	0,46
06/03/2016	0,51	0,61
08/03/2016	0,45	0,48
10/03/2016	0,43	0,58
12/03/2016	0,46	0,58
14/03/2016	0,44	0,53
16/03/2016	0,39	0,50
22/03/2016	0,40	0,45
24/03/2016	0,37	0,44
26/03/2016	0,38	0,49
28/03/2016	0,32	0,39
30/03/2016	0,33	0,42
01/04/2016	0,38	0,47
03/04/2016	0,40	0,49
05/04/2016	0,47	0,59
07/04/2016	0,38	0,56
09/04/2016	0,36	0,44
11/04/2016	0,39	0,44
13/04/2016	0,32	0,45
15/04/2016	0,34	0,46
17/04/2016	0,36	0,49
19/04/2016	0,37	0,44
21/04/2016	0,35	0,50
23/04/2016	0,41	0,47
25/04/2016	0,38	0,51
27/04/2016	0,38	0,49
29/04/2016	0,28	0,40

Data	Ponto 4	
	Cl Livre (mg/L)	Cl Total (mg/L)
15/02/2016	0,18	0,32
16/02/2016	0,06	0,15
17/02/2016	0,09	0,18
18/02/2016	0,11	0,22
19/02/2016	0,18	0,26
20/02/2016	0,26	0,37
23/02/2016	0,24	0,31
25/02/2016	0,12	0,20
29/02/2016	0,20	0,30
02/03/2016	0,18	0,28
04/03/2016	0,12	0,21
06/03/2016	0,26	0,36
08/03/2016	0,18	0,30
10/03/2016	0,19	0,31
12/03/2016	0,28	0,39
14/03/2016	0,21	0,29
16/03/2016	0,17	0,28
22/03/2016	0,15	0,22
24/03/2016	0,18	0,27
26/03/2016	0,16	0,28
28/03/2016	0,11	0,17
30/03/2016	0,13	0,19
01/04/2016	0,08	0,18
03/04/2016	0,09	0,16
05/04/2016	0,10	0,21
07/04/2016	0,15	0,23
09/04/2016	0,12	0,21
11/04/2016	0,08	0,20
13/04/2016	0,13	0,24
15/04/2016	0,04	0,17
17/04/2016	0,10	0,20
19/04/2016	0,06	0,18
21/04/2016	0,06	0,24
23/04/2016	0,15	0,29
25/04/2016	0,11	0,18
27/04/2016	0,10	0,21
29/04/2016	0,05	0,19



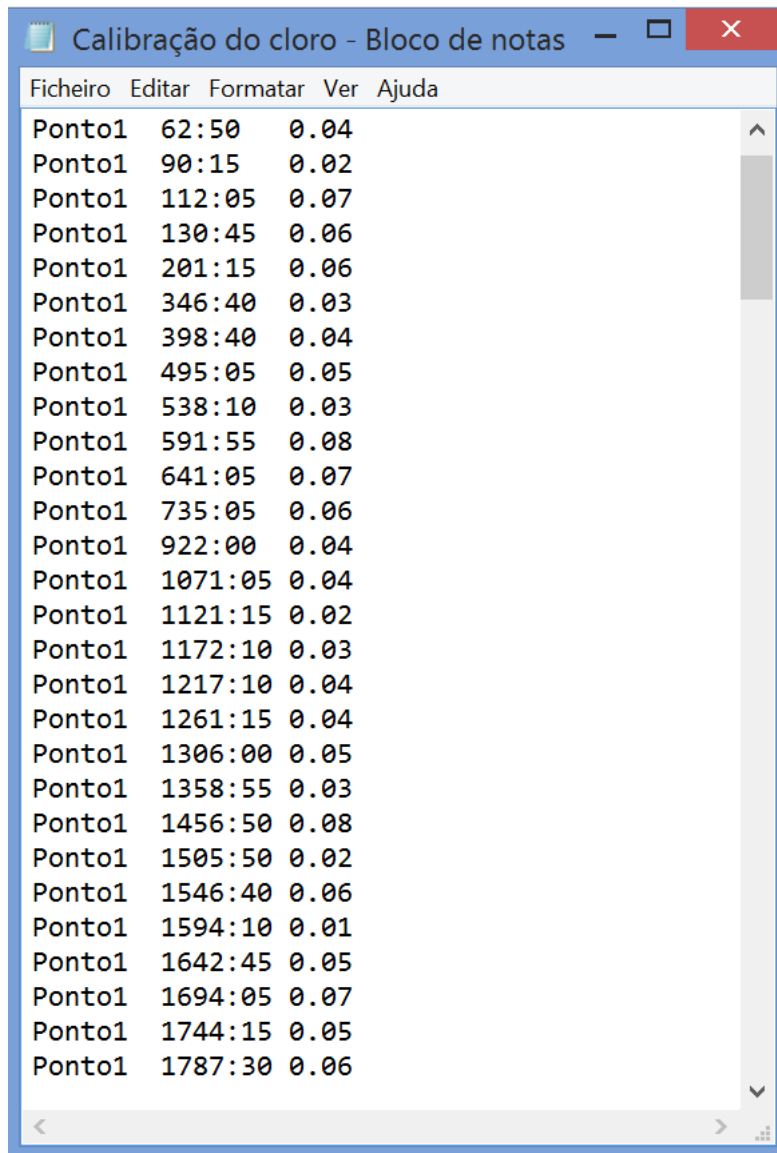
## Anexo VI – Ficheiro de texto para calibração da pressão com extensão *.DAT*



Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
Ponto1	10	20.5		
Ponto2	10	13.5		
Ponto3b	10	21.92		
Ponto4	10	41.5		
Ponto5	10	41.5		
Ponto6	10	39.5		
Ponto7	10	33.5		



## Anexo VII – Ficheiro de texto para calibração do cloro com extensão *.DAT*



The screenshot shows a Notepad window with the title "Calibração do cloro - Bloco de notas". The window contains a list of 20 data points, each consisting of a point identifier, a time value, and a numerical value. The data is as follows:

Ponto	Tempo	Valor
Ponto1	62:50	0.04
Ponto1	90:15	0.02
Ponto1	112:05	0.07
Ponto1	130:45	0.06
Ponto1	201:15	0.06
Ponto1	346:40	0.03
Ponto1	398:40	0.04
Ponto1	495:05	0.05
Ponto1	538:10	0.03
Ponto1	591:55	0.08
Ponto1	641:05	0.07
Ponto1	735:05	0.06
Ponto1	922:00	0.04
Ponto1	1071:05	0.04
Ponto1	1121:15	0.02
Ponto1	1172:10	0.03
Ponto1	1217:10	0.04
Ponto1	1261:15	0.04
Ponto1	1306:00	0.05
Ponto1	1358:55	0.03
Ponto1	1456:50	0.08
Ponto1	1505:50	0.02
Ponto1	1546:40	0.06
Ponto1	1594:10	0.01
Ponto1	1642:45	0.05
Ponto1	1694:05	0.07
Ponto1	1744:15	0.05
Ponto1	1787:30	0.06



## Anexo VIII – Exemplo de relatório de dados extraído EPANET

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

[TITLE]  
REDE DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DE VILA NOVA DA RAINHA

[JUNCTIONS]

ID	Elev	Demand	Pattern	
N2938	8	0.006622517	P_2010	;
N2941	8	0.006622517	P_2010	;
N2942	8	0.006622517	P_2010	;
N2944	8	0.006622517	P_2010	;
N2945	8	0.006622517	P_2010	;
N2948	9	0.006622517	P_2010	;
N2949	9	0.006622517	P_2010	;
N2951	10	0.006622517	P_2010	;
N2952	10	0.006622517	P_2010	;
N2955	10	0.006622517	P_2010	;
N2956	19	0.006622517	P_2010	;
N2957	19.5	0.006622517	P_2010	;
N2961	8	0.006622517	P_2010	;
N2962	14	0.006622517	P_2010	;
N2963	14	0.006622517	P_2010	;
N2964	9	0.006622517	P_2010	;
N2965	18	0.006622517	P_2010	;
Ponto4	14.7	0.15150	P_2010	;
N2972	19	0.006622517	P_2010	;
N2973	16.5	0.006622517	P_2010	;
N2974	17	0.006622517	P_2010	;
N2975	21	0.006622517	P_2010	;
N2976	18	0.006622517	P_2010	;
N2977	10	0.006622517	P_2010	;
Ponto6	16	0.00231	P_2010	;
N2979	14	0.006622517	P_2010	;
N2981	14	0.006622517	P_2010	;
N2984	15	0.006622517	P_2010	;
N2985	16	0.006622517	P_2010	;
N2986	17	0.006622517	P_2010	;
N2987	18.5	0.006622517	P_2010	;
N2988	18.5	0.006622517	P_2010	;
N2991	19	0.006622517	P_2010	;
N2992	19	0.006622517	P_2010	;
N2993	19.5	0.006622517	P_2010	;
N2994	18.5	0.006622517	P_2010	;
N2995	18.5	0.006622517	P_2010	;

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

N2996	19	0.006622517	P_2010	;
N2997	20	0.006622517	P_2010	;
N2998	21.5	0.006622517	P_2010	;
7	35	0.006622517	P_2010	;
21	35	0.006622517	P_2010	;
24	35	0.006622517	P_2010	;
51	35	0.006622517	P_2010	;
59	35	0.006622517	P_2010	;
80	35	0.006622517	P_2010	;
115	23	0.006622517	P_2010	;
Ponto1	36.5	0.06944	P_2010	;
1	12	0.006622517	P_2010	;
2	19	0.006622517	P_2010	;
3	19	0.006622517	P_2010	;
4	18.7	0.006622517	P_2010	;
5	18.5	0.006622517	P_2010	;
6	20.5	0.006622517	P_2010	;
8	20	0.006622517	P_2010	;
9	18.7	0.006622517	P_2010	;
10	18.5	0.006622517	P_2010	;
11	22.5	0.006622517	P_2010	;
12	22	0.006622517	P_2010	;
13	22	0.006622517	P_2010	;
14	26	0.006622517	P_2010	;
15	26	0.006622517	P_2010	;
16	30	0.006622517	P_2010	;
17	22.5	0.006622517	P_2010	;
18	23	0.006622517	P_2010	;
19	24	0.006622517	P_2010	;
20	24	0.006622517	P_2010	;
23	24	0.006622517	P_2010	;
25	33	0.006622517	P_2010	;
Ponto2	43.5	0.01852	P_2010	;
27	23	0.03472	P_2010	;
31	14	0.006622517	P_2010	;
32	14	0.006622517	P_2010	;
33	14	0.006622517	P_2010	;
34	14	0.006622517	P_2010	;
22	17.5	0.0116	P_2010	;

Página 2

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

28	14	0.006622517	P_2010	;
35	14	0.006622517	P_2010	;
36	16	0.006622517	P_2010	;
37	16	0.006622517	P_2010	;
38	10	0.006622517	P_2010	;
39	10	0.006622517	P_2010	;
40	10	0.006622517	P_2010	;
41	9	0.006622517	P_2010	;
42	10	0.006622517	P_2010	;
43	10	0.006622517	P_2010	;
Ponto5	14	0.00463	P_2010	;
45	8	0.006622517	P_2010	;
46	8	0.006622517	P_2010	;
47	8	0.006622517	P_2010	;
48	14	0.006622517	P_2010	;
49	14	0.006622517	P_2010	;
50	10	0.006622517	P_2010	;
52	18	0.006622517	P_2010	;
53	18	0.006622517	P_2010	;
54	10	0.006622517	P_2010	;
55	10	0.006622517	P_2010	;
56	10	0.006622517	P_2010	;
57	19.5	0.006622517	P_2010	;
58	19	0.006622517	P_2010	;
60	19	0.006622517	P_2010	;
61	19	0.006622517	P_2010	;
62	19	0.006622517	P_2010	;
63	16.5	0.006622517	P_2010	;
64	16.5	0.006622517	P_2010	;
65	17	0.006622517	P_2010	;
66	17	0.006622517	P_2010	;
67	17	0.006622517	P_2010	;
68	17	0.006622517	P_2010	;
69	17	0.006622517	P_2010	;
70	21	0.006622517	P_2010	;
71	21	0.006622517	P_2010	;
72	21	0.006622517	P_2010	;
73	21	0.006622517	P_2010	;
74	19.5	0.006622517	P_2010	;

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

75	19.5	0.006622517	P_2010	;
76	19.5	0.006622517	P_2010	;
77	18.5	0.006622517	P_2010	;
78	18.5	0.006622517	P_2010	;
79	18.5	0.006622517	P_2010	;
81	18.5	0.006622517	P_2010	;
82	18.5	0.006622517	P_2010	;
83	19	0.006622517	P_2010	;
84	19	0.006622517	P_2010	;
85	19	0.006622517	P_2010	;
86	19	0.006622517	P_2010	;
87	19	0.006622517	P_2010	;
88	19	0.006622517	P_2010	;
89	19	0.006622517	P_2010	;
90	19	0.006622517	P_2010	;
91	18.5	0.006622517	P_2010	;
92	18.7	0.006622517	P_2010	;
93	18.7	0.006622517	P_2010	;
94	19	0.006622517	P_2010	;
95	19	0.006622517	P_2010	;
96	21.5	0.006622517	P_2010	;
97	19	0.006622517	P_2010	;
98	23	0.006622517	P_2010	;
Ponto7	23	0.02315	P_2010	;
100	23	0.006622517	P_2010	;
101	22	0.006622517	P_2010	;
102	22	0.006622517	P_2010	;
103	26	0.006622517	P_2010	;
104	26	0.006622517	P_2010	;
105	26	0.006622517	P_2010	;
106	26	0.006622517	P_2010	;
107	26	0.006622517	P_2010	;
108	30	0.006622517	P_2010	;
109	33	0.006622517	P_2010	;
110	12	0.006622517	P_2010	;
111	18.5	0.006622517	P_2010	;
Ponto3b	35	0.006622517	P_2010	;
[RESERVOIRS]				
:ID	Head	Pattern		
R_VNR	36.7			

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

[PIPES]	Node1	Node2	Length	Diameter	Roughness	MinorLoss	Status
T471	47	N2938	108.82	81.4	140	0	Open ;PVC
T472	N2942	N2941	258.56	81.4	140	0	Open ;PVC
T473	45	N2942	25.58	81.4	140	0	Open ;PVC
T474	46	N2945	102.28	81.4	140	0	Open ;PVC
T475	N2948	N2944	93.809	81.4	140	0	Open ;PVC
T476	N2948	N2949	7.5	81.4	140	0	Open ;PVC
T477	40	41	72.46	81.4	140	0	Open ;PVC
T478	N2951	N2952	8.86	81.4	140	0	Open ;PVC
T479	N2952	N2977	5.21	81.4	140	0	Open ;PVC
T480	56	N2949	70.894	81.4	140	0	Open ;PVC
T481	N2949	N2955	18.879	81.4	140	0	Open ;PVC
T482	42	N2956	88.799	81.4	140	0	Open ;PVC
T483	N2956	57	8.64	81.4	140	0	Open ;PVC
T484	55	N2957	72.358	81.4	140	0	Open ;PVC
T485	43	N2962	117.102	81.4	140	0	Open ;PVC
T486	N2962	N2961	45.00	81.4	140	0	Open ;PVC
T487	Ponto5	N2963	129.251	81.4	140	0	Open ;PVC
T488	48	N2964	56.01	81.4	140	0	Open ;PVC
T489	49	53	230.652	81.4	140	0	Open ;PVC
T491	74	58	102.916	81.4	140	0	Open ;PVC
T492	73	N2993	44.1	81.4	140	0	Open ;PVC
T493	61	71	59.622	81.4	140	0	Open ;PVC
T494	N2957	N2972	20.695	81.4	140	0	Open ;PVC
T495	63	62	56.591	81.4	140	0	Open ;PVC
T496	69	N2975	40.841	81.4	140	0	Open ;PVC
T497	64	N2974	58.522	81.4	140	0	Open ;PVC
T498	68	N2976	64.916	81.4	140	0	Open ;PVC
T499	54	N2973	78.687	81.4	140	0	Open ;PVC
T500	37	38	66.777	81.4	140	0	Open ;PVC
T501	35	Ponto6	36.356	81.4	140	0	Open ;PVC
T503	N2981	31	1	81.4	140	0	Open ;PVC
T504	N2979	N2984	36.848	81.4	140	0	Open ;PVC
T505	N2984	N2985	13.564	81.4	140	0	Open ;PVC
T506	N2984	N2986	33.134	81.4	140	0	Open ;PVC
T507	36	67	20.49	81.4	140	0	Open ;PVC
T508	66	78	130.46	81.4	140	0	Open ;PVC
T509	N2988	79	8.698	81.4	140	0	Open ;PVC
T510	72	81	96.904	81.4	140	0	Open ;PVC
T511	N2996	82	48.322	81.4	140	0	Open ;PVC
T512	N2987	83	47.248	81.4	140	0	Open ;PVC
T513	N2991	N2996	7.209	81.4	140	0	Open ;PVC
T514	88	N2992	21.97	81.4	140	0	Open ;PVC
T515	76	89	156.141	81.4	140	0	Open ;PVC
T516	90	N2994	15.91	81.4	140	0	Open ;PVC
T517	N2994	N2965	37.25	81.4	140	0	Open ;PVC
T518	91	N2995	42.306	81.4	140	0	Open ;PVC
T519	86	N2997	57.984	81.4	140	0	Open ;PVC
T520	85	N2998	144.827	81.4	140	0	Open ;PVC
24	R_VNR			0.12	100	140	0
47	7	24	1	100	140	0	Open ;PVC
71	24	59	1	100	140	0	Open ;PVC
73	21	51	1	100	140	0	Open ;PVC
78	51	80	1	100	140	0	Open ;PVC
4	Ponto3b	110	154.143	144.6	140	0	Open ;PVC
115	96	115	82.993	99.4	140	0	Open ;PVC
116	21	25	362.116	57	140	0	Open ;PVC
2	Ponto7	2	180.349	113	140	0	Open ;PVC
3	95	3	41.845	99.4	140	0	Open ;PVC

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

5	3	4	17.664	99.4	140	0	Open	:PVC	
6	92	5	28.198	99.4	140	0	Open	:PVC	
7	93	9	10.218	99.4	140	0	Open	:PVC	
8	9	8	82.256	99.4	140	0	Open	:PVC	
9	94	6	101.742	99.4	140	0	Open	:PVC	
10	9	10	22.606	99.4	140	0	Open	:PVC	
11	100	11		56.976	99.4	140	0	Open	:PVC
12	11	12		79.669	99.4	140	0	Open	:PVC
13	101	13	19.957	99.4	140	0	Open	:PVC	
14	98	16	222.947	113	140	0	Open	:PVC	
15	16	107	39.746	113	140	0	Open	:PVC	
16	15	14	13.304	113	140	0	Open	:PVC	
17	102	14	38.23	113	140	0	Open	:PVC	
18	103	17	100.549	99.4	140	0	Open	:PVC	
19	105	18	76.695	99.4	140	0	Open	:PVC	
20	108	19	48.607	99.4	140	0	Open	:PVC	
21	106	20	311.877		99.4	140	0	Open	:PVC
22	104	23	352.05	99.4	140	0	Open	:PVC	
28	32	39	78.247	81.4	140	0	Open	:PVC	
30	34	N2979	3.293	81.4	140	0	Open	:PVC	
31	N2981	33	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
34	1	28	201	113	140	0	Open	:PVC	
51	N2951	50	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
52	N2965	52	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
59	N2972	60	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
64	N2986	65	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
69	70	N2975	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
75	N2993	75	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
79	77	N2987	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
84	84	N2991	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
85	N2996	87	1	81.4	140	0	Open	:PVC	
98	N2992	97	0.36	81.4	140	0	Open	:PVC	
112	N2988	111	0.2	81.4	140	0	Open	:PVC	
113	80	Ponto3b	1	144.6	140	0	Open	:PVC	
23	109	Ponto1	782.79	57	140	0	Open	:PVC	
120	25	Ponto2	333.547	57	140	0	Open	:PVC	
25	25	27	423.798	57	140	0	Open	:PVC	
26	22	Ponto4	267.37	81.4	140	0	Open	:PVC	

[PUMPS]

ID	Node1	Node2	Parameters
B1_VNR	7	21	HEAD CR_VNR ;Hidropressora
B2_VNR	24	51	HEAD CR_VNR ;Hidropressora
B3_VNR	59	80	HEAD CR_VNR ;Hidropressora

[VALVES]

ID	Node1	Node2	Diameter	Type	Setting	MinorLoss
27	31	32	80	TCV	0	;
29	33	34	80	TCV	0	;
32	N2965	22	80	TCV	0	;
1	28	N2981	100	TCV	0	;
35	N2979	35	80	TCV	0	;
36	Ponto6	36	80	TCV	0	;
37	Ponto6	37	80	TCV	0	;
38	38	N2952	80	TCV	0	;
39	39	N2951	80	TCV	0	;
40	50	40	80	TCV	0	;
41	41	N2948	80	TCV	0	;
42	N2955	42	80	TCV	0	;
43	N2955	43	80	TCV	0	;
44	N2962	Ponto5	80	TCV	0	;

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET						
45	N2944	46	80	TCV	0	0 ;
46	N2944	45	80	TCV	0	0 ;
48	N2942	47	80	TCV	0	0 ;
49	N2963	48	80	TCV	0	0 ;
50	N2963	49	80	TCV	0	0 ;
53	53	52	80	TCV	0	0 ;
54	N2977	54	80	TCV	0	0 ;
55	N2977	55	80	TCV	0	0 ;
56	N2977	56	80	TCV	0	0 ;
57	N2957	57	80	TCV	0	0 ;
58	N2956	58	80	TCV	0	0 ;
60	62	N2972	80	TCV	0	0 ;
61	60	61	80	TCV	0	0 ;
62	N2973	63	80	TCV	0	0 ;
63	N2973	64	80	TCV	0	0 ;
65	67	N2986	80	TCV	0	0 ;
66	65	66	80	TCV	0	0 ;
67	N2974	68	80	TCV	0	0 ;
68	N2974	69	80	TCV	0	0 ;
70	71	70	80	TCV	0	0 ;
72	N2975	73	80	TCV	0	0 ;
74	N2975	72	80	TCV	0	0 ;
76	75	74	80	TCV	0	0 ;
77	N2993	76	80	TCV	0	0 ;
80	78	77	80	TCV	0	0 ;
81	N2987	79	80	TCV	0	0 ;
82	81	111	80	TCV	0	0 ;
83	82	N2988	80	TCV	0	0 ;
86	83	84	80	TCV	0	0 ;
87	N2991	85	80	TCV	0	0 ;
88	87	88	80	TCV	0	0 ;
89	N2996	86	80	TCV	0	0 ;
90	89	N2992	80	TCV	0	0 ;
91	97	90	80	TCV	0	0 ;
92	N2994	91	80	TCV	0	0 ;
93	4	92	100	TCV	0	0 ;
94	4	93	100	TCV	0	0 ;
95	3	94	100	TCV	0	0 ;
96	2	95	100	TCV	0	0 ;

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

97	N2998	96	100	TCV	0	0	:
99	115	98	125	TCV	0	0	:
100	115	100	100	TCV	0	0	:
101	115	Ponto7	125	TCV	0	0	:
102	12	101	100	TCV	0	0	:
103	12	102	125	TCV	0	0	:
104	14	103	100	TCV	0	0	:
105	14	104	100	TCV	0	0	:
106	15	105	100	TCV	0	0	:
107	15	106	100	TCV	0	0	:
108	107	15	100	TCV	0	0	:
109	16	108	100	TCV	0	0	:
110	25	109	65	TCV	0	0	:
111	110	1	160	TCV	0	0	:

[STATUS]

ID	Status/Setting
B2_VNR	Closed
B3_VNR	Closed
27	Open
29	Open
32	Open
1	Open
35	Open
36	Open
37	Open
38	Open
39	Open
40	Open
41	Open
42	Open
43	Open
44	Open
45	Open
46	Open
48	Open
49	Open
50	Open
53	Closed
54	Open
55	Open
56	Open
57	Open
58	Closed
60	Open
61	Open
62	Open
63	Open
65	Open
66	Open
67	Open
68	Open
70	Open
72	Open
74	Open
76	Open
77	Open
80	Open
81	Closed
82	Closed
83	Open
86	Open
87	Open
88	Open

Dados da rede de Vila Nova da Rainha introduzidos no EPANET

```

89      Open
90      Closed
91      Open
92      Open
93      Open
94      Open
95      Open
96      Open
97      Open
99      Open
100     Open
101     Open
102     Open
103     Open
104     Open
105     Open
106     Open
107     Open
108     Open
109     Open
110     Open
111     Open

[BATTERNS]
; ID      Multipliers
P_2010   0.57142      0.44021      0.44444      0.42751      0.41258      0.54603
P_2010   1.083559     1.24444     1.02857     0.98201     1.20634     1.14285
P_2010   1.32063         1.17248     0.96084     0.88042     1.0582      1.24444
P_2010   1.62539         1.76084     1.69312     1.11322     0.93968
0.70264

[CURVES]
; ID      X-Value      Y-Value
; PUMP: Hidropressora
CB_VNR   11.111      15

[ENERGY]
Global Efficiency 75
Global Price      0
Demand Charge    0

[QUALITY]
; Node      InitQual
R_VNR      0.57

[REACTIONS]
Order Bulk      1
Order Tank      1
Order Wall      1
Global Bulk     -5
Global Wall     -0.10

[TIMES]
Duration        1800:00
Hydraulic Timestep 0:05
Quality Timestep 0:05
Pattern Timestep 1:00
Pattern Start   0:00
Report Timestep 1:00
Report Start   0:00
Start ClockTime 12:00 AM
Statistic      NONE

[OPTIONS]
Units          LPS
Headloss       H-W
Pattern        P_2010
Demand Multiplier 1.46
Quality        Cloro mg/L

[END]

```



**Anexo IX – Espessura das tubagens para PVC PN10 (Politejo, 2016)**


Referência Referencia	Pressão de serviço Presión de servicio (Kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensões Dimensiones			
		e (mm)	a (mm)	Ø (mm)	L (m)
63 TL - OR - AL	6	1,9	112	63	6
	10	3,0			
	16	4,7			
75 TL - OR - AL	6	2,2	119	75	6
	10	3,6			
	16	5,6			
90 TL - OR - AL	6	2,7	127	90	6
	10	4,3			
	16	6,7			
100 TL - OR - AL	6	3,2	139	110	6
	10	5,3			
	16	8,2			
125 TL - OR - AL	6	3,7	146	125	6
	10	6,0			
	16	9,3			
140 TL - OR - AL	6	4,1	154	140	6
	10	6,7			
	16	10,4			
160 TL - OR - AL	6	4,7	167	160	6
	10	7,7			
	16	11,9			
200 TL - OR - AL	6	5,9	182	200	6
	10	9,6			
	16	14,9			
250 TL - OR - AL	6	7,3	208,5	250	6
	10	11,9			
	16	18,6			
315 TL - OR - AL	6	9,2	218	315	6
	10	15,0			
	16	23,4			
400 TL - OR - AL	6	11,7	260	400	6
	10	19,1			
	16	29,7			
500 TL - OR - AL	6	14,6	300	500	6
	10	23,8			
630 TL - OR - AL	6	18,4	-	630	6
	10	30,0			
710 TL - OR - AL	6	20,7	-	710	6
	10	33,8			
800 TL - OR - AL	6	23,3	-	800	6
	10	38,1			

Ref. TL - TUBO LISO Ref. OR - C/ JUNTA INTEGRAL Ref. AL - C/ ABOCAMENTO POR COLAGEM  
 Ref. TL - TUBO LISO Ref. OR - C/ JUNTA INTEGRAL Ref. AL - C/ UNIÓN POR ENCOLADO