



# ISEL



## **Estudo do decaimento de cloro no tratamento e distribuição de águas**

**PATRÍCIA ALEXANDRA DA SILVA FERNANDES**  
(Licenciada em Saúde Ambiental)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

**Orientadores:**

Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos  
Doutor Teodoro José Pereira Trindade

**Júri:**

Presidente: Doutora Isabel Maria da Silva João  
Vogais:  
Doutor José Valério do Nascimento Palmeira  
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos

**Dezembro de 2024**

# **Estudo do decaimento de cloro no tratamento e distribuição de águas**

**PATRÍCIA ALEXANDRA DA SILVA FERNANDES**  
(Licenciada em Saúde Ambiental)

Trabalho de Projeto para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

**Orientadores:**

Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos, ISEL/IPL  
Doutor Teodoro José Pereira Trindade, ISEL/IPL

**Júri:**

Presidente: Doutora Isabel Maria da Silva João, ISEL/IPL  
Vogais:  
Doutor José Valério do Nascimento Palmeira, ISEL/IPL  
Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos, ISEL/IPL

**Dezembro de 2024**

*“Water, water, everywhere,  
Nor any drop to drink.”*

Samuel Taylor Coleridge

## **Agradecimentos**

Aos meus orientadores, Professora Doutora Maria Teresa Loureiro dos Santos e Professor Doutor Teodoro José Pereira Trindade, gostaria de expressar o meu mais profundo agradecimento pela orientação, disponibilidade, apoio e vasto conhecimento ao longo deste trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, em particular, à Professora Alexandra Rodrigues e ao Professor Pedro Silva, pela generosa cedência das plantas em formato AutoCad.

Aos meus colegas da Mota-Engil ATIV, quero agradecer pelo apoio contínuo e pelos recursos indispensáveis que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À minha família, em particular aos meus pais, pela disponibilidade e preocupação. À minha irmã, agradeço profundamente pela paciência infinita. Ao meu namorado, um agradecimento especial pelo apoio moral incondicional e por ter acreditado sempre em mim. Um simples "obrigado" jamais será suficiente para expressar todo o meu agradecimento.

Aos meus amigos, que estiveram ao meu lado durante todo este percurso, muito obrigada pela motivação constante e compreensão sem fim.

E, finalmente, a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu sincero e profundo agradecimento.

## Declaração de integridade

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

O autor

Patrícia Alexandra da Silva Fernandes

Patrícia Fernandes

Lisboa, 20 de setembro de 2024

## Resumo

A água é distribuída às populações através de uma rede de abastecimento, após ser tratada numa estação de tratamento. Ao longo da rede, é importante que o cloro se mantenha em concentrações adequadas para a saúde pública. Assim, é relevante estudar o decaimento do cloro residual livre nas redes de distribuição, para verificar se a concentração se encontra dentro do intervalo recomendado.

Este trabalho teve como objetivo determinar o decaimento do cloro residual livre, num caso de estudo real, nomeadamente, na rede de distribuição de água do piso 2 do edifício C do ISEL.

Para alcançar este objetivo, foram recolhidas 56 amostras de água em torneiras de baixo e elevado consumo, com e sem purga (fornecida e estagnada), medindo-se as concentrações de cloro residual livre, o pH e a temperatura.

Posteriormente, foi construído no EPANET um modelo de simulação hidráulica e de qualidade da água da rede em estudo. A calibração baseou-se em determinações analíticas dos parâmetros hidráulicos e nas medições de cloro.

As medições de cloro indicaram que, nos pontos de baixo consumo, 21% amostras com purga e 43% sem purga estavam abaixo do valor recomendado, possivelmente por estagnação, sugerindo contaminação microbiológica. Nos pontos de elevado consumo, nenhuma amostra ficou abaixo do recomendado; porém, 86% amostras com purga e 43% sem purga excederam o recomendado, indicando possível formação de subprodutos de desinfecção prejudiciais à saúde humana.

Foram realizadas 34 simulações com 6 cenários (A1 a C2), variando consumos nodais, alturas piezométricas e concentrações de cloro no reservatório. Após calibração hidráulicas, simulou-se a qualidade da água quanto ao cloro residual livre, observando-se excedências do recomendado em períodos de maior e menor consumo. Conclui-se que, para manter as concentrações de cloro dentro do intervalo recomendado, concentrações de cloro próximo à entrada do ISEL devem ser mantidas entre 0,30 e 0,60 mg/L.

**Palavras-Chave:** Decaimento de cloro residual livre, Modelação, Calibração, EPANET 2.2.

## Abstract

Water is distributed to populations through a supply network after being treated at a water treatment plant. Along the network, it is important to maintain chlorine concentrations at levels that are safe for public health. Therefore, studying the decay of free residual chlorine in distribution networks is crucial to ensure that concentrations remain within the recommended range.

This study aimed to determine the decay of free residual chlorine in a real case study, specifically in the water distribution network on the second floor of building C at ISEL.

To achieve this, 56 water samples were collected from low- and high-consumption faucets, both with and without flushing (supplied and stagnant water), measuring the concentrations of free residual chlorine, pH, and temperature.

Subsequently, a hydraulic and water quality simulation model of the network was developed using EPANET. The calibration was based on estimates of hydraulic parameters and chlorine measurements.

Chlorine measurements revealed that, at low-consumption points, 21% of the samples with flushing and 43% without flushing fell below the recommended threshold, likely due to stagnation, which may indicate microbiological contamination. In contrast, at high-consumption points, none of the samples were below the recommended value; however, 86% of the samples with flushing and 43% without flushing exceeded the recommended limit, suggesting the potential formation of disinfection by-products that could pose risks to human health.

A total of 34 simulations were carried out with 6 scenarios (A1 to C2), varying nodal consumption, piezometric heights, and chlorine concentrations in the reservoir. After hydraulic calibration, water quality was simulated regarding free residual chlorine, observing exceedances of the recommended value during periods of both high and low consumption. It is concluded that, to maintain chlorine concentrations within the recommended range, chlorine concentrations near the ISEL entrance should be kept between 0.30 and 0.60 mg/L.

**Keywords:** Free residual chlorine decay, Modeling, Calibration, EPANET 2.2.

# Índice

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>ii</b>
<b>Declaração de integridade</b> .....	<b>iii</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>iv</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>v</b>
<b>Lista de abreviaturas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de simbologia química</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
1.1. Enquadramento e motivação .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Estrutura da dissertação .....	3
<b>2. Enquadramento teórico</b> .....	<b>5</b>
2.1. Qualidade da água.....	5
2.2. Cloro nos sistemas de abastecimento.....	7
2.2.1. Desinfeção da água potável .....	7
2.2.2. Química do cloro .....	7
2.2.3. Decaimento do cloro.....	8
2.3. Modelação da cinética do decaimento de cloro.....	14
2.3.1. Introdução .....	14
2.3.2. Decaimento do cloro no seio da água.....	15
2.3.3. Decaimento do cloro na parede das tubagens.....	18
2.4. Modelos hidráulicos e da qualidade da água .....	20

2.4.1. Introdução .....	20
2.4.2. Modelo EPANET .....	21
<b>3. Metodologia .....</b>	<b>27</b>
3.1. Etapas metodológicas.....	27
3.2. Caraterização do local de estudo.....	27
3.3. Construção da rede de distribuição de água no EPANET .....	29
3.4. Determinação dos parâmetros da qualidade da água .....	33
3.4.1. Nota introdutória .....	33
3.4.2. Metodologia de amostragem .....	34
3.4.3. Procedimento experimental .....	37
3.5. Calibração do modelo .....	40
3.5.1. Nota introdutória .....	40
3.5.2. Calibração do modelo hidráulico.....	42
3.5.3. Calibração do modelo da qualidade da água .....	47
<b>4. Caso de estudo.....</b>	<b>50</b>
4.1. Descrição do local de estudo .....	50
4.2. Caraterização da rede de distribuição de água no EPANET .....	54
4.2.1. Componentes físicos .....	54
4.2.2. Componentes não-físicos .....	59
4.3. Ensaios de campo dos parâmetros da qualidade da água .....	62
4.4. Parâmetros para calibração do modelo hidráulico .....	64
4.4.1. Caudal de água nas tubagens .....	64

4.4.2. Pressão nos nós.....	66
4.4.3. Velocidade nas tubagens .....	67
4.5. Parâmetros para calibração do modelo da qualidade da água.....	67
4.5.1. Tempo de percurso.....	67
4.5.2. Constantes de cinética de decaimento de cloro.....	68
4.5.3. Cloro residual livre .....	69
<b>5. Apresentação e discussão de resultados .....</b>	<b>71</b>
5.1. Padrão de consumo temporal.....	71
5.2. Cloro residual livre observado.....	73
5.3. Simulação hidráulica.....	78
5.3.1. Caudal simulado nas tubagens.....	78
5.3.2. Pressão simulada nos nós.....	81
5.3.3. Velocidade simulada nas tubagens .....	85
5.4. Simulação qualidade da água.....	88
5.4.1. Tempo de percurso simulado da água.....	88
5.4.2. Cloro residual livre simulado.....	90
<b>6. Conclusões e perspetivas futuras .....</b>	<b>97</b>
<b>Referências.....</b>	<b>99</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>105</b>
Anexo I - Certificado de comunicação na 9ª Edição do Fórum de Engenharia Química e Biológica.....	106
Anexo II – Comunicação em painel apresentada na 9ª Edição do Fórum de Engenharia Química e Biológica.....	107

Anexo III - Certificados de participação e de apresentação na <i>14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference</i> .....	108
Anexo IV - Comunicação em painel apresentada na <i>14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference</i> .....	110
Anexo V – Manual de Instruções HI701 Cloro Livre Hanna Instruments .....	111
Anexo VI – Resultados de cloro residual livre, pH e temperatura nos pontos de amostragem.....	112
Anexo VII – Determinação dos parâmetros hidráulicos para calibração do modelo no EPANET .....	117
Anexo VIII – Calibração dos resultados estatísticos do EPANET.....	127
Anexo IX – Rede de distribuição de água detalhada no EPANET .....	138

# Índice de Figuras

<b>Figura 2.1.</b> Distribuição relativa das principais espécies de cloro em função do pH a 25°C.....	9
<b>Figura 2.2.</b> Dissociação do ácido hipocloroso em função do pH e a diferentes temperaturas.....	10
<b>Figura 2.3.</b> Curva de cloração ao ponto crítico.....	12
<b>Figura 2.4.</b> Componentes físicos de um sistema de distribuição de água.....	22
<b>Figura 3.1.</b> Etapas metodológicas do presente trabalho - caso de estudo.....	27
<b>Figura 3.2.</b> Planta do campus do ISEL.....	28
<b>Figura 3.3.</b> Contador junto à entrada do campus do ISEL.....	30
<b>Figura 3.4.</b> Fotómetro portátil utilizado para medição da concentração do cloro residual livre.....	34
<b>Figura 3.5.</b> Células para o fotómetro com cloração rosa proporcional à concentração de cloro residual livre.....	35
<b>Figura 3.6.</b> Tira-testes de pH.....	35
<b>Figura 3.7.</b> Termómetro analógico.....	36
<b>Figura 3.8.</b> Torneira: a) com pressão ajustável e b) sem pressão ajustável.....	37
<b>Figura 3.9.</b> Exemplo de ficheiro texto utilizado no EPANET.....	41
<b>Figura 3.10.</b> Introdução dos ficheiros texto dos parâmetros hidráulicos e da qualidade da água no EPANET.....	41
<b>Figura 3.11.</b> Frasco de vidro escuro.....	48
<b>Figura 4.1.</b> Edifício C do ISEL.....	50
<b>Figura 4.2.</b> Constituição dos pisos do edifício C do ISEL.....	50

<b>Figura 4.3.</b> Distribuição semanal da utilização dos pisos do edifício C, pelos alunos do ISEL.....	51
<b>Figura 4.4.</b> Planta de emergência do piso 2 do edifício C do ISEL. ....	53
<b>Figura 4.5.</b> Fotografia aérea da ETA de Asseiceira. ....	54
<b>Figura 4.6.</b> Fotografia aérea da ETA de Vale da Pedra. ....	54
<b>Figura 4.7.</b> Planta AutoCad do piso 2 do edifício C do ISEL, com destaque da rede de distribuição de água das instalações sanitárias: a) masculinas e b) femininas. ....	55
<b>Figura 4.8.</b> Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculina do piso 2 do edifício C do ISEL, no EPANET. ....	56
<b>Figura 4.9.</b> Rede de distribuição de água das instalações sanitárias feminina do piso 2 do edifício C do ISEL, no EPANET. ....	56
<b>Figura 4.10.</b> Número de elementos da rede de distribuição de água das instalações sanitárias do piso 2 do edifício C: a) masculina e b) feminina. ....	57
<b>Figura 4.11.</b> Exemplo dos dados introduzidos no EPANET para as tubagens.....	58
<b>Figura 4.12.</b> Exemplo dos dados introduzidos no EPANET para os nós.....	59
<b>Figura 4.13.</b> Exemplo de horário de uma sala de aula do piso 2 do edifício C.....	61
<b>Figura 4.14.</b> Localização dos pontos de amostragem na rede de distribuição de água das instalações sanitárias: a) masculina e b) feminina.....	63
<b>Figura 4.15.</b> Exemplo de colheita de amostra de água.....	64
<b>Figura 4.16.</b> Exemplo de esquema da rede de distribuição de água da instalação sanitária masculina. ....	64
<b>Figura 4.17.</b> Representação gráfica dos valores $\log (C_t / C_0)$ em função do tempo. ....	68
<b>Figura 4.18.</b> Introdução dos valores de $k_b$ e $k_w$ no EPANET. ....	69
<b>Figura 5.1.</b> Consumo médio ao longo de 24 h do piso 2 do edifício C. ....	71

<b>Figura 5.2.</b> Concentrações de cloro residual livre das amostras efetuadas nos pontos de amostragem, sem purga.....	74
<b>Figura 5.3.</b> Distribuição percentual de cloro residual livre nas amostras de água, sem purga.....	75
<b>Figura 5.4.</b> Concentrações de cloro residual livre das amostras efetuadas nos pontos de amostragem, com purga.....	76
<b>Figura 5.5.</b> Distribuição percentual de cloro residual livre nas amostras de água, com purga.....	76
<b>Figura 5.6.</b> Correlação dos caudais nas tubagens estimados e simulados.....	79
<b>Figura 5.7.</b> Comparação das médias dos caudais nas tubagens estimados e simulados.....	79
<b>Figura 5.8.</b> Simulações dos caudais nas tubagens.....	81
<b>Figura 5.9.</b> Cenário A1: Correlação das pressões nos nós estimadas e simuladas.....	83
<b>Figura 5.10.</b> Cenário A1: Comparação das médias das pressões nos nós estimadas e simuladas.....	83
<b>Figura 5.11.</b> Cenário A2: Resultados estatísticos da calibração das pressões nos nós estimadas e simuladas.....	84
<b>Figura 5.12.</b> Simulações das pressões nos nós.....	85
<b>Figura 5.13.</b> Correlação das velocidades nas tubagens estimadas e simuladas.....	87
<b>Figura 5.14.</b> Comparação das médias das velocidades nas tubagens estimadas e simuladas.....	87
<b>Figura 5.15.</b> Simulações das velocidades nas tubagens.....	88
<b>Figura 5.16.</b> Cenário B2: Evolução do tempo de percurso da água.....	90
<b>Figura 5.17.</b> Concentrações de cloro residual livre estimadas e simuladas da rede de água das instalações sanitárias masculinas.....	92

**Figura 5.18.** Concentrações de cloro residual livre estimadas e simuladas da rede de água das instalações sanitárias femininas. .... 93

**Figura 5.19.** Simulações das concentrações de cloro residual livre. .... 94

## Índice de Tabelas

<b>Tabela 2.1.</b> Modelos cinéticos aplicados ao decaimento de cloro. ....	16
<b>Tabela 2.2.</b> Descrição dos elementos físicos do programa EPANET .....	23
<b>Tabela 2.3.</b> Descrição dos componentes não-físicos do programa EPANET .....	24
<b>Tabela 3.1.</b> Valores de capitação de água segundo o Decreto Regulamentar nº 23/95.....	31
<b>Tabela 3.2.</b> Materiais, equipamentos e reagentes a utilizar na análise dos parâmetros físico-químicos durante a colheita de água de uma torneira.....	38
<b>Tabela 3.3.</b> Equações para o cálculo da perda de carga contínua em escoamentos em pressão, em sistema internacional .....	44
<b>Tabela 3.4.</b> Coeficientes de rugosidade para condutas de abastecimento de água .....	45
<b>Tabela 4.1.</b> Caracterização das instalações sanitárias do piso 2 do edifício C. ....	53
<b>Tabela 4.2.</b> Características do edifício C do ISEL e do edifício Departamental da FCT.....	60
<b>Tabela 4.3.</b> Número de lugares por sala do piso 2 do edifício C ISEL.....	61
<b>Tabela 4.4.</b> Caracterização dos consumos do edifício departamental da FCT/UNL .....	62
<b>Tabela 4.5.</b> Designação dos pontos de amostragem e critério de utilização. ....	63
<b>Tabela 4.6.</b> Exemplo de caudais estimados em cada nó e tubagem.....	65
<b>Tabela 4.7.</b> Cloro residual livre e valores experimentais usados na determinação da constante $k_b$ . ....	68
<b>Tabela 4.8.</b> Descrição dos cenários testados.....	70
<b>Tabela 5.1.</b> Valores de consumos médios de água ajustados em cada instante de tempo.....	72

## Lista de abreviaturas

Abreviaturas	Descrição
AWWA	<i>American Water Works Association</i>
EPAL	Empresa Portuguesa de Águas Livres
ETA	Estação de tratamento de água
FCT/UNL	Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa
IPL	Instituto Politécnico de Lisboa
ISEL	Instituto Superior de Engenharia de Lisboa
PFAS	Substâncias perfluoroalquiladas
PVC	Cloreto de polivinilo
RNF	Reservatório nível fixo
RNV	Reservatório nível variável
TFM	Trabalho final de mestrado
THM	Trihalometanos
uPVC	Cloreto de polivinilo esteárico
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UV	Radiação ultravioleta
VG	Válvula genérica

## Lista de simbologia química

Símbolos	Descrição
Cl <sub>2</sub>	Cloro
Cl <sup>-</sup>	Cloreto (ião)
ClO <sub>2</sub>	Dióxido de cloro
H <sup>+</sup>	Hidrogénio (ião)
H <sub>2</sub> O	Água
HOCl	Ácido hipocloroso
NH <sub>3</sub>	Amónia
NH <sub>2</sub> Cl	Monocloramina
NHCl <sub>2</sub>	Dicloramina
NCl <sub>3</sub>	Tricloramina
OCl <sup>-</sup>	Hipoclorito (ião)
O <sub>3</sub>	Ozono

# 1. Introdução

## 1.1. Enquadramento e motivação

O cloro é um desinfetante que tem como principal finalidade impedir a disseminação de microrganismos na água de abastecimento (Stefán *et al.*, 2019). O cloro é escolhido como desinfetante devido à sua eficácia, custo relativamente baixo e capacidade de permanecer dissolvido na água desde as estações de tratamento de água (ETA) até o consumidor final (Kwio-Tamale & Onyutha, 2024).

Dá-se o nome de cloro residual livre, à concentração de cloro dissolvido que permanece ao longo do sistema de distribuição de água, após o processo de desinfecção. A existência de cloro residual ao longo da rede de distribuição de água é especialmente importante para lidar com falhas resultantes do tratamento inicial da água ou com possíveis contaminações que possam ocorrer durante o transporte da água, contribuindo, desta forma, para manter a qualidade da água destinada ao consumo humano, prevenindo o crescimento de microrganismos (Vieira *et al.*, 2004).

Porém, existem diversos fatores, como a temperatura, o pH, a idade da água ou tempo de percurso, o material e a idade das tubagens, a velocidade, entre outros, que levam ao decaimento da concentração de cloro residual livre ao longo da rede de distribuição de água, comprometendo a qualidade microbiológica da água e colocando em risco a saúde dos consumidores.

A manutenção de cloro residual livre dentro dos valores legais recomendados é um indicador de monitorização de qualidade da água importante na gestão de sistemas de abastecimento pelas entidades gestoras. O Decreto-Lei n.º 69/2023, de 22 de agosto, recomenda que a concentração de cloro residual livre na água da torneira do consumidor se encontre entre 0,20 e 0,60 mg/L. Se a concentração de cloro residual ultrapassar os valores recomendados, podem ocorrer efeitos negativos na qualidade da água e conseqüentemente na saúde dos consumidores. Concentrações de cloro residual excessivo, pode levar à formação de subprodutos de desinfecção prejudiciais à saúde, dos quais destacam-se os trihalometanos (THM) (Javadinejad *et al.*, 2019). Por outro lado, concentrações reduzidas de cloro residual apresentam como consequência uma proteção inadequada contra a contaminação microbiológica.

Através da análise do Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal, tendo por base os controlos analíticos realizados e referenciados a 31 de dezembro de 2023, verifica-se que aproximadamente 6 % das amostras da água analisadas na torneira do consumidor encontram-se com concentrações de cloro residual livre abaixo do valor mínimo recomendado (ERSAR, 2024).

Para manter a concentração de cloro residual livre dentro dos valores recomendados, é importante perceber a complexidade e a dinâmica dos fatores que influenciam a estabilidade deste desinfetante. Esta complexidade de fatores, leva à necessidade de utilização de modelos hidráulicos e da qualidade da água que permitam simular um sistema de distribuição de água e determinar a concentração do cloro residual livre, como é o caso do programa EPANET 2.2. A importância de fornecer água segura aos consumidores, sem comprometer a sua saúde, e a preocupação com a perda de eficácia da desinfecção devido ao decaimento do cloro residual livre, levaram à necessidade de desenvolver o presente trabalho final de mestrado (TFM), num contexto real, nomeadamente num edifício de uma instituição de ensino superior.

A motivação deste estudo centrou-se em verificar, através da recolha de amostras de água nos pontos de amostragem (torneiras), se a água fornecida e distribuída à comunidade escolar para consumo se encontra desinfetada e dentro dos valores recomendados, protegendo a saúde dos estudantes, docentes e não docentes.

O recurso à modelação neste estudo é uma ferramenta valiosa no sentido de permitir analisar, ao longo de todo o sistema distribuição de água, a concentração de cloro residual livre.

## **1.2. Objetivo**

O presente TFM tem como objetivo determinar o decaimento de cloro residual livre num caso de estudo real, nomeadamente, analisar a rede de distribuição de água do piso mais utilizado do edifício C do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL) do Instituto Politécnico de Lisboa (IPL). Para tal, recorreu-se à utilização do programa EPANET 2.2, que realiza simulações, por longos períodos, do comportamento hidráulico e da qualidade da água de sistemas de distribuição.

A metodologia do presente estudo consistiu na construção e calibração de um modelo hidráulico e da qualidade da água rede predial, possibilitando a simulação da concentração de cloro residual livre ao longo da rede de distribuição de água.

O presente estudo centrou-se em:

1. Caracterizar a rede de distribuição de água predial em estudo;
2. Recolher amostras de água em vários pontos de amostragem da rede de distribuição de água em estudo e determinar a concentração de cloro residual livre, assim como a temperatura e o pH;
3. Comparar a concentração de cloro residual livre medida com o intervalo recomendado pela legislação em vigor;
4. Construção e calibração de um modelo hidráulico e da qualidade da água da rede de distribuição de água em estudo no programa EPANET 2.2;
5. Analisar o sistema de distribuição de água em estudo e avaliar a concentração do cloro residual livre através do EPANET 2.2;
6. Sugerir algumas medidas preventivas caso a rede de distribuição de água atual não satisfaça os valores legais recomendados.

### **1.3. Estrutura da dissertação**

O presente TFM divide-se em 6 capítulos. O primeiro capítulo, a presente introdução, abrange o contexto, a motivação, os objetivos, bem como a organização geral do trabalho.

No Capítulo 2 é apresentado um breve enquadramento teórico onde é abordada a importância da qualidade da água e da desinfeção, é explicada a química do cloro e é também abordada a problemática do decaimento do cloro residual livre no seio da água e na parede das tubagens do sistema de distribuição de água, assim como a forma de determinar as respetivas constantes cinéticas. Este capítulo descreve também uma breve introdução à modelação hidráulica e da qualidade da água, tendo como foco, em particular, na ferramenta de modelação utilizada no presente trabalho, nomeadamente, o programa EPANET 2.2.

No Capítulo 3 é apresentada a metodologia aplicada, nomeadamente, a caracterização do local de estudo, a construção da rede de distribuição de água no EPANET 2.2, a metodologia (critérios) e o procedimento (conjunto de passos) experimental, e a calibração do modelo hidráulico e da qualidade da água.

No Capítulo 4 é abordado o desenvolvimento do caso de estudo, nomeadamente, a descrição do local de estudo e da rede de distribuição de água do piso mais utilizado do edifício C, a caracterização dos ensaios de campo, e a calibração do modelo hidráulico e da qualidade da água.

No Capítulo 5 são apresentados, analisados e discutidos os resultados obtidos no decorrer do estudo, designadamente, os valores resultantes da recolha de amostras e os valores decorrentes das simulações realizadas no programa EPANET 2.2.

No Capítulo 6 são apresentadas as principais conclusões e perspetivas futuras.

No âmbito do presente TFM foram apresentadas as seguintes comunicações em painel em conferências nacionais e internacionais:

- Fernandes P., Santos M.T., Trindade T., (2023), Estudo do decaimento de cloro em redes de distribuição de água, comunicação em painel apresentada na 9ª Edição do Fórum de Engenharia Química e Biológica, que decorreu de 16 a 19 de maio de 2023 no Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (certificado e comunicação em painel apresentados no Anexo I e II, respetivamente);
- Fernandes P., Santos M.T., Trindade T., (2023), *Chlorine decay in water treatment and distribution*, comunicação em painel apresentada na 14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference, que decorreu de 12 a 14 de setembro de 2023 no Instituto Politécnico de Bragança (certificados e comunicação em painel apresentados no Anexo III e IV, respetivamente).

## 2. Enquadramento teórico

### 2.1. Qualidade da água

O acesso à água potável é um direito humano imprescindível e essencial para a vida, saúde, bem-estar, alimentação e habitação (Frey *et al.*, 2020). Garantir elevados padrões de qualidade da água na torneira do consumidor é essencial para preservar a saúde humana. Uma consequência da má qualidade da água destinada ao consumo humano é o surgimento de surtos de doenças que podem afetar, especialmente, grupos de riscos, como crianças e idosos (Zaghini *et al.*, 2024).

O Decreto-Lei n.º 69/2023, de 22 de agosto, define «Água destinada ao consumo humano» como:

- “i) 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, quer em lugares públicos, quer em lugares privados, independentemente da sua origem e de ser ou não fornecida a partir de uma rede de distribuição de água, fornecida a partir de uma cisterna fixa ou móvel, em garrafas ou outros recipientes, com ou sem fins comerciais, incluindo águas de nascente;
- ii) Utilizada em empresa do setor alimentar para o fabrico, a transformação, a conservação ou a comercialização de produtos, ou substâncias, destinados ao consumo humano, bem como a utilizada na limpeza de superfícies, objetos e materiais que podem estar em contacto com os alimentos, exceto quando a utilização dessa água não afeta a salubridade do género alimentício na sua forma acabada.”

Para que a água possa ser utilizada para abastecimento público sem causar prejuízos para a saúde humana, limites de qualidade devem ser cumpridos.

Em 1980, foi publicada, a nível comunitário, a primeira Diretiva relativa à qualidade das águas destinadas ao consumo humano – Diretiva n.º 80/778/CEE. Esta foi revogada pela Diretiva n.º 98/83/CE e, posteriormente, pela Diretiva n.º 2015/1787. Este último documento legal altera os anexos II e III da Diretiva n.º 98/83/CE relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano. A nível nacional, o Decreto-Lei nº 243/2001, de 5 de setembro transpõe para direito interno a Diretiva 98/83/CE. O presente diploma legal

é revogado pelo Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, que manteve aspetos fundamentais do anterior diploma.

O Decreto-Lei n.º 69/2023 revoga o Decreto-Lei n.º 306/2007, na sua redação atual.

As principais alterações do Decreto-Lei n.º 69/2023 são:

- Introdução de novos parâmetros, como a *Legionella spp*, ácidos haloacéticos, bisfenol A e substâncias perfluoroalquiladas (PFAS) na lista de valores paramétricos, e limitação de valores para o chumbo e o crómio;
- A avaliação e gestão do risco abrangendo toda a cadeia de abastecimento, nomeadamente, nos pontos de captação de água destinada ao consumo humano, durante o processo de tratamento da água, nos pontos de armazenamento de água, nos sistemas de distribuição de abastecimento públicos e nos sistemas de distribuição predial;
- Obrigatoriedade da disponibilização de informações *online* relacionadas com a qualidade da água, dados sobre a avaliação e gestão do risco do sistema de abastecimento, métodos de produção de água ou recomendações para a redução do consumo.

A água com qualidade destinada ao consumo humano deve respeitar o conjunto de valores de parâmetros microbiológicos, parâmetros químicos e indicadores fixados nas partes I, II e III, respetivamente, do anexo I do Decreto-Lei n.º 69/2023. No anexo I do Decreto-Lei n.º 69/2023, ao contrário do anterior Decreto-Lei n.º 306/2007 revogado, foram incluídas as concentrações derivadas de radioatividade na água destinada ao consumo humano e os valores paramétricos para a avaliação do risco dos sistemas de distribuição predial, nomeadamente, *Legionella spp* e chumbo, indicados nas partes IV e V, respetivamente.

No anexo II do Decreto-Lei n.º 69/2023, são abordados os principais pontos fundamentais de um programa de monitorização de água destinada para consumo humano. A monitorização da água tem como objetivo verificar a pureza, a salubridade e a qualidade da água, ao longo de toda a cadeia de abastecimento, desde a sua captação até à distribuição, nomeadamente, até à torneira do consumidor.

Para além da necessidade de definir e cumprir os valores paramétricos legais e o programa de monitorização de água destinada ao consumo humano, são necessários

processos para desinfetar as águas, desde a origem até à torneira do consumidor, sem colocar em risco a saúde humana pelo próprio tratamento.

## 2.2. Cloro nos sistemas de abastecimento

### 2.2.1. Desinfecção da água potável

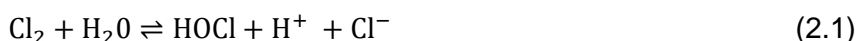
Existem muitos métodos para desinfecção da água potável, alguns dos quais são físicos, como, por exemplo, a desinfecção por radiação ultravioleta (UV), e outros são químicos, a título de exemplo, tecnologias que utilizam cloro ( $\text{Cl}_2$ ), dióxido de cloro ( $\text{ClO}_2$ ) e ozono ( $\text{O}_3$ ) (WHO, 2011).

De entre vários processos de desinfecção da água potável, a aplicação de cloro é o método mais comumente utilizado devido ao seu baixo custo, à sua fiabilidade de evitar a propagação de microrganismos e à sua capacidade de permanecer na água ao longo da rede de distribuição (Kwio-Tamale & Onyutha, 2024). A capacidade de o cloro manter uma concentração residual ao longo da rede de distribuição de água contribui para a inativação e prevenção da proliferação de microrganismos que possam contaminar a água (Vieira *et al.*, 2004).

A principal ação do cloro na eliminação de microrganismos é devido ao seu efeito oxidante. O cloro oxida os principais constituintes da célula dos microrganismos, causando danos estruturais (membranas celulares, material genético e proteínas), impedindo o seu crescimento e/ou sobrevivência. Para além da ação na destruição estrutural celular, o cloro também apresenta ação na desativação de enzimas vitais e na interferência do metabolismo energético dos microrganismos (Soares *et al.*, 2016).

### 2.2.2. Química do cloro

O cloro pode ser aplicado na água sob forma de líquido (hipoclorito de sódio), sólido (hipoclorito de cálcio) ou gasoso (cloro molecular). O cloro molecular ao ser dissolvido na água hidrolisa-se rapidamente e forma ácido hipocloroso (HOCl), de acordo com a Expressão 2.1 (Rodrigues & Scalize, 2019).

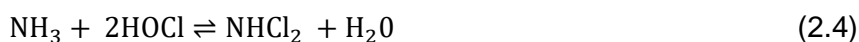


Por sua vez, o HOCl dissocia-se a  $\text{pH} > 6$  formando o ião hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), tal como representado na Expressão 2.2 (Rodrigues & Scalize, 2019).



Ambos os compostos HOCl e OCl<sup>-</sup> possuem ação oxidante e desinfetante, atuando na inativação dos microrganismos patogênicos. O cloro presente na água na forma molecular de HOCl e OCl<sup>-</sup> é designado por cloro residual livre (Rodrigues & Scalize, 2019).

Na presença de amônia na água, o HOCl reage rapidamente com a amônia (NH<sub>3</sub>) e forma compostos clorados ativos, chamados cloraminas ou cloro residual combinado, conforme as Expressões 2.3 a 2.5 (Rodrigues & Scalize, 2019).



O cloro residual combinado, por exemplo, a monocloramina (NH<sub>2</sub>Cl) e a dicloramina (NHCl<sub>2</sub>), apresenta um poder desinfetante, porém é menos reativo, mais fraco e de ação mais lenta do que o cloro residual livre (Rodrigues & Scalize, 2019).

Designa-se por cloro residual total a soma do cloro residual combinado (cloraminas) e do cloro residual livre (efetivamente ativo) (Alves, 2010).

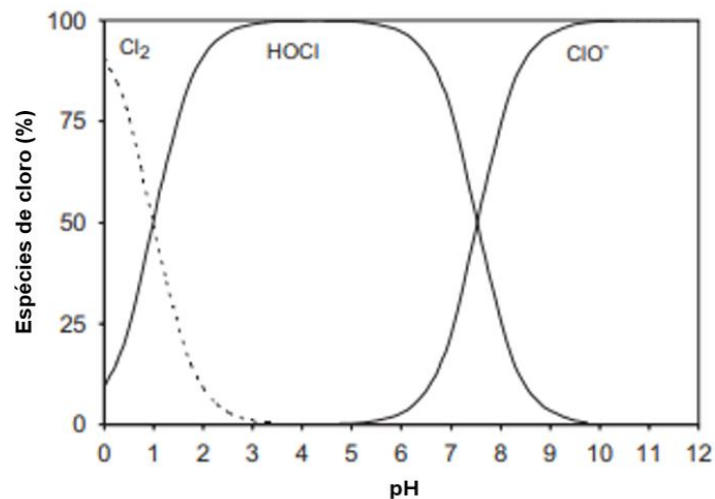
### 2.2.3. Decaimento do cloro

O decaimento de cloro em sistemas de distribuição de água depende de inúmeros fatores que podem influenciar direta ou indiretamente a estabilidade do desinfetante, tais como (Kwio-Tamale & Onyutha, 2024; Li *et al.*, 2019):

- Parâmetros da qualidade da água, por exemplo, o pH, a temperatura, a concentração e o tipo de compostos orgânicos e inorgânicos existentes na água, entre outros;
- Características da água, nomeadamente, a idade da água (período de permanência da água no sistema de distribuição da água) ou tempo de percurso (período de transporte da água de um ponto a outro do sistema de distribuição da água);
- Tipo e quantidade de cloro aplicado;

- Características do sistema de distribuição da água, por exemplo, o material que reveste o interior das tubagens, o comprimento e a idade das condutas e os sedimentos depositados nas mesmas;
- Parâmetros hidráulicos do sistema de distribuição de água, a título de exemplo, a velocidade da água, a pressão e o fluxo de água nas tubagens.

O equilíbrio entre as três formas de cloro ( $\text{Cl}_2$ ,  $\text{HOCl}$  e  $\text{OCl}^-$ ) presentes na água varia dependendo do pH da água, o que, conseqüentemente, intervém na eficiência da desinfecção, uma vez que as diferentes formas de cloro apresentam diferenças significativas na sua reatividade com microrganismos (Deborde & von Gunten, 2008). As variações das três formas de cloro consoante o valor de pH são apresentadas na Figura 2.1.



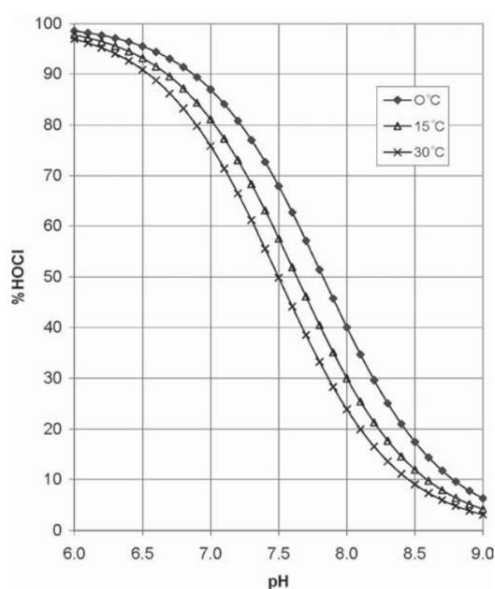
**Figura 2.1.** Distribuição relativa das principais espécies de cloro em função do pH a 25°C (Deborde & von Gunten, 2008).

Para condições típicas de tratamento da água, os valores recomendados de pH devem encontrar-se compreendidos entre 6,5 e 9,5 inclusive, de forma a garantir a compatibilidade com saúde humana, a eficiência da desinfecção e a prevenção da qualidade da água. Neste intervalo de pH as principais espécies de cloro predominantes são o  $\text{HOCl}$  e o  $\text{OCl}^-$  (Deborde & von Gunten, 2008; Corporation, 2011).

O  $\text{Cl}_2$  é a espécie de cloro dominante para  $\text{pH} \leq 1$ , sendo que para a faixa de pH utilizada no tratamento de água, o  $\text{Cl}_2$  é desprezado (Corporation, 2011). Para pH de 7 a 20 °C, é formado cerca de 75% de  $\text{HOCl}$ , mas apenas 25% em pH de 8 (Deborde & von Gunten, 2008). À medida que o valor de pH aumenta, o  $\text{HOCl}$  dissocia-se, formando  $\text{OCl}^-$ , tornando-se o desinfetante predominante.

A eficácia de cloro como agente desinfetante reduz-se significativamente à medida que o valor de pH aumenta, sendo que para  $\text{pH} \geq 9$  não existe quase nenhuma desinfecção, verificando-se uma ineficiência no processo de cloração (Deborde & von Gunten, 2008). Desta forma, verifica-se a importância de monitorizar o pH da água, uma vez que o aumento da alcalinidade da mesma poderá requerer uma concentração mais elevada de cloro residual livre e de tempo de contacto, a fim de garantir a eficiência da desinfecção (WHO, 2011).

Para além do pH, a temperatura também apresenta influência na dissociação do HOCl. O aumento da temperatura e do pH leva ao declínio da percentagem de cloro na forma de HOCl, tal como ilustrado na Figura 2.2 (Corporation, 2011).



**Figura 2.2.** Dissociação do ácido hipocloroso em função do pH e a diferentes temperaturas (Corporation, 2011).

De acordo com o estudo de Monteiro *et al.* (2017) observou-se que, para uma faixa de temperaturas variando entre 10 e 30°C no sistema de distribuição de água, o aumento da temperatura acelera o decaimento do cloro residual livre. De forma complementar, no estudo de Karadirek *et al.* (2015), determinou-se que, em três temperaturas representativas (15, 20 e 30°C), o decaimento de cloro residual livre aumenta com a elevação da temperatura.

O aumento da temperatura acelera as reações químicas e favorece o crescimento de microrganismos, resultando, conseqüentemente, na redução mais rápida da concentração de cloro residual livre (Li *et al.*, 2019).

As reações de oxidação do cloro com compostos inorgânicos e orgânicos têm diferentes velocidades de reação, resultando em diferentes taxas de decaimento de cloro residual livre. As reações com compostos inorgânicos são mais rápidas, levando a um decaimento rápido de cloro residual livre. Por outro lado, as reações com a matéria orgânica traduzem-se numa taxa de decaimento do cloro residual livre relativamente mais lenta, uma vez que estes compostos orgânicos são mais difíceis de oxidar (Boccelli *et al.*, 2003). Desta forma, o consumo de cloro residual livre pode ser classificado em duas fases, sendo a primeira fase correspondente a reações do cloro com compostos facilmente oxidáveis e a segunda fase refere-se ao consumo de cloro em reações mais lentas. A segunda fase sendo mais lenta que a primeira fase, ocorre no sistema de distribuição de água (Al-Jasser, 2007).

O crescimento de biofilmes é outro fator que reduz a concentração de cloro residual livre e, por sua vez, a qualidade da água. Os biofilmes apresentam a capacidade de abrigar e proteger bactérias patogénicas, impedindo que a ação do desinfetante chegue ao seu interior (Shi *et al.*, 2022). Isto resulta na necessidade de o cloro residual livre reagir primeiramente com a camada superficial do biofilme antes de atingir os microrganismos, o que, conseqüentemente, leva ao seu consumo.

A idade da água ou o tempo de percurso também apresenta uma influência no decaimento de cloro residual livre. O acumular de água estagnada numa área específica da rede de distribuição de água é caracterizado por água com idade elevada. Nestas zonas do sistema de distribuição de água de baixo consumo, pode ocorrer crescimento microbiológico. Conseqüentemente, este crescimento microbiológico pode levar ao consumo do cloro residual livre, resultando na redução da sua concentração devido à ação oxidante do cloro na eliminação dos microrganismos (Vieira *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2019).

Para salvaguardar a saúde dos consumidores, o processo de desinfecção deve ser completo e eficaz. Isto significa que a quantidade de cloro aplicada nas ETA e nos pontos de rechloragem deve ser suficiente para que ocorra oxidação com a amónia disponível e com a matéria inorgânica, e suficiente para garantir uma concentração de cloro residual livre acima de 0,20 mg/L em qualquer ponto da rede de distribuição, conforme exige o Decreto-Lei n.º 69/2023, de forma a proteger a água contra a contaminação microbiológica. Qualquer dose menor de cloro aplicada à necessária, resultará em uma desinfecção insuficiente ou até inexistente (Pinheiro & Wagner, 2001; Alves, 2010).

Assim, a desinfecção da água é garantida quando a dose de cloro adicionada é suficiente para ultrapassar o chamado *breakpoint* ou ponto crítico. No ponto crítico, todo o cloro reage com a amônia disponível, eliminando as cloraminas ou cloro residual combinado e permitindo que o cloro residual livre se acumule na água (Alves, 2010).

A evolução da concentração de cloro residual e aplicação de diferentes doses de cloro adicionadas distingue-se em quatro zonas (Alves, 2010) (Figura 2.3):

- **Zona 1.** Carência imediata de cloro – As doses de cloro iniciais reagem com a matéria orgânica e mineral facilmente oxidável existente na água, levando à formação de cloreto, que não tem propriedades desinfetantes. Nesta zona, a concentração de cloro residual na água é mínima.
- **Zona 2.** Formação de cloraminas – O cloro adicionado reage com a amônia e forma compostos clorados ativos, chamados cloraminas ou cloro residual combinado.
- **Zona 3.** Destruição das cloraminas – O cloro adicionado reage com as cloraminas e origina ião cloreto. Nesta zona, verifica-se uma redução do cloro residual disponível combinado devido à eliminação das cloraminas.
- **Zona 4.** Formação de cloro residual disponível livre – A partir de uma determinada dose de cloro deixa de existir destruição de cloraminas (ponto crítico) e todo o cloro adicionado origina HOCl e OCl<sup>-</sup>, designando-se por cloro residual disponível livre.

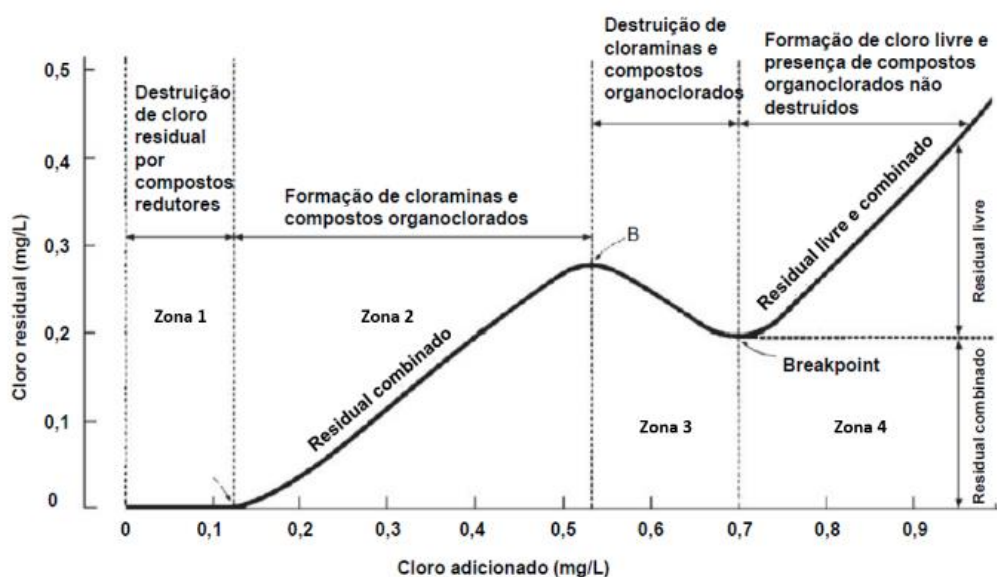


Figura 2.3. Curva de cloragem ao ponto crítico (Alves, 2010).

Tal como a eficiência do tratamento de desinfecção nas ETA apresenta uma importância relevante, as características do sistema de distribuição de água (a título de exemplo, o material, o comprimento, o diâmetro e a idade das tubagens) também apresentam uma influência na concentração de cloro residual livre que chega à torneira dos consumidores.

Os sistemas de distribuição de água têm sido associados a doenças epidémicas e endémicas transmitidas pela água (Moe & Rheingans, 2006). Fatores como a presença de nutrientes orgânicos e inorgânicos nas tubagens, que favorecem o crescimento microbológico e a formação de biofilmes, o envelhecimento e a deterioração das tubagens resultante da acumulação de material e corrosão, contribuem para o decaimento de cloro residual livre e a deterioração da qualidade da água (Liu *et al.*, 2017; Ainsworth, 2004).

As tubagens podem ser constituídas por diferentes tipos materiais (metálicos, plástico, entre outros). Cada um desses pode reagir com o cloro, resultando em diferentes taxas de decaimento de cloro residual livre ao longo da rede de distribuição de água. Para além do tipo de material, a idade de serviço da tubagem é um fator importante que deve ser considerado no consumo de cloro residual livre (Al-Jasser, 2007).

A taxa de decaimento de cloro residual livre é maior em tubagens metálicas, em comparação com tubagens plásticas, especialmente com longo tempo de serviço. As condutas de ferro fundido apresentam um maior consumo de cloro com o aumento do tempo de serviço da conduta, devido à corrosão da superfície interna. Observaram-se diferentes taxas de decaimento de cloro residual livre, afetadas pelo tempo de serviço das tubagens, para diferentes tipos de metais, pela seguinte ordem decrescente: ferro fundido > aço > ferro revestido com cimento. Nas condutas constituídas por ferro revestido com cimento foi verificado um menor decaimento de cloro residual livre devido à capacidade do cimento de proteger e isolar o ferro. Com o aumento do tempo de serviço, a camada protetora do cimento tende a desaparecer, verificando-se um aumento da corrosão do ferro e, conseqüentemente, um aumento do consumo de cloro residual livre. Por outro lado, o efeito do tempo de serviço apresentou pouca influência no decaimento de cloro para tubagens plástica de cloreto de polivinilo  $[\text{CH}_2\text{-CHCl}]_n$  (PVC), cloreto de polivinil esteárico (uPVC) e polietileno (Al-Jasser, 2007).

O comprimento das tubagens também pode ter influência na taxa de decaimento de cloro residual. Em redes de distribuição muito longas o tempo de percurso da água até

à torneira do consumidor também será conseqüentemente longo, o que levará a uma concentração de cloro residual na chegada à torneira dos consumidores mais baixa (Ainsworth, 2004).

O decaimento de cloro também é influenciado pelas condições hidráulicas. Por exemplo, em zonas do sistema de distribuição de água de baixos consumos, o escoamento tende a ser pouco turbulento, com pressão e fluxo de água nas tubagens reduzidos, o que resulta numa maior idade da água e, conseqüentemente, num maior decaimento da concentração do cloro residual livre (Oliveira *et al.*, 2022).

## **2.3. Modelação da cinética do decaimento de cloro**

### *2.3.1. Introdução*

Ao longo dos sistemas de distribuição de água potável ocorrem inúmeras reações químicas e biológicas que influenciam a qualidade da água que chega às torneiras dos consumidores. Estas reações ocorrem não só no volume da água que é fornecida, como também na interface entre a água e os componentes do sistema, como tubagens, conexões e tanques de armazenamento (Vieira *et al.*, 2004).

O decaimento de cloro residual livre em sistemas de distribuição é descrito como resultado de consumo de desinfetante através de duas reações químicas, designadamente reações de cloro no seio da água – reações com substâncias, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos, que permanecem na água após o tratamento – e reações de cloro com a parede das tubagens – reações com materiais das condutas (por exemplo, ferro, PVC e uPVC), com biofilme e com produtos de corrosão. A soma destas duas reações químicas permite descrever o decaimento de cloro ao longo da rede de distribuição de água, através do desenvolvimento de modelos cinéticos (Monteiro *et al.*, 2020).

Na última década, vários estudos realizados apresentaram uma série de modelos com o propósito de descrever a cinética subjacente ao decaimento do cloro residual. No entanto, dado ao conhecimento limitado em relação à cinética química das reações do cloro em sistemas de distribuição, a modelação foi baseada na suposição da reação global dada pela Expressão 2.6 (Vieira *et al.*, 2004).



Devido à complexidade sobre a cinética química das reações do cloro em sistemas de distribuição e à falta de conhecimento completo sobre a composição de todos os reagentes que possam potencialmente reagir com o cloro, os modelos cinéticos desenvolvidos adotaram uma abordagem em que as reações individuais que contribuem para o decaimento de cloro não são consideradas isoladamente, mas como um conjunto integrado (Vieira *et al.*, 2004).

De forma a representar o decaimento de cloro como um conjunto integrado das reações do cloro com o seio da água e nas paredes das tubagens, foi definida uma constante de decaimento global como a soma das constantes de decaimento no seio da água e na parede das tubagens, conforme a Expressão 2.7 (Powell *et al.*, 2000).

$$k = k_b + k_w \quad (2.7)$$

Onde:

k – constante global do decaimento de primeira ordem;

$k_b$  – constante cinética de decaimento de cloro no seio da água;

$k_w$  – constante cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede.

### 2.3.2. Decaimento do cloro no seio da água

O modelo cinético clássico e frequentemente utilizado para descrever o decaimento do cloro em sistemas de distribuição de água é o modelo cinético de primeira ordem, conforme descrito pelo Expressão 2.8.

$$C = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (2.8)$$

Onde:

C – concentração de cloro no tempo t;

$C_0$  – concentração inicial de cloro (t = 0);

k – constante global do decaimento de primeira ordem.

O modelo cinético de primeira ordem representa o decaimento exponencial da concentração de cloro ao longo do tempo, onde a velocidade da reação é proporcional à concentração do reagente (Vieira *et al.*, 2004).

Este modelo cinético clássico é frequentemente usado para modelação de decaimento de cloro no seio da água devido à sua simplicidade. No entanto, apesar do modelo cinético de primeira ordem ser amplamente utilizado, outros modelos cinéticos foram propostos a fim de melhorar a exatidão do decaimento do cloro ao longo do sistema de

distribuição de água, tal como apresentados na Tabela 2.1 (Monteiro *et al.*, 2020; Vieira *et al.*, 2004; Silva *et al.*, 2019).

**Tabela 2.1.** Modelos cinéticos aplicados ao decaimento de cloro (Adaptada de Vieira *et al.*, 2004).

Modelo cinético	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	$-k_1 C_1, -k_2 C_2$ $C_{1,0} = C_0 x$ $C_{2,0} = C_0 (1-x)$	$C_0 x e^{-(k_1 t)} + C_0 (1-x) e^{-(k_2 t)}$	$k_1, k_2, x$

Um dos modelos cinéticos apresentados anteriormente é o modelo de ordem  $n$  em relação ao cloro, que significa que a velocidade da reação é proporcional à potência de ordem  $n$  da concentração de cloro. O parâmetro  $n$ , pode apresentar valores iguais ou superiores a 1, não necessariamente inteiros. Quando  $n$  se iguala a 2, diz-se que se trata de um modelo cinético de segunda ordem. Este último modelo é característico por descrever o comportamento de águas recém-cloradas, onde se verifica uma rápida taxa de decaimento de cloro (Powell *et al.*, 2000).

O modelo de primeira ordem limitada assume que uma fração da concentração inicial de cloro,  $C^*$ , permanece inalterada e somente o restante,  $C_0 - C^*$ , decai exponencialmente de acordo com a lei de primeira ordem. Este modelo pressupõe uma limitação no decaimento de cloro, devido à insuficiência de matéria orgânica disponível para reagir com todo o cloro (Powell *et al.*, 2000).

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

Este modelo cinético permite descrever a existência de duas fases distintas e simultâneas do decaimento de cloro na água, designadamente, a primeira fase determinada por um conjunto de reações rápidas onde se verifica um acentuado decaimento de cloro e a segunda fase caracterizada por reações lentas com uma reduzida taxa de decaimento de cloro (Powell *et al.*, 2000).

Nos modelos referidos anteriormente, considera-se que a velocidade de decaimento de cloro é apenas proporcional à concentração do mesmo. No entanto, é de denotar que este decaimento pode ser também representativo de um conjunto de reações complexas

entre o cloro e os diversos compostos orgânicos (e inorgânicos) presentes na água. Desta forma, foi proposto um modelo - modelo de segunda ordem - que considera que o decaimento de cloro no seio da água depende não só da concentração de cloro, mas também do tipo e da concentração de compostos orgânicos existentes na água que reagem com o mesmo (Fisher *et al.*, 2011).

Para além do modelo de segunda ordem, foi também proposto, pelo estudo de Kastl *et al.* (1999), um modelo de segunda ordem similar ao modelo cinético de primeira ordem paralela, que assume a existências de duas fases de decaimento diferentes – rápida ou lenta. Este modelo de segunda ordem paralela é considerado uma variante do modelo de segunda ordem global com requisitos de modelação de decaimento de cloro mais precisos.

Têm sido desenvolvidos estudos com o objetivo de determinar qual o modelo cinético mais adequado para descrever o decaimento do cloro em sistemas de distribuição de água. Powell *et al.* (2000) indicam que os modelos de primeira ordem são adequados para modelar o decaimento de cloro no seio da água e na parede das tubagens, apresentando uma correlação forte (superior a 0,95) entre as concentrações de cloro simuladas e observadas, embora possam sofrer variações devido à interação de composto orgânicos e inorgânicos com o cloro. Já o modelo cinético de segunda ordem possibilita uma maior estabilidade sob as tais condições. Além disso, Kastl *et al.* (1999) confirmam que o modelo de segunda ordem paralelo é necessário e preciso para o estudo do comportamento do decaimento de cloro em duas fases envolvendo duas reações simultâneas de compostos orgânicos com cloro.

O modelo cinético de primeira ordem é considerado o modelo preferencial para o estudo do decaimento do cloro. A escolha deste modelo cinético deve-se à sua facilidade de implementação e menor complexidade computacional, à sua forte correlação entre as concentrações de cloro residual livre simulados e observados, e à sua simplicidade em descrever de forma precisa e confiável o decaimento de cloro residual livre em condições operacionais estáveis, sem considerar múltiplas fases de decaimento ou interações complexas.

### **Determinação da constante de cinética de decaimento de cloro no seio da água**

A constante de cinética de decaimento de cloro no seio da água,  $k_b$ , encontra-se ligada à natureza da água, o que por sua vez torna-se difícil caracterizar o comportamento real da curva de decaimento de cloro livre. Os modelos de primeira ordem, devido à sua

simplicidade, são os mais utilizados para determinar o valor da constante cinética de primeira ordem. A linearização da Expressão 2.8 permite o cálculo do valor de  $k_b$  através da Expressão 2.9 (Silva *et al.*, 2019).

$$\log \frac{C_t}{C_0} = -k_b t \quad (2.9)$$

Onde:

C – concentração de cloro no tempo t;

$C_0$  – concentração inicial de cloro (t = 0);

$k_b$  – constante cinética de decaimento de cloro no seio da água.

O valor de  $k_b$  é estimado a partir do declive da reta da representação gráfica dos valores  $\log (C_t / C_0)$  em função do tempo (t).

A determinação experimental da constante cinética de decaimento de cloro no seio da água é normalmente obtida através do nomeado “teste de garrafa”, que permite avaliar unicamente o efeito das reações que ocorrem no seio da água. O “teste de garrafa” consiste na medição da concentração de cloro residual livre em intervalos de tempo das amostras de água recolhidas, e na representação gráfica dos valores da concentração de cloro em função dos intervalos de tempo definidos, determinando através do declive da reta o valor de  $k_b$  (Silva *et al.*, 2019; Beleza, 2005).

### 2.3.3. Decaimento do cloro na parede das tubagens

À reação do cloro com o próprio material da tubagem e com o biofilme, denomina-se por decaimento do cloro nas paredes da tubagem (Al-Jasser, 2007).

Rossmann *et al.*, (1994) desenvolveram o modelo de decaimento do cloro nas paredes da tubagem assumindo uma cinética de primeira ordem. Este modelo cinético clássico representa as reações químicas nas quais a taxa de decaimento é limitada pela concentração de cloro na parede das tubagens. Esta concentração depende da taxa de transferência de massa entre o seio da água e a parede da tubagem sendo proporcional à concentração de cloro na água.

Segundo a lei de primeira ordem, o decaimento de cloro associado à parede da conduta pode ser descrito pela Expressão 2.10 (Rossmann, 2000; Rossmann *et al.*, 1994).

$$r = \frac{2k_w k_f}{R(k_w + k_f)} C \quad (2.10)$$

Onde:

$r$  – taxa de reação da parede do tubo;

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

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

$C$  – concentração do cloro;

$R$  - raio da tubagem.

O coeficiente de transferência de massa pode ser expresso em termos de um número adimensional de Sherwood ( $Sh$ ) apresentado pela Expressão 2.11.

$$k_f = Sh \frac{D}{d} \quad (2.11)$$

Em que:

$Sh$  – número adimensional de Sherwood;

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

$d$  – diâmetro da tubagem.

O número adimensional de Sherwood depende das condições hidráulicas do escoamento, sendo estimado pela Expressão 2.12 para regimes de escoamentos laminares ( $Re < 2.300$ ) e estimado de acordo com a Expressão 2.13 para escoamentos turbulentos ( $Re > 2.300$ ).

$$Sh = 3,65 \frac{0,0068 \left(\frac{d}{L}\right) Re Sc}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{d}{L}\right) Re Sc\right]^{\frac{2}{3}}} \quad (2.12)$$

$$Sh = 0,0149 Re^{0,88} Sc^{\frac{1}{3}} \quad (2.13)$$

Onde:

$L$  – comprimento da tubagem;

$Re$  – número de Reynolds;

$Sc$  – número de Schmidt.

O número de Schmidt é calculado de acordo com a Expressão 2.14.

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (2.14)$$

Onde:

$\nu$  – viscosidade cinética da água;

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

O número de Reynolds é calculado pela Expressão 2.15.

$$R = \frac{ud}{\nu} \quad (2.15)$$

Onde:

$u$  – velocidade na tubagem;

$d$  – diâmetro da tubagem.

### **Determinação da constante de cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede**

Para o estudo do decaimento de cloro devido ao efeito da parede, é necessária uma análise laboratorial de vários fatores, tais como, o tipo de material e o diâmetro da tubagem, a concentração inicial de cloro e a existência de corrosão e biofilme. No entanto, esta análise é exaustiva o que, dificulta uma medição direta da constante de cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede,  $k_w$ .

Porém, é possível determinar  $k_w$  após conhecer o comportamento do decaimento do cloro no seio de água. Este valor ( $k_w$ ) é obtido por meio de diferença entre a constante  $k_b$ , determinada experimentalmente (determinação descrita na secção 2.3.2), e a constante global de decaimento de primeira ordem deduzida (Expressão 2.7).

A determinação da constante  $k_w$  pode também ser determinada indiretamente com recurso a um programa de modelação da qualidade da água, como é o caso do programa EPANET. Assim, aplicando o valor da constante  $k_b$ , no EPANET, o valor da constante  $k_w$  é estimado por meio de calibração, aplicando um processo de tentativa-erro através da comparação de uma maior aproximação entre os valores simulados e os valores reais de cloro observados em campo (Rossman, 2000).

## **2.4. Modelos hidráulicos e da qualidade da água**

### *2.4.1. Introdução*

A modelação hidráulica foi o primeiro tipo de modelação de sistemas de distribuição de água a ser desenvolvida. A criação deste modelo matemático permitiu a análise dos

níveis de pressão, do caudal, e de outros fatores hidráulicos nas redes de distribuição de água (Walski, 2006).

De forma a complementar a modelação hidráulica, a *American Water Works Association* (AWWA) e a *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), reuniram um conjunto de investigadores em modelação da qualidade da água e desenvolveram um modelo de qualidade da água para os sistemas de distribuição de água potável (Walski, 2006).

#### 2.4.2. Modelo EPANET

O programa EPANET, desenvolvido pela USEPA, permite realizar simulações hidráulicas e da qualidade da água confiável e amplamente utilizado nas últimas décadas, capaz de prever a concentração de cloro residual livre em diversos pontos do sistema de distribuição de água (Muhammad *et al.*, 2021).

O EPANET encontra-se disponível *online* e a sua utilização é gratuita, o que proporciona uma acessibilidade a diversos utilizadores e elimina problemas de acesso causados por questões financeiras. Este programa conta com um Manual do Utilizador, disponível em inglês, no *website* USEPA, o que facilita a aprendizagem sobre a sua utilização.

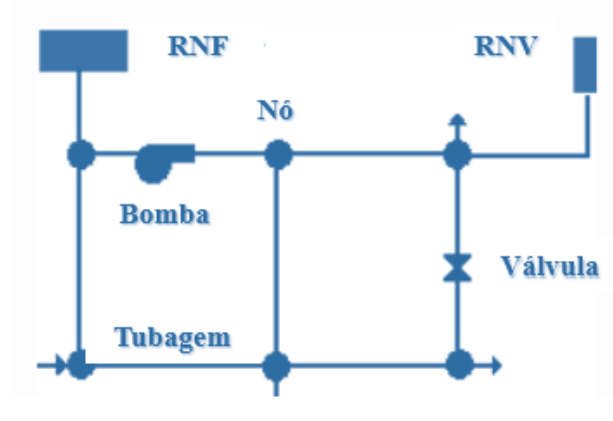
O programa EPANET permite desenhar ou importar uma representação esquemática de qualquer tipo de rede de distribuição de água: ramificadas, malhadas e mistas.

As redes de distribuição de água podem ser classificadas em três tipos principais: ramificadas, malhadas e mistas. As redes ramificadas são caracterizadas por uma tubagem principal que se divide em tubagens secundárias, distribuindo a água em uma única direção. As redes malhadas são compostas por tubagens que formam uma malha ou blocos interconectados, permitindo um escoamento bidirecional da água. As redes mistas combinam características das redes ramificadas e malhadas (Cambrais, 2024).

Enquanto as redes de distribuição de água ramificadas oferecem uma estrutura mais simples, elas são mais vulneráveis a interrupções. Por outro lado, as redes malhadas, proporcionam continuidade no abastecimento. As redes mistas integram os benefícios de ambos os sistemas (Cambrais, 2024).

O programa EPANET tem a capacidade de modelar e representar esquematicamente vários componentes físicos de uma rede de distribuição de água, nomeadamente,

tubagens, nós/junções (juntas das tubagens), bombas, válvulas e reservatórios de nível fixo (RNF) ou reservatório de nível variável (RNV) (Figura 2.4) (Rossman, 2000).



**Figura 2.4.** Componentes físicos de um sistema de distribuição de água (Adaptado de Rossman, 2000).

Os elementos físicos que constituem uma rede de distribuição de água no programa EPANET 2.2 são descritos na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2.** Descrição dos elementos físicos do programa EPANET (Adaptado de Neves, 2016).

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

Para além dos componentes físicos, o programa também utiliza três tipos de componentes não-físicos, nomeadamente, curvas, padrões temporários e controlos. Os componentes não-físicos que constituem uma rede de distribuição de água no programa EPANET 2.2 são descritos na Tabela 2.3.

**Tabela 2.3.** Descrição dos componentes não-físicos do programa EPANET (Adaptado de Neves, 2016).

Componentes		Definição
Curvas	Bomba	Representa uma relação entre a altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento desta, para uma velocidade de rotação nominal.
	Volume	Determina o modo como o volume de água armazenado num reservatório de nível variável varia com a altura de água.
	Rendimento	Relaciona o rendimento do grupo com o caudal bombeado. É utilizada apenas para cálculos energéticos.
	Perda de Carga	Descreve a perda de carga, através de uma válvula genérica (VG), em função do caudal.
Padrões Temporais		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		Conjunto de instruções que estabelecem o modo como a rede opera ao longo do tempo. Estes especificam o estado dos troços selecionados em função do tempo, alturas de água num reservatório de nível variável e valores de pressão em pontos específicos da rede.

O programa EPANET monitoriza a pressão em cada nó, a altura de água em cada tanque/reservatório, o caudal de água em cada tubagem, a idade da água ou tempo de percurso, a rastreabilidade da fonte e a concentração de uma espécie química ao longo do sistema de distribuição de água durante um período de simulação composto por múltiplos intervalos de tempo (Rossman, 2000).

O EPANET demonstra as seguintes competências no que diz respeito à modelação hidráulica de sistemas de água (Rossman, 2000):

- Análise ilimitada de número de componentes do sistema de distribuição de água;
- Aplicação das fórmulas de Hazen-Williams, Darcy-Weisbach ou Chezy-Manning de modo a determinar o valor da perda de carga;
- Modelação de bombas com velocidade constante ou variável e cálculo da energia resultante da bombagem e seu respetivo custo;
- Modelação dos principais tipos de válvulas;
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável de formas diversas, através de curvas de volume em função da altura de água;

- Existência de múltiplas categorias de consumo nos nós, onde cada uma apresenta um padrão próprio de variação ao longo do tempo;
- Entre outras.

Adicionalmente, o EPANET apresenta as seguintes capacidades no que respeita à modelação da qualidade da água (Rossman, 2000):

- Modelação do movimento de um constituinte não reativo (traçador) através do sistema de distribuição ao longo do tempo;
- Modelação do movimento e do destino de um constituinte reativo à medida que este sofre um crescimento (por exemplo, um subproduto da desinfecção) ou um decaimento (por exemplo, o cloro residual livre) com o tempo;
- Modelação da idade da água ou tempo de percurso através da rede de distribuição de água;
- Cálculo do caudal de um nó específico que atinge os outros nós ao longo do tempo;
- Modelação de reações de decaimento no seio da água e na parede das tubagens;
- Aplicação do modelo cinético de ordem  $n$  na modelação das reações no seio da água;
- Aplicação do modelo cinético de primeira ordem na modelação das reações que ocorrem na parede das tubagens;
- Definição de limites para a transferência de massa na modelação de reações na parede das tubagens;
- Possibilita que reações de crescimento ou decaimento sejam controladas por um valor de concentração recomendada;
- Aplicação de coeficientes de reação global, possibilitando a alteração do seu valor individual para cada tubagem;

- Permite correlacionar os coeficientes de reação na parede com a rugosidade da tubagem;
- Modelação de reservatórios de armazenamento de nível variável como reatores de mistura completa, de escoamento em êmbolo ou ainda de mistura com dois compartimentos.

Através destas capacidades, o EPANET pode realizar os seguintes tipos de análise (Rossman, 2000):

- Mistura de água a partir de diversas origens;
- Determinação da idade da água ou tempo de percurso;
- Determinação do decaimento de cloro residual livre;
- Determinação do crescimento de um subproduto da desinfecção;
- Rastreamento da propagação de contaminantes ao longo da rede de distribuição de água.

A escolha do EPANET como programa de simulação, nomeadamente nos estudos de decaimento de cloro residual livre, deve-se à sua gama de vantagens, designadamente, análise de um número ilimitado de tubagens, fornecimento de um ambiente integrado para edição de dados de entrada, na qual permite correlacionar o decaimento de cloro residual livre com diferentes parâmetros, execução de simulações e visualização dos resultados em diversos formatos, isto é, mapas de rede codificados por cores, tabelas de dados, gráficos de séries temporais e de contorno (Arunkumar & Mariappan, 2011).

## 3. Metodologia

### 3.1. Etapas metodológicas

A metodologia para o presente estudo baseia-se na construção e calibração do modelo de simulação hidráulica e da qualidade da água para a rede de distribuição de água de um edifício do ISEL, recorrendo ao programa EPANET 2.2.

As cinco etapas usadas no desenvolvimento do caso de estudo do presente trabalho são apresentadas na Figura 3.1.

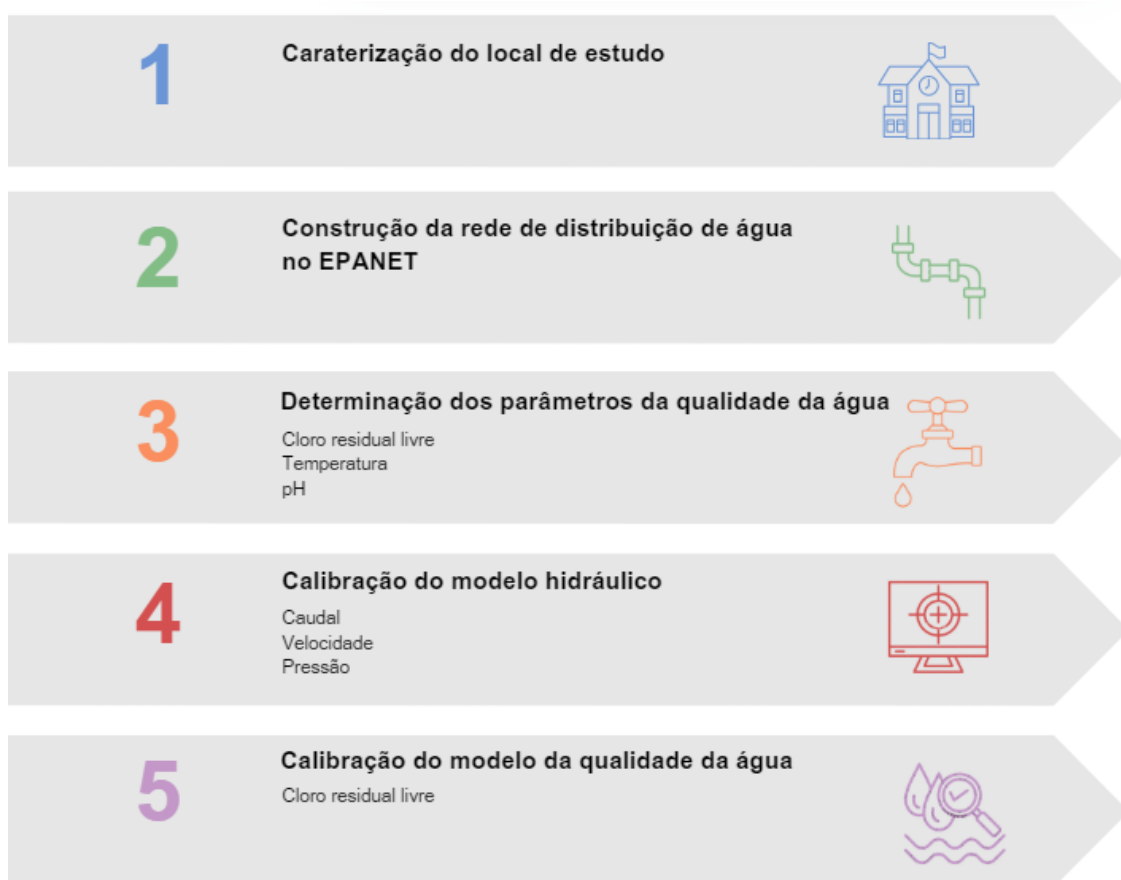
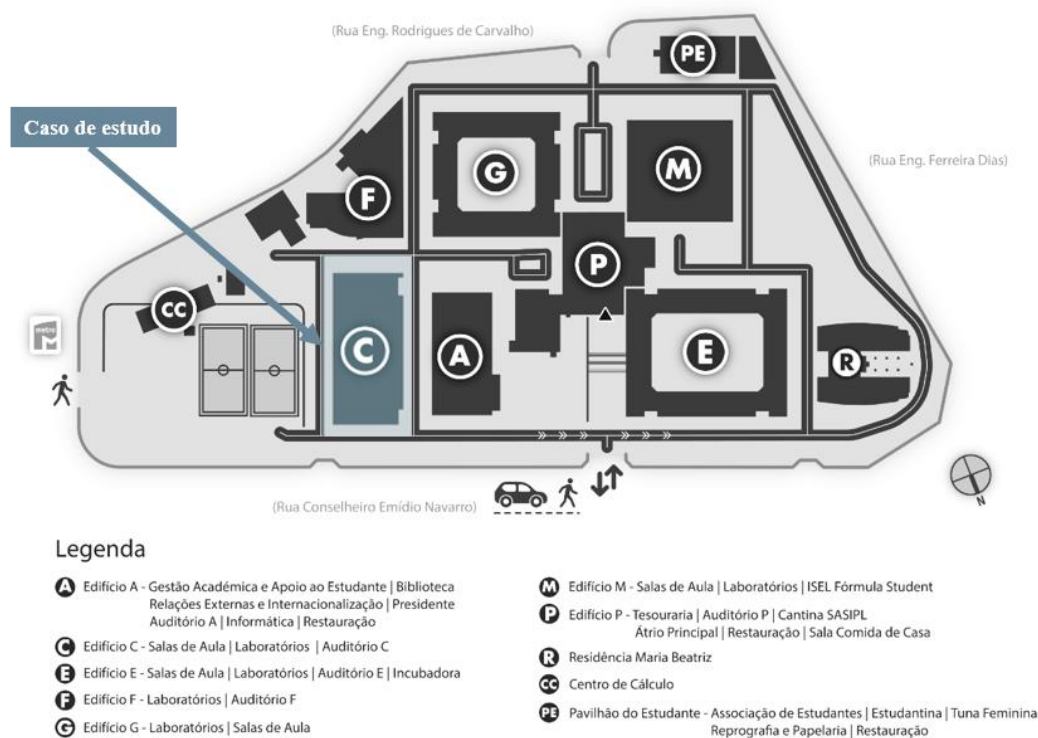


Figura 3.1. Etapas metodológicas do presente trabalho - caso de estudo.

### 3.2. Caraterização do local de estudo

O ISEL é a mais antiga escola de engenharia do país, com mais de 160 anos de existência, a qual conta atualmente com 12 cursos de licenciatura, 11 cursos de mestrado e 9 pós-graduações na área da engenharia. Está sediada na Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa (ISEL, n.d.).

O ISEL integra um conjunto de 7 edifícios, todos eles associados a atividades de âmbito escolar, apresentados na Figura 3.2.



**Figura 3.2.** Planta do campus do ISEL.

O presente estudo foi realizado no edifício C, designado também por edifício Ferreira Cardoso. De forma a caracterizar a qualidade da água consumida, optou-se por analisar a rede de distribuição de água do piso mais utilizado do edifício C pela população do campus.

Para obter a informação sobre o piso mais utilizado, foi enviado um e-mail aos docentes, questionando sobre o número de alunos que frequentaram as suas aulas lecionadas nas salas do edifício C durante o primeiro semestre do ano letivo de 2023/2024. O número de respostas recebidas foi insatisfatório, com apenas um docente respondendo sobre a utilização de duas salas de aula (C.0.22 e C.2.22). Considerando o baixo número de respostas por parte dos docentes, optou-se por outra alternativa para obter a informação necessária.

Assim, a recolha da informação sobre o piso mais utilizado incidiu no levantamento das horas em que as salas de aula do edifício C foram ocupadas para lecionar unidades curriculares aos alunos do ISEL. Este levantamento foi obtido através da consulta dos

horários escolares das turmas dos cursos do ISEL (licenciaturas, mestrados e pós-graduações) do 1º semestre do ano letivo 2023/2024.

No entanto, na recolha de informação sobre o piso mais utilizado no edifício C, não foram contabilizadas as utilizações pontuais de salas de estudos pelos alunos, dos gabinetes pelos docentes e de outros espaços escolares ocupados excecionalmente, devido às suas utilizações variáveis, esporádicas ou de curta duração, o que dificulta um levantamento preciso da sua ocupação. Em contraste, as salas de aula apresentam um uso mais previsível e regular, com horários pré-definidos.

Para além do levantamento das horas de utilização de cada piso do edifício C, foi também realizada uma análise visual em campo da utilização de cada piso.

### **3.3. Construção da rede de distribuição de água no EPANET**

Para a realização desta etapa foi necessário, primeiramente, recolher dados dos componentes físicos da rede de distribuição de água em estudo, nomeadamente, características técnicas como o diâmetro, o comprimento e o tipo de material das tubagens existentes no edifício C, e a cota dos nós acima do nível do mar. Estes dados foram recolhidos através das plantas do edifício C, fornecidas em AutoCad.

Para proceder à construção do modelo, a rede de distribuição de água do piso mais utilizado do edifício C foi exportada do AutoCad para o EPANET 2.2. No entanto, foi necessário acrescentar dados em falta, nomeadamente, o coeficiente de rugosidade das tubagens, o caudal em cada nó, o reservatório de nível fixo e as suas propriedades (nível da água e qualidade inicial) e o tipo de válvula.

Para além dos componentes físicos, foi também necessário recolher dados de operação do sistema de distribuição de água, designados por componentes não-físicos do EPANET 2.2, nomeadamente, o padrão temporal de consumo de água. O padrão temporal foi estimado a partir de uma relação de proporcionalidade direta entre o consumo médio do edifício e o número de utilizadores (alunos, docentes e não docentes) que frequentam o piso mais utilizado do edifício C.

O caudal médio é obtido através da quantificação de consumos de água num sistema de abastecimento, que constitui uma tarefa necessária e, por vezes, complexa no desenvolvimento de um modelo de simulação. Existem várias formas de determinar o consumo médio global, designadamente:

- por macro-medição, isto é, medição direta dos volumes de água fornecida à rede através de grupos elevatórios, condutas adutoras e/ou reservatórios;
- por micro-medição, em outros termos, medição dos volumes de água utilizados nos pontos de consumo, os quais, na prática, encontram-se expressos nos registos de faturação fornecidos pelas entidades gestoras (por exemplo, medição dos volumes de água através de contadores/medidores de água);
- por estimativa, com base, por exemplo, no tipo de ocupação e número de habitantes servidos (Coelho, Loureiro & Alegre, 2006).

No presente estudo foi necessário recorrer a estimativas para determinar o consumo médio de água por duas razões:

1. Durante a realização do estudo, encontrava-se em curso a reabilitação da rede de abastecimento de água do edifício C, assim como do sistema de rega do ISEL. Estas intervenções acarretaram dificuldades na obtenção de medições precisas, uma vez que o consumo real de água foi afetado, justificando, assim, o uso de estimativas.
2. O ISEL dispõe de um único contador de água para medir o volume total de água utilizado em todo o campus do ISEL (Figura 3.3). Devido à falta de individualização dos dados de consumo específico de cada edifício ou piso, foi necessário recorrer a estimativas para determinar o consumo médio de água.

Estes fatores limitaram a precisão das medições diretas e justificaram a adoção de metodologias indiretas para a estimativa do consumo hídrico.



**Figura 3.3.** Contador junto à entrada do campus do ISEL.

Desta forma, o caudal médio foi estimado a partir de valores empíricos da capitação e da população, através da Expressão 3.1.

$$Q_{\text{médio}} \left( \frac{\text{L}}{\text{d}} \right) = \text{Capitação} \left( \frac{\text{L}}{\text{hab.d}} \right) \times \text{População (hab)} \quad (3.1)$$

A capitação de consumo de água pode ser obtida por valores disponíveis na legislação ou por estudos realizados em condições semelhantes.

Segundo o Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, é apresentada uma tipologia dos diferentes consumos, nomeadamente, domésticos, comerciais ou de serviços, industriais ou similares, e públicos. Porém esta designação de consumos é pouco detalhada relativamente às diferentes e reais utilizações de água. Os valores de capitação de água segundo a presente legislação são apresentados na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Valores de capitação de água segundo o Decreto Regulamentar nº 23/95.

Tipologia	Definição
<b>Domésticos</b> (> 50.000 habitantes)	175 L/(hab.d)
<b>Comerciais</b>	50 L/(hab.d)
<b>Públicos</b>	5 a 20 L/(hab.d)

A caracterização de diferentes tipos de consumo apresentados pelo Decreto Regulamentar nº 23/95, não é clara na identificação da tipologia para alguns tipos de instalações, particularmente, para instalações de ensino.

A escassez de valores de capitação referente às instalações de ensino deve-se ao facto de estes espaços apresentarem uma grande variedade de tipos de consumo. As instalações de ensino podem apresentar diferentes usos de água, associados ao uso de instalações sanitárias e balneários, à limpeza das instalações, à rega de espaços verdes e exteriores, ao sistema de incêndio, à preparação de refeições, aos dormitórios, entre outros. Para além das diferentes utilizações de água que um espaço escolar de ensino superior apresenta, é também devido a fatores, como, por exemplo, a dimensão do complexo escolar, o número de utilizadores do espaço, o número de dispositivos e a frequência da sua utilização, que se verifica uma grande dificuldade em caracterizar de forma geral este tipo de instalação.

O campus do ISEL é um complexo de ensino superior com diferentes edifícios, com utilizações de água distintas. Para o presente estudo, importa determinar o consumo de

água no edifício C. Porém, devido às limitações mencionadas anteriormente na determinação direta do consumo médio de água do edifício C, a capitação de água do edifício C foi estimada com base no consumo médio diário de água unitária de um edifício de ensino superior, com características tão semelhantes quanto possível ao ISEL.

O valor de capitação de consumo de água médio foi, portanto, assumido com base no consumo unitário do edifício Departamental, pertencente ao complexo universitário da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa (FCT/UNL), determinado no estudo da autora Ferreira (2009).

O valor para a população foi estimado com base no número de alunos que frequentam o piso mais utilizado do edifício C e no número de docentes e não-docentes que frequentam este edifício.

O número de alunos que frequentam o piso mais utilizado do edifício C foi obtido através da estimativa do número máximo de alunos que as salas de aula podem acomodar. Os dados sobre a capacidade máxima (lugares sentados) de cada sala foram obtidos através da visualização dos horários de ocupação de todas as salas de aula do piso mais utilizado.

O número de docentes e não-docentes do ISEL foi incluído. Para estimar o número de docentes e não-docentes que frequentam o edifício C, considerou-se a distribuição desses indivíduos pelos 7 edifícios do ISEL, assumindo uma alocação proporcional entre os edifícios. Esta estimativa não se limitou apenas a considerar a utilização de um piso específico, mas sim do edifício C, por duas razões principais:

1. Os docentes e não-docentes não se restringem à utilização de um único edifício, mas deslocam-se frequentemente entre os diversos edifícios do campus universitário, conforme as suas necessidades diárias e atividades académicas e administrativas, como aulas, reuniões e eventos.
2. Assim como foi realizado uma estimativa do número máximo de alunos, foi também adotada uma abordagem de majoração do número de docentes e não-docentes.

Posteriormente, o padrão temporal de consumo de água para o edifício C foi estimado através de uma relação de proporcionalidade direta entre o consumo médio de água e

a capacidade máxima de cada sala do piso mais utilizado do edifício C, incluindo a alocação proporcional de docentes e não-docentes, ao longo de um dia aleatório de aulas (das 8 h às 23 h).

Foi considerado um consumo residual, mas não nulo, no período noturno (das 23 h às 8 h), uma vez que, mesmo sem a ocupação de pessoas, podem existir possíveis fugas de água. As horas do período noturno foram caracterizadas por 10% de um consumo médio mínimo.

### **3.4. Determinação dos parâmetros da qualidade da água**

#### *3.4.1. Nota introdutória*

Foi necessário levar a cabo a medição do cloro residual livre, assim como dos parâmetros de qualidade da água que podem ter influência no decaimento do cloro residual, nomeadamente, o pH e a temperatura.

De forma a assegurar que a água destinada ao consumo humano satisfaz os requisitos de qualidade da água fixados nos termos do Decreto-Lei n.º 69/2023, foram realizadas colheitas de amostras pontuais de água nos pontos de amostragem (torneiras) do piso mais utilizado do edifício C.

A metodologia e o procedimento experimental (secção 3.4.2 e 3.4.3, respetivamente) para a colheita das amostras de água nas torneiras para verificação dos valores de qualidade da água, designadamente, cloro residual livre, pH e temperatura, teve por base a consulta dos seguintes documentos:

- ISO 5667-5:2006 – *Water quality sampling – Part 5. Guidance on sampling of drinking water from treatment works and piped distribution systems*;
- Recomendação Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos n.º 01/2017 – Procedimento para a colheita de amostras de água para consumo humano em sistemas de abastecimento (ERSAR, 2017);
- Instruções para colheita de amostras de águas para consumo humano da Agência Portuguesa do Ambiente (APA, 2019);
- Secção 4500-CI.G - *DPD Colorimetric Method* do *Standard methods for the examination of water and wastewater* (Baird et al., 2017).

### 3.4.2. Metodologia de amostragem

No presentes estudo foram considerados critérios para a realização da recolha de amostras de água, nomeadamente:

- Medição local e precisão

No presente estudo recorreu-se ao uso de equipamentos que permitissem a realização das medições do cloro residual livre, pH e temperatura no local da colheita, de forma a reduzir os erros resultantes do transporte da amostra de água e/ou da exposição à radiação solar.

Para a medição da concentração de cloro residual livre recorreu-se ao método colorimétrico DPD, usando um fotómetro portátil Checker®HC HI701 da marca HANNA Instruments, com uma gama de 0,00 a 2,50 ppm (mg/L) e uma precisão de  $\pm 0,03$  ppm (mg/L) (Figura 3.4).



**Figura 3.4.** Fotómetro portátil utilizado para medição da concentração do cloro residual livre.

O manual de instruções do respetivo equipamento é apresentado no Anexo V.

O método colorimétrico DPD é um método amplamente utilizado, especialmente para medições de campo (Corporation, 2011). Este método utiliza o DPD como reagente colorimétrico. O cloro residual existente na água reage com o DPD, o que resulta na formação de um composto com coloração característica proporcional à concentração de cloro residual livre (Figura 3.5) (Li, 2021).

O procedimento do método colorimétrico DPD utilizado encontra-se de acordo com o *Standard Methods* (Secção 4500-Cl.G - DPD Colorimetric Method), o qual consistiu na recolha de um volume de 10 mL de amostra de água em uma cuvete, na qual foi inserido

reagente indicador DPD, produzindo-se uma cloração rosa, cujo nível de intensidade é proporcional à concentração de cloro residual livre.



**Figura 3.5.** Células para o fotómetro com cloração rosa proporcional à concentração de cloro residual livre.

Para o presente estudo foram determinados os valores de pH, com tiras-teste para análise do pH da água, com uma precisão de pH de 0,5, o qual baseia-se num método de análise visual colorimétrico, através da comparação imediata da cor com a tabela de cores padronizada (Figura 3.6).



**Figura 3.6.** Tira-testes de pH.

Para o presente estudo utilizou-se um termómetro analógico, com uma escala de abaixo de -10 a 150°C, com precisão de  $\pm 1,0^{\circ}\text{C}$  (Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Termómetro analógico.

- Seleção dos pontos de amostragem com base na utilização

No presente estudo, procedeu-se à seleção dos pontos de amostragem tendo por base critério de utilização, isto é, foram selecionadas torneiras que representassem tanto um elevado consumo como um baixo consumo de água.

- Recolha de amostras de água com e sem purga

Para este estudo, a realização da recolha de amostras de água sem purga teve como objetivo quantificar o cloro residual livre na água estagnada.

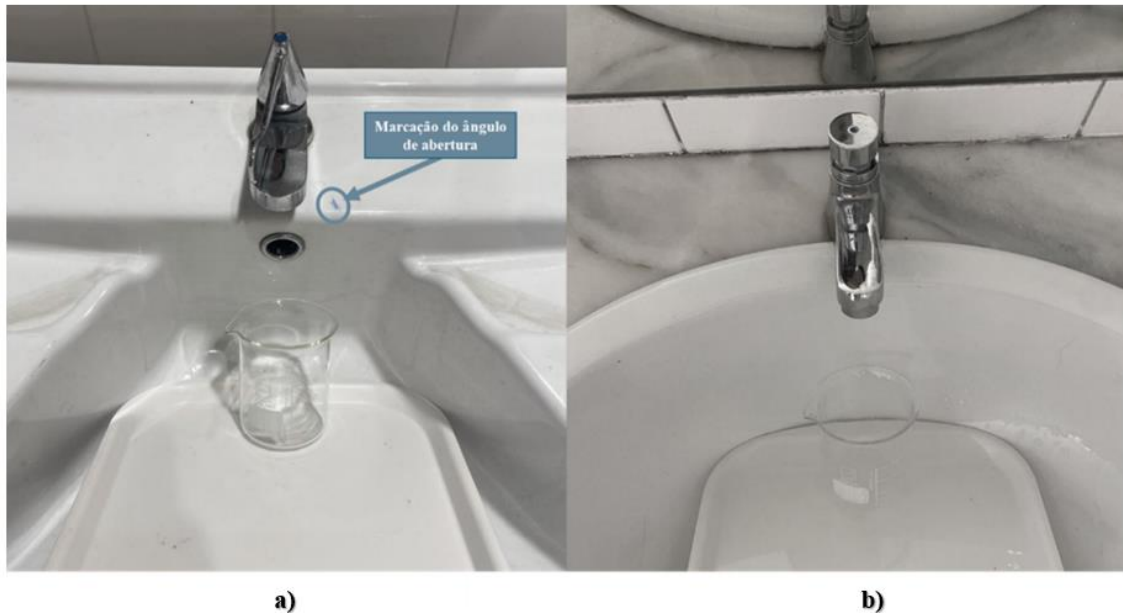
A realização das colheitas das amostras de água com purga de 2 a 3 min foi realizada com o objetivo de verificar a variação e a concentração real do cloro residual livre na água fornecida. A realização desta colheita permitiu reduzir a probabilidade de os resultados do cloro residual livre serem aproximadamente zero, devido à possível existência de torneiras com baixo consumo de água, que podem ser caracterizadas por terminais de água estagnada.

- Condições constantes nas recolhas de amostras de água

Aquando da realização da amostragem, utilizou-se um caudal de água aproximadamente constante, procurando garantir que as colheitas são realizadas sob as mesmas condições. Foi aplicado o seguinte procedimento:

- Para torneiras com pressão ajustável foi marcado o ângulo de abertura, de forma que, no decorrer das várias medições realizadas, o caudal usado na amostragem fosse aproximadamente constante (Figura 3.8a);
- Nas torneiras onde a pressão não é ajustável, a prática acima referida não foi necessária (Figura 3.8b);

- Adicionalmente, no início de cada colheita, o caudal de água foi medido de forma a verificar se os fluxos água de ambos os tipos de torneiras permanecem constantes em todas as recolhas de amostras de água.



**Figura 3.8.** Torneira: a) com pressão ajustável e b) sem pressão ajustável.

### 3.4.3. Procedimento experimental

#### **Preparação das colheitas de amostras de água**

Antes da realização das colheitas de amostras de água, foi realizado um levantamento e adequabilidade dos meios e materiais para a análise do cloro residual livre, pH, temperatura e caudal. Os meios e materiais necessários para a realização das análises de cada parâmetro encontram-se apresentados na Tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Materiais, equipamentos e reagentes a utilizar na análise dos parâmetros físico-químicos durante a colheita de água de uma torneira.

	Caudal	Cloro residual livre	pH	Temperatura
Materiais	1 Copo de precipitação (200 ml)	2 Copos de precipitação (50 ml) Pano(s) para limpeza do material/equipamentos 1 Esguicho de água destilada (para limpeza)		
		2 Cuvetes de amostra com tampa Pano(s) para limpeza das cuvetes		
Equipamento	Cronómetro (telemóvel)	Fotómetro portátil (Checker®HC HI701)	Tiras-teste colorimétricas	Termómetro analógico
Reagentes		2 Reagentes DPD para cloro livre		

Previamente à recolha de amostras de água, foram verificadas visualmente as condições do local de amostragem, nomeadamente, estado de conservação e higiene das torneiras, a turvação, cor e cheiro da água. Estas verificações foram registadas numa folha de registo de amostragem.

Caso as condições não fossem as adequadas, procedia-se à avaliação de alternativas, nomeadamente, à escolha de outro ponto de amostragem ou à alteração da data da colheita.

### Procedimento de colheitas na torneira

De forma a garantir que a amostra representasse valores reais da qualidade da água, foi desenvolvido e implementado o seguinte procedimento para o presente estudo de investigação:

1. No início de cada colheita de água, foi medido o caudal para assegurar que o fluxo de água que saía das torneiras se mantinha constante, ao longo de todas as medições, realizadas nos diferentes dias:
  - a) Colocar um copo de precipitação debaixo da torneira (tal como mostra a Figura 3.8);

- b) Cronometrar quanto tempo demora até o copo de precipitação encher de água até ao volume definido (aproximadamente 200 mL);
- c) Determinar o valor do caudal através da Expressão 3.2.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.2)$$

Onde:

Q – caudal, em mL/s;

V – volume de água recolhido, em mL;

t – tempo decorrido até V, em s.

2. Recolher a primeira amostra de água sem escoamento prévio para um copo de precipitação;
3. Deixar correr a água durante mais 2 ou 3 min, com o mesmo caudal;
4. Após o escoamento prévio de 2 ou 3 min, recolher a segunda amostra de água para um copo de precipitação;
5. Desligar a torneira e proceder à análise dos parâmetros físico-químicos.

Para análise da temperatura:

1. Inserir o termómetro dentro do copo de precipitação com a amostra de água sem escoamento prévio e registar o valor obtido.

Para análise do cloro residual livre:

1. Encher a cuvete com 10 mL de amostra de água sem escoamento prévio que se encontra no copo de precipitação e fechar a cuvete com a tampa;
2. Limpar e secar a cuvete com um pano de limpeza;
3. Colocar a cuvete no fotómetro portátil e fechar a tampa do medidor, de forma ser medido o zero;
4. Retirar a cuvete do medidor, abrir a tampa e adicionar a saqueta de reagente DPD para cloro livre;
5. Voltar a colocar a tampa e agitar, durante 20 s;

6. Colocar a cuvete novamente no fotómetro portátil, de forma a medir a concentração de cloro residual livre, em ppm, e registar o valor obtido;
7. Após a primeira leitura, retirar a cuvete do fotómetro portátil e inserir novamente, de modo a proceder a segunda leitura e registar o valor obtido.

#### Para análise do pH:

1. Colocar a tira-teste de pH dentro do copo de precipitação com a amostra de água sem escoamento prévio, comparar a cloração da tira-teste com a escala de cores e registar o valor obtido.

Este procedimento para análise do cloro residual livre, pH e temperatura repetiu-se para a amostra de água com purga de 2 a 3 min.

A frequência de amostragem foi realizada durante o decorrer do 1º semestre do ano letivo 2023/2024, no mês de dezembro, abrangendo sete dias da semana, durante duas semanas (de 6 de dezembro a 12 de dezembro).

As concentrações do cloro residual livre com purga, obtidos experimentalmente, foram utilizadas para calibrar o modelo da qualidade da água do programa EPANET 2.2.

### **3.5. Calibração do modelo**

#### *3.5.1. Nota introdutória*

Primeiramente, foi necessário proceder à calibração hidráulica da rede de distribuição de água. Para isso, foram realizados cálculos dos parâmetros hidráulicos, nomeadamente, caudal nas tubagens, pressão nos nós e velocidade nas tubagens. Com a calibração hidráulica concluída, os resultados do cloro residual livre, obtidos experimentalmente, foram então utilizados para calibrar o modelo de qualidade da água no programa EPANET 2.2

Os valores estimados de caudal, pressão, velocidade e os valores do cloro residual livre observados, foram introduzidos em ficheiros texto, com extensão *.dat*, onde cada linha do arquivo contém os seguintes itens (Figura 3.9):

- **ID do Local:** Local onde a medição foi realizada/estimada;
- **Hora:** Hora em que a medição foi feita;
- **Valor:** Resultado da medição (Rossman, 2000).

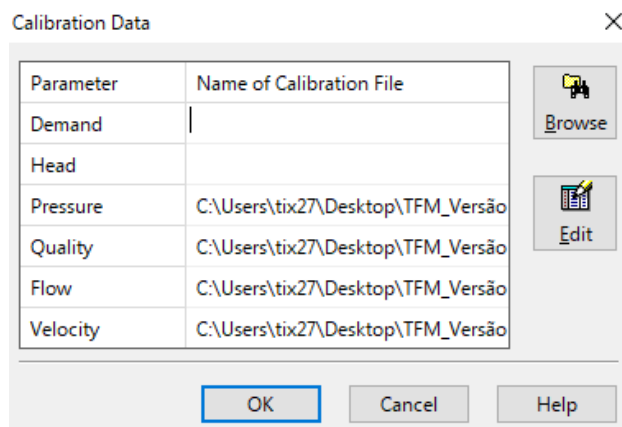
```

Ponto1 42.41 0.65
Ponto1 163.74 0.60
Ponto1 184.90 0.43
Ponto1 307.48 0.58
Ponto1 331.23 0.65
Ponto1 353.81 0.14
Ponto4 18.83 0.62
Ponto4 42.58 0.61
Ponto4 163.91 0.64
Ponto4 185.08 0.60
Ponto4 307.58 0.64
Ponto4 331.33 0.63
Ponto4 353.91 0.68
Ponto_Entrada_ISEL      332.41 0.66

```

**Figura 3.9.** Exemplo de ficheiro texto utilizado no EPANET.

Os ficheiros textos foram carregados no EPANET 2.2 para calibração do modelo hidráulico e da qualidade da água (Figura 3.10).



**Figura 3.10.** Introdução dos ficheiros texto dos parâmetros hidráulicos e da qualidade da água no EPANET.

Para realizar a calibração dos modelos, foi feita uma simulação. Posteriormente, foi extraído um relatório de calibração com métricas e gráficos, onde foi possível comparar os valores estimados ou medidos em campo com os valores simulados (Rossman, 2000).

Através da análise do relatório de calibração, foram utilizados os seguintes critérios estatísticos para determinar se os modelos se encontravam bem calibrados:

- **Erro médio:** Diferença média entre os valores simulados e os valores estimados ou medidos deve ser baixa;

- **Correlação positiva:** Forte correlação positiva entre os resultados simulados e os dados estimados ou medidos, indicando que ambos se movem na mesma direção;
- **Coeficiente de correlação:** Coeficiente de correlação próximo de 1 sugere que o modelo está a representar corretamente as tendências dos dados reais.

Nas próximas secções são explicadas as metodologias utilizadas para estimar os parâmetros necessários à calibração do modelo hidráulico e da qualidade da água.

### *3.5.2. Calibração do modelo hidráulico*

#### **Determinação do caudal nas tubagens**

A calibração do modelo hidráulico do EPANET 2.2, do presente estudo, foi realizada em relação ao caudal em cada troço, sendo este dos parâmetros que melhor representa o comportamento hidráulico.

O caudal em cada troço foi determinado por via analítica através da determinação dos caudais de cálculo para cada tubagem. Para a determinação dos caudais de cálculo do respetivo sistema de distribuição de água predial, foi necessário, previamente, determinar o caudal em cada nó.

Os caudais dos nós localizados na extremidade da rede predial (torneiras, urinóis e sanitas) foram determinados de duas maneiras:

1. Medição em campo, isto é, os caudais dos nós referentes às torneiras dos lavatórios das instalações sanitárias foram determinados experimentalmente, através da Expressão 3.2.
2. Atribuição de um valor teórico, ou seja, os caudais mínimos dos restantes dispositivos (urinóis e sanitas) foram determinados através de um valor teórico apresentado no anexo IV a que se refere o artigo 90.º do Decreto Regulamentar nº 23/95. Neste anexo são apresentados os valores mínimos dos caudais instantâneos a considerar nos dispositivos de utilização dos sistemas prediais de abastecimento de água.

Foi atribuído um valor de caudal igual a zero aos nós intermédios e a montante.

Após a determinação dos caudais dos nós (a jusante, intermédios e a montante), foram determinados os caudais acumulados de cada tubagem, isto é, a soma de todo o volume de água que foi entregue ao(s) nó(s) a jusante de cada tubagem.

A partir do caudal acumulado foram determinados os caudais de cálculo de cada tubagem pelas Expressões 3.3 a 3.6.

$$Q_a \leq 0,3 \frac{l}{s} : Q_c = Q_a \quad (3.3)$$

$$3,5 \geq Q_a > 0,3 \frac{l}{s} : Q_c = 0,547 Q_a^{0,514} \quad (3.4)$$

$$25 \geq Q_a > 3,5 \frac{l}{s} : Q_c = 0,523 Q_a^{0,536} \quad (3.5)$$

$$500 \geq Q_a > 25 \frac{l}{s} : Q_c = 0,253 Q_a^{0,759} \quad (3.6)$$

Onde:

$Q_a$  – caudal de água acumulado, em L/s;

$Q_c$  – caudal de água de cálculo, em L/s.

A determinação do caudal de cálculo permite representar os valores de caudais de cada troço.

### **Determinação da pressão nos nós**

Previamente, ao cálculo da pressão em cada nó, foi determinada a perda de carga hidráulica nas tubagens.

A perda de carga hidráulica nas tubagens, pode ser estimado usando as seguintes fórmulas (Tabela 3.3):

- Fórmula de Hazen-Williams;
- Fórmula de Darcy-Weisbach;
- Fórmula de Chezy-Manning.

**Tabela 3.3.** Equações para o cálculo da perda de carga contínua em escoamentos em pressão, em sistema internacional (Adaptado de Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

Equações de perda de carga contínua	Expressão (m)	Expoente do caudal (B)
<b>Hazen-Williams</b>	$\Delta H = 10,674 \left(\frac{Q}{C}\right)^{1,852} D^{-4,871} L$	1,852
<b>Darcy-Weisbach</b>	$\Delta H = 0,0827 f Q^2 D^{-5} L$	2
<b>Chezy-Manning</b>	$\Delta H = 10,294 n Q^2 D^{-5,33} L$	2

Onde:

$\Delta H$  – Perda de carga contínua, em m;

C - coeficiente da fórmula de Hazen-Williams;

$\epsilon$  - rugosidade absoluta (ou rugosidade de Darcy-Weisbach), em mm;

f - fator de Darcy-Weisbach (depende de  $\epsilon$ , d e q);

n - coeficiente de rugosidade de Manning;

D - diâmetro da tubagem, em m;

L - comprimento da tubagem, em m;

Q - caudal, em m<sup>3</sup>/s.

A fórmula de Hazen-Williams foi desenvolvida apenas para o escoamento turbulento de água, não sendo aplicável a outros fluídos. Esta fórmula é uma das mais utilizadas para o cálculo da perda de carga. Já a fórmula de Darcy-Weisbach é aplicável a todos os regimes de escoamento e todos os líquidos. A fórmula de Chezy-Manning é utilizada, frequentemente, em escoamentos em superfície livre (sem confinamento total, por exemplo rios e canais abertos) (Rossman, 2000).

Uma vez que a fórmula de Hazen-Williams é uma das mais utilizadas para determinar o termo de perda de carga, para o presente estudo, recorreu-se ao uso da referida fórmula. Consequentemente, foi adotado o respetivo coeficiente de rugosidade da fórmula de Hazen-Williams.

A escolha do valor do coeficiente de rugosidade foi realizada em função do material das tubagens. Os valores típicos do coeficiente C para diferentes materiais de tubos são apresentados na Tabela 3.4.

**Tabela 3.4.** Coeficientes de rugosidade para condutas de abastecimento de água (Adaptado de Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

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

A pressão foi determinada pela diferença entre a altura piezométrica do nó a jusante e a altura do terreno do nó jusante. Por sua vez, a altura piezométrica do nó jusante é determinada pela diferença entre a altura piezométrica a montante do nó e perda de carga da tubagem.

A pressão no nó a jusante foi determinada pela diferença entre a altura piezométrica do nó a jusante ( $H_j$ ) e a altura do terreno do nó a jusante ( $Z_j$ ), através da Expressão 3.7.

$$P_j = H_j - Z_j \quad (3.7)$$

Onde:

$P_j$  – pressão do nó a jusante, em m.c.a;

$H_j$  – altura piezométrica do nó a jusante, em m;

$Z_j$  – altura do terreno do nó a jusante, em m.

A altura piezométrica no nó a jusante é determinada pela diferença entre a altura piezométrica a montante do nó ( $H_m$ ) e a perda de carga na tubagem ( $h_L$ ), através da Expressão 3.8.

$$H_j = H_m - h_L \quad (3.8)$$

Onde:

$H_m$  – altura piezométrica do nó a montante, em m;

$h_L$  – perda de carga, em m.

Combinando as Expressões 3.7 e 3.8, a pressão no nó a jusante é expressa em função da altura piezométrica a montante e da perda de carga na tubagem, tal como apresentado na Expressão 3.9.

$$P_j = (H_m - h_L) - Z_j \quad (3.9)$$

Quando o valor calculado fosse superior ao valor máximo de pressão ou fosse inferior ao valor de pressão mínima estabelecido pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, esse valor legalmente definido era aplicado, respetivamente.

Segundo o Decreto Regulamentar n.º 23/95, a pressão máxima não deve ultrapassar os 61,28 m.c.a medido ao nível do solo, e a pressão mínima a garantir num prédio com dois pisos é de 18,36 m.c.a. É recomendável a pressão de serviço dos dispositivos de utilização situar-se entre 15,30 e 30,60 m.c.a.

### **Determinação da velocidade nas tubagens**

Para além do caudal e da perda de carga, é importante considerar a velocidade de água no interior das tubagens como um dos elementos no dimensionamento hidráulico de uma rede predial de água.

A velocidade é calculada através da Expressão 3.10.

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.10)$$

Onde:

$v$  - velocidade, em m/s;

$Q$  - caudal, em m<sup>3</sup>/s;

$A$  – área da secção da tubagem transversal ao escoamento, em m<sup>2</sup>.

Tal como na pressão, a velocidade estimada foi ajustada aos valores de velocidade mínima e máxima para a rede predial definidos pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, onde as velocidades se devem situar entre 0,5 e 2,0 m/s.

### 3.5.3. Calibração do modelo da qualidade da água

#### **Determinação do tempo de percurso**

A calibração do modelo de qualidade da água foi realizada através da verificação do tempo de percurso ou idade da água nos diferentes pontos de amostragem, com recurso ao EPANET 2.2.

A simulação ocorreu por um período que permitisse a estabilização da rede de distribuição de água, aproximadamente, 240 h.

#### **Determinação das constantes cinéticas do decaimento de cloro**

Os modelos de simulação de decaimento de cloro residual livre do EPANET 2.2, consideram reações de cloro no seio da água e reações de cloro com a parede das tubagens. Assim sendo, a calibração do modelo de qualidade da água incluiu a determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio da água ( $k_b$ ) e a determinação da constante cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede ( $k_w$ ).

#### Constante cinética de decaimento de cloro no seio da água

Para determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio da água, foi realizado o “teste de garrafa”, no dia 19/12/2023, descrito por Coelho, Loureiro & Alegre (2006), detalhadamente:

1. Recolher água no ponto de amostragem que represente a qualidade da água que chega ao campus, nomeadamente, na torneira junto à entrada do ISEL;
2. Recolher a amostra de água para num frasco de vidro escuro, completamente cheio e hermeticamente fechado (Figura 3.11);
3. Manter o frasco a uma temperatura constante;
4. Ao fim de intervalos de tempo pré-determinados (10 min), determinar a concentração do cloro residual, com recurso ao fotómetro portátil Checker®HC HI701 da marca HANNA Instruments;
5. Representar graficamente os valores da concentração de cloro em função dos intervalos de tempo definidos.



**Figura 3.11.** Frasco de vidro escuro.

O parâmetro  $k_b$  encontra-se ligado à natureza da água, o que, por sua vez, torna-se difícil caracterizar o comportamento real da curva de decaimento de cloro residual livre. Os modelos cinéticos de primeira ordem, devido à sua simplicidade, são os mais utilizados para determinar a constante cinética de decaimento no seio da água, através do declive da reta,  $k_b$  (Silva *et al.*, 2019).

No presente estudo, foi aplicada a Expressão 2.9, correspondente à equação de primeira ordem, a fim de determinar a constante cinética de decaimento no seio da água, através do declive da reta,  $k_b$ .

#### Constante cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede

Para determinar a constante cinética de decaimento de cloro devido ao efeito da parede introduziram-se, inicialmente no EPANET 2.2, os valores medidos de cloro residual livre das amostras de água recolhidas. A equação de primeira ordem foi aplicada tanto para as reações no seio de água como para as reações na parede das tubagens, e o valor estimado da constante  $k_b$  foi incluído. Em seguida, a constante  $k_w$  foi determinada por tentativa-erro, até que os valores simulados ficassem o mais similares possível aos valores reais de cloro observados em campo.

No estudo de Neves (2016) foi utilizado um período de simulação de longa duração, aproximadamente 18000 h, com o objetivo de garantir a estabilização do sistema e abranger o máximo de valores reais de cloro obtidos em campo para comparação com os valores simulados. De modo similar, (Silva *et al.*, 2019) realizaram também uma simulação de longa duração, de cerca de 336 h.

Em detrimento dos estudos apresentados, optou-se por determinar a constante  $k_w$  com uma simulação de longa duração, que abrangesse o máximo de valores reais de cloro obtidos em campo para comparação com os valores simulados, aproximadamente 400 h.

## 4. Caso de estudo

### 4.1. Descrição do local de estudo

O edifício C do ISEL apresenta uma área de aproximadamente 2155 m<sup>2</sup> e é constituído por 7 pisos, que vão desde o piso -2 ao piso 4. Estes pisos incluem salas de aula, laboratórios, gabinetes e um auditório/anfiteatro (Figuras 4.1 e 4.2). Este edifício escolar tem um horário de utilização das 8 h às 23 h, durante 6 dias por semana, incluindo sábados.



Figura 4.1. Edifício C do ISEL.

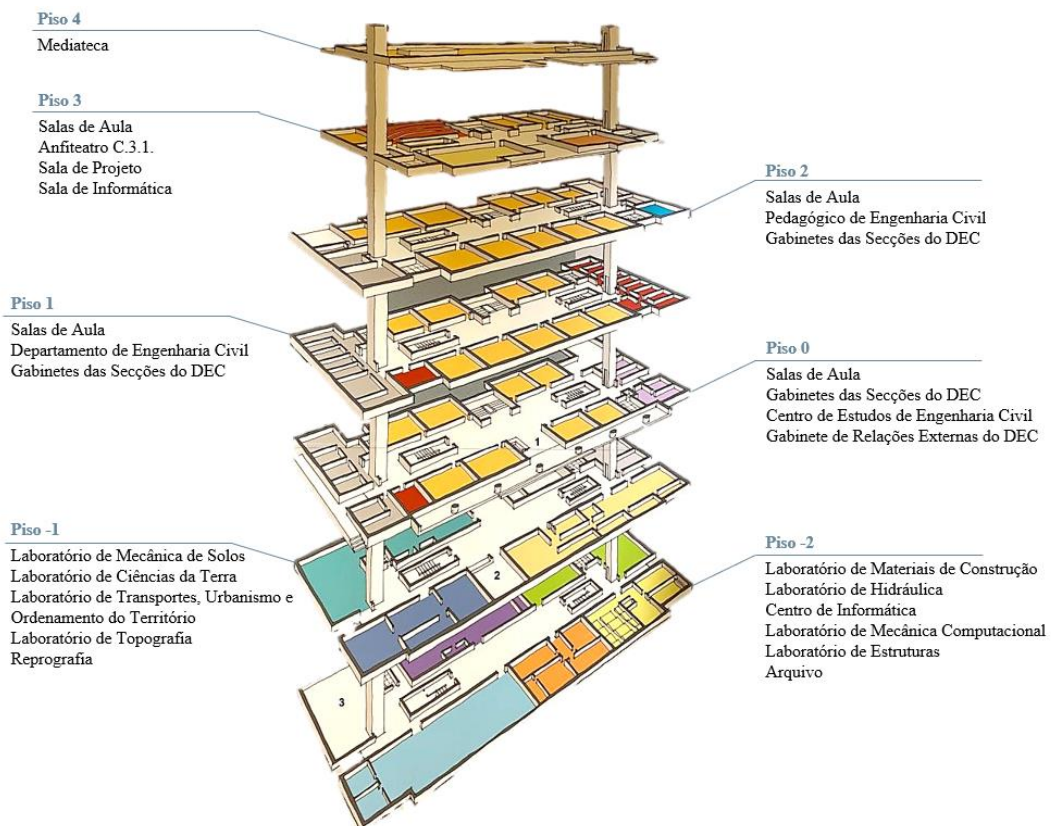
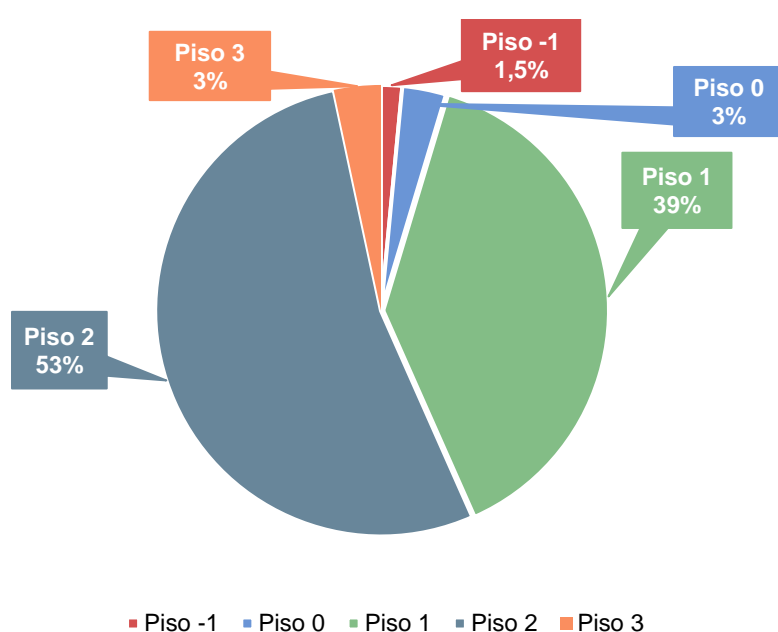


Figura 4.2. Constituição dos pisos do edifício C do ISEL.

O levantamento das horas de utilização das salas de aula no edifício C do ISEL, baseado nos horários escolares do 1º semestre de 2023/2024, permitiu identificar os pisos mais utilizados. De referir que, tanto o piso -2 como o piso 4, não foram referenciados nos horários escolares do 1º semestre dos cursos dos alunos do ISEL, apresentado uma percentagem nula de utilização das salas de aulas. No decorrer do presente estudo, verificou-se que o piso -2 encontrava-se a ser utilizado apenas para arquivo. O piso 4 encontrava-se a ser utilizado excecionalmente pelos alunos da Escola Superior de Dança. Ambos estes pisos foram descartados como possíveis pontos de recolha de amostras de água.

As percentagens de utilização de cada piso são apresentadas na Figura 4.3.



**Figura 4.3.** Distribuição semanal da utilização dos pisos do edifício C, pelos alunos do ISEL.

Com base na análise da Figura 4.3, nota-se que o piso -1 é o andar com o menor uso de salas de aula pelos alunos do ISEL, correspondendo a aproximadamente 1,5%. O piso -1 também é utilizado ocasionalmente pelos alunos da Escola Superior de Dança.

O piso 0 apresentou uma utilização de salas de aulas de apenas 3%, ocorrendo somente no período da tarde pelos alunos dos cursos de pós-graduações. No entanto, neste piso, a sala C.0.14 é utilizada para estudo académico, funcionando de segunda a sexta-feira, das 8 h às 23 h, com lotação de 32 lugares. A caracterização do piso mais utilizado baseou-se no levantamento das horas em que as salas de aula do edifício C foram ocupadas para lecionar unidades curriculares. No entanto, esta abordagem não inclui

utilizações pontuais, como as da sala de estudo. Assim, o piso 0 pode ter uma utilização real maior do que a estimada, o que constitui uma limitação neste estudo.

As salas de aula do piso 3 são usadas exclusivamente no período da tarde, apresentando uma utilização de apenas 3%. No entanto, as salas do piso 3 também são utilizadas ocasionalmente para outras atividades, como avaliações.

Os pisos 1 e 2 são utilizados majoritariamente para lecionar unidades curriculares. Além disso, estes pisos são frequentemente utilizados pelos docentes para acesso aos gabinetes.

O piso 1 apresentou uma utilização de salas de aula pelos alunos do ISEL de aproximadamente 39%. Verificou-se também que este piso é frequentado principalmente no período da tarde.

As salas de aula do piso 2 apresentaram a maior utilização, cerca de 53%. A utilização semanal das salas de aula deste piso é semelhante tanto no período da manhã como no período da tarde. O piso 2 é único piso do edifício C utilizado ao fim de semana (sábado) no período da manhã para lecionar aulas.

Pode-se concluir que o piso 2 é o andar mais frequentado, representando, desta forma, o melhor cenário para caracterizar qualidade da água consumida que chega às torneiras do edifício C.

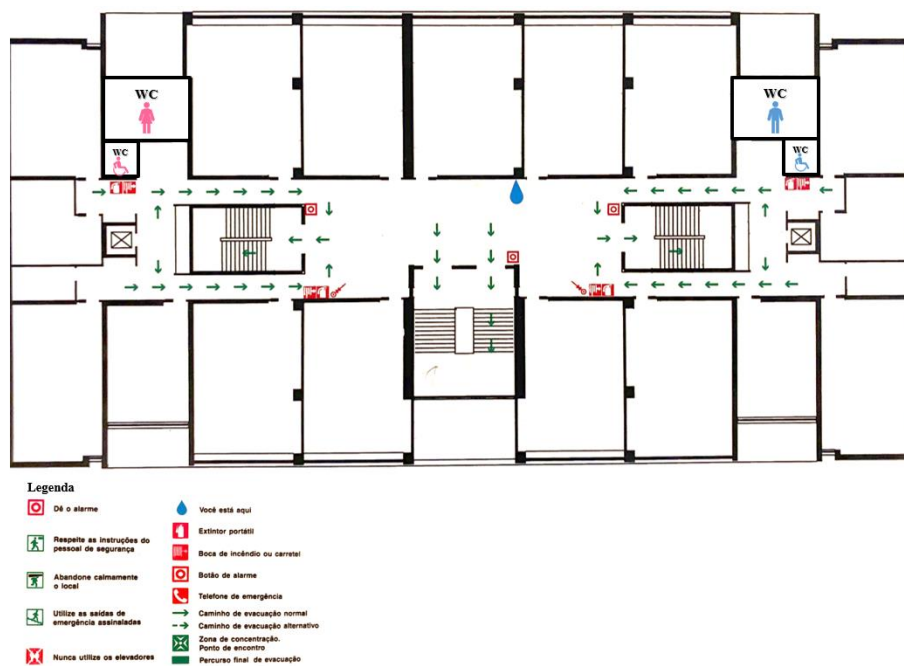
O piso 2 é constituído por 18 salas de aula, 3 gabinetes, 1 centro de estudos, 1 sala de arrumos e 4 instalações sanitárias, nomeadamente, feminina, feminina para portadores de deficiência, masculina e masculina para portadores de deficiência. É nas instalações sanitárias que os alunos e docentes têm acesso à água para consumo.

As instalações sanitárias para portadores de deficiência possuem apenas 1 lavatório e 1 sanita. Em contraste, as instalações sanitárias femininas e masculinas possuem um maior número de dispositivos de serviço (lavatórios, sanitas e urinóis), com um total de 10 e 12, respetivamente. A quantidade dos dispositivos de serviço de cada instalação sanitária do piso 2 do edifício C é caracterizada na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Caracterização das instalações sanitárias do piso 2 do edifício C.

		Número		
		Lavatórios	Sanitas	Urinóis
Instalações sanitária	Feminina	6	4	-
	Feminina para portadores de deficiência	1	1	-
	Masculina	4	3	5
	Masculina para portadores de deficiência	1	1	-

As instalações sanitárias femininas e masculinas estão localizadas em lados opostos do piso 2. A localização das instalações sanitárias do piso 2 do edifício C do ISEL são apresentadas na Figura 4.4.



**Figura 4.4.** Planta de emergência do piso 2 do edifício C do ISEL.

A água que abastece a rede de distribuição de água do ISEL é proveniente de duas ETA – a ETA da Asseiceira e a ETA de Vale da Pedra. A ETA de Asseiceira trata a água captada na Albufeira de Castelo de Bode (Figura 4.5) (EPAL, n.d.). A ETA de Vale da Pedra, por sua vez, trata a água que é captada no Rio Tejo (Figura 4.6) (EPAL, 2019). Ambas as ETA utilizam cloro gasoso como agente desinfetante no processo de desinfecção final.



**Figura 4.5.** Fotografia aérea da ETA de Asseiceira.



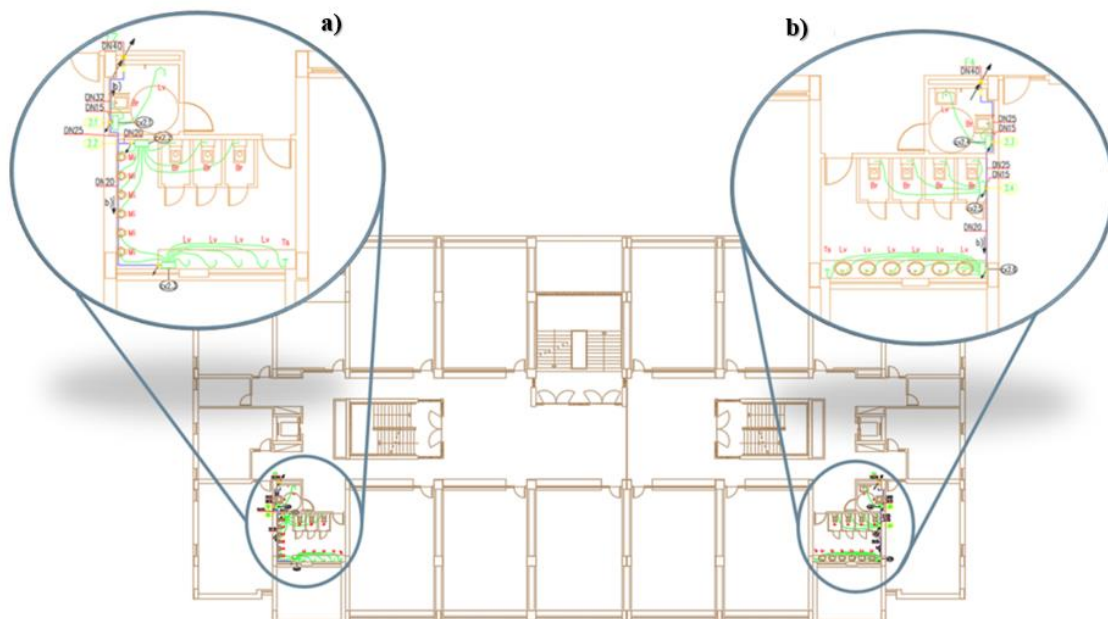
**Figura 4.6.** Fotografia aérea da ETA de Vale da Pedra.

## **4.2. Caracterização da rede de distribuição de água no EPANET**

### **4.2.1. Componentes físicos**

No presente estudo foi caracterizada a rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas do piso 2 do edifício C do ISEL.

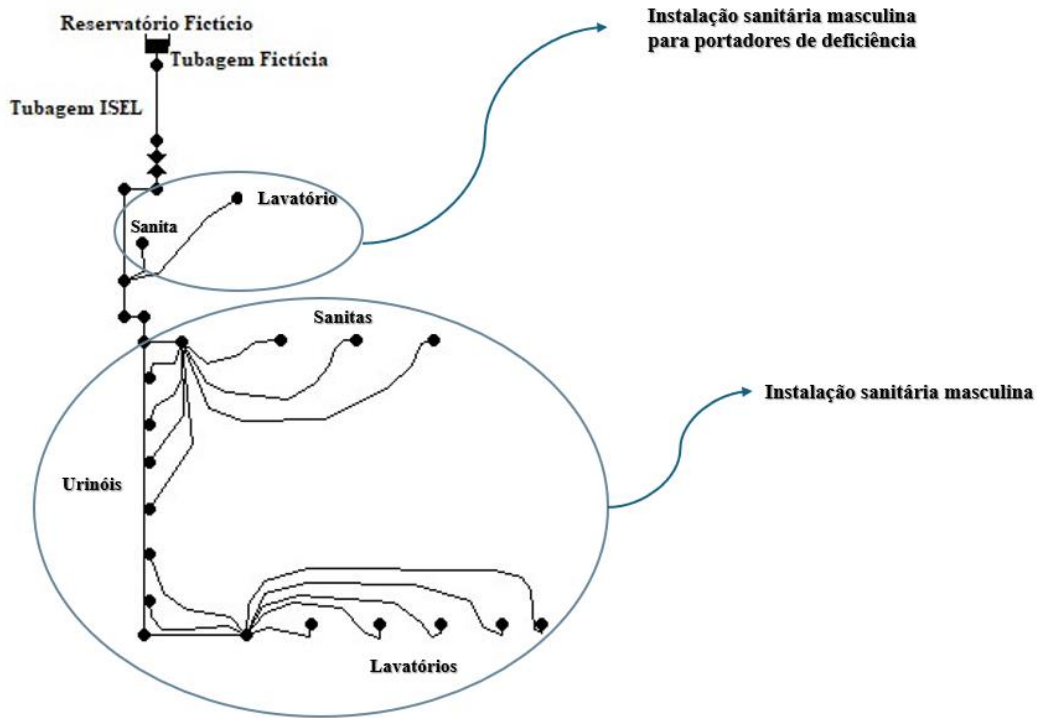
A rede de distribuição de água do piso 2 das instalações sanitárias masculinas e femininas são apresentadas apresentada na Figura 4.7.



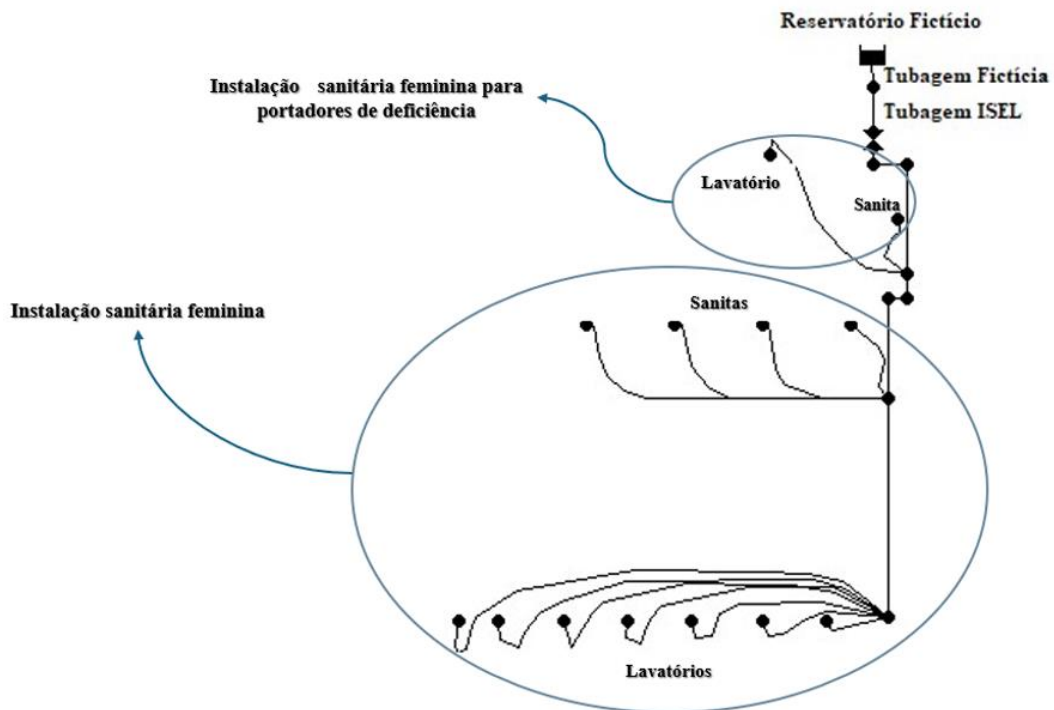
**Figura 4.7.** Planta AutoCad do piso 2 do edifício C do ISEL, com destaque da rede de distribuição de água das instalações sanitárias: a) masculinas e b) femininas.

É importante destacar que, na planta em AutoCad da rede de distribuição de água em estudo, apenas as tubagens do piso 2 estavam desenhadas. As tubagens principais do edifício C, que abastecem as tubagens das instalações sanitárias do piso 2, não foram caracterizadas no presente modelo.

A rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas do piso 2, modeladas no EPANET 2.2, são caracterizadas nas Figuras 4.8 e 4.9, especificamente.



**Figura 4.8.** Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculina do piso 2 do edifício C do ISEL, no EPANET.



**Figura 4.9.** Rede de distribuição de água das instalações sanitárias feminina do piso 2 do edifício C do ISEL, no EPANET.

A rede de distribuição de água em estudo é considerada ramificada, uma vez que a tubagem principal se divide em tubagens secundárias, distribuindo a água em uma única direção (Cambrais, 2024).

A rede de distribuição de água do piso 2, que abrange as tubagens das instalações sanitárias, possui um comprimento total de cerca de 88 m, com diâmetros variando de 12 a 40 mm. As tubagens interiores são predominantemente de PEX, um tipo de tubagem flexível feita de polietileno reticulado.

A tubagem exterior enterrada, que liga o edifício C à entrada do ISEL, é maioritariamente constituída por PEAD tipo “Politejo” ou equivalente, tendo um comprimento de aproximadamente 110 m e um diâmetro de 110 mm.

Como não foi possível obter dados confiáveis das características técnicas do reservatório de nível fixo mais próximo do ISEL, foi adicionado um reservatório fictício ao modelo em estudo. Consequentemente, também foi introduzida uma tubagem fictícia que permitisse a ligação entre o reservatório fictício e a rede de distribuição de água do ISEL.

O sumário do número de elementos da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculina e feminina, exportado do EPANET 2.2, encontra-se caracterizado na Figura 4.10.

Number of Junctions	29	Number of Junctions	23
Number of Reservoirs	1	Number of Reservoirs	1
Number of Tanks	0	Number of Tanks	0
Number of Pipes	28	Number of Pipes	22
Number of Pumps	0	Number of Pumps	0
Number of Valves	1	Number of Valves	1

a) b)

**Figura 4.10.** Número de elementos da rede de distribuição de água das instalações sanitárias do piso 2 do edifício C: a) masculina e b) feminina.

Nas tubagens foram inseridos os diâmetros internos e o coeficiente de rugosidade.

Os diâmetros internos das tubagens foram introduzidos consoante a informação contida na planta em AutoCad do piso 2 do edifício C.

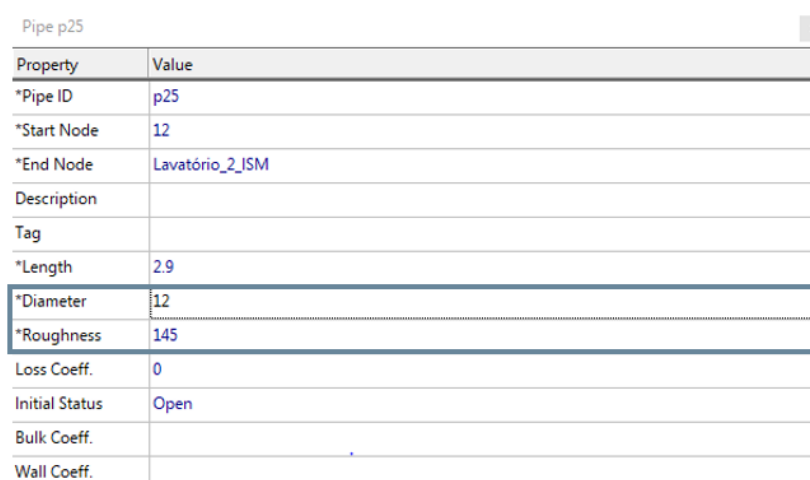
O coeficiente de rugosidade foi adotado nos termos da fórmula de Hazen-Williams, uma vez que é a fórmula mais utilizada para determinar a perda de carga. A escolha do valor do coeficiente de rugosidade foi determinada em função do material das tubagens: PEX

para as tubagens internas e PEAD tipo “Politejo” ou equivalente para a tubagem exterior enterrada. Assim, foi considerado o valor médio do intervalo da fórmula de Hazen-Williams, ou seja, coeficiente de rugosidade igual a 145 (Tabela 3.4).

À tubagem fictícia, que conecta o reservatório fictício à rede de distribuição de água do ISEL, foram atribuídos um comprimento de 10 m e um diâmetro de 110 mm.

Foi introduzido um estado “aberto” em todas as tubagens.

Um exemplo dos dados de entrada para as tubagens no EPANET 2.2 encontra-se apresentado na Figura 4.11, sendo o diâmetro (*Diameter*) expresso em mm.



Property	Value
*Pipe ID	p25
*Start Node	12
*End Node	Lavatório_2_ISM
Description	
Tag	
*Length	2.9
*Diameter	12
*Roughness	145
Loss Coeff.	0
Initial Status	Open
Bulk Coeff.	
Wall Coeff.	

**Figura 4.11.** Exemplo dos dados introduzidos no EPANET para as tubagens.

Os principais dados a inserir para os nós são as cotas acima do nível de referência (nível da água do mar), os caudais de água e o padrão de consumo de água.

A cota acima do nível do mar foi obtida através da análise da planta em AutoCad.

O caudal em cada nó foi determinado de duas maneiras: pela medição em campo dos caudais das torneiras dos lavatórios das instalações sanitárias, conforme a Expressão 3.2, ou pela atribuição de valores teóricos para os outros dispositivos (torneiras de serviço, urinóis e sanitas) com base no anexo IV do Decreto Regulamentar no 23/95. Os valores de caudais são atribuídos aos nós a jusante, enquanto nas junções intermédias o caudal é zero.

O padrão temporal de consumo de água estimado é apresentado na Secção 4.2.2. “Componentes não-físicos”.

Um exemplo dos dados de entrada do EPANET 2.2 para os nós é mostrado na Figura 4.12, onde a altura ao nível do mar (*Elevation*) é expressa em m, e onde o consumo nodal (*Base Demand*) é expresso em L/s.

Junction Ponto3	
Property	Value
*Junction ID	Ponto3
X-Coordinate	-346.100
Y-Coordinate	-33.100
Description	Lavatório da wc masculina
Tag	
*Elevation	81.27
Base Demand	0.078
Demand Pattern	2
Demand Categories	1
Emitter Coeff.	
Initial Quality	

**Figura 4.12.** Exemplo dos dados introduzidos no EPANET para os nós.

Para as válvulas foram introduzidos no EPANET 2.2, o diâmetro, o estado (aberto ou fechado) e o tipo de válvula.

Na planta em AutoCad da rede de distribuição de água, cada instalação sanitária apresenta apenas uma válvula. Porém, não foi possível identificar os tipos de válvulas utilizadas no piso 2 do edifício C. Desta forma, optou-se por caracterizá-las como válvulas redutoras de pressão. Esta escolha foi adequada para a rede ramificada em estudo, pois as válvulas redutoras de pressão limitam a pressão, evitam sobrepensões e funcionam bem em sistemas de fluxo unidirecional (Rossman, 2000).

#### 4.2.2. Componentes não-físicos

O valor de capitação de consumo médio de água foi estimado com base no consumo unitário de um edifício com características tão semelhantes quanto possível ao ISEL, pertencente também a um complexo universitário, nomeadamente, o edifício Departamental da FCT/UNL, conforme determinado no estudo de Ferreira (2009).

O edifício Departamental tem o aproximadamente o dobro da área do edifício C, e conseqüentemente, o número de alunos e número de dispositivos nas instalações sanitárias é notoriamente maior. A existência de um bar no edifício Departamental

também pode ter uma influência acrescida na utilização de água. As características do edifício C do ISEL e do edifício Departamental da FCT são apresentadas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2.** Características do edifício C do ISEL e do edifício Departamental da FCT (Ferreira, 2009).

	Edifício	
	C	Departamental
<b>Campus</b>	ISEL/IPL	FCT/UNL
<b>Localização</b>	Lisboa	Lisboa
<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	2155	4117
<b>Nº de pisos</b>	7	7
<b>Tipo de utilização</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Instalações sanitárias;</li> <li>– Laboratórios/ Gabinetes;</li> <li>– Limpeza das instalações.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Instalações sanitárias;</li> <li>– Bar;</li> <li>– Limpeza das instalações.</li> </ul>
<b>Nº de alunos</b>	390 <sup>(1)</sup>	1009
<b>Nº de docentes e não-docentes</b>	63 <sup>(2)</sup>	160
<b>Nº de dispositivos nas instalações sanitárias</b>	Torneira tradicionais: 12 Torneiras com temporizador: 50 Urinóis: 23	Torneira tradicionais: 20 Torneiras com temporizador: 127 Urinóis: 72

<sup>(1)</sup> Valor estimado através do número máximo de alunos (lugares sentados) que as salas de aula do piso 2 do edifício C podem acomodar.

<sup>(2)</sup> Considerou-se apenas 14% do número total de docentes e não-docentes do ISEL (441) devido à alocação destes indivíduos entre os 7 edifícios do ISEL.

Ferreira (2009) determinou a população média diária considerando apenas 50% dos alunos, devido à sua distribuição entre vários edifícios de ensino superior. Além disso, foram incluídos o número de professores, docentes e não-docentes de outros serviços do campus FCT/UNL. A autora Ferreira (2009) considerou, então, uma população média diária de 665 pessoas.

A população do piso 2 do edifício C foi estimada com base no número máximo de alunos que as salas de aula podem acomodar, especificamente, 390 alunos. O número de docentes e não-docentes foi estimado consoante a alocação destes indivíduos ao edifício C, detalhadamente, 63 indivíduos. O valor total de população que frequentam o piso 2 do edifício C é igual a 453 indivíduos. O levantamento do número de lugares por sala do piso 2 do ISEL é apresentado na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3.** Número de lugares por sala do piso 2 do edifício C ISEL.

Sala	Número de lugares
C.2.01	48
C.2.02	52
C.2.10	50
C.2.11	49
C.2.12	48
C.2.13	48
C.2.14	47
C.2.23	48
<b>Total</b>	<b>390</b>

Um exemplo de um horário com indicação do número de lugares de uma sala de aula do piso 2 do edifício C é mostrado na Figura 4.13.

The image shows a classroom schedule board for 'SALA C.2.14' with 47 seats. The board is titled 'ISEL' and shows a grid of time slots from 08:30 to 22:00. Each slot contains details about the course, teacher, and subject. The board is divided into columns for 'Materia', 'Docente', 'Tercer', 'Quarta', and 'Quinta'.

Horário	Materia	Docente	Tercer	Quarta	Quinta
08:30 - 09:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
09:00 - 09:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
09:30 - 10:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
10:00 - 10:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
10:30 - 11:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
11:00 - 11:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
11:30 - 12:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
12:00 - 12:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
12:30 - 13:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
13:00 - 13:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
13:30 - 14:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
14:00 - 14:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
14:30 - 15:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
15:00 - 15:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
15:30 - 16:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
16:00 - 16:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
16:30 - 17:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
17:00 - 17:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
17:30 - 18:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
18:00 - 18:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
18:30 - 19:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
19:00 - 19:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
19:30 - 20:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
20:00 - 20:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
20:30 - 21:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
21:00 - 21:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
21:30 - 22:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
22:00 - 22:30	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I
22:30 - 23:00	Química I	[Nome]	Matemática I	Matemática I	Matemática I

**Figura 4.13.** Exemplo de horário de uma sala de aula do piso 2 do edifício C.

Observa-se uma semelhança entre o número de utilizadores do edifício C do ISEL (453 utilizadores) e do edifício Departamental da FCT/UNL (665 utilizadores). Para além disso, embora existam algumas diferenças entre ambos os edifícios, é mais adequado usar o valor do consumo médio diário do edifício Departamental do que usar o valor de captação de água definido no Decreto Regulamentar nº 23/95 que não caracteriza o consumo de água para instalações de ensino superior. Os consumos do edifício departamental estimados no estudo de Ferreira (2009) são caracterizados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4.** Caracterização dos consumos do edifício departamental da FCT/UNL (Ferreira, 2009).

Edifício	Consumo médio anual (m <sup>3</sup> /ano)	Consumo médio mensal (m <sup>3</sup> /mês)	Consumo médio diário (m <sup>3</sup> /d)	Consumo médio diário por utilizador (m <sup>3</sup> /(utilizador.d))	Consumo médio diário por área (m <sup>3</sup> /(m <sup>2</sup> .d))
Departamental (FCT/UNL)	16200	1350	45	0,07 <sup>(1)</sup>	0,002

<sup>(1)</sup> Ferreira (2009) determinou a população média diária, considerando apenas 50% dos alunos devido à sua alocação a vários edifícios. O número de professores, docentes e não-docentes de outros serviços do campus FCT/UNL foram incluídos. A população média diária do edifício foi estimada considerando 665 pessoas.

Desta forma, no presente estudo, assumiu-se um valor consumo médio diário por utilizador de 70 L/(utilizador.d), ou seja, 0,07 m<sup>3</sup>/(utilizador.d).

### 4.3. Ensaios de campo dos parâmetros da qualidade da água

Para a colheita dos parâmetros da qualidade da água, nomeadamente, cloro residual livre, pH e temperatura, foram selecionados quatro pontos de amostragem com base no critério de utilização (ver secção 3.4.2).

Para representar o baixo consumo de água da rede de distribuição do piso 2 (pontos de amostragem 1 e 2), foram selecionadas as torneiras das instalações sanitárias destinadas a portadores de deficiência. A escolha baseou-se na premissa de que há, teoricamente, um menor número de alunos portadores de deficiência, o que resulta em uma menor taxa de utilização destas instalações. Além disso, durante o período de colheita de amostras de água, não foi observada nenhuma utilização das instalações sanitárias de portadores de deficiência, reforçando a ideia de que estes pontos de amostragem representam efetivamente locais de baixo consumo de água.

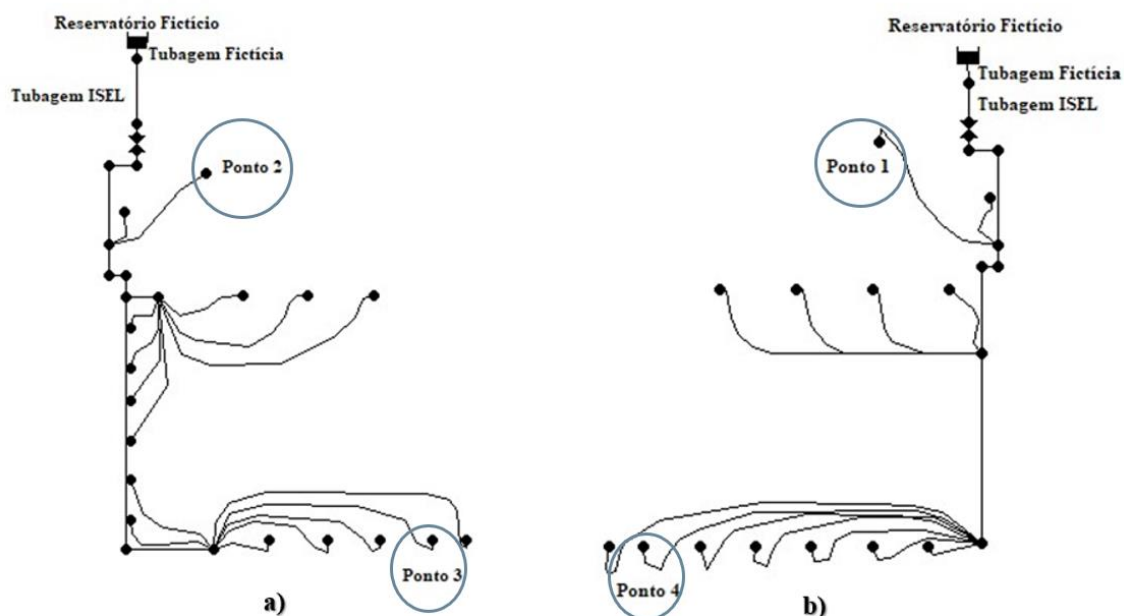
Já para os pontos de maior utilização (pontos de amostragem 3 e 4), foram escolhidas as torneiras localizadas próximas à entrada das instalações sanitárias e próximas aos dispensadores de sabonete líquido. A escolha destes pontos deve-se ao facto de serem áreas de maior movimento e acessibilidade, onde se espera uma frequência elevada de uso por parte dos alunos, docentes e não-docentes. A localização próxima aos dispensadores de sabonete líquido também indica que estas torneiras são utilizadas com frequência para a lavagem das mãos. Além disso, durante a colheita de amostras de água, foi verificada a utilização constante destas instalações sanitárias, confirmando que estes pontos de amostragem representam locais de maior consumo de água no piso 2.

Os pontos de amostragem selecionados e sua caracterização conforme o critério de utilização são mostrados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5.** Designação dos pontos de amostragem e critério de utilização.

Ponto de amostragem	Designação	Critério de utilização
1	Torneira da instalação sanitária de portadores de deficiência feminina	Menor
2	Torneira da instalação sanitária de portadores de deficiência masculina	Menor
3	Torneira da instalação sanitária masculina	Maior
4	Torneira da instalação sanitária feminina	Maior

A localização dos pontos de amostragem da rede de distribuição de água das instalações sanitárias no EPANET 2.2 é apresentada na Figura 4.14.



**Figura 4.14.** Localização dos pontos de amostragem na rede de distribuição de água das instalações sanitárias: a) masculina e b) feminina.

A medição de cloro residual livre, sem purga e com purga de 2,5 min (exemplo de colheita de amostras apresentada na Figura 4.15), foi realizada durante o mês de dezembro, abrangendo vários dias da semana, entre as 17 h e as 20 h. Foram realizadas 56 colheitas de amostras de água. Os resultados obtidos durante a amostragem de cloro residual livre, pH e temperatura encontram-se apresentados no Anexo VI. Estes resultados serão discutidos na Secção 5.2. “Cloro residual livre observado”.

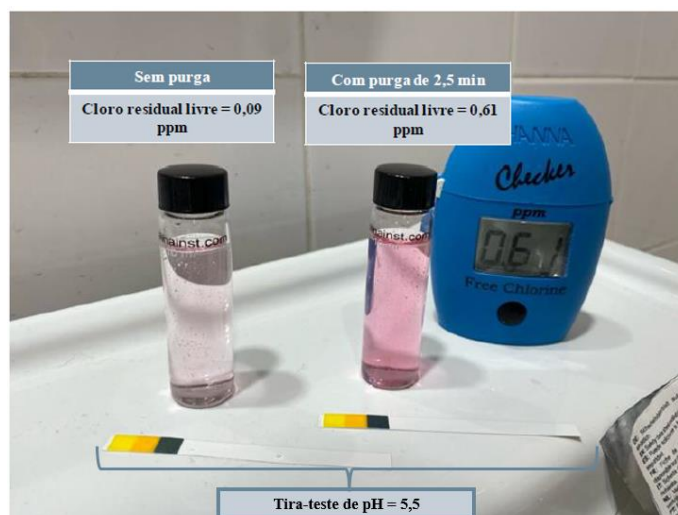


Figura 4.15. Exemplo de colheita de amostra de água.

#### 4.4. Parâmetros para calibração do modelo hidráulico

##### 4.4.1. Caudal de água nas tubagens

No presente estudo, iniciou-se a calibração do modelo hidráulico pelos caudais de água nas tubagens.

De seguida, é descrita a presente metodologia utilizada para explicar o método de cálculo dos caudais dos troços, considerando, como exemplo simplifcativo, parte da rede de distribuição de água da instalação sanitária masculina, conforme mostra a Figura 4.16.

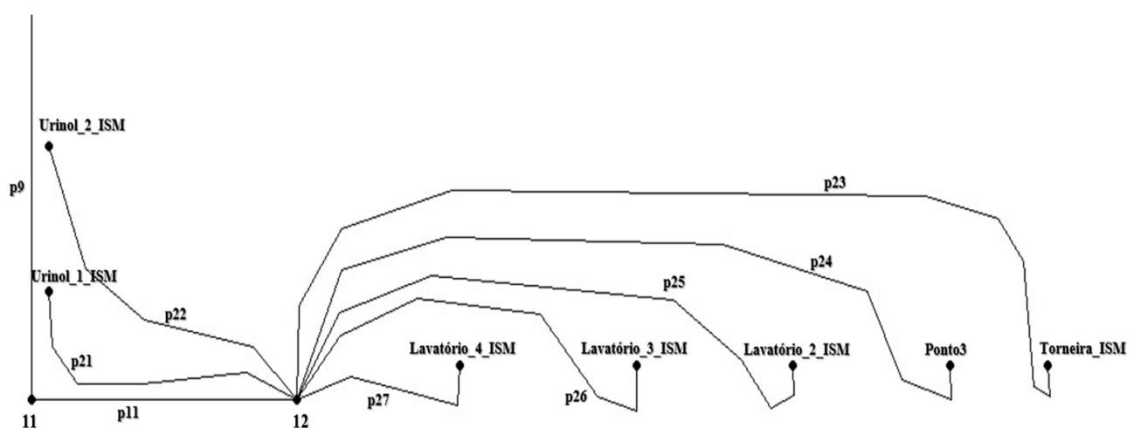


Figura 4.16. Exemplo de esquema da rede de distribuição de água da instalação sanitária masculina.

Primeiramente, foram atribuídos valores de caudais instantâneos aos nós que se encontram a jusante, que na Figura 4.16 correspondem aos seguintes nós: Torneira\_ISM, Ponto 3, Lavatório\_2\_ISM, Lavatório\_3\_ISM, Lavatório\_4\_ISM,

Urinol\_2\_ISM, Urinol\_1\_ISM. Aos restantes nós intermédios, a título de exemplo, 12 e 11, foram atribuídos um valor de consumo nulo.

De seguida, foram determinados os caudais acumulados em cada tubagem. Para a determinação deste valor, é necessário iniciar pelo nó mais a jusante, que neste exemplo, correspondeu ao nó Torneira\_ISM. Apresentando este nó um consumo igual a 0,1000 L/s, assume-se que, a tubagem imediatamente a montante do nó, nomeadamente o tubo p23, apresenta um igual valor de consumo. Aplicou-se a mesma lógica para os restantes nós a jusante.

Os caudais acumulados nas tubagens a montante dos nós, que se encontram na extremidade da rede de distribuição de água, foram determinados através da soma do caudal de todos os dispositivos de utilização alimentados através dessa secção. A título de exemplo, o nó 12 apresenta um consumo é igual a 0 L/s e o caudal acumulado na tubagem p11 apresenta um valor igual a 0,6078 L/s.

Por fim, a partir dos caudais acumulados foram determinados os caudais de cálculo de cada tubagem, através das Expressões 3.3 a 3.6.

Os caudais instantâneos em cada nó e caudais em cada tubagem de um troço da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas, exemplificados anteriormente, são apresentados na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6.** Exemplo de caudais estimados em cada nó e tubagem.

Nó		Tubagem		
Nó	Caudal instantâneo (L/s)	Tubo	Caudal acumulado (L/s)	Caudal de cálculo (L/s)
Torneira_ISM	0,1000	p23	0,1000	0,1000
Ponto 3	0,0780	p24	0,0780	0,0780
Lavatório_2_ISM	0,0649	p25	0,0649	0,0649
Lavatório_3_ISM	0,0523	p26	0,0523	0,0523
Lavatório_4_ISM	0,1126	p27	0,1126	0,1126
Urinol_1_ISM	0,1000	p21	0,1000	0,1000
Urinol_2_ISM	0,1000	p22	0,1000	0,1000
12	0,0000	p11	0,6078	0,4235
11	0,0000	p9	0,6078	0,4235

No Anexo VII são apresentados os caudais instantâneos em cada nó e caudais estimados em cada tubagem de um troço do sistema de distribuição de água, das instalações sanitárias masculinas e femininas. De seguida, foram criados ficheiros texto, com os valores dos caudais nos troços estimados e carregados no EPANET 2.2, de forma a calibrar o modelo hidráulico.

Uma vez que, no presente estudo, não foi possível obter dados do padrão consumo devido ao processo de reabilitação da rede em curso, foi definida uma hora que representasse o caudal calculado nas tubagens. Uma vez que a determinação dos caudais nas tubagens teve por base os caudais mínimos dos dispositivos de utilização definidos pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, optou-se por definir como instante, para comparação dos valores calculados e simulados, uma hora que representasse um menor consumo. Esta escolha é justificável, pois um menor padrão de consumo está diretamente associado a um caudal reduzido ao longo da rede de distribuição. Foi testado o instante de calibração correspondente às 15 h.

#### *4.4.2. Pressão nos nós*

No presente estudo, em virtude da indisponibilidade de equipamentos necessários para medições diretas, optou-se por determinar a pressão com base no cálculo da perda de carga contínua ao longo da rede de distribuição de água.

Contudo, devido à impossibilidade de obter dados confiáveis sobre o nível de água do reservatório de nível fixo mais próximo ao ISEL, foram testados dois cenários com diferentes alturas piezométricas, com o objetivo de obter uma maior aproximação entre os valores estimados da pressão e os valores simulados, nomeadamente:

- **Cenário A1** – Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 110 m;
- **Cenário A2** – Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 120 m.

No Anexo VII são apresentadas as perdas de carga calculadas em cada tubagem e as pressões estimadas em cada nó do sistema de distribuição das instalações sanitárias masculinas e femininas.

Foi criado um ficheiro texto com as pressões estimadas e carregado para o EPANET 2.2 para calibração do modelo hidráulico.

Como a determinação da pressão depende do caudal calculado, a calibração da pressão nos nós foi feita no instante em que houve a maior semelhança entre os valores dos caudais estimados e simulados, com uma correlação positiva (15 h).

#### *4.4.3. Velocidade nas tubagens*

A calibração da velocidade também foi realizada para o instante com maior semelhança entre os valores dos caudais estimados e simulados e com uma correlação próxima de 1, uma vez que para o seu cálculo, conforme a Expressão 3.10, foi utilizado o caudal de calculo representativo desse mesmo instante (15 h).

No Anexo VII são apresentadas as velocidades calculadas das tubagens do sistema de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas. Tal como nos parâmetros enunciados anteriormente, foi carregado para o EPANET 2.2, os valores de velocidade calculados para calibração hidráulica.

Após a calibração do modelo hidráulico, seguiu-se para a calibração do modelo da qualidade da água.

### **4.5. Parâmetros para calibração do modelo da qualidade da água**

#### *4.5.1. Tempo de percurso*

A simulação do tempo de percurso ou idade da água foi executado no EPANET 2.2, atribuindo a designação *Age* (Idade), nas opções de qualidade do programa. A simulação foi corrida por um tempo longo que permitiu a estabilização da rede de distribuição de água, nomeadamente, 240 h.

Durante as simulações, observou-se que os consumos nodais previamente definidos poderiam estar a influenciar incorretamente a diferença da idade da água entre pontos com diferentes frequências de utilização de água. Esta influência é decorrente do facto de que o consumo previamente definido, tanto para as torneiras de maior consumo como de menor consumo, era similar, aproximadamente 0,100 L/s.

Desta forma, para uma análise mais precisa das variações dos tempos de percurso da água, foi crucial ajustar os consumos nodais de forma que reflitam mais fielmente as condições reais de utilização. Foram testados os seguintes cenários de calibração:

- **Cenário B1** – Consumos nodais teóricos definidos;
- **Cenário B2** – Ajuste dos consumos nos pontos de amostragem 1 e 2 devido ao uso esporádico das torneiras nas instalações sanitárias para portadores de

deficiência. Para refletir a baixa utilização, o consumo foi ajustado para um valor residual de 0,0001 L/s.

#### 4.5.2. Constantes de cinética de decaimento de cloro

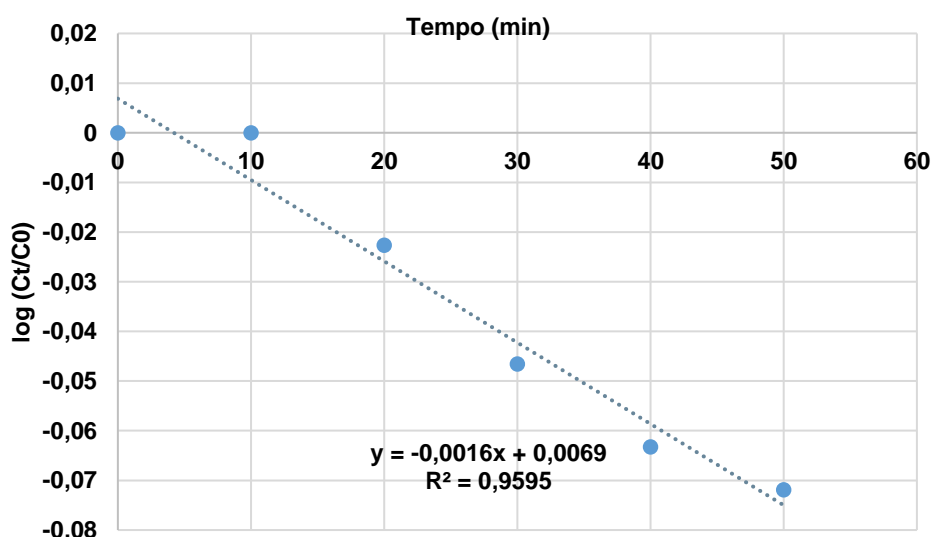
##### No seio da água, $k_b$

A recolha de água foi realizada na torneira junto à entrada do ISEL de forma que representasse a água que chega ao campus. As medições da concentração de cloro residual livre foram realizadas com intervalos de tempo de 10 min. Os valores de cloro residual livre e os valores para a determinação da constante cinética  $k_b$  são apresentados na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7.** Cloro residual livre e valores experimentais usados na determinação da constante  $k_b$ .

Tempo (min)	Cloro residual livre (mg/L $Cl_2$ )	$\log (C_t/C_0)$	$k_b$
0	0,59	0,00	-0,0016/min = -2,304/d
10	0,59	0,00	
20	0,56	-0,02	
30	0,53	-0,05	
40	0,51	-0,06	
50	0,50	-0,07	

O valor de  $k_b$  foi estimado a partir do declive da reta da representação gráfica dos valores  $\log (C_t / C_0)$  em função do tempo (Figura 4.17),  $k_b = -0,0016/\text{min} = -2,304/\text{d}$ . Este valor da constante cinética  $k_b$  foi introduzido nas opções de reações do EPANET.

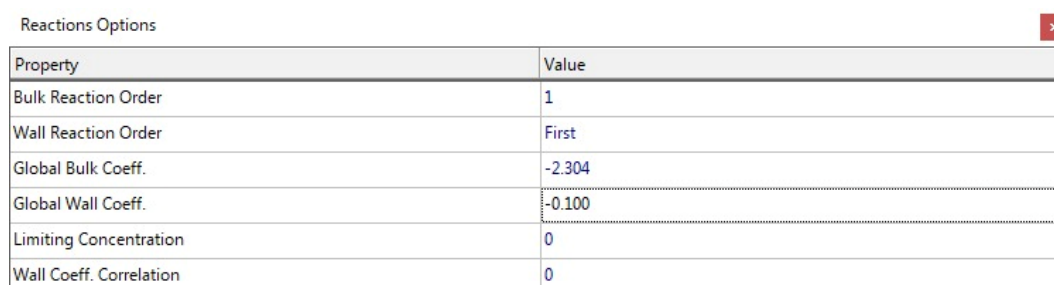


**Figura 4.17.** Representação gráfica dos valores  $\log (C_t / C_0)$  em função do tempo.

## Devido ao efeito da parede, $k_w$

A constante cinética  $k_w$  foi definida por meio de método de tentativa-erro. Este processo envolveu ajustar o valor da constante cinética  $k_w$  para minimizar a diferença entre os valores medidos em campo e os valores simulados no EPANET 2.2. Foram testados três valores da constante  $k_w$ , especificamente -0,010, -0,100 e -0,150 m/d.

A introdução do valor estimado da  $k_b$  ( $k_b = -2,304/d$ ) e do valor testado da  $k_w$  ( $k_w = -0,010$ ) no EPANET 2.2, encontram-se apresentados na Figura 4.18, como exemplo de opções de reações.



Property	Value
Bulk Reaction Order	1
Wall Reaction Order	First
Global Bulk Coeff.	-2.304
Global Wall Coeff.	-0.100
Limiting Concentration	0
Wall Coeff. Correlation	0

**Figura 4.18.** Introdução dos valores de  $k_b$  e  $k_w$  no EPANET.

Foi definido um período de simulação de 400 h por forma a abranger o máximo de valores de cloro residual livre reais medidos em campo e, conseqüentemente, permitir a sua comparação com os valores simulados.

### 4.5.3. Cloro residual livre

Após a introdução dos valores de cloro residual livre medidos em campo e das constantes cinéticas estimadas no EPANET 2.2, foi gerado um relatório de calibração.

Assim como ocorre com a idade da água, os consumos nodais também influenciam as concentrações de cloro residual livre. Por esta razão, estes consumos dos pontos de amostragem 1 e 2 foram ajustados para um valor residual de 0,0001 L/s, que caracteriza o uso esporádico das torneiras das instalações sanitárias destinadas a portadores de deficiência.

Uma vez que se considerou a distância entre o reservatório e a entrada do ISEL insignificantes em termos de variação das concentrações de cloro residual livre, estabeleceu-se um valor de cloro residual livre correspondente ao valor medido no dia 19/12/2023, na entrada do ISEL, nomeadamente, 0,66 mg/L, para ser utilizado como parâmetro na definição da qualidade inicial do reservatório hipotético. Para além deste

cenário base, foram testados outros cenários de forma ajustar as concentrações de cloro residual livre simuladas às concentrações estabelecidas pela legislação em vigor (entre 0,20 e 0,60 mg/L de cloro residual livre):

- **Cenário C1** – 0,60 mg/L de cloro residual livre, correspondente ao valor máximo recomendado na torneira do consumidor;
- **Cenário C2** – 0,30 mg/L de cloro residual livre, correspondente a metade do valor máximo recomendado na torneira do consumidor.

Para ilustrar o funcionamento da rede de distribuição de água em situações extremas, as variáveis em estudo (caudal nas tubagens, pressão nos nós, velocidade nas tubagens e cloro residual livre) foram simuladas para uma hora de maior consumo (12 h) e de menor consumo (15 h).

Uma breve descrição dos cenários testados no presente estudo é apresentada na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8.** Descrição dos cenários testados.

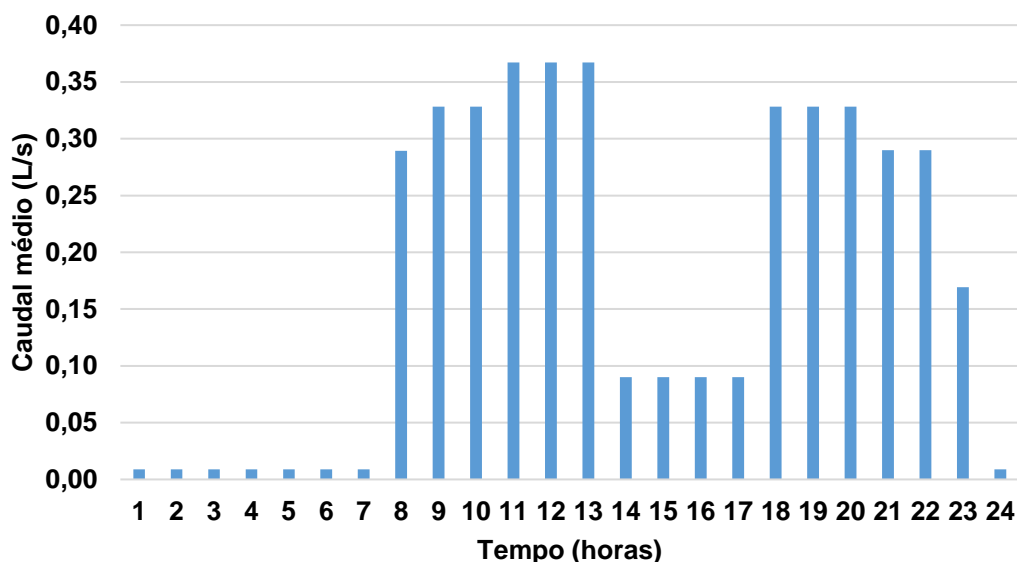
Cenários	Descrição	Modelo calibrado	Parâmetro
A1	Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 110 m	Hidráulico	Pressão
A2	Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 120 m		
B1	Consumos nodais teóricos definidos previamente	Qualidade da água	Tempo de percurso
B2	Ajuste dos consumos nos pontos de amostragem de menor consumo, de forma a refletir a baixa utilização		
C1	Concentração de cloro residual livre no reservatório fictício igual a 0,60 mg/L		Cloro residual livre
C2	Concentração de cloro residual livre no reservatório fictício igual a 0,30 mg/L		

## 5. Apresentação e discussão de resultados

### 5.1. Padrão de consumo temporal

Com base na análise dos horários escolares do piso 2 do edifício C e considerando uma relação de proporcionalidade direta entre a utilização do espaço e o consumo de água, verificou-se que os períodos de maior consumo de água concentram-se durante a manhã, das 8h às 13h, e no período noturno, das 18h às 22h. Estes picos de consumo podem ser justificados devido à maior concentração de aulas lecionadas nestes horários.

O padrão de consumo de água ao longo de 24 h do piso 2 do edifício C é caracterizado na Figura 5.1.



**Figura 5.1.** Consumo médio ao longo de 24 h do piso 2 do edifício C.

Os fatores multiplicativos são usados para ajustar os valores dos consumos médios de água. Por exemplo, um fator multiplicativo de 2, multiplica o caudal de água, enquanto um fator de 0,5 reduz o caudal para metade. O valor padrão do fator multiplicativo é 1,0. Os fatores multiplicativos do presente estudo em cada instante de tempo são apresentados na Tabela 5.1.

**Tabela 5.1.** Valores de consumos médios de água ajustados em cada instante de tempo.

<b>Hora</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
<b>Fator Multiplicativo</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	1,6	1,9	1,9	2,1	2,1
<b>Hora</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>
<b>Fator Multiplicativo</b>	2,1	0,5	0,5	0,5	0,5	1,9	1,9	1,9	1,7	1,7	1,0	0,1

**Nota:** Apesar do horário de funcionamento do edifício C em estudo ser das 8 h às 23 h, poderá existir fugas de águas. Desta forma, as mesmas foram caracterizadas com um fator multiplicativo de 0,1, o que corresponde a 10% do consumo médio mínimo ao longo de um dia.

O estudo teve como limitação a dificuldade em obter medições precisas do consumo de água e do seu respetivo padrão, devido ao processo de reabilitação da rede em curso e à existência de um único contador. Esta limitação exigiu o uso de estimativas, que podem não refletir com precisão a realidade do consumo da rede em estudo.

Pinto (2010) identificou como uma das limitações do seu estudo a ausência de medições de caudal em pontos específicos da rede, o que comprometeu a análise detalhada da distribuição espacial dos consumos.

Para além disso, a falta de dados exatos sobre o número de alunos, docentes e não-docentes que frequentam cada piso, assim como a frequência de uso das instalações sanitárias, foi também considerada uma limitação na estimativa do consumo de água ao longo de 24 h no piso 2 do edifício C. Estas informações são essenciais, pois o consumo de água varia conforme o número de utilizadores e a frequência de utilização dos dispositivos das instalações sanitárias, influenciando diretamente os padrões de consumo.

Desta forma, as estimativas do consumo e do seu respetivo padrão temporal apresentaram uma incerteza associada, em grande parte devido à natureza estocástica dos consumos humanos. O consumo de água em instalações sanitárias segue um padrão aleatório, variando tanto no tempo (em função de horários e padrões de comportamento) quanto no espaço (diferentes partes do edifício podem apresentar consumos variáveis). Esta variabilidade intrínseca torna difícil prever com exatidão consumos robustos ao longo de 24 h apenas com base em estimativas, reforçando a necessidade de uma caracterização mais detalhada.

## 5.2. Cloro residual livre observado

No presente estudo, foram analisadas 56 amostras de água para determinação do cloro residual livre em 4 torneiras do piso 2 do edifício C: pontos de amostragem 1 e 2, que correspondem a instalações sanitárias para portadores de deficiência feminina e masculina, respetivamente, e que pretendem caracterizar um baixo consumo de água; e pontos de amostragem 3 e 4, que são instalações sanitárias masculina e feminina, respetivamente, e que tinham como objetivo representar um maior consumo de água pelos utilizadores.

Após a medição de cloro residual livre nos pontos de amostragem, foi possível verificar as variações de concentrações deste parâmetro.

A variação da concentração de cloro residual livre foi ligeiramente mais notória nas amostragens sem purga prévia (0,00 a 0,72 mg/L) do que com purga (0,11 a 0,76 mg/L). A menor variação nas concentrações de cloro residual livre nas amostragens com purga, pode ser resultado da escorrência de água prévia, permitindo avaliar melhor a qualidade da água, com menor influência de fatores como a estagnação da água.

Esta variação também foi mais evidente nos pontos de amostragem 1 e 2 (0,00 a 0,76 mg/L), em comparação com os pontos de amostragem 3 e 4 (0,27 a 0,72 mg/L). A maior variação de cloro residual livre nos pontos de amostragem 1 e 2 deve-se, possivelmente, ao baixo consumo de água, resultando na estagnação da mesma nas tubagens e, conseqüentemente, no decaimento de cloro residual livre. Em concordância, Li *et al.* (2019) afirma que casos de estagnação da água nas tubagens levam ao aumento da idade da água, resultando em uma redução das concentrações de cloro residual livre. Em contraste, nos pontos de amostragem 3 e 4, a utilização frequente destas torneiras mantém as concentrações de cloro residual livre estáveis, com menor variação.

Relativamente às recolhas de amostras de água sem purga, observou-se que, aproximadamente, 43% das amostras de água (6 de 14) nos pontos de amostragem 1 e 2 apresentaram concentrações de cloro residual livre abaixo do valor recomendado (0,20 mg/L). Esta concentração reduzida de cloro residual livre nestes pontos pode indicar uma proteção inadequada contra a contaminação microbiana.

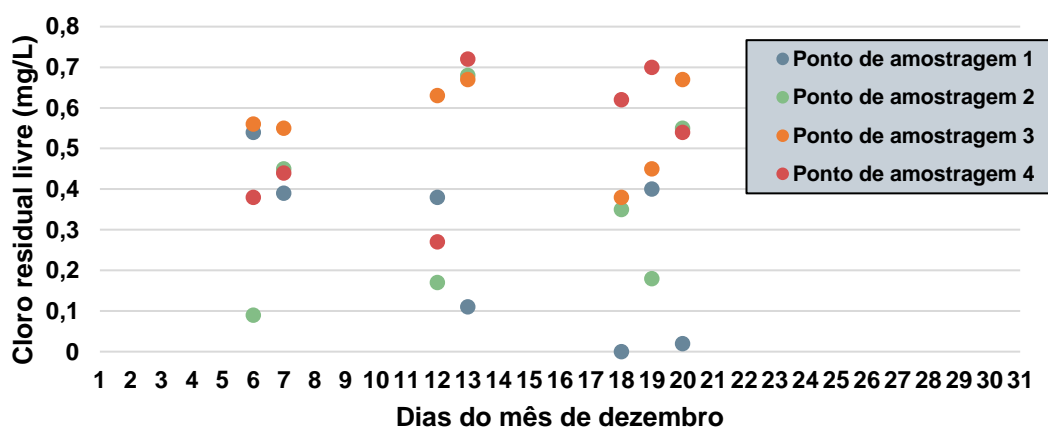
No momento da recolha das amostras de água nos pontos de amostragem 1 e 2, foi constatado que as bacias das torneiras estavam secas, sugerindo que não haviam sido

utilizadas recentemente, o que indica possível estagnação e uma elevada idade da água nas tubagens, o que leva a crer que estes pontos de amostragem são de baixo consumo.

Nas amostragens sem purga, os pontos de amostragem 3 e 4 não apresentaram nenhuma concentração de cloro residual livre abaixo do valor legal recomendado, o que pode ser justificado pelo facto de serem torneiras de elevado consumo de água, evitando a estagnação da mesma. Contrariamente, 43% das amostras (6 de 14) apresentaram concentrações de cloro residual livre acima do valor recomendado (0,60 mg/L), indicando risco de formação de subprodutos de desinfeção prejudiciais

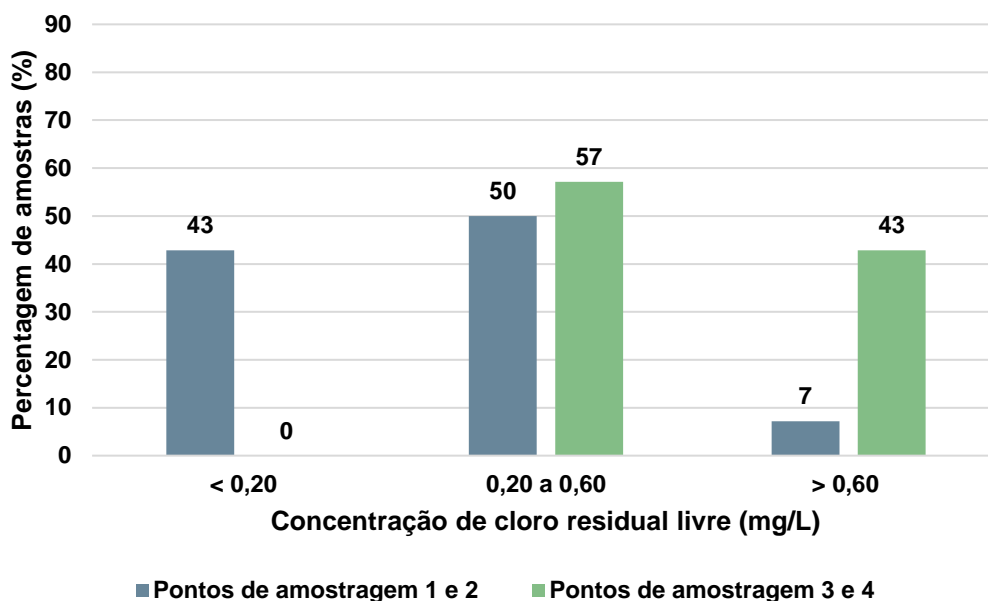
Foi observado que havia sempre gotas de água na bacia das torneiras 3 e 4, sugerindo uso recente e ausência de água estagnada nas tubagens. Além disso, durante as recolhas de amostras de água nos dias 6, 7, 12 e 20 de dezembro, as instalações sanitárias masculinas estavam a ser utilizadas, e no dia 20 de dezembro, as instalações sanitárias femininas também estavam a ser usadas.

As variações das concentrações de cloro residual livre dos vários pontos de amostragem, sem purga prévia, são apresentadas na Figura 5.2.



**Figura 5.2.** Concentrações de cloro residual livre das amostras efetuadas nos pontos de amostragem, sem purga.

A percentagem de amostras em cumprimento e em incumprimento segundo o intervalo recomendado, sem purga, é apresentada na Figura 5.3.



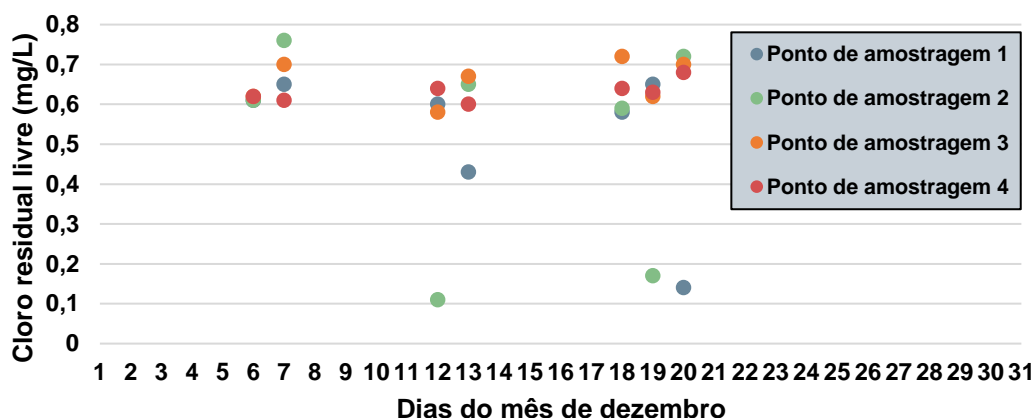
**Figura 5.3.** Distribuição percentual de cloro residual livre nas amostras de água, sem purga.

Relativamente às recolhas de amostras de água com purga, observou-se que, aproximadamente, 86% das amostras de água (12 de 14) dos pontos de amostragem 3 e 4 apresentaram concentrações de cloro residual livre que excederam o valor recomendado. Estas concentrações elevadas de cloro residual livre podem apresentar um risco para a saúde dos utilizadores do piso 2 do edifício C, uma vez que possibilitam o desenvolvimento de sabor e odor desagradável e a formação de subprodutos de desinfecção prejudiciais, como os THM. No estudo de Stefán *et al.* (2019), foi possível observar uma correlação positiva entre as concentrações elevadas de cloro residual livre e o aumento da formação de subprodutos de desinfecção.

Nas amostragens com purga, os pontos de amostragem 1 e 2 apresentaram maior variação na concentração de cloro residual livre (0,14 a 0,65 mg/L e 0,11 a 0,76 mg/L, respetivamente), em comparação com os pontos de amostragem 3 e 4 (0,58 a 0,72 mg/L e 0,60 a 0,68 mg/L, respetivamente). Além disso, 21% das amostras de água (3 de 14) dos pontos de amostragem 1 e 2, apresentaram concentrações de cloro residual livre abaixo do valor mínimo recomendado, no dia 20 de dezembro e nos dias 12 e 19 de dezembro, respetivamente.

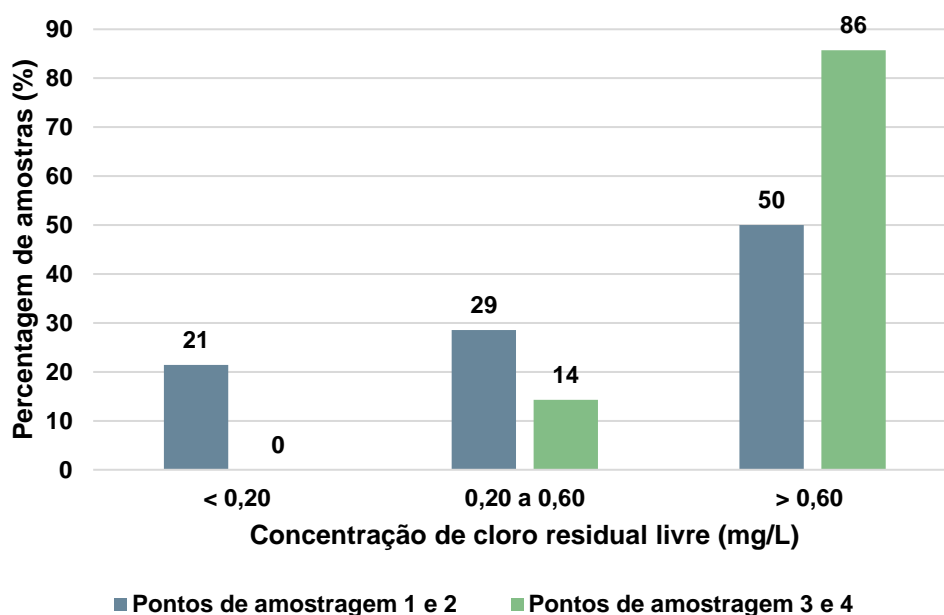
Desta forma, pode-se sugerir que a instabilidade e as baixas concentrações de cloro residual livre nos pontos de amostragem 1 e 2, mesmo após purga de 2,5 min, podem ser atribuídas ao baixo consumo de água nestas torneiras da rede de distribuição de água do piso 2 do edifício C, levando à redução da concentração de cloro residual livre.

As variações das concentrações de cloro residual livre dos vários pontos de amostragem, com purga de 2,5 min, são apresentadas na Figura 5.4.



**Figura 5.4.** Concentrações de cloro residual livre das amostras efetuadas nos pontos de amostragem, com purga.

A percentagem de amostras em cumprimento e em incumprimento segundo o intervalo recomendado, com purga prévia, é apresentada na Figura 5.5.



**Figura 5.5.** Distribuição percentual de cloro residual livre nas amostras de água, com purga.

As análises estatísticas das concentrações de cloro residual livre nos pontos de amostragem em estudo podem ser consultadas no Anexo VI.

De forma a promover uma concentração de cloro residual livre acima do valor mínimo recomendado na rede de distribuição de água do ISEL, aconselha-se a implementação das seguintes medidas preventivas:

- Renovar a água estagnada nas tubagens após períodos prolongados sem consumo, como as férias escolares. Esta boa prática resulta na escorrência da água acumulada, substituindo-a por água nova, evitando concentrações nulas ou reduzidas de cloro residual livre associadas à estagnação da água;
- Realizar periodicamente a limpeza e desinfecção das torneiras. Esta prática visa a reduzir focos de contaminação microbológica (biofilme) que podem causar cheiros desagradáveis ou alterar o sabor da água.

Para além, disso recomenda-se à entidade gestora proceder à realização de monitorizações regulares nas torneiras, de modo detetar concentrações excessivas ou reduzidas de cloro residual livre e prevenir riscos para a saúde dos alunos, docentes e não docentes.

De forma a identificar previamente possíveis locais no ISEL com concentrações nulas ou baixas de cloro, sugere-se a realização de medições da concentração de cloro residual livre em pontos críticos da rede, tais como edifícios antigos com tubagens envelhecidas.

Existem inúmeros fatores que podem influenciar o decaimento de cloro residual livre, dificultando a caracterização do mesmo. Ao longo do presente estudo, foram analisados alguns fatores em campo que influenciam o comportamento real da curva de decaimento de cloro livre, designadamente, o pH e a temperatura.

Relativamente ao pH, verificou-se um incumprimento contínuo no seu valor (5,5). Este valor foi lido durante 7 dias, mantendo-se inalterado. O incumprimento deste parâmetro com os valores recomendados ( $\geq 6,5$  e  $\leq 9,5$ ) poderá afetar negativamente a qualidade da água para consumo. Desta forma, verifica-se a importância de a entidade gestora monitorizar periodicamente o pH da água de forma a verificar o seu cumprimento de acordo com o intervalo recomendado referido no Decreto-Lei n.º 69/2023.

De acordo com Deborde & Von Gunten (2008), este baixo valor de pH não compromete a redução significativa do cloro residual livre, uma vez que este desinfetante residual diminui à medida que o pH aumenta, tornando-se ineficaz em  $\text{pH} \geq 9$ .

Nos estudos de Monteiro *et al.* (2017) e Karadirek *et al.* (2015), observou-se que o aumento da temperatura acelera o decaimento do cloro residual livre na água.

O estudo de Oliveira *et al.* (2022) revelou que, a constante cinética  $k_b$  apresenta valores mais elevados para temperaturas entre 30 e 31 °C, em comparação com os valores entre 20 e 21 °C. Os autores também observaram que o valor de  $k_b$  foi menor no mês com temperaturas mais baixas e maior no mês com temperaturas mais altas.

No presente estudo, observou-se que a temperatura da água se manteve em níveis relativamente baixos, com uma média de 16,0 °C. De acordo com a literatura, tais condições térmicas não aceleram significativamente o decaimento do cloro residual livre, dado que não foram registadas temperaturas elevadas, as quais poderiam intensificar o decaimento.

A baixa temperatura da água medida pode estar associada à temperatura média do ambiente, uma vez que as medições em campo foram realizadas durante o inverno, quando a temperatura média do ar em dezembro foi de aproximadamente 10 °C.

### **5.3. Simulação hidráulica**

#### *5.3.1. Caudal simulado nas tubagens*

Para a calibração do modelo hidráulico do caudal nas tubagens, foi testado o instante 15 h, correspondente a um período de menor consumo.

Após a simulação foi possível observar um comportamento similar entre os caudais estimados e os simulados. Na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, o maior transporte de água ocorre nas tubagens principais, que gradualmente se distribui pelas tubagens ramificadas.

A rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculina apresentou um erro médio aceitável de 0,057 e uma correlação positiva próxima de 1, especificamente 0,990.

Na rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas, o erro médio apresentou um valor aceitável de 0,048, o que sugere que o modelo é bastante consistente. A correlação entre os caudais estimados e simulados foi de 0,994, indicando uma elevada concordância.

Embora o erro médio seja significativamente reduzido, esta pequena diferença pode ser atribuída a imprecisões nas medições realizadas em campo, à aplicação de valores teóricos e à presença de fugas ao longo da rede.

Em concordância com o estudo de Figueiredo (2014), o erro médio dos caudais nas tubagens foi atribuído às imprecisões nas medições realizadas e à ocorrência de perdas reais de água ao longo do sistema de distribuição.

Os gráficos de correlação e de comparação de médias dos caudais nas tubagens da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias às 15 h, encontram-se apresentados na Figura 5.6 e 5.7. Os valores estatísticos da calibração do caudal podem ser consultados no Anexo VIII.

A designação e a localização das tubagens da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas podem ser consultadas no Anexo IX.

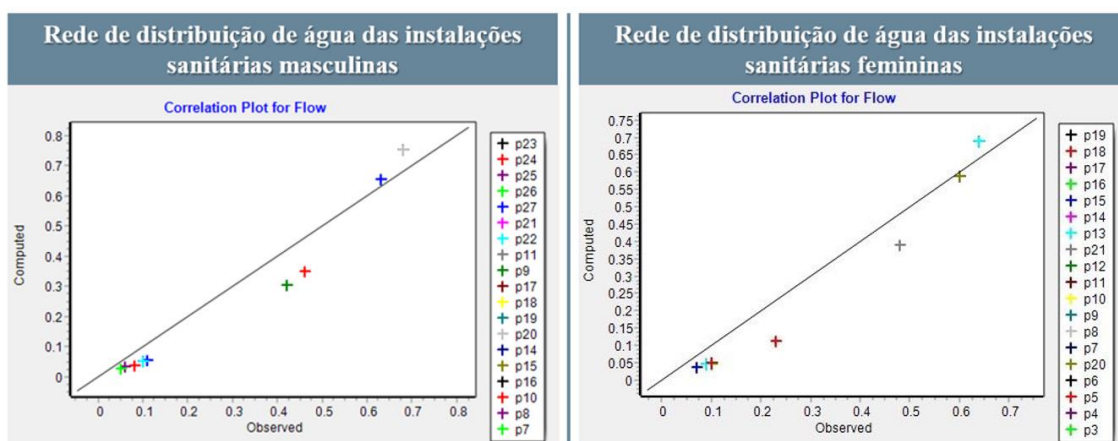


Figura 5.6. Correlação dos caudais nas tubagens estimados e simulados.

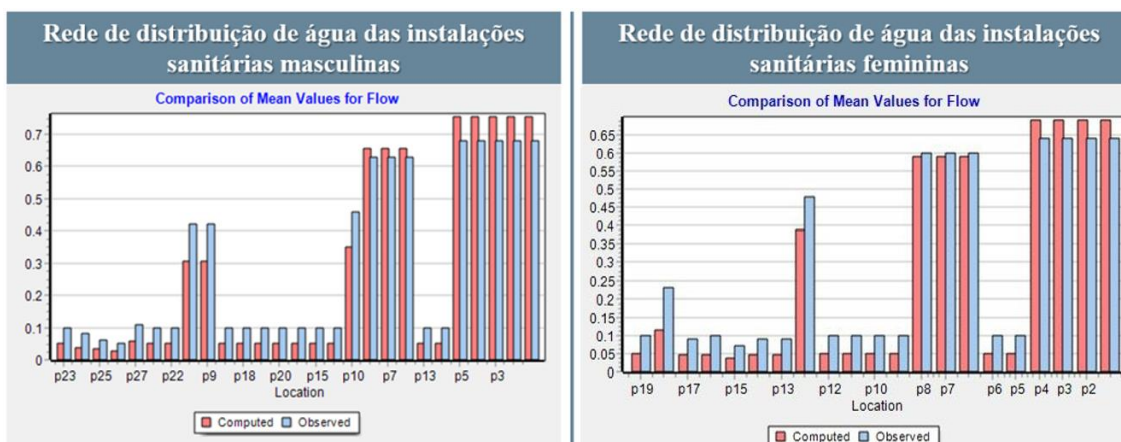
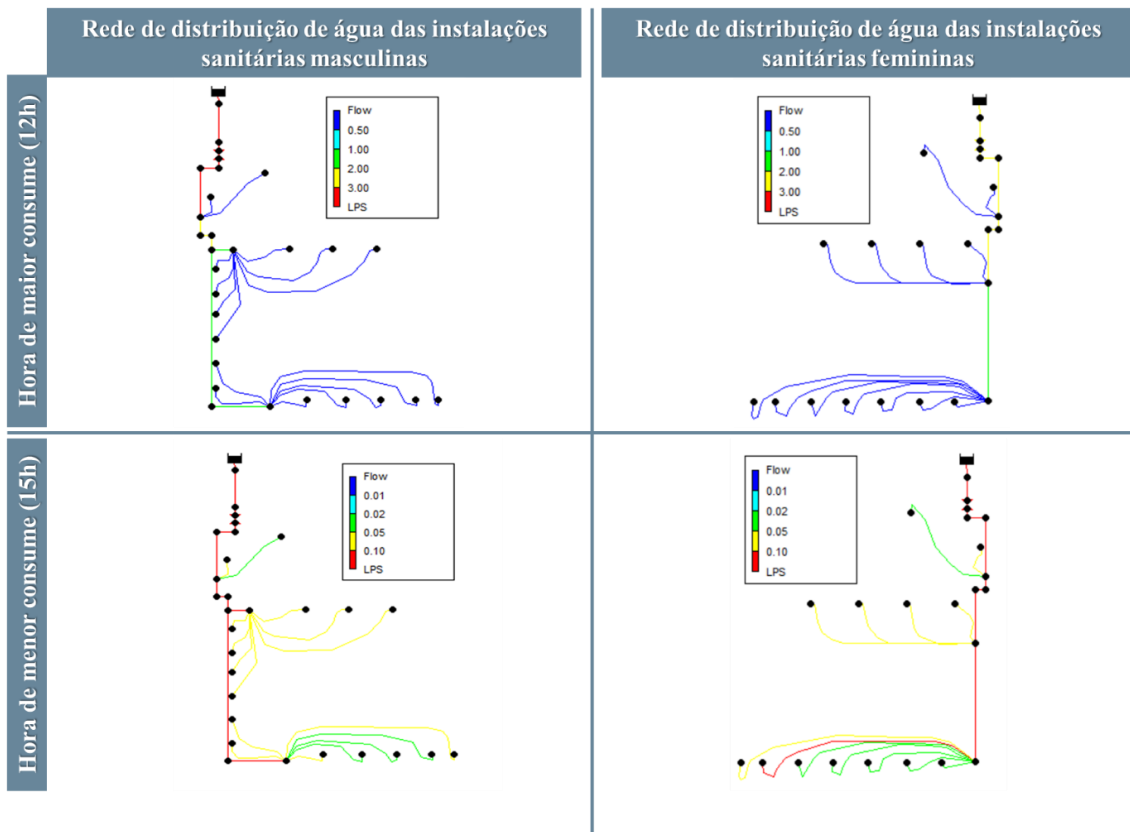


Figura 5.7. Comparação das médias dos caudais nas tubagens estimados e simulados.

Os dados resultantes das simulações no EPANET 2.2 demonstram uma variação significativa no caudal da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas, dependendo do período de consumo de água. Durante um dos períodos de maior consumo, às 12 h, o caudal à saída do reservatório na rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas foi de 3,17 L/s e 2,89 L/s, respetivamente. Durante um dos períodos de menor consumo, às 15 h, o caudal à saída do reservatório foi de 0,75 L/s para o sistema da instalação sanitária masculina e foi de 0,69 L/s para o sistema da instalação sanitária feminina. Esta variação demonstra como os padrões de consumo afetam diretamente o caudal de água nas tubagens da rede de distribuição de água.

Tanto no período de maior consumo quanto no de menor consumo, as tubagens principais são responsáveis pelo transporte dos maiores volumes de água. No entanto, uma tubagem secundária associada a uma torneira das instalações sanitárias femininas apresentou um caudal semelhante ao de uma tubagem principal. Isso ocorreu devido à alta pressão existente na torneira, resultando em um caudal significativamente elevado. Durante as medições de caudal em campo, verificou-se que esta torneira tinha o maior caudal instantâneo, de 0,2280 L/s.

As simulações dos caudais nas tubagens da rede de distribuição de água das instalações sanitárias na hora de maior e menor consumo são apresentadas na Figura 5.8.



**Figura 5.8.** Simulações dos caudais nas tubagens.

### 5.3.2. Pressão simulada nos nós

Para estimar a pressão nos nós, foram testados dois cenários de nível de água do reservatório fictício: o primeiro cenário (A1) considerou uma altura piezométrica de 110 m, enquanto o segundo cenário (A2) utilizou uma altura piezométrica de 120 m.

No estudo realizado por Pinto (2010), também foram atribuídos diferentes níveis de água ao reservatório com o objetivo de minimizar as discrepâncias entre os valores calculados e simulados.

Através da análise das pressões nos nós estimadas (Anexo VII), verificou-se que, tanto para o cenário A1 como para o cenário A2, o valor de pressão máxima não foi ultrapassado (61,28 m.c.a, medido ao nível do solo) e que a pressão mínima de 18,36 m.c.a foi garantida nos nós que se encontravam no piso 2 do edifício C. Porém, é possível observar que a pressão recomendada (15,30 a 30,60 m.c.a) para os dispositivos de utilização é ultrapassada no cenário A2.

## **Cenário A1**

Após a simulação do cenário A1, observou-se uma alta similaridade entre as pressões nos nós estimadas e simuladas. O erro médio foi de 0,186 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e 0,167 para a rede das instalações sanitárias femininas. Além disso, a correlação entre as pressões estimadas e simuladas foi próxima de 1 na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, com valores de 0,972 para as instalações sanitárias masculinas e 0,986 para as femininas.

Verificou-se uma maior similaridade nas pressões estimadas e simuladas dos nós principais da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias. As pressões estimadas e simuladas nos nós Ponto\_Entrada\_ISEL, n1, n2, n4, n5 e n10 da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e nos nós Ponto\_Entrada\_ISEL, n2 e n4 da rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas foram iguais. A similaridade observada, o erro médio aceitável, e correlação linear positiva reforçam a confiabilidade do modelo de simulação e sugere que as pressões simuladas replicam com precisão o comportamento hidráulico das pressões estimadas.

Verificou-se que, na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, os valores de pressão, tanto estimados como simulados, dos dispositivos de utilização situaram-se entre os valores recomendáveis e foram superiores à pressão mínima definida para o segundo piso. A pressão do ponto de entrada do ISEL estimada e simulada não ultrapassou o valor máximo estabelecido pela legislação.

Os gráficos de correlação e de comparação de médias das pressões nos nós da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias às 15 h para o cenário A1 encontram-se apresentados nas Figuras 5.9 e 5.10. A análise estatística da pressão nos nós e o cálculo do erro entre os valores de pressão estimados e simulados para o cenário A1 podem ser consultados no Anexo VIII.

A designação e a localização dos nós da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas podem ser consultadas no Anexo IX.

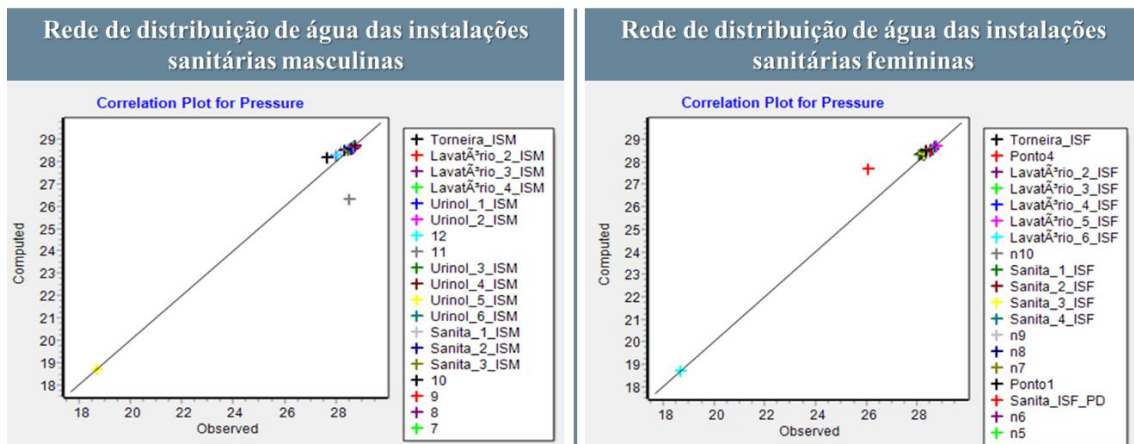


Figura 5.9. Cenário A1: Correlação das pressões nos nós estimadas e simuladas.

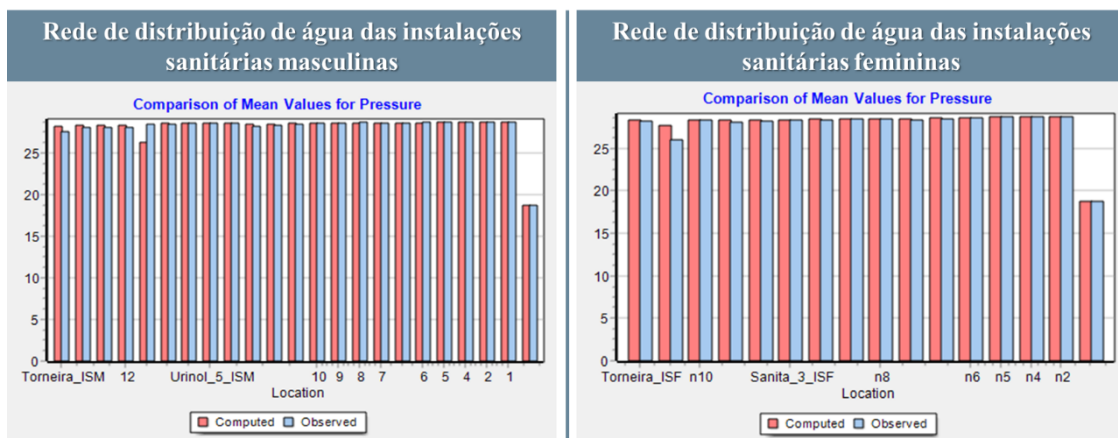


Figura 5.10. Cenário A1: Comparação das médias das pressões nos nós estimadas e simuladas.

## Cenário A2

No cenário A2, semelhante ao cenário anterior, o erro médio foi considerado aceitável, com valores de 0,196 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e 0,166 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas. Adicionalmente, a correlação linear entre as médias das pressões estimadas e simuladas foi de 0,971 para as instalações sanitárias masculinas e 0,986 para as femininas, indicando uma relação linear perfeita.

Conforme o Decreto Regulamentar n.º 23/95, a pressão do ponto de entrada do ISEL calculada e simulada não ultrapassou o valor máximo estabelecido e foi garantida a pressão mínima para os valores de pressão tanto estimados como simulados correspondentes ao segundo andar do edifício. Porém, verificou-se que as pressões dos serviços dos dispositivos de utilização estimadas e simuladas ultrapassaram o valor recomendado, nomeadamente, 30,60 m.c.a.

Os valores estatísticos da pressão dos nós estimados e simulados da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas às 15 h para o cenário A2 são apresentados na Figura 5.11.

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas						Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas					
Calibration Statistics for Pressure						Calibration Statistics for Pressure					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Torneira_ISM	1	37.63	38.18	0.547	0.547	Torneira_ISF	1	38.26	38.33	0.067	0.067
Ponto3	1	37.82	38.23	0.410	0.410	Ponto4	1	36.06	37.72	1.655	1.655
Urinol_1_ISM	1	38.01	38.28	0.273	0.273	n10	1	38.31	38.34	0.029	0.029
Urinol_2_ISM	1	38.01	38.28	0.272	0.272	Sanita_1_ISF	1	38.05	38.33	0.275	0.275
12	1	38.05	38.29	0.244	0.244	Sanita_2_ISF	1	38.17	38.36	0.189	0.189
11	1	38.48	36.32	2.163	2.163	Sanita_3_ISF	1	38.27	38.39	0.118	0.118
Urinol_3_ISM	1	38.52	38.55	0.035	0.035	Sanita_4_ISF	1	38.35	38.41	0.059	0.059
Urinol_4_ISM	1	38.53	38.56	0.029	0.029	n9	1	38.45	38.44	0.012	0.012
Urinol_5_ISM	1	38.54	38.56	0.022	0.022	n8	1	38.52	38.51	0.014	0.014
Urinol_6_ISM	1	38.55	38.56	0.014	0.014	Ponto1	1	38.33	38.50	0.168	0.168
Sanita_1_ISM	1	38.19	38.47	0.275	0.275	Sanita_ISF_PD	1	38.50	38.54	0.045	0.045
Sanita_2_ISM	1	38.32	38.50	0.182	0.182	n6	1	38.59	38.57	0.022	0.022
Sanita_3_ISM	1	38.47	38.54	0.071	0.071	n5	1	38.67	38.66	0.008	0.008
10	1	38.57	38.57	0.000	0.000	n4	1	38.70	38.70	0.001	0.001
9	1	38.63	38.61	0.020	0.020	n2	1	38.72	38.72	0.002	0.002
8	1	38.66	38.64	0.024	0.024	Ponto_Entrada_ISEL	1	28.70	28.70	0.001	0.001
7	1	38.57	38.64	0.072	0.072	Network	16	37.67	37.83	0.166	0.426
Ponto2	1	38.40	38.58	0.177	0.177						
Sanita_ISM_PD	1	38.58	38.63	0.046	0.046						
6	1	38.66	38.65	0.011	0.011						
5	1	38.70	38.70	0.004	0.004						
4	1	38.71	38.71	0.000	0.000						
2	1	38.72	38.72	0.003	0.003						
1	1	38.72	38.72	0.000	0.000						
Network	25	38.03	38.05	0.196	0.469						

Correlation Between Means: 0.971

Correlation Between Means: 0.986

**Figura 5.11.** Cenário A2: Resultados estatísticos da calibração das pressões nos nós estimadas e simuladas.

Com base na análise de ambos os cenários, é possível inferir que a altura do reservatório fictício de 110 m poderia ser identificada como a opção mais apropriada, uma vez que se mantém abaixo do valor recomendado.

Efetuada a simulação do comportamento da pressão nos nós, nas horas de maior e menor consumo de água, foi possível observar que, na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, apresentaram, na sua maioria, valores superiores ao mínimo definido na legislação.

Comparativamente, no estudo de Neves (2016), também se observou que, durante a hora de maior consumo, as simulações de pressão registraram, predominantemente, valores superiores ao mínimo recomendado para os nós localizados no segundo piso.

Porém, verificou-se que, na rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas, existem dois nós que se encontram no segundo piso, com pressão mínima inferior a 18,36 m.c.a em ambos os períodos de consumo de água. Desta forma, poderá ser aconselhada a instalação de um equipamento de pressurização, de forma a aumentar a pressão.

Quanto ao valor máximo de pressão medido ao nível do solo, verificou-se que não é excedido durante ambos os períodos de consumo de água. Em relação ao intervalo regulatório recomendado, a pressão nos dispositivos de utilização permanece dentro da faixa de 15,30 a 30,60 m.c.a, o que favorece a durabilidade prolongada dos materiais.

As simulações das pressões nos nós da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, na hora de maior e menor consumo, com um nível de água do reservatório fictício igual a 110 m, são apresentadas na Figura 5.12.

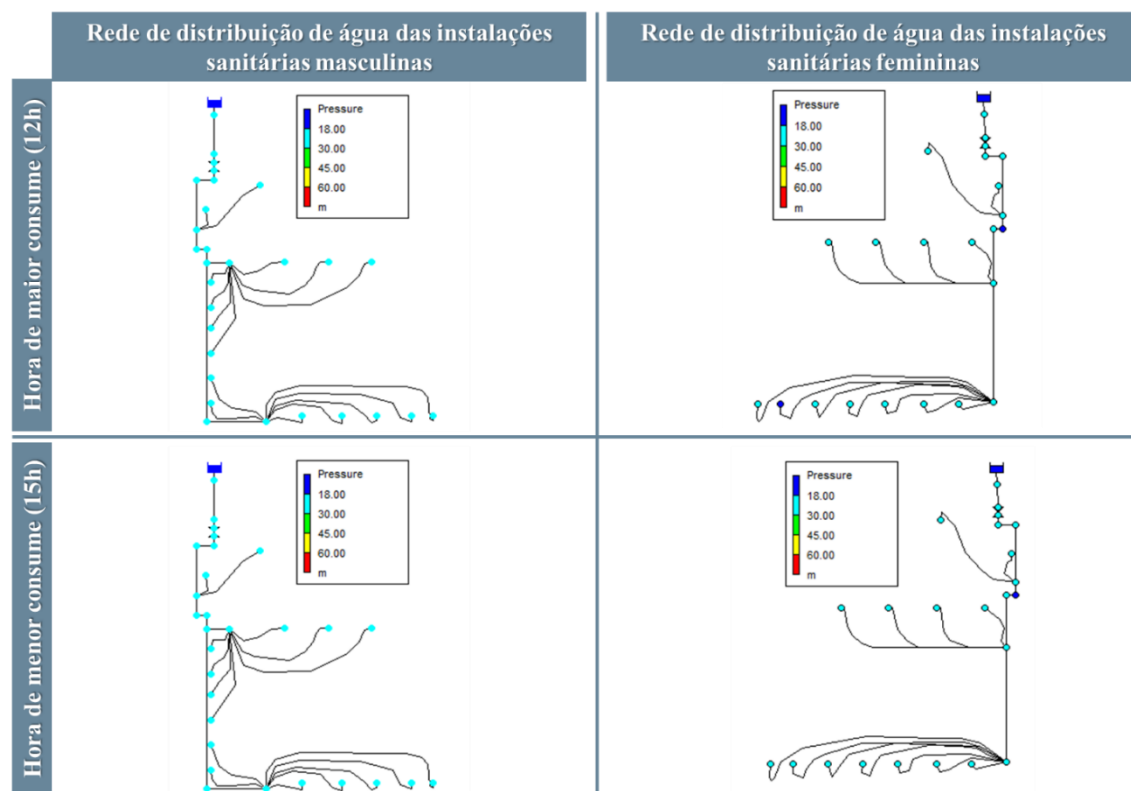


Figura 5.12. Simulações das pressões nos nós.

### 5.3.3. Velocidade simulada nas tubagens

Por meio de análise das velocidades estimadas nas tubagens apresentadas no Anexo VII, verificou-se que o valor de velocidade estimado da tubagem predial p26 da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas e da tubagem p19 da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas encontravam-se abaixo do mínimo definido pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95, foram alterados para 0,5 m/s. A tubagem p18 da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas apresentava um valor de velocidade acima do máximo definido pelo presente decreto, tendo existido a necessidade de alterar o valor para 2,0 m/s.

Após a simulação das velocidades nas tubagens, os resultados do relatório de calibração indicaram uma correlação de 0,804 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e 0,792 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas. Estas correlações sugerem uma conexão significativa entre as velocidades estimadas e simuladas, embora não seja completamente perfeita.

Tal como no presente estudo, no trabalho realizado por Maricato (2015), a velocidade simulada nas tubagens foi identificada como o parâmetro com a correlação mais baixa.

Observou-se uma maior variação entre os valores das velocidades estimados e simulados das condutas localizadas próximas às extremidades da rede de distribuição de água, com erros médios variando entre 0,251 e 0,502 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas, e entre 0,326 e 0,992 para a rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas.

Na rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas, observou-se uma maior concordância entre os valores determinados e simulados nas tubagens principais, especificamente nas tubagens Tubagem\_ISEL, p2, p3, p4, p5, p6, p7 e p8, com um erro médio variando entre 0,009 e 0,098. De forma semelhante, no sistema de distribuição de água das instalações sanitárias femininas, as tubagens principais, nomeadamente Tubagem\_ISEL, p2, p3, p4, p20, p7 e p8, também apresentaram uma maior similaridade entre os valores calculados e simulados, com um erro médio entre 0,003 e 0,094.

Observou-se que, de modo geral, os valores de velocidade simulados das tubagens situadas próximas à extremidade na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias estavam abaixo da velocidade mínima recomendada para tubagens prediais (0,5 m/s). Adicionalmente, verificou-se que nenhuma tubagem excedeu o valor máximo estabelecido pela legislação (2,0 m/s).

No estudo de Maricato (2015), observou-se que, nos nós a jusante da rede de distribuição de água, a velocidade simulada nas tubagens é significativamente menor, indicando uma possível relação inversa entre a localização na rede de distribuição de água e a velocidade do escoamento.

Em conformidade com Neves (2016), pode-se afirmar que os baixos valores de velocidade nas tubagens estão possivelmente associados a nós que apresentam caudais reduzidos.

Os gráficos de correlação e de comparação de médias das velocidades nas tubagens na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias às 15 h encontram-se apresentados nas Figuras 5.13 e 5.14. Os resultados estatísticos da velocidade nas tubagens podem ser consultados no Anexo VIII.

A designação e a localização das tubagens da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas podem ser consultas no Anexo IX.

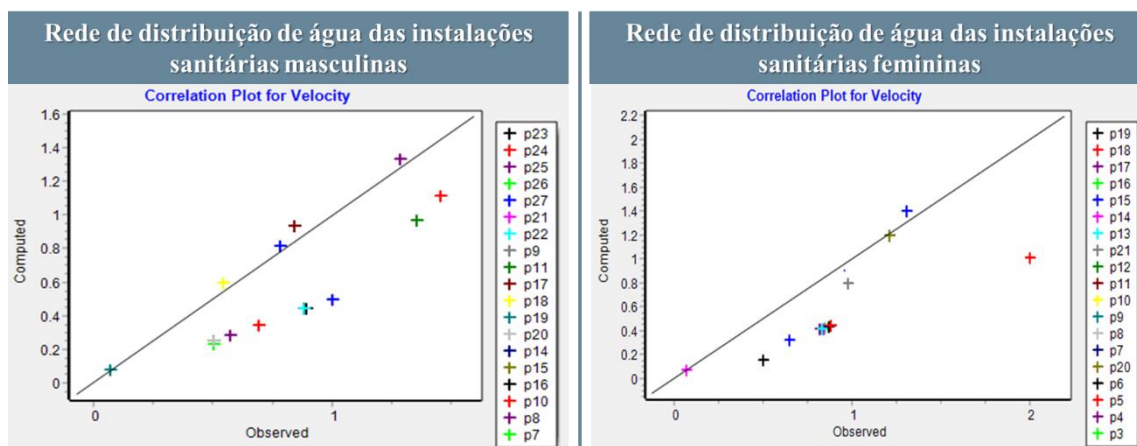


Figura 5.13. Correlação das velocidades nas tubagens estimadas e simuladas.

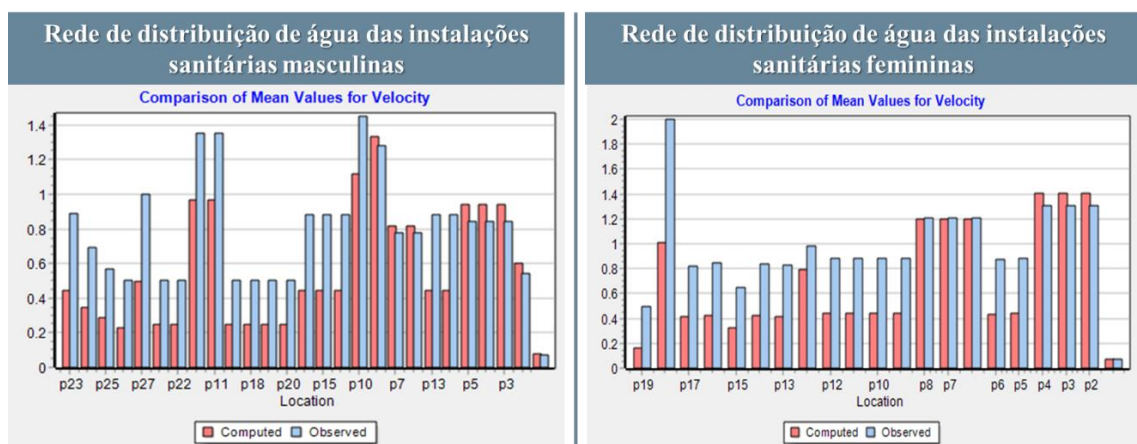


Figura 5.14. Comparação das médias das velocidades nas tubagens estimadas e simuladas.

A simulação das velocidades no EPANET 2.2 revelou que, o valor da velocidade máxima definido pelo Decreto Regulamentar n.º 23/95 é excedido durante o período de maior consumo, maioritariamente, nas tubagens principais da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas. Adicionalmente, verificou-se que nenhuma das tubagens prediais encontravam-se abaixo do valor mínimo estabelecido pela legislação.

Na hora de menor consumo, as tubagens que se encontram na extremidade na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias encontravam-se abaixo do valor mínimo definido pela legislação.

Tanto na hora de maior consumo como na hora de menor consumo, as tubagens ao nível do solo, especificamente a Tubagem\_ISEL e a Tubagem\_Fíctica, apresentaram velocidades inferiores a 0,5 m/s. Estas tubagens não se encontram sujeitas ao valor mínimo estabelecido, pois não se classificam como tubagens prediais.

As simulações das velocidades nas tubagens na hora de maior e menor consumo da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias são apresentadas na Figura 5.15.

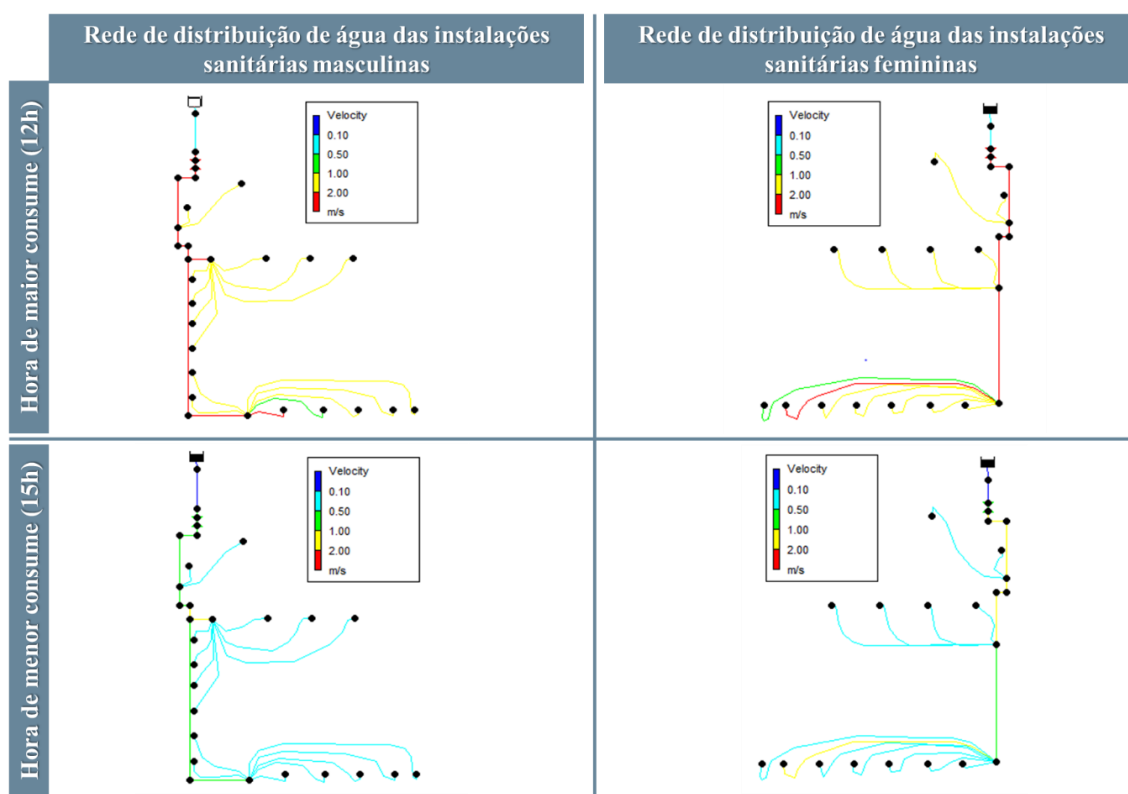


Figura 5.15. Simulações das velocidades nas tubagens.

## 5.4. Simulação qualidade da água

### 5.4.1. Tempo de percurso simulado da água

No presente estudo foi realizada a simulação da variação da idade da água. Este parâmetro traduz o tempo médio que uma parcela de água demora a chegar a um determinado nó do sistema de distribuição desde o ponto de entrada de água.

Durante as simulações, foram testados dois cenários: cenário B1 – consumos nodais teóricos definidos; e cenário B2 - ajuste dos consumos nos pontos de amostragem 1 e 2 para 0,0001 L/s, refletindo a utilização esporádica destas torneiras.

### **Cenário B1**

Assumindo que a água que entra na rede de distribuição de água, a partir do reservatório de nível fixo fictício, possui uma idade de zero, o tempo de percurso máximo, tanto das torneiras de baixo consumo (pontos de amostragem 1 e 2) quanto das de elevado consumo (pontos de amostragem 3 e 4), é de 3 h.

Porém, os pontos de amostragem 1 e 2, devido à menor frequência de utilização, tendem a acumular água estagnada, resultando em uma idade da água mais elevada em comparação com os pontos de amostragem de uso recorrente. O igual tempo de percurso entre os pontos de amostragem de elevada e baixa utilização não representa corretamente a realidade.

### **Cenário B2**

Os consumos de água nos pontos de amostragem 1 e 2 foram ajustados para evitar influências incorretas nas idades da água. A necessidade deste ajuste decorreu do facto de que os consumos determinados para as torneiras de baixo consumo eram semelhantes aos das torneiras de elevada utilização, ambos em torno de 0,100 L/s. Esta semelhança comprometeu a precisão dos resultados, já que não refletiu adequadamente a realidade da utilização esporádica das torneiras de baixo consumo. Portanto, foi realizado um ajuste nos consumos de água dos pontos de amostragem 1 e 2, para um valor residual de 0,0001 L/s, de forma a garantir a correta determinação das idades da água.

Os gráficos resultantes da simulação do EPANET 2.2, permitiram observar um período inicial em que o tempo de percurso aumenta, partindo do valor zero até o ponto em que a primeira parcela de água, que percorreu todo o trajeto desde o reservatório fictício, chega ao nó. A partir desse ponto, são evidentes ciclos repetitivos e estáveis.

Os pontos de amostragem 1 e 2 apresentaram um tempo de percurso de 5 h, em contraste com os pontos de amostragem 3 e 4, que demonstraram um tempo de percurso de 3 h. Esta diferença confirma que uma menor frequência de utilização resulta em uma idade da água mais elevada, enquanto uma maior frequência de utilização

tende a reduzir a idade da água nas torneiras dos utilizadores. Esta relação inversa entre o uso e a idade da água evidencia a importância da necessidade de renovar a água que se encontra nas tubagens antes do seu consumo, de forma a garantir a sua adequada qualidade.

Em conformidade com a conclusão do estudo de Maricato (2015), também se observou que, nos locais de menor ocupação populacional e, conseqüentemente, com um consumo de água reduzido, o tempo de percurso da água é significativamente maior.

O tempo de percurso da água até à chegada dos pontos de amostragem da rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas e femininas é apresentado na Figura 5.16.

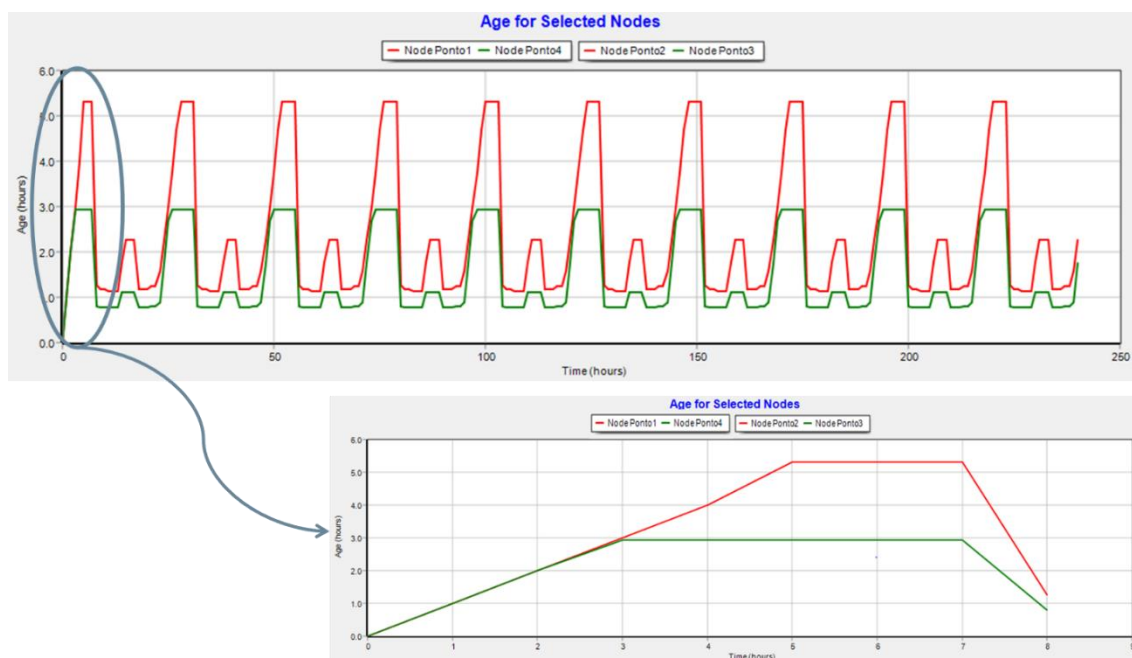


Figura 5.16. Cenário B2: Evolução do tempo de percurso da água.

#### 5.4.2. Cloro residual livre simulado

Previamente à simulação das concentrações de cloro residual livre, foi determinado através do “teste de garrafa” o valor da constante cinética  $k_b$  (-2,304/d). O valor da constante cinética  $k_w$ , foi teste por meio do método de tentativa-erro. Foram testados três valores da constante  $k_w$ , especificamente -0,010, -0,100 e -0,150 m/d.

Para uma análise mais precisa da concentração de cloro residual livre, foi essencial ajustar os consumos nodais, de modo a refletir com maior precisão as condições reais de utilização. As torneiras localizadas nas instalações sanitárias para portadores de deficiência (pontos de amostragem 1 e 2) são utilizadas de forma esporádica sob

condições normais, e durante as medições de campo de cloro residual livre, não se observou a utilização destas instalações sanitárias. Assim, ajustou-se os consumos de água dos pontos de amostragem 1 e 2 para um valor residual de 0,0001 L/s.

Em concordância com o estudo de Neves (2016), também se observou uma maior aproximação entre os valores medidos em campo e os valores simulados de cloro residual livre após o ajuste dos consumos nos pontos de amostragem.

Observou-se que, na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, as correlações eram todas lineares positivas, embora com algumas variações, e os erros médios apresentavam diferenças. Assim, a escolha do valor  $k_w$  foi priorizada com base no erro médio mais baixo, pois este critério quantifica diretamente a precisão entre as concentrações de cloro residual livre medidas e simuladas. A correlação foi utilizada como uma ferramenta adicional para avaliar a consistência na relação entre as concentrações de cloro medidas e simuladas.

Assim, o valor de  $k_w$  que apresentou a menor diferença média entre as concentrações de cloro residual livre medidas e simuladas foi -0,010 m/d, com uma correlação de 0,997, na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias. Desta forma, considerou-se que o valor de  $k_w = - 0,010$  m/d era o que proporcionava melhor ajuste entre as concentrações de cloro residual medidas e simuladas.

Os relatórios da simulação, na rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, indicaram que aproximadamente 87% do decaimento do cloro residual livre ocorre no seio da água e cerca de 12% ocorre na superfície das tubagens. Isto sugere que o cloro residual livre é consumido mais lentamente pelas reações nas superfícies das tubagens em comparação com os fatores relacionados ao seio da água.

Após a introdução das constantes cinéticas e dos valores de cloro residual livre medidos, foi gerado um relatório de calibração. Os resultados simulados de concentrações de cloro residual livre corresponderam às concentrações reais medidas em campo, confirmando a precisão da modelagem. Especificamente, os pontos de amostragem 1 e 2, que possuem menor frequência de utilização, apresentaram concentrações simuladas de cloro residual livre inferiores em comparação com as torneiras de maior consumo (pontos de amostragem 3 e 4). Estes resultados sustentam a conclusão de que a redução na frequência de utilização está associada a concentrações mais baixas de cloro residual livre.

Em conformidade com o estudo de Neves (2016), também se verificou que, nos pontos de amostragem que representam menor consumo e maior tempo de percurso, foram observados baixos valores de cloro residual livre.

Assim como no presente estudo, o trabalho de Maricato (2015) também demonstrou que os valores de cloro residual livre obtidos em campo e os valores simulados apresentam maior congruência nos pontos mais próximos do reservatório. Em contrapartida, foram observadas diferenças mais significativas nos pontos de amostragem localizados mais distantes do reservatório.

Os valores estatísticos das concentrações de cloro residual livre da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias, encontram-se apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18. Estes valores consideram uma qualidade inicial do reservatório fictício de 0,66 mg/L, valores de  $k_w$  de -0,010, -0,100 e -0,150 m/d, e consumos residuais de água nos pontos de amostragem 1 e 2 de 0,0001 L/s.

$k_w = -0,010$ m/d						$k_w = -0,100$ m/d					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre						Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto2	7	0.52	0.58	0.193	0.260	Ponto2	7	0.52	0.48	0.240	0.260
Ponto3	7	0.66	0.65	0.048	0.050	Ponto3	7	0.66	0.64	0.051	0.055
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.001	0.001	Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	15	0.59	0.62	0.113	0.181	Network	15	0.59	0.57	0.136	0.181
Correlation Between Means: 0.997						Correlation Between Means: 0.995					

$k_w = -0,150$ m/d					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto2	7	0.52	0.46	0.248	0.263
Ponto3	7	0.66	0.63	0.052	0.058
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	15	0.59	0.55	0.140	0.184
Correlation Between Means: 0.993					

**Figura 5.17.** Concentrações de cloro residual livre estimadas e simuladas da rede de água das instalações sanitárias masculinas.

$k_{pw} = -0,010 \text{ m/d}$						$k_{pw} = -0,100 \text{ m/d}$					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre						Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Pontol	6	0.51	0.57	0.105	0.181	Pontol	6	0.51	0.46	0.155	0.174
Ponto4	7	0.63	0.65	0.026	0.028	Ponto4	7	0.63	0.63	0.016	0.022
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.001	0.001	Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	14	0.58	0.62	0.058	0.120	Network	14	0.58	0.56	0.074	0.115
Correlation Between Means: 0.997						Correlation Between Means: 0.998					

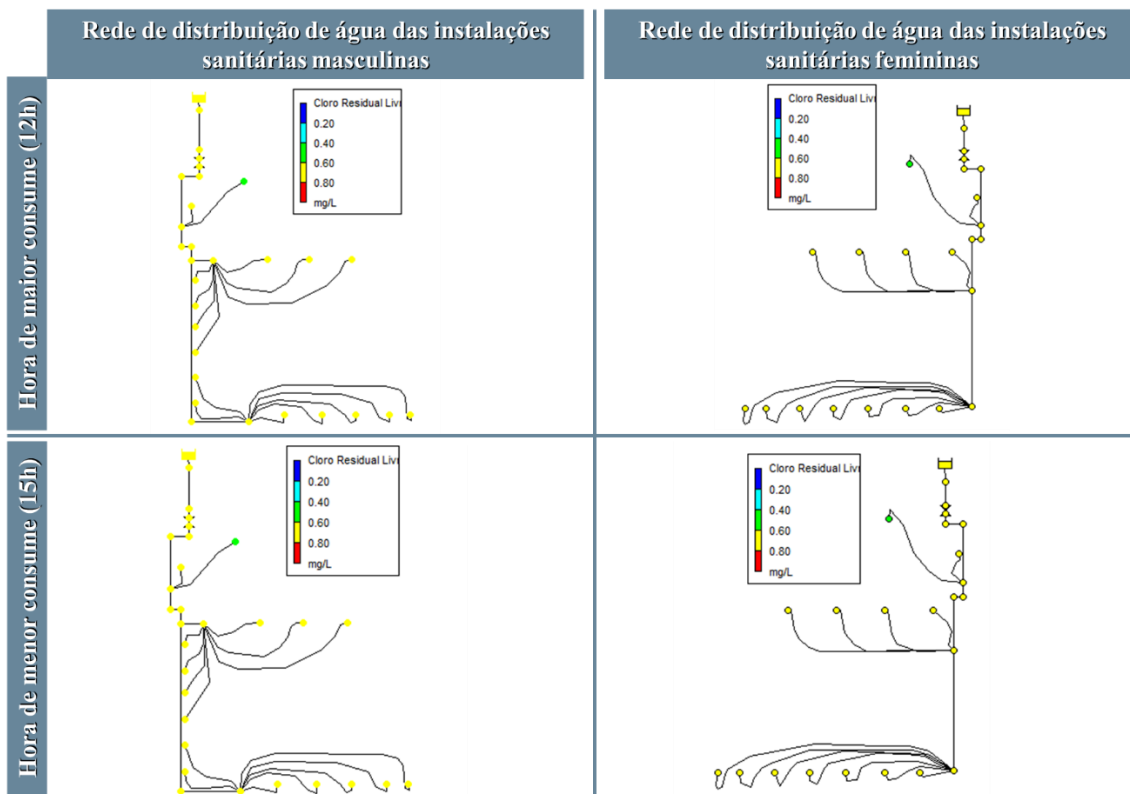
  

$k_{pw} = -0,150 \text{ m/d}$					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Pontol	6	0.51	0.44	0.168	0.180
Ponto4	7	0.63	0.63	0.017	0.023
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	14	0.58	0.55	0.081	0.119
Correlation Between Means: 0.999					

**Figura 5.18.** Concentrações de cloro residual livre estimadas e simuladas da rede de água das instalações sanitárias femininas.

Durante as simulações realizadas para os períodos de maior e menor consumo de água, observou-se que o valor máximo recomendado de 0,60 mg/L para a concentração de cloro residual livre foi excedido em todos os nós, à exceção dos pontos de amostragem 1 e 2.

As simulações das concentrações de cloro residual livre nos nós da rede de distribuição de águas das instalações sanitárias masculinas e femininas, na hora de maior e menor consumo são apresentadas na Figura 5.19.



**Figura 5.19.** Simulações das concentrações de cloro residual livre.

As concentrações de cloro residual livre, tanto simuladas quanto observadas, que excederam o valor recomendado de 0,60 mg/L podem representar um risco para a saúde dos utilizadores do piso 2 do edifício C, nomeadamente, desenvolvimento de sabor e odor desagradável e formação de subprodutos de desinfeção prejudiciais.

Para solucionar o problema de concentrações de cloro residual livre superiores ao valor máximo recomendado, assegurando simultaneamente uma concentração mínima de 0,20 mg/L nas torneiras do piso 2 do edifício C, foram simulados cenários no EPANET 2.2 com a adição de diferentes doses de cloro no reservatório fictício.

Foram testados dois cenários para a qualidade inicial do reservatório fictício: cenário C1 com 0,60 mg/L de cloro residual livre, correspondente ao valor máximo recomendado na torneira do consumidor; e cenário C2 com 0,30 mg/L de cloro residual livre, correspondente a metade do valor máximo recomendado na torneira do consumidor.

### **Cenário C1**

Ao simular a redução da qualidade inicial da água no reservatório fictício para 0,60 mg/L, observou-se que os níveis de cloro residual livre nas torneiras dos consumidores

permaneceram dentro do valor máximo recomendado, tanto hora de maior como de menor consumo.

É de notar que, durante o período de maior consumo, a concentração simulada de cloro residual livre nas torneiras de maior utilização (pontos de amostragem 3 e 4) se aproximaram significativamente do valor máximo recomendado, especificamente 0,59 mg/L. A concentração simulada de cloro residual livre nos pontos de amostragem 1 e 2 foi ligeiramente inferior, com valores de 0,54 e 0,55 mg/L, respetivamente.

Durante o período de menor consumo, a concentração simulada de cloro residual livre apresentou uma redução, sendo de 0,56 mg/L para os pontos de amostragem 3 e 4, e de 0,45 mg/L para os pontos de amostragem 1 e 2.

Em ambas as horas de consumo, não se verificaram concentrações de cloro residual livre abaixo do valor mínimo recomendado.

## **Cenário C2**

Simulando a redução de cloro residual livre no reservatório fictício para 0,30 mg/L, constatou-se que todas os pontos apresentaram concentrações dentro dos intervalos recomendados, sem se aproximarem do máximo recomendado. Contudo, é notável que, sobretudo nos pontos de amostragem 1 e 2, as concentrações aproximaram-se da mínima recomendada.

Durante o período de maior consumo, a concentração simulada de cloro residual livre nos pontos de amostragem 3 e 4 foi de 0,30 mg/L. A concentração simulada de cloro residual livre nas torneiras de menor consumo (pontos de amostragem 1 e 2) aproximou-se do mínimo recomendado, especificamente 0,28 mg/L.

Na hora de menor consumo, observou-se uma redução da concentração de cloro residual livre, no entanto, as concentrações permaneceram acima do valor mínimo recomendado. Especificamente, as concentrações para as torneiras nos pontos de amostragem 1 e 2 foram de 0,23 e 0,24 mg/L, respetivamente, e as concentrações para os pontos de amostragem 3 e 4, a concentração foi de 0,29 mg/L.

A presença de concentrações de cloro residual livre entre 0,30 e 0,60 mg/L, próximas à entrada do ISEL, demonstraram ser eficazes na redução das concentrações simuladas, que inicialmente estavam acima do valor recomendado. Além disso, estas concentrações garantem que os utilizadores do piso 2 do edifício C permaneçam

protegidos concentrações de cloro residual livre abaixo do valor mínimo recomendado, assegurando a qualidade da água e protegendo a sua saúde, ao manter a desinfecção e prevenir a contaminação microbiológica. Assim, recomenda-se que as concentrações de cloro residual livre em pontos próximos à entrada do ISEL sejam mantidas dentro do intervalo de 0,30 a 0,60 mg/L.

Os valores estatísticos das concentrações de cloro residual livre da rede de distribuição de água de ambas as instalações sanitárias para o cenário C1 e C2 encontram-se apresentados no Anexo VIII.

## 6. Conclusões e perspetivas futuras

No presente estudo foram realizadas colheitas de amostras de água, com purga e sem purga, com o objetivo de quantificar a concentração de cloro residual livre na água fornecida e estagnada, respetivamente. Os ensaios experimentais foram realizados em pontos de amostragem representativos de baixo e elevado consumo de água, a fim de verificar a conformidade da concentração de cloro residual livre com os valores legais recomendados (0,20 a 0,60 mg/L).

Foi também desenvolvido e calibrado um modelo hidráulico e de qualidade da água para a rede de distribuição de água do piso 2 do edifício C do ISEL, utilizando o programa EPANET 2.2, com o objetivo de analisar o decaimento do cloro residual livre.

Os resultados experimentais obtidos das 56 colheitas de amostras de água, realizadas nos pontos de amostragem, revelaram que:

- Nos pontos de amostragem de baixo consumo de água, 21% das amostras com purga e 43% das amostras sem purga apresentaram cloro residual livre abaixo do valor recomendado, possivelmente devido à estagnação da água nas tubagens, sugerindo um potencial risco de contaminação microbológica;
- Já os pontos de amostragem de elevado consumo de água não apresentaram concentrações abaixo do valor recomendado. Contrariamente, apresentaram concentrações de cloro residual livre acima do valor recomendado em 86% das amostras com purga e 43% das amostras sem purga, indicando risco de formação de subprodutos de desinfecção prejudiciais;
- O valor de pH (5,5) manteve-se abaixo do intervalo recomendado ( $\geq 6,5$  e  $\leq 9,5$ ). Porém, este valor não compromete a redução significativa do cloro residual livre;
- A temperatura da água permaneceu estável (em média 16,0 °C), sem afetar o decaimento do cloro residual livre.

A calibração do modelo foi realizada com medições do cloro residual com purga e pela determinação dos parâmetros hidráulicos. A calibração foi dificultada por limitações, como a necessidade de utilizar estimativas para a determinação do padrão temporal de consumo de água, resultantes da reabilitação da rede em estudo e da ausência de dados precisos sobre os utilizadores do piso 2. Além disso, a inclusão de um reservatório fictício no modelo contribuiu para as dificuldades encontradas.

Após a calibração, foram testados 6 cenários com: A1 e A2 - diferentes alturas piezométricas do reservatório; B1 e B2 - diferentes consumos nodais nos pontos de baixo consumo; C1 e C2 - diferentes concentrações de cloro residual livre na entrada da rede. Valores da constante  $k_w$  (-0,010, -0,100 e -0,150 m/d) também foram testados.

Foram realizadas 34 simulações, nas quais obteve-se as seguintes conclusões:

- O modelo encontrava-se bem calibrado, com correlações lineares positivas > 0,792;
- Não foram observadas concentrações de cloro residual livre abaixo do valor mínimo recomendado;
- As concentrações de cloro residual livre excederam o valor máximo recomendado em períodos de maior e menor consumo de água;
- De forma a resolver o problema de concentrações de cloro residual livre acima do valor máximo, garantindo a concentração mínima recomendada, foram simulados dois cenários nos quais se verificou ser recomendável que as concentrações de cloro residual livre em pontos próximos à entrada do ISEL sejam mantidas dentro do intervalo de 0,30 a 0,60 mg/L.

Para garantir concentrações adequadas de cloro residual livre, aconselha-se a renovação da água nas tubagens após longos períodos sem consumo (ex.: férias escolares) e a limpeza e desinfeção periódica das torneiras para prevenir biofilmes e sabor e odor desagradável na água. Adicionalmente, é essencial que a entidade gestora realize monitorizações regulares nas torneiras do ISEL.

Como perspetivas de trabalhos futuros propõe-se:

- Alargar a aplicação deste estudo para todo o sistema de distribuição água do ISEL, contribuindo para aprimorar a monitorização da rede e identificar zonas de abastecimento de água críticas (ex: edifícios com tubagens antigas);
- Abranger medições durante o verão, a fim de analisar o impacto das temperaturas elevadas no decaimento do cloro residual livre e no crescimento de microrganismos, que podem comprometer a qualidade da água;
- Melhorar o modelo através da integração de consumos robustos e de um reservatório real, de modo a garantir uma representação mais fiel do sistema hidráulico em estudo;
- Proceder à simulação do estudo de formação de subprodutos de desinfeção prejudiciais à saúde (ex: THM).

## Referências

- Ainsworth, R. (2004). *Safe piped water: managing microbial water quality in piped distribution systems*. World Health Organization by IWA Publishing (International Water Assoc).
- Al-Jasser, A. O. (2007). Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect. *Water Research*, 41(2), 387–396. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.032>
- Alves, C. (2010). *Tratamento de Águas de Abastecimento*. 3a Ed, Publindústria - Edições Técnicas, Porto.
- APA. (2019). *Instruções para Colheita de Amostras de Águas para Consumo Humano*. Agência Portuguesa do Ambiente. Disponível em [Instrucoes\\_Colheita\\_Amostras\\_Aguas\\_Consumo\\_Humano.pdf](#). Acedido em 10 de outubro de 2023.
- Arunkumar, M., & Mariappan, V. E. N. (2011). Water Demand Analysis Of Municipal Water Supply Using Epanet Software. *International Journal on Applied Bio-Engineering*, 5(1), 9–19. <https://doi.org/10.18000/ijabeg.10072>
- Beleza, J. (2005). Simulação Das Concentrações De Cloro Residual E Tri- Halometanos Em Redes De Distribuição De Água Para Consumo Humano. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Boccelli, D. L., Tryby, M. E., Uber, J. G., & Summers, R. S. (2003). A reactive species model for chlorine decay and THM formation under rechlorination conditions. *Water Research*, 37(11), 2654–2666. [https://doi.org/10.1016/s0043-1354\(03\)00067-8](https://doi.org/10.1016/s0043-1354(03)00067-8)
- Cambras, M. R. (2024). Diagnóstico e avaliação de um sistema abastecimento de água em município de médio porte: um estudo sobre perdas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista.
- Coelho, S. T., Loureiro, D., & Alegre, H. (2006). *Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos & Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Disponível em <http://epanet-curso.Inec.pt/artigos/GT4.pdf>. Acedido em junho de 2023.

Corporation, B. & V. (2011). *White's handbook of Chlorination and Alternative Disinfectants*. John Wiley & Sons, Inc.

Deborde, M., & von Gunten, U. (2008). Reactions of chlorine with inorganic and organic compounds during water treatment-Kinetics and mechanisms: A critical review. *Water Research*, 42 (1-2), 13–51. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.025>

Directiva 80/778/CEE do Conselho, de 15 de julho, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, nº L 229/11.

Directiva 98/83/CE do Conselho, de 3 de novembro, Jornal Oficial das Comunidades Europeias, nº L 330.

Diretiva (UE) 2015/1787 da Comissão, de 6 de outubro, Jornal Oficial da União Europeia nº L 260.

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

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

Decreto-Lei nº 69/2023, de 22 de agosto, Diário da República n.º 161, Série I.

Decreto Regulamentar nº 23/95, de 23 de agosto, Diário da República nº194, Série I-B.

EPAL (2019). *A ETA de Vale da Pedra*. Empresa Portuguesa de Águas Livres. Disponível em <https://www.epal.pt/EPAL/docs/default-source/agua/eta-vale-da-pedra.pdf?sfvrsn=2>. Acedido em 27 de abril de 2023.

EPAL (n.d.). Vídeos: Estação de Tratamento Da Asseiceira. Empresa Portuguesa de Águas Livres. Disponível em <https://www.epal.pt/EPAL/menu/epal/publica%C3%A7%C3%B5es/v%C3%ADdeos/videos/default-source/videos/estactrataaguaass>. Acedido em 27 de abril de 2023.

ERSAR (2017). *Recomendação ERSAR nº 01/2017: Procedimento para a Colheita de Amostras de Água para Consumo Humano em Sistemas de Abastecimento*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Disponível em <https://www.ersar.pt/pt/site-comunicacao/site-noticias/documents/rec-01-2017.pdf>. Acedido em 10 de outubro de 2023.

ERSAR. (2024). *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal (2024) Volume 2 - Controlo da qualidade da água para consumo humano*. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos. Disponível em <https://www.ersar.pt/pt/site-publicacoes/Paginas/edicoes-anuais-do-RASARP.aspx>. Acedido em 23 de setembro de 2024.

Ferreira, S. M. M. C. (2009). *Uso eficiente da Água em Instalações Coletivas e Similares - Contributo para a caracterização do uso e aumento da eficiência*. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.

Figueiredo, D. M. D. (2014). *Modelação do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água*. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa.

Fisher, I., Kastl, G., & Sathasivan, A. (2011). Evaluation of suitable chlorine bulk-decay models for water distribution systems. *Water Research*, 45(16), 4896–4908. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.06.032>

Frey, K., Torres, P. H. C., Jacobi, P. R., & Ramos, R. F. (2020). *Objetivos do Desenvolvimento Sustentável: Desafios para o planeamento e a governança ambiental na Macrometrópole Paulista*. Universidade Federal do ABC.

ISEL (n.d.). *Estudar no ISEL*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Disponível em <https://www.isel.pt/o-isel-apresenta-se/estudar-no-ISEL>.

ISO 5667-5:2006. *Water quality sampling – Part 5. Guidance on sampling of drinking water from treatment works and piped distribution systems*.

Javadinejad, S., Ostad-Ali-Askari, K., & Jafary, F. (2019). Using simulation model to determine the regulation and to optimize the quantity of chlorine injection in water distribution networks. *Modeling Earth Systems and Environment*, 5(3), 1015–1023. <https://doi.org/10.1007/s40808-019-00587-x>

Karadirek, I. E., Kara, S., Muhammetoglu, A., Muhammetoglu, H., & Soyupak, S. (2015). Management of chlorine dosing rates in urban water distribution networks using online continuous monitoring and modeling. *Urban Water Journal*, 13(4), 345–359. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2014.992916>

Kastl, G. J., Fisher, I. H., & Jegatheesan, V. (1999). Evaluation of chlorine decay kinetics expressions for drinking water distribution systems modelling. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 48(6), 219–226. <https://doi.org/10.2166/aqua.1999.002>

Kwio-Tamale, J. C., & Onyutha, C. (2024). Influence of physical and water quality parameters on residual chlorine decay in water distribution network. *Heliyon*, 10(10), e30892. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30892>

Li, P. (2021). Concise review on residual chlorine measurement: Interferences and possible solutions. *Journal of Cleaner Production*, 323, 129119. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129119>

Li, R. A., McDonald, J. A., Sathasivan, A., & Khan, S. J. (2019). Disinfectant residual stability leading to disinfectant decay and by-product formation in drinking water distribution systems: A systematic review. *Water Research*, 153, 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.01.020>

Liu, G., Zhang, Y., Knibbe, W. J., Feng, C., Liu, W., Medema, G., & van der Meer, W. (2017). Potential impacts of changing supply-water quality on drinking water distribution: A review. *Water Research*, 116, 135–148. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.031>

Maricato, N. M. Q. (2015). Modelação da qualidade da água de uma rede de abastecimento – Aplicada a uma zona de Castelo Branco. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Moe, C. L., & Rheingans, R. D. (2006). Global challenges in water, sanitation, and health. *Journal of Water and Health*, 4(S1), 41–57. <https://doi.org/10.2166/wh.2006.0043>

Monteiro, L., Carneiro, J., & Covas, D. I. C. (2020). Modelling chlorine wall decay in a full-scale water supply system. *Urban Water Journal*, 17(8), 754–762. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2020.1804595>

Monteiro, L., Figueiredo, D., Covas, D., & Menaia, J. (2017). Integrating water temperature in chlorine decay modelling: a case study. *Urban Water Journal*, 14(10), 1097–1101. <https://doi.org/10.1080/1573062x.2017.1363249>

- Muhammad, N. S., Shin, S. M., & Abdullah, J. (2021). Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System Using EPANET. *International Journal of Integrated Engineering*, 13(3), 94–99. <https://doi.org/10.30880/ijie.2021.13.03.011>
- Neves, L. I. P. (2016). Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água: caso de estudo Águas da Azambuja. Dissertação de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa do Instituto Politécnico de Lisboa.
- Oliveira, L. D., Reis, D. R. D., & Hoffmann, N. K. S. D. A. (2022). Decay process of free residual chlorine concentration affected by travel time in water distribution systems. *Ambiente & Água - an Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 17(3), 1–14. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2830>
- Pinheiro, R., & Wagner, G. (2001). *Upgrading Water Treatment Plants*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482295139>
- Pinto, T. M. V. (2010). Modelação e calibração de um sistema de abastecimento de água. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Powell, J. C., West, J. R., Hallam, N. B., Forster, C. F., & Simms, J. (2000). Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 126(1), 13–20. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9496\(2000\)126:1\(13\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9496(2000)126:1(13))
- Rodrigues, M. F. da S., & Scalize, P. S. (2019). Decaimento de cloro residual livre em águas distribuídas em redes de abastecimento. *Brazilian Journal of Development*, 5(9), 16366–16375. <https://doi.org/10.34117/bjdv5n9-187>
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2 Users Manual*. United States Environmental Protection Agency.
- Rossman, L. A., Clark, R. M., & Grayman, W. M. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 803–820. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9372\(1994\)120:4\(803\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9372(1994)120:4(803))
- Shi, X., Clark, G. G., Huang, C., Nguyen, T. H., & Yuan, B. (2022). Chlorine decay and disinfection by-products formation during chlorination of biofilms formed with simulated drinking water containing corrosion inhibitors. *Science of the Total Environment*, 815, 152763. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152763>

Silva, G. A. B., Meira, C. M. B. S., de Santana, C. F. D., de Amorim Coura, M., de Oliveira, R., do Nascimento, R. S., & dos Santos, W. B. (2019). Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água. *Revista DAE*, 67(218), 92–103. <https://doi.org/10.4322/dae.2019.036>

Soares, S. S., Arruda, P. N., Lobón, G. S., & Scalize, P. S. (2016). Avaliação de métodos para determinação de cloro residual livre em águas de abastecimento público. *Semina: Ciências Exatas E Tecnológicas*, 37(1), 119. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2016v37n1p119>

Baird, R., Eaton, A. D., Rice, E. W., Bridgewater, L., & Water Environment Federation. (2017). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association.

Stefán, D., Erdélyi, N., Izsák, B., Záray, G., & Vargha, M. (2019). Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination. *Microchemical Journal*, 149, 104008. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.104008>

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. *Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua*, 53(7), 453–467. <https://doi.org/10.2166/aqua.2004.0036>

Walski, T. M. (2006). A history of water distribution. *Journal - American Water Works Association*, 98(3), 110–121. <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2006.tb07611.x>

WHO. (2011). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization. Disponível em <https://www.who.int/publications/i/item/9789241549950>. Acedido em 11 de março de 2023.

Zaghini, A., Gagliardi, F., Marsili, V., Mazzoni, F., Tirello, L., Stefano Alvisi, & Franchini, M. (2024). A Pragmatic Approach for Chlorine Decay Modeling in Multiple-Source Water Distribution Networks Based on Trace Analysis. *Water*, 16(2), 345–345. <https://doi.org/10.3390/w16020345>

## **Anexos**

**Anexo I - Certificado de comunicação na 9ª Edição do Fórum de Engenharia Química e Biológica**



# Anexo II – Comunicação em painel apresentada na 9ª Edição do Fórum de Engenharia Química e Biológica



## ESTUDO DO DECAIMENTO DE CLORO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUAS

Fernandes P.<sup>1</sup>, Santos M.T.<sup>1,2</sup>, Trindade T.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>CERNAS - Centro de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade, Coimbra, Portugal

Correspondência: patriciaalexandras@gmail.com

### RESUMO

A cloração é o processo de desinfecção de água potável mais utilizado. Para garantir a qualidade da água que chega às torneiras dos consumidores, a concentração de cloro residual livre deve ser mantida dentro de um limite padrão. No entanto, existem valores de cloro residual desinfetante na torneira do consumidor abaixo do limite mínimo, contribuindo para um potencial risco para a saúde pública. Este facto, justifica a importância e necessidade de se realizar estudos de avaliação ao decaimento do cloro na teste de distribuição de água. O presente trabalho tem como objetivo estudar o decaimento de cloro residual livre no sistema de distribuição de água potável do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Para tal, pretende-se efetuar a monitorização das características da água em diferentes pontos ao longo da rede de distribuição. Serão efetuadas amostragens de água e quantificação laboratorial de cloro residual livre, pH, temperatura e caudal. Adicionalmente, propõe-se desenvolver um modelo cinético para o decaimento de cloro residual na rede de distribuição utilizando o *software* EPANET. Através da construção e calibração de um modelo hidráulico e de qualidade da água do sistema de distribuição, poder-se-á determinar se a água fornecida ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa apresenta uma concentração adequada em cloro residual livre.

### INTRODUÇÃO

A cloração é uma das etapas tecnológicas mais utilizadas no tratamento de água potável [1]. Uma das características que prevalece na escolha do cloro como agente químico desinfetante é a sua capacidade de manter uma concentração residual ao longo da rede de distribuição, contribuindo, assim, para a inativação e prevenção da proliferação de microrganismos nocivos e/ou patogénicos [2].

De modo a prevenir a inadequada qualidade da água que chega às torneiras dos consumidores, deverá ser assegurada uma concentração efetiva de cloro disponível em qualquer ponto do sistema de distribuição, designada por cloro residual livre [2]. De acordo com a legislação portuguesa, a concentração de cloro residual deve encontrar-se entre 0,2 e 0,6 mg/L [3].

Ao longo da rede de distribuição de água potável, ocorrem inúmeras transformações químicas que reduzem a concentração de cloro residual livre. Esta redução da concentração de cloro residual pode ser justificada pela intervenção, direta ou indireta, de diversos fatores, nomeadamente, temperatura, pH, matéria orgânica, espécies interativas (por exemplo, produtos resultantes da corrosão), tempo de percurso, condição hidráulica, materiais das tubagens, entre outros [5,6].

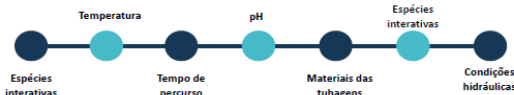


Figura 1. Fatores que influenciam a estabilidade do cloro residual livre

A concentração de cloro residual livre na água e os restantes fatores que influenciam a sua estabilidade, são considerados parâmetros importantes da qualidade da água, que devem ser modelados, de modo a garantir que a qualidade da água se encontra dentro de limites apropriados [7]. O EPANET é um *software* que permite modelar sistemas de distribuição de água através da simulação numérica do desempenho hidráulico e da qualidade da água em redes de tubagem pressurizada, que consistem em tubulações, nós (junções), bombas, válvulas, tanques de armazenamento e reservatórios [8,9]. Desde a década de 1990, vários estudos têm utilizado o EPANET para estimar a concentração de cloro residual livre que permanece ao longo dos sistemas de distribuição de águas [10].

### OBJETIVO

O presente trabalho de investigação apresenta como objetivo o estudo ao decaimento de cloro na rede de distribuição de água do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). Pretende-se monitorizar a água em diferentes pontos ao longo da rede de distribuição através da quantificação laboratorial de parâmetros relevantes para caracterizar a qualidade da água. Adicionalmente, pretende-se desenvolver um modelo cinético para o decaimento do cloro na rede de distribuição de água usando o *software* EPANET.

### AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa pela disponibilização das plantas da rede de distribuição de água.

### REFERÊNCIAS

- [1] Steffán, D., Erdélyi, N., Izsek, B., Záray, G., Vargha, M. Formation of chlorination by-products in drinking water treatment plants using breakpoint chlorination. *Microchemical Journal*, 2019, 149, 104008.
- [2] Javadinajad, S., Ostad-Ali-Askari, K., Jafari, F. Using simulation model to determine the regulation and to optimize the quantity of chlorine injection in water distribution networks. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2019, 5(3), 1015–1023.
- [3] Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de Agosto, Diário da República, N.º 164, Série I-A.
- [4] Martins, A., Rosa, J., Guerreiro, S. Volume 2 – Controlo da qualidade da água para consumo humano in Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal. Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos, Lisboa, 2022.
- [5] Li, R. A., McDonald, J. A., Sathisayan, A., Khan, S. J. Disinfectant residual stability leading to disinfectant decay and by-product formation in drinking water distribution systems: A systematic review. *Water Research*, 2019, 155, 335–340.
- [6] Trinh, Q. T., Bai Krishna, K. C., Salihi, A., Litowski, A., Sathisayan, A. Biofilm growth on PVC and HDPE pipes impacts chlorine stability in the recycled water. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020, 6(6), 104476.
- [7] Ajaz, M.; Ahmad, D. Optimal Water Quality Simulation of the Proposed Water Distribution System for the University of Kashmir Using EPANET 2.2 and Leakage Modelling of the Network Using EPANET Extension WaterNetGen. *Environmental Sciences Proceedings*, 2023, 25(1), 27.
- [8] Fardal, A., Noshadi, M., Measoudi, M. H. Analysis of Drinking Water Distribution Network Using EPANET Model (Case Study: Part of Shiraz Water Distribution Network). *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 2022, 1-9.
- [9] Rossmann, L.; Wood, H.; Thyby, M.; Shang, F.; Janke, R.; Haxton, T. EPANET 2.2 User Manual. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2020.
- [10] N. S. Muhammad, S. M. Shin, J. Abdullah. Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System Using EPANET. *International Journal of Integrated Engineering*, 2021, 13(3), 94-99.

### MEDOLOGIA EXPERIMENTAL

O desenvolvimento do trabalho de investigação proposto é efetuado de acordo com as seguintes etapas:

- Levantamento das características, designadamente, comprimento, diâmetro e materiais das tubagens, da rede de distribuição de água do ISEL e exportação do AutoCad ou plantas.



Figura 1. Exemplo de um troço do sistema de distribuição de água do ISEL (Edifício 7, Piso 0).

Tabela 1. Diâmetros das tubagens da rede de distribuição de água do ISEL (Edifício 7, Piso 0)

Designação	Diâmetro (mm)
DN15	15
DN20	20
DN25	25

Tabela 2. Materiais das tubagens da rede de distribuição de água do ISEL (Edifício 7, Piso 0)

Designação	Materiais
Redes interiores	PEX
	Aço Inoxidável
Redes exteriores	PEAD tipo "Politejo" ou equivalente

- Seleção dos pontos de monitorização na rede de distribuição de água com diferentes condições hidráulicas, designadamente, pontos de maior e menor consumo, extremos da rede e pontos intermédios ou de percurso.
- Amostragem de água, medição do caudal, temperatura, pH e concentração de cloro residual livre.
- Construção e calibração do modelo numérico de simulação hidráulica e de qualidade da água na rede de distribuição do ISEL (EPANET 2.2.) [9].

A quantificação laboratorial das amostras de água é realizada através dos seguintes métodos analíticos:

- Caudal, através da medição do volume e do tempo.
- Cloro residual livre, através da aplicação do *DPD Colorimetric Method* por meio de leitura do espectrofotómetro.
- pH, com recurso à medição por método eletroquímico.
- Temperatura, através da utilização de um termómetro digital.

### CONCLUSÕES FUTURAS

O presente estudo que ainda se encontra em desenvolvimento, pretende contribuir para um conhecimento detalhado do decaimento de cloro residual livre em redes de distribuição de água potável. Serão produzidos os seguintes conteúdos genéricos:

1. Quantificação laboratorial de parâmetros relevantes para o decaimento de cloro na rede de distribuição de água.
2. Construção e calibração de um modelo hidráulico e de qualidade da água do sistema de distribuição em estudo.
3. Comparação da concentração de cloro residual livre da água com os limites padrão definidos pela legislação portuguesa.

**Anexo III - Certificados de participação e de apresentação na 14<sup>th</sup>  
International Chemical and Biological Engineering Conference**



14<sup>th</sup> International Chemical and Biological  
Engineering Conference

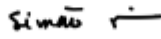
## Certificado de Participação

Certifica-se que

**Patrícia Alexandra da Silva Fernandes**

participou na *14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference* que decorreu no Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, de 12 a 15 de setembro de 2023.

**Presidentes da Comissão Organizadora**

  
Simão P. Pinho

  
Filomena Barreiro



ORDEM  
DOS  
ENGENHEIROS





14<sup>th</sup> International Chemical and Biological  
Engineering Conference

## Certificado de Apresentação

Certifica-se que

**Patrícia Alexandra da Silva Fernandes**

apresentou a Comunicação em Painel

**Chlorine decay in water treatment and distribution**

*Patrícia Fernandes, Maria Teresa Santos, Teodoro Trindade*

na *14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering  
Conference* que decorreu no Instituto Politécnico de Bragança,  
Portugal, de 12 a 15 de setembro de 2023.

Presidentes da Comissão Organizadora

Handwritten signature of Simão P. Pinho in black ink.

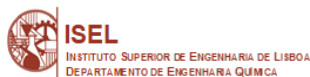
Simão P. Pinho

Handwritten signature of Filomena Barreiro in black ink.

Filomena Barreiro



# Anexo IV - Comunicação em painel apresentada na 14<sup>th</sup> International Chemical and Biological Engineering Conference



## Chlorine decay in water treatment and distribution

Fernandes P.<sup>1,\*</sup>, Santos M.T.<sup>1,2</sup>, Trindade T.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>CERNAS - Centro de Recursos Naturais, Ambiente e Sociedade, Coimbra, Portugal

\*patriciaalexandras@gmail.com

### ABSTRACT

Chlorination is the most used disinfection process of drinking water. In order to ensure the quality of the water that reaches consumers taps, the amount of chlorine added to the water must be kept within a standard range. However, there are values of residual chlorine disinfectant in the consumer tap below the minimum limit, being a potential public health risks. In this way, it is relevant to carry out a field study of the decay of chlorine in real water distribution grids. This research work aims to study chlorine decay in the water distribution network of building C of the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. It is intended to determine the variation on water chlorine content and conclude whether the water supplied has the adequate residual chlorine concentration according to the standards. It is also intended to identify corrective and preventive measures for possible areas with low concentrations of residual chlorine.

To achieve the desired goal, water sampling and laboratorial quantification of flow, temperature, and residual chlorine are carried out. Additionally, it was built and calibrated a numerical hydraulic water quality model of the water distribution network.

### ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.

### REFERENCES

- [1] D. Stefán, et al., Microchemical Journal, 149 (2019) p. 104008.
- [2] Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de Agosto, Diário da República, N.º 164, Série I-A.
- [3] S. Javadinejad, K. Ostad Ali Askari and F. Jafari, Modeling Earth Systems and Environment, 5 (2019) p. 1015-1023.
- [4] R. A. Li, et al., Water research, 153 (2019) p. 335-348, 2019.
- [5] Ajaz, M, et al., Environmental Sciences Proceedings. 25(1) (2023), p.27.
- [6] Rossman, L, et al., EPANET 2.2 User Manual, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, 2020, p.1.

### INTRODUCTION

The chlorination stands as one of the most frequently employed technological stages in the treatment of drinking water. The main goal of chlorination is the prevention of pathogenic microorganism proliferation, prior to feed the treated water into the distribution network [1]. In order to ensure the quality of water that reaches consumers tap, according to the portuguese legislation [2], the amount of chlorine added to the water must be kept within a standard range. This amount of chlorine is defined as free residual chlorine [3].

Numerous chlorine reactions in water occur that reduces the concentration of free residual chlorine, presenting potential public health risks. These reactions are related to the chemical, microbiological and physical characteristics of the water, as well as the materials that make up the pipe through which the water flows such as, temperature, pH, organic matter, pipe materials, etc [4].

The concentration of free residual chlorine and the other factors that influence its stability, are considered important parameters of water quality, can be modeled numerically to estimate the water quality at the different network consumers taps [5]. The software EPANET 2.2. has been used in the present research to evaluate the chlorine that remains in the water distribution system after chlorination. EPANET 2.2. is a free software that performs an extended period numerical simulation of water hydraulic behavior and quality in pressurized pipe networks [6].

### MATERIALS AND METHODS

The present research work aims to study chlorine decay in the water distribution network of building C of the Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL). This building has an area of 2.155 m<sup>2</sup> with 7 floors, consisting of classrooms, laboratories, offices and an auditorium. It is planned to monitor different points along the network through water sampling and laboratory quantification of selected parameters (residual chlorine, pH, temperature and flow). Additionally, it is proposed to develop a kinetic model for the decay of chlorine in the water distribution network using the EPANET 2.2. software. Through the construction and calibration of a hydraulic and water quality model of the distribution system, it is intended to determine the variation of chlorine and conclude whether the water supplied has the adequate residual chlorine concentration according to portuguese standards. It is also intended to identify corrective and preventive measures for areas having low concentrations of residual chlorine.

For the development of the research work, these were the followed steps:

- 1 Analysis of the ISEL water distribution network and export from AutoCad (Figure 1).
- 2 Survey of characteristics of the ISEL water distribution network (Table 1).



Figure 1. Section of Building C, Floor -2 from ISEL water distribution system in: a) AutoCad and b) EPANET 2.2.

Table 1. Survey of the length and diameter characteristics of a section of Building C, Floor -2 from ISEL water distribution system

Designation	Length (m)	Diameter (mm)
Pipe A	0.1889	15
Pipe B	4.0791	15
Pipe C	2.4434	15
Pipe D	0.2353	15

- 3 Selection of monitoring points in the water distribution network with different hydraulic conditions.
- 4 Laboratorial quantification of the following parameters:

- Residual chlorine, by applying the DPD Colorimetric Method with spectrophotometer readings (Figure 2).
- The spectrophotometer is calibrated by presenting a series of standards and observing the transmission of light, applying a specific wavelength (530nm).
- The calibration curve will have values between 0 and 2 mg/L Cl.
- pH, by applying the electrochemical method.
- Temperature, using a digital thermometer (on site measurement).
- Flow rate, by measuring volume and time (on site measurement)



Figure 2. Visible spectrophotometer (GENESIS 20)

- 5 Construction and calibration of a numerical model for hydraulic simulation and water quality of the selected water distribution network.

### CONCLUSIONS

The research work is being developed as the experimental part of a dissertation to obtain a Master's degree. The present study aims to contribute to a detailed knowledge of the decay of free residual chlorine in drinking water distribution networks. The building has an average of 25 valves per floor that were monitoring points for measuring free residual chlorine.

This work is still under development.

# Anexo V – Manual de Instruções HI701 Cloro Livre Hanna Instruments

## Sugestões para uma medição precisa

- É importante que o amostra não contenha depósitos.
- Sempre que a cuvette é colocada na célula de medição, deve estar seca exteriormente e não apresentar quaisquer impressões digitais, gordura ou sujidade. Antes de colocar a cuvette, limpe-a bem com um pano HI731318 ou um pano sem pelos.
- Agitar a cuvette pode gerar bolhas, provocando leituras mais elevadas. Para obter resultados precisos, remova tais bolhas agitando circularmente ou batendo cuidadosamente na cuvette.
- Não deixe a amostra repousar muito tempo após a adição de reagente, pois a precisão será afetada.
- Deixe a amostra fora imediatamente após realizar a leitura ou o vidro pode ficar permanentemente manchado.



## Gestão da energia

Para poupar a pilha, o instrumento desliga-se após 2 minutos de inatividade. Uma pilha nova dura um mínimo de 5000 medições. Quando a pilha se esgota, o instrumento apresenta "bAd" e, em seguida, "bAL" durante 1 segundo e desliga-se.

Para reiniciar o instrumento, a pilha deve ser substituída por uma nova.

Para substituir a pilha do instrumento:

- Desligue o instrumento mantendo o botão premido até que o medidor se desligue.
- Vire o instrumento ao contrário e retire a tampa do compartimento da pilha com uma chave-de-parafusos.



- Retire a pilha e substitua-a por uma nova, inserindo a extremidade de polo negativo primeiro.
- Insira a tampa do compartimento das pilhas e aperte o parafuso.

## Recomendações de Utilização

Antes de utilizar este produto, certifique-se da sua total adequação à sua aplicação específica e ao ambiente em que o vai usar. Qualquer alteração a este instrumento introduzido pelo utilizador pode resultar na degradação do desempenho do medidor. Para evitar danos ou queimaduras, não coloque o Medidor no forno micro-ondas. Para sua segurança e do medidor, não utilize nem armazene o medidor em ambientes perigosos.

## Acessórios

Conjuntos de reagentes

HI701-25	Reagentes para 25 testes de Cloro Livre
Outros acessórios	
HI701-11	Estajo de padrões certificados para Cloro Livre
HI731225	Tampa preta para cuvette para colorímetros Checker® HC (4 un.)
HI731318	Pano para limpeza de cuvetes (4 un.)
HI731321	Cuvete em vidro e vedante de tampa para colorímetros Checker® HC (4 un.)
HI740028P	Pilhas de 1.5V AAA (12 un.)
HI93703-50	Solução de limpeza para cuvetes (230 ml)

## Garantia

O HI701 possui garantia de um ano contra defeitos de fabrica e em materiais, desde que utilizado para o fim previsto e se proceda à sua manutenção do modo indicado nas instruções. Esta garantia limita-se à sua reparação ou substituição sem encargos. Os danos resultantes de acidentes, uso indevido, adulteração ou falta de manutenção recomendada não estão cobertos pela garantia. Caso seja necessária assistência técnica, contacte a Hanna Instruments. Se em garantia, indique o número do modelo, data de aquisição, número de série e a natureza do problema. Se a reparação não se encontrar ao abrigo da garantia, será notificado dos custos decorrentes. Caso pretenda enviar o instrumento à Hanna Instruments, obtenha primeiro uma autorização junto do Departamento de Apoio a Clientes. Proceda depois ao envio, com todos os portes pagos. Quando expedir qualquer equipamento, certifique-se que está corretamente embalado, bem acondicionado e protegido.

IST701 06/18

## MANUAL DE INSTRUÇÕES

### HI701 Cloro Livre



## Estimado cliente,

Obrigado por escolher um produto Hanna Instruments. Por favor leia este manual de instruções cuidadosamente, antes de utilizar o colorímetro portátil Checker®. Para mais informações sobre a Hanna Instruments e os nossos produtos, visite [www.hanna.pt](http://www.hanna.pt) ou contacte-nos para [info@hanna.pt](mailto:info@hanna.pt). Para obter assistência técnica, contacte a Assistência Técnica Hanna Instruments ou envie um e-mail para [assistencia@hanna.pt](mailto:assistencia@hanna.pt).

## Exame preliminar

Por favor examine este produto atentamente. Assegure-se que o instrumento não está danificado. Se detetar quaisquer danos, contacte imediatamente o Apoio a Clientes Hanna Instruments.

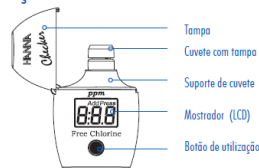
Cada HI701 é fornecido com:

- Cuvete de amostra com tampa (2 un.)
- Reagentes para 6 testes
- Pilha de 1.5V AAA (1 un.)
- Manual de instruções e Guia rápido de utilização

## Especificações

Gama	0.00 a 2.50 ppm
Resolução	0,01 ppm
Precisão	±0.03 ppm ±3% da leitura @25 °C/77 °F
Fonte de luz	Diodo emissor de luz @ 525 nm
Detetor de luz	Fotocélula de silício
Método	Adaptação método USEPA 8330.5 A reação entre o Cloro e o reagente DPD origina uma coloração rosa na amostra.
Ambiente de utilização	0 to 50 °C (32 to 122 °F); HR máx. 0 a 95% sem condensação
Tipo de pilha	1.5V AAA (1 un.)
Desligar automático	Após 2 minutos de inatividade
Dimensões	86 x 61 x 37.5 mm
Peso	52 g

## Descrição funcional



## Erros e Avisos



**Demasiada luz:** Existe luz em demasia para realizar uma medição. Por favor verifique a preparação da cuvette zero.



**Pouca luz:** Não existe luz suficiente para realizar uma medição. Por favor verifique a preparação da cuvette de zero.



**Cuvetes trocadas:** As cuvetes de amostra e de zero estão trocadas.



**Abaixo da gama:** Um "0.00" intermitente indica que a amostra absorve menos luz do que a referência zero. Verifique o procedimento e assegure-se que utiliza a mesma cuvette para a referência (zero) e medição.



**Acima da Gama:** Um valor da concentração máxima o intermitente indica que a medição se encontra acima de gama. Dilua a amostra e volte a realizar a teste.



**Baixa carga de energia (Battery Low):** As pilhas devem ser substituídas em breve.



**Pilha esgotada:** Isto indica que a pilha está esgotada e que deve ser substituída. Quando é apresentada esta indicação, é interrompido o funcionamento normal do instrumento. Substitua a pilha e volte a ligar o medidor.



## Procedimento de Medição

- Ligue o medidor premindo o botão. Todos os segmentos são exibidos. Quando o ecrã apresenta "Add", "C1" com "Press" a intermitente, o medidor está pronto a ser utilizado.



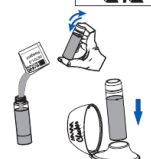
- Encha a cuvette com 10 ml de amostra não reagida e volte a colocar a tampa. Coloque a cuvette no medidor e feche a tampa do medidor.



- Prima o botão. Quando aparece "Add", "C2" com "Press" a intermitente no ecrã, o medidor realizou o zero.



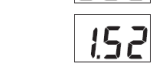
- Retire a cuvette no medidor e retire-lhe a tampa. Adicione o conteúdo de uma saqueta de reagente HI701-0. Volte a colocar a tampa e agite cuidadosamente, durante 20 segundos. Volte a substituir a cuvette no medidor.



- Prima e mantenha premido o botão, até que o temporizador seja apresentado no LCD (o ecrã apresentará a contagem decrescente anterior à medição) ou, em alternativa, aguarde 1 minuto e prima o botão.



- O instrumento indica a concentração de Cloro livre em ppm. O medidor desliga-se automaticamente após 2 minutos.



A Hanna Instruments reserva-se o direito de modificar o desenho, construção e aparência dos seus produtos sem aviso prévio.

## Anexo VI – Resultados de cloro residual livre, pH e temperatura (T) nos pontos de amostragem

**Tabela VI.1.** Resultados de cloro residual livre, pH e T nos pontos de amostragem

Data da colheita	Hora de colheita	Ponto de amostragem	Cloro residual livre (ppm)	pH	Temperatura (°C)	Apreciação ponto de amostragem (colocar OK ou NOK)		
06/12/2023	19h15	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,09	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,61	5,5	16		
06/12/2023	19h30	Torneira da IS masculina (junto à porta) *2	Sem purga	0,56	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,62	5,5	16		
06/12/2023	18h35	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,54	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,61	5,5	16		
06/12/2023	18h50	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,38	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,62	5,5	16		
07/12/2023	19h05	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,45	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,76	5,5	16		
07/12/2023	19h25	Torneira da IS masculina (junto à porta) *2	Sem purga	0,55	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,70	5,5	16		

**Tabela VI.1.** Resultados de cloro residual livre, pH e T nos pontos de amostragem (continuação)

Data da colheita	Hora de colheita	Ponto de amostragem	Cloro residual livre (ppm)	pH	Temperatura (°C)	Apreciação ponto de amostragem (colocar OK ou NOK)		
07/12/2023	18h25	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,39	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,65	5,5	16		
07/12/2023	18h35	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,44	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,61	5,5	16		
12/12/2023	19h15	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,17	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,11	5,5	17		
12/12/2023	19h30	Torneira da IS masculina (junto à porta) *2	Sem purga	0,63	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,58	5,5	17		
12/12/2023	19h45	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,38	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,60	5,5	17		
12/12/2023	19h55	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,27	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,64	5,5	17		
13/12/2023	17h30	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,68	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,65	5,5	17		

**Tabela VI.1.** Resultados de cloro residual livre, pH e T nos pontos de amostragem (continuação)

Data da colheita	Hora de colheita	Ponto de amostragem	Cloro residual livre (ppm)	pH	Temperatura (°C)	Apreciação ponto de amostragem (colocar OK ou NOK)		
13/12/2023	17h40	Torneira da IS masculina (junto à porta)	Sem purga	0,67	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,67	5,5	17		
13/12/2023	16h55	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,11	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,43	5,5	17		
13/12/2023	17h15	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,72	5,5	18	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,60	5,5	17		
18/12/2023	19h00	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,35	5,5	16	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,59	5,5	15		
18/12/2023	19h15	Torneira da IS masculina (junto à porta)	Sem purga	0,38	5,5	16	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,72	5,5	15		
18/12/2023	19h30	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,00	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,58	5,5	16		
18/12/2023	19h45	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,62	5,5	16	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,64	5,5	15		
19/12/2023	18h50	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina *1	Sem purga	0,18	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,17	5,5	16		

**Tabela VI.1.** Resultados de cloro residual livre, pH e T nos pontos de amostragem (continuação)

Data da colheita	Hora de colheita	Ponto de amostragem	Cloro residual livre (ppm)	pH	Temperatura (°C)	Apreciação ponto de amostragem (colocar OK ou NOK)		
19/12/2023	19h05	Torneira da IS masculina (junto à porta)	Sem purga	0,45	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,62	5,5	15		
19/12/2023	19h15	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,40	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,65	5,5	15		
19/12/2023	19h30	Torneira da IS feminina (junto à porta)	Sem purga	0,70	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,63	5,5	15		
20/12/2023	18h20	Torneira da IS de portadores de deficiência masculina	Sem purga	0,55	5,5	16	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,72	5,5	15		
20/12/2023	18h30	Torneira da IS masculina (junto à porta) *2	Sem purga	0,67	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,70	5,5	15		
20/12/2023	17h50	Torneira da IS de portadores de deficiência feminina *1	Sem purga	0,02	5,5	17	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,14	5,5	15		
20/12/2023	18h05	Torneira da IS feminina (junto à porta) *2	Sem purga	0,54	5,5	15	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,68	5,5	15		
19/12/2023	19h55	Torneira junto à entrada do ISEL	Sem purga	0,00	5,5	16	<b>Água:</b> OK cor esbranquiçada/turva (formação de pequenas bolhas) OK cor castanha/avermelhada OK cheiro	<b>Torneira:</b> OK água fria OK conservação e higiene
			Com purga	0,66	5,5	16		

**Observações:**

\*1 Torneira/bidé seco/sem gotas de água

\*2 IS utilizada durante a colheita

**Legenda:**

IS – Instalação Sanitária

**Tabela VI.2.** Análises estatísticas dos resultados da amostragem sem purga

Sem purga								
Ponto de amostragem	N.º de análises realizadas	Concentração de cloro residual livre (mg/L)				N.º de análises em incumprimento <sup>1</sup>	% de amostras abaixo do valor mínimo <sup>1</sup>	% de amostras acima do valor máximo <sup>1</sup>
		Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão			
1	7	0,00	0,38	0,54	0,21	3	42,86	0,00
2	7	0,09	0,35	0,68	0,22	4	42,86	14,29
3	7	0,38	0,56	0,67	0,11	3	0,00	42,86
4	7	0,27	0,54	0,72	0,18	3	0,00	42,86

<sup>1</sup> Conforme o Decreto-Lei nº 69/2023, de 21 de agosto.

**Tabela VI.3.** Análises estatísticas dos resultados da amostragem com purga

Com purga de 2,5 min								
Ponto de amostragem	N.º de análises realizadas	Concentração de cloro residual livre (mg/L)				N.º de análises em incumprimento <sup>1</sup>	% de amostras abaixo do valor mínimo <sup>1</sup>	% de amostras acima do valor máximo <sup>1</sup>
		Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão			
1	7	0,14	0,60	0,65	0,18	4	14,29	42,86
2	7	0,11	0,61	0,76	0,26	6	28,57	57,14
3	7	0,58	0,67	0,72	0,05	6	0,00	85,71
4	7	0,60	0,63	0,68	0,02	6	0,00	85,71

<sup>1</sup> Conforme o Decreto-Lei nº 69/2023, de 21 de agosto.

## Anexo VII – Determinação dos parâmetros hidráulicos para calibração do modelo no EPANET

**Tabela VII.1.** Consumos em cada nó e caudais em cada tubagem de um troço da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas				
Nó		Tubagem		
Nó	Caudal instantâneo (L/s)	Tubo	Caudal acumulado (L/s)	Caudal de cálculo (L/s)
Torneira_ISM	0,1000	p23	0,1000	0,1000
Ponto 3	0,0780	p24	0,0780	0,0780
Lavatório_2_ISM	0,0649	p25	0,0649	0,0649
Lavatório_3_ISM	0,0523	p26	0,0523	0,0523
Lavatório_4_ISM	0,1126	p27	0,1126	0,1126
Urinol_1_ISM	0,1000	p21	0,1000	0,1000
Urinol_2_ISM	0,1000	p22	0,1000	0,1000
12	0,0000	p11	0,6078	0,4235
11	0,0000	p9	0,6078	0,4235
Urinol_3_ISM	0,1000	p17	0,1000	0,1000
Urinol_4_ISM	0,1000	p18	0,1000	0,1000
Urinol_5_ISM	0,1000	p19	0,1000	0,1000
Urinol_6_ISM	0,1000	p20	0,1000	0,1000
Sanita_1_ISM	0,1000	p14	0,1000	0,1000
Sanita_2_ISM	0,1000	p15	0,1000	0,1000
Sanita_3_ISM	0,1000	p16	0,1000	0,1000
10	0,0000	p10	0,7000	0,4554
9	0,0000	p8	1,3078	0,6279
8	0,0000	p7	1,3078	0,6279
7	0,0000	p6	1,3078	0,6279
Ponto 2	0,0997	p13	0,0997	0,0997
Sanita_ISM_PD	0,1000	p12	0,1000	0,1000
6	0,0000	p5	1,5075	0,6755
5	0,0000	p4	1,5075	0,6755
4	0,0000	p3	1,5075	0,6755
3	0,0000	Válvula_ISM_PD	1,5075	0,6755
2	0,0000	p2	1,5075	0,6755
1	0,0000	Tubagem_ISEL	1,5075	0,6755
Ponto_Entrada_ISEL	0,0000	Tubagem_Ficticia	1,5075	0,6755

**Tabela VII.2.** Consumos em cada nó e caudais em cada tubagem de um troço da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas				
Nó		Tubagem		
Nó	Caudal instantâneo (L/s)	Tubo	Caudal acumulado (L/s)	Caudal de cálculo (L/s)
Torneira ISF	0,1000	p19	0,1000	0,1000
Ponto4	0,2280	p18	0,2280	0,2280
Lavatório 2 ISF	0,0931	p17	0,0931	0,0931
Lavatório 3 ISF	0,0958	p16	0,0958	0,0958
Lavatório 4 ISF	0,0732	p15	0,0732	0,0732
Lavatório 5 ISF	0,0949	p14	0,0949	0,0949
Lavatório 6 ISF	0,0941	p13	0,0941	0,0941
n10	0,0000	p21	0,7791	0,4811
Sanita 1 ISF	0,1000	p12	0,1000	0,1000
Sanita 2 ISF	0,1000	p11	0,1000	0,1000
Sanita 3 ISF	0,1000	p10	0,1000	0,1000
Sanita 4 ISF	0,1000	p9	0,1000	0,1000
n9	0,0000	p8	1,1791	0,5953
n8	0,0000	p7	1,1791	0,5953
n7	0,0000	p20	1,1791	0,5953
Ponto1	0,0983	p6	0,0983	0,0983
Sanita ISF_PD	0,1000	p5	0,1000	0,1000
n6	0,0000	p4	1,3774	0,6449
n5	0,0000	p3	1,3774	0,6449
n4	0,0000	p2	1,3774	0,6449
n3	0,0000	Válvula ISF_PD	1,3774	0,6449
n2	0,0000	Tubagem ISEL	1,3774	0,6449
Ponto_Entrada_IS EL	0,0000	Tubagem_Fictici a	1,3774	0,6449

**Tabela VII.3.** Perda de carga contínua em cada tubagem da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas, com coeficiente da fórmula de Hazen-Williams de 145 e com expoente de caudal igual a 1,852

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas				
Tubo	Comprimento da tubagem (m)	Diâmetro da tubagem (m)	Caudal (L/s)	Perda de carga contínua (m)
p23	4,50	0,0120	0,1000	0,4236
p24	3,90	0,0120	0,0780	0,2317
p25	2,90	0,0120	0,0649	0,1226
p26	1,90	0,0120	0,0523	0,0539
p27	0,80	0,0120	0,1126	0,0938
p21	1,70	0,0160	0,1000	0,0394
p22	1,90	0,0160	0,1000	0,0441
p9	3,80	0,0200	0,4235	0,4304
p11	1,36	0,0200	0,4235	0,1535
p17	2,30	0,0160	0,1000	0,0533
p18	1,70	0,0160	0,1000	0,0394
p19	1,20	0,0160	0,1000	0,0278
p20	0,80	0,0160	0,1000	0,0185
p14	4,00	0,0120	0,1000	0,3766
p15	2,60	0,0120	0,1000	0,2448
p16	1,10	0,0120	0,1000	0,1036
p10	0,51	0,0200	0,4554	0,0657
p8	0,30	0,0250	0,6279	0,0238
p7	0,24	0,0320	0,6279	0,0057
p6	0,30	0,0320	0,6279	0,0071
p13	2,80	0,0120	0,0997	0,2621
p12	0,90	0,0120	0,1000	0,0847
p5	1,40	0,0320	0,6755	0,0381
p4	0,40	0,0320	0,6755	0,0110
p3	0,23	0,0320	0,6755	0,0061
p2	0,26	0,0400	0,6755	0,0024
<b>Tubagem ISEL</b>	<b>110,00</b>	<b>0,1100</b>	<b>0,6755</b>	<b>0,0073</b>
<b>Tubagem Fictica</b>	<b>10,00</b>	<b>0,1100</b>	<b>0,6755</b>	<b>0,0007</b>

**Tabela VII.4.** Perda de carga contínua em cada tubagem da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas, com coeficiente da fórmula de Hazen-Williams de 145 e com expoente de caudal igual a 1,852

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas				
Tubo	Comprimento da tubagem (m)	Diâmetro da tubagem (m)	Caudal (L/s)	Perda de carga contínua (m)
p19	5,70	0,0200	0,1000	0,0446
p18	5,20	0,0120	0,2280	2,2524
p17	4,40	0,0120	0,0931	0,3631
p16	3,50	0,0120	0,0958	0,3045
p15	2,60	0,0120	0,0732	0,1375
p14	1,60	0,0120	0,0949	0,1366
p13	0,70	0,0120	0,0941	0,0589
p21	3,00	0,0250	0,4811	0,1451
p12	4,30	0,0120	0,1000	0,4048
p11	3,00	0,0120	0,1000	0,2824
p10	1,90	0,0120	0,1000	0,1789
p9	1,10	0,0120	0,1000	0,1036
p8	0,98	0,0250	0,5953	0,0700
p7	0,22	0,0250	0,5953	0,0154
p20	0,67	0,0250	0,5953	0,0477
p6	2,80	0,0120	0,0983	0,2551
p5	0,97	0,0120	0,1000	0,0913
p4	1,00	0,0250	0,6449	0,0832
p3	0,40	0,0250	0,6449	0,0337
p2	0,23	0,0250	0,6449	0,0188
Tubagem_ISEL	110,00	0,1100	0,6449	0,0067
Tubagem_Ficticia	10,00	0,1100	0,6449	0,0006

**Tabela VII.5.** Pressão em cada nó da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas, com valores de nível de água do reservatório fítico igual a 110 m

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas							
Troços	Perda de carga (m)	Altura piezométrica (m)		Altura do terreno (m)		Pressão (m.c.a)	
		Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
12 - Torneira_ISM	0.4236	109.32	108.90	81.27	81.27	28.05	27.63
12 - Ponto 3	0.2317	109.32	109.09	81.27	81.27	28.05	27.82
12 - Lavatório_2_ISM	0.1226	109.32	109.20	81.27	81.27	28.05	27.93
12 - Lavatório_3_ISM	0.0539	109.32	109.27	81.27	81.27	28.05	28.00
12 - Lavatório_4_ISM	0.0938	109.32	109.23	81.27	81.27	28.05	27.96
12 - Urinol_1_ISM	0.0394	109.32	109.28	81.27	81.27	28.05	28.01
12 - Urinol_2_ISM	0.0441	109.32	109.28	81.27	81.27	28.05	28.01
11 - 12	0.1535	109.47	109.32	81.27	81.27	28.20	28.05
9 - 11	0.4304	109.90	109.47	81.27	81.27	28.63	28.20
10 - Urinol_3_ISM	0.0533	109.84	109.79	81.27	81.27	28.57	28.52
10 - Urinol_4_ISM	0.0394	109.84	109.80	81.27	81.27	28.57	28.53
10 - Urinol_5_ISM	0.0278	109.84	109.81	81.27	81.27	28.57	28.54
10 - Urinol_6_ISM	0.0185	109.84	109.82	81.27	81.27	28.57	28.55
10 - Sanita_1_ISM	0.3766	109.84	109.46	81.27	81.27	28.57	28.19
10 - Sanita_2_ISM	0.2448	109.73	109.59	81.27	81.27	28.46	28.32
10 - Sanita_3_ISM	0.1036	109.84	109.73	81.27	81.27	28.57	28.46
9 - 10	0.0657	109.90	109.84	81.27	81.27	28.63	28.57
8 - 9	0.0238	109.93	109.90	81.27	81.27	28.66	28.63
7 - 8	0.0057	109.93	109.93	81.27	81.27	28.66	28.66
6 - 7	0.0071	109.85	109.84	81.27	81.27	28.58	28.57
6 - Ponto2	0.2621	109.93	109.67	81.27	81.27	28.66	28.40
6 - Sanita_ISM_PD	0.0847	109.93	109.85	81.27	81.27	28.66	28.58
5 - 6	0.0381	109.97	109.93	81.27	81.27	28.70	28.66
4 - 5	0.0110	109.98	109.97	81.27	81.27	28.71	28.70
3 - 4	0.0061	109.99	109.98	81.27	81.27	28.72	28.71
1 - 2	0.0024	109.99	109.99	81.27	81.27	28.72	28.72
Ponto_Entrada_ISEL - 1	0.0073	110.00	109.99	91.30	81.27	18.70	28.72
Reservatório Fícticio - Ponto_Entrada_ISEL	0.0007	110.00	110.00	110.00	91.30	0.00	18.70

**Tabela VII.6.** Pressão em cada nó da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas, com valores de nível de água do reservatório fítico igual a 120 m

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas							
Troços	Perda de carga (m)	Altura piezométrica (m)		Altura do terreno (m)		Pressão (m.c.a)	
		Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
12 - Torneira_ISM	0.4236	119.32	118.90	81.27	81.27	38.05	37.63
12 - Ponto 3	0.2317	119.32	119.09	81.27	81.27	38.05	37.82
12 - Lavatório_2_ISM	0.1226	119.32	119.20	81.27	81.27	38.05	37.93
12 - Lavatório_3_ISM	0.0539	119.32	119.27	81.27	81.27	38.05	38.00
12 - Lavatório_4_ISM	0.0938	119.32	119.23	81.27	81.27	38.05	37.96
12 - Urinol_1_ISM	0.0394	119.32	119.28	81.27	81.27	38.05	38.01
12 - Urinol_2_ISM	0.0441	119.32	119.28	81.27	81.27	38.05	38.01
11 - 12	0.1535	119.47	119.32	81.27	81.27	38.20	38.05
9 - 11	0.4304	119.90	119.47	81.27	81.27	38.63	38.20
10 - Urinol_3_ISM	0.0533	119.84	119.79	81.27	81.27	38.57	38.52
10 - Urinol_4_ISM	0.0394	119.84	119.80	81.27	81.27	38.57	38.53
10 - Urinol_5_ISM	0.0278	119.84	119.81	81.27	81.27	38.57	38.54
10 - Urinol_6_ISM	0.0185	119.84	119.82	81.27	81.27	38.57	38.55
10 - Sanita_1_ISM	0.3766	119.84	119.46	81.27	81.27	38.57	38.19
10 - Sanita_2_ISM	0.2448	119.73	119.59	81.27	81.27	38.46	38.32
10 - Sanita_3_ISM	0.1036	119.84	119.73	81.27	81.27	38.57	38.46
9 - 10	0.0657	119.90	119.84	81.27	81.27	38.63	38.57
8 - 9	0.0238	119.93	119.90	81.27	81.27	38.66	38.63
7 - 8	0.0057	119.93	119.93	81.27	81.27	38.66	38.66
6 - 7	0.0071	119.85	119.84	81.27	81.27	38.58	38.57
6 - Ponto2	0.2621	119.93	119.67	81.27	81.27	38.66	38.40
6 - Sanita_ISM_PD	0.0847	119.93	119.85	81.27	81.27	38.66	38.58
5 - 6	0.0381	119.97	119.93	81.27	81.27	38.70	38.66
4 - 5	0.0110	119.98	119.97	81.27	81.27	38.71	38.70
3 - 4	0.0061	119.99	119.98	81.27	81.27	38.72	38.71
1 - 2	0.0024	119.99	119.99	81.27	81.27	38.72	38.72
Ponto_Entrada_ISEL - 1	0.0073	120.00	119.99	91.30	81.27	28.70	38.72
Reservatório Fictício - Ponto_Entrada_ISEL	0.0007	120.00	120.00	120.00	91.30	0.00	28.70

**Tabela VII.7.** Pressão em cada nó da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas, com valores de nível de água do reservatório fítico igual a 110 m

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas							
Troços	Perda de carga (m)	Altura piezométrica (m)		Altura do terreno (m)		Pressão (m.c.a)	
		Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
n10 - Torneira_ISF	0,0446	109,58	109,53	81,27	81,27	81,27	28,26
n10 - Ponto4	2,2524	109,58	107,33	81,27	81,27	81,27	26,06
n10 - Lavatório_2_ISF	0,3631	109,58	109,22	81,27	81,27	81,27	27,95
n10 - Lavatório_3_ISF	0,3045	109,58	109,27	81,27	81,27	81,27	28,00
n10 - Lavatório_4_ISF	0,1375	109,58	109,44	81,27	81,27	81,27	28,17
n10 - Lavatório_5_ISF	0,1366	109,58	109,44	81,27	81,27	81,27	28,17
n10 - Lavatório_6_ISF	0,0589	109,58	109,52	81,27	81,27	81,27	28,25
n9 - n10	0,1451	109,72	109,58	81,27	81,27	81,27	28,31
n9 - Sanita_1_ISF	0,4048	109,72	109,32	81,27	81,27	81,27	28,05
n9 - Sanita_2_ISF	0,2824	109,72	109,44	81,27	81,27	81,27	28,17
n9 - Sanita_3_ISF	0,1789	109,72	109,54	81,27	81,27	81,27	28,27
n9 - Sanita_4_ISF	0,1036	109,72	109,62	81,27	81,27	81,27	28,35
n8 - n9	0,0700	109,79	109,72	81,27	81,27	81,27	28,45
n7 - n8	0,0154	109,81	109,79	81,27	81,27	81,27	28,52
n6 - n7	0,0477	109,86	109,81	81,27	81,27	81,27	28,54
n6 - Ponto1	0,2551	109,86	109,60	81,27	81,27	81,27	28,33
n6 - Sanita_ISF_PD	0,0913	109,86	109,77	81,27	81,27	81,27	28,50
n5 - n6	0,0832	109,94	109,86	81,27	81,27	81,27	28,59
n4 - n5	0,0337	109,97	109,94	81,27	81,27	81,27	28,67
n3 - n4	0,0188	109,99	109,97	81,27	81,27	81,27	28,70
Ponto_Entrada_ISEL - n2	0,0067	110,00	109,99	91,30	81,27	81,27	28,72
Reservatório Fictício - Ponto_Entrada_ISEL	0,0006	110,00	110,00	110,00	91,30	0,00	18,70

**Tabela VII.8.** Pressão em cada nó da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas, com valores de nível de água do reservatório fítico igual a 120 m

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas							
Troços	Perda de carga (m)	Altura piezométrica (m)		Altura do terreno (m)		Pressão (m.c.a)	
		Montante	Jusante	Montante	Jusante	Montante	Jusante
n10 - Torneira_ISF	0,0446	119,58	119,53	81,27	81,27	81,27	38,26
n10 - Ponto4	2,2524	119,58	117,33	81,27	81,27	81,27	36,06
n10 - Lavatório_2_ISF	0,3631	119,58	119,22	81,27	81,27	81,27	37,95
n10 - Lavatório_3_ISF	0,3045	119,58	119,27	81,27	81,27	81,27	38,00
n10 - Lavatório_4_ISF	0,1375	119,58	119,44	81,27	81,27	81,27	38,17
n10 - Lavatório_5_ISF	0,1366	119,58	119,44	81,27	81,27	81,27	38,17
n10 - Lavatório_6_ISF	0,0589	119,58	119,52	81,27	81,27	81,27	38,25
n9 - n10	0,1451	119,72	119,58	81,27	81,27	81,27	38,31
n9 - Sanita_1_ISF	0,4048	119,72	119,32	81,27	81,27	81,27	38,05
n9 - Sanita_2_ISF	0,2824	119,72	119,44	81,27	81,27	81,27	38,17
n9 - Sanita_3_ISF	0,1789	119,72	119,54	81,27	81,27	81,27	38,27
n9 - Sanita_4_ISF	0,1036	119,72	119,62	81,27	81,27	81,27	38,35
n8 - n9	0,0700	119,79	119,72	81,27	81,27	81,27	38,45
n7 - n8	0,0154	119,81	119,79	81,27	81,27	81,27	38,52
n6 - n7	0,0477	119,86	119,81	81,27	81,27	81,27	38,54
n6 - Ponto1	0,2551	119,86	119,60	81,27	81,27	81,27	38,33
n6 - Sanita_ISF_PD	0,0913	119,86	119,77	81,27	81,27	81,27	38,50
n5 - n6	0,0832	119,94	119,86	81,27	81,27	81,27	38,59
n4 - n5	0,0337	119,97	119,94	81,27	81,27	81,27	38,67
n3 - n4	0,0188	119,99	119,97	81,27	81,27	81,27	38,70
Ponto_Entrada_ISEL - n2	0,0067	120,00	119,99	91,30	81,27	81,27	38,72
Reservatório Fictício - Ponto_Entrada_ISEL	0,0006	120,00	120,00	120,00	91,30	0,00	28,70

**Tabela VII.9.** Velocidade em cada tubagem da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias masculinas				
Tubo	Comprimento da tubagem (m)	Diâmetro da tubagem (m)	Caudal (L/s)	Velocidade (m <sup>2</sup> /s)
p23	4,50	0,0120	0,1000	0,8842
p24	3,90	0,0120	0,0780	0,6897
p25	2,90	0,0120	0,0649	0,5738
p26	1,90	0,0120	0,0523	0,4624
p27	0,80	0,0120	0,1126	0,9956
p21	1,70	0,0160	0,1000	0,4974
p22	1,90	0,0160	0,1000	0,4974
p9	3,80	0,0200	0,4235	1,3480
p11	1,36	0,0200	0,4235	1,3480
p17	2,30	0,0160	0,1000	0,4974
p18	1,70	0,0160	0,1000	0,4974
p19	1,20	0,0160	0,1000	0,4974
p20	0,80	0,0160	0,1000	0,4974
p14	4,00	0,0120	0,1000	0,8842
p15	2,60	0,0120	0,1000	0,8842
p16	1,10	0,0120	0,1000	0,8842
p10	0,51	0,0200	0,4554	1,4495
p8	0,30	0,0250	0,6279	1,2791
p7	0,24	0,0320	0,6279	0,7807
p6	0,30	0,0320	0,6279	0,7807
p13	2,80	0,0120	0,0997	0,8815
p12	0,90	0,0120	0,1000	0,8842
p5	1,40	0,0320	0,6755	0,8399
p4	0,40	0,0320	0,6755	0,8399
p3	0,23	0,0320	0,6755	0,8399
p2	0,26	0,0400	0,6755	0,5375
Tubagem_ISEL	110,00	0,1100	0,6755	0,0711
Tubagem_Fictica	10,00	0,1100	0,6755	0,0711

**Tabela VII.10.** Velocidade em cada tubagem da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Rede de distribuição de água das instalações sanitárias femininas				
Tubo	Comprimento da tubagem (m)	Diâmetro da tubagem (m)	Caudal (L/s)	Velocidade (m <sup>2</sup> /s)
p19	5,70	0,0200	0,1000	0,3183
p18	5,20	0,0120	0,2280	2,0159
p17	4,40	0,0120	0,0931	0,8234
p16	3,50	0,0120	0,0958	0,8473
p15	2,60	0,0120	0,0732	0,6476
p14	1,60	0,0120	0,0949	0,8387
p13	0,70	0,0120	0,0941	0,8318
p21	3,00	0,0250	0,4811	0,9802
p12	4,30	0,0120	0,1000	0,8842
p11	3,00	0,0120	0,1000	0,8842
p10	1,90	0,0120	0,1000	0,8842
p9	1,10	0,0120	0,1000	0,8842
p8	0,98	0,0250	0,5953	1,2128
p7	0,22	0,0250	0,5953	1,2128
p20	0,67	0,0250	0,5953	1,2128
p6	2,80	0,0120	0,0983	0,8687
p5	0,97	0,0120	0,1000	0,8842
p4	1,00	0,0250	0,6449	1,3137
p3	0,40	0,0250	0,6449	1,3137
p2	0,23	0,0250	0,6449	1,3137
Tubagem_ISEL	110,00	0,1100	0,6449	0,0679
Tubagem_Ficticia	10,00	0,1100	0,6449	0,0679

## Anexo VIII – Calibração dos resultados estatísticos do EPANET

**Tabela VIII.1.** Calibração dos caudais nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Calibration Statistics for Flow

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
p23	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p24	1	0.08	0.04	0.041	0.041
p25	1	0.06	0.03	0.028	0.028
p26	1	0.05	0.03	0.024	0.024
p27	1	0.11	0.06	0.054	0.054
p21	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p22	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p11	1	0.42	0.30	0.116	0.116
p9	1	0.42	0.30	0.116	0.116
p17	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p18	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p19	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p20	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p14	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p15	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p16	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p10	1	0.46	0.35	0.110	0.110
p8	1	0.63	0.65	0.024	0.024
p7	1	0.63	0.65	0.024	0.024
p6	1	0.63	0.65	0.024	0.024
p13	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p12	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p5	1	0.68	0.75	0.074	0.074
p4	1	0.68	0.75	0.074	0.074
p3	1	0.68	0.75	0.074	0.074
p2	1	0.68	0.75	0.074	0.074
Tubagem_ISEL	1	0.68	0.75	0.074	0.074
Network	27	0.30	0.28	0.057	0.062

Correlation Between Means: 0.990

**Tabela VIII.2.** Calibração dos caudais nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Calibration Statistics for Flow

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
p19	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p18	1	0.23	0.11	0.116	0.116
p17	1	0.09	0.05	0.043	0.043
p16	1	0.10	0.05	0.052	0.052
p15	1	0.07	0.04	0.033	0.033
p14	1	0.09	0.05	0.043	0.043
p13	1	0.09	0.05	0.043	0.043
p21	1	0.48	0.39	0.090	0.090
p12	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p11	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p10	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p9	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p8	1	0.60	0.59	0.010	0.010
p7	1	0.60	0.59	0.010	0.010
p20	1	0.60	0.59	0.010	0.010
p6	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p5	1	0.10	0.05	0.050	0.050
p4	1	0.64	0.69	0.050	0.050
p3	1	0.64	0.69	0.050	0.050
p2	1	0.64	0.69	0.050	0.050
Tubagem_ISEL	1	0.64	0.69	0.050	0.050
Network	21	0.30	0.27	0.048	0.053

Correlation Between Means: 0.994

**Tabela VIII.3.** Calibração das pressões nos nós da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Cenário A1 – Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 110 m

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Torneira_ISM	1	27.63	28.18	0.547	0.547
Urinol_1_ISM	1	28.02	28.28	0.263	0.263
Urinol_2_ISM	1	28.02	28.28	0.262	0.262
12	1	28.05	28.29	0.244	0.244
11	1	28.48	26.32	2.163	2.163
Urinol_3_ISM	1	28.52	28.55	0.035	0.035
Urinol_4_ISM	1	28.53	28.56	0.029	0.029
Urinol_5_ISM	1	28.54	28.56	0.022	0.022
Urinol_6_ISM	1	28.55	28.56	0.015	0.015
Sanita_1_ISM	1	28.19	28.47	0.275	0.275
Sanita_2_ISM	1	28.32	28.50	0.182	0.182
Sanita_3_ISM	1	28.47	28.54	0.071	0.071
10	1	28.57	28.57	0.000	0.000
9	1	28.63	28.61	0.020	0.020
8	1	28.66	28.64	0.024	0.024
7	1	28.57	28.64	0.072	0.072
Sanita_ISM_PD	1	28.58	28.63	0.046	0.046
6	1	28.66	28.65	0.010	0.010
5	1	28.70	28.70	0.004	0.004
4	1	28.71	28.71	0.000	0.000
2	1	28.72	28.72	0.003	0.003
1	1	28.72	28.72	0.000	0.000
Ponto_Entrada_ISEL	1	18.70	18.70	0.001	0.001
Network	23	28.02	28.02	0.186	0.480

Correlation Between Means: 0.972

**Tabela VIII.4.** Calibração das pressões nos nós da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Cenário A1– Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 110 m

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Torneira_ISF	1	28.26	28.33	0.067	0.067
Ponto4	1	26.06	27.72	1.656	1.656
n10	1	28.31	28.34	0.029	0.029
Sanita_1_ISF	1	28.05	28.33	0.275	0.275
Sanita_2_ISF	1	28.17	28.36	0.189	0.189
Sanita_3_ISF	1	28.27	28.39	0.118	0.118
Sanita_4_ISF	1	28.35	28.41	0.059	0.059
n9	1	28.45	28.44	0.012	0.012
n8	1	28.52	28.51	0.014	0.014
Ponto1	1	28.33	28.50	0.168	0.168
Sanita_ISF_PD	1	28.50	28.54	0.045	0.045
n6	1	28.59	28.57	0.022	0.022
n5	1	28.67	28.66	0.008	0.008
n4	1	28.70	28.70	0.001	0.001
n2	1	28.72	28.72	0.002	0.002
Ponto_Entrada_ISEL	1	18.70	18.70	0.001	0.001
Network	16	27.67	27.83	0.167	0.426

Correlation Between Means: 0.986

**Tabela VIII.5.** Calibração das pressões nos nós da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Cenário A2 – Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 120 m

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Torneira_ISM	1	37.63	38.18	0.547	0.547
Ponto3	1	37.82	38.23	0.410	0.410
Urinol_1_ISM	1	38.01	38.28	0.273	0.273
Urinol_2_ISM	1	38.01	38.28	0.272	0.272
12	1	38.05	38.29	0.244	0.244
11	1	38.48	36.32	2.163	2.163
Urinol_3_ISM	1	38.52	38.55	0.035	0.035
Urinol_4_ISM	1	38.53	38.56	0.029	0.029
Urinol_5_ISM	1	38.54	38.56	0.022	0.022
Urinol_6_ISM	1	38.55	38.56	0.014	0.014
Sanita_1_ISM	1	38.19	38.47	0.275	0.275
Sanita_2_ISM	1	38.32	38.50	0.182	0.182
Sanita_3_ISM	1	38.47	38.54	0.071	0.071
10	1	38.57	38.57	0.000	0.000
9	1	38.63	38.61	0.020	0.020
8	1	38.66	38.64	0.024	0.024
7	1	38.57	38.64	0.072	0.072
Ponto2	1	38.40	38.58	0.177	0.177
Sanita_ISM_PD	1	38.58	38.63	0.046	0.046
6	1	38.66	38.65	0.011	0.011
5	1	38.70	38.70	0.004	0.004
4	1	38.71	38.71	0.000	0.000
2	1	38.72	38.72	0.003	0.003
1	1	38.72	38.72	0.000	0.000
Ponto_Entrada_ISEL	1	28.70	28.70	0.001	0.001
Network	25	38.03	38.05	0.196	0.469

Correlation Between Means: 0.971

**Tabela VIII.6.** Calibração das pressões nos nós da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Cenário A2 – Altura piezométrica do reservatório fictício igual a 120 m

Calibration Statistics for Pressure

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Torneira_ISF	1	38.26	38.33	0.067	0.067
Ponto4	1	36.06	37.72	1.655	1.655
n10	1	38.31	38.34	0.029	0.029
Sanita_1_ISF	1	38.05	38.33	0.275	0.275
Sanita_2_ISF	1	38.17	38.36	0.189	0.189
Sanita_3_ISF	1	38.27	38.39	0.118	0.118
Sanita_4_ISF	1	38.35	38.41	0.059	0.059
n9	1	38.45	38.44	0.012	0.012
n8	1	38.52	38.51	0.014	0.014
Ponto1	1	38.33	38.50	0.168	0.168
Sanita_ISF_PD	1	38.50	38.54	0.045	0.045
n6	1	38.59	38.57	0.022	0.022
n5	1	38.67	38.66	0.008	0.008
n4	1	38.70	38.70	0.001	0.001
n2	1	38.72	38.72	0.002	0.002
Ponto_Entrada_ISEL	1	28.70	28.70	0.001	0.001
Network	16	37.67	37.83	0.166	0.426

Correlation Between Means: 0.986

**Tabela VIII.7.** Calibração das velocidades nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

Calibration Statistics for Velocity

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
p23	1	0.89	0.44	0.448	0.448
p24	1	0.69	0.35	0.345	0.345
p25	1	0.57	0.29	0.283	0.283
p26	1	0.50	0.23	0.269	0.269
p27	1	1.00	0.50	0.502	0.502
p21	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p22	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p9	1	1.35	0.97	0.382	0.382
p11	1	1.35	0.97	0.382	0.382
p17	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p18	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p19	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p20	1	0.50	0.25	0.251	0.251
p14	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p15	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p16	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p10	1	1.45	1.11	0.335	0.335
p8	1	1.28	1.33	0.053	0.053
p7	1	0.78	0.81	0.034	0.034
p6	1	0.78	0.81	0.034	0.034
p13	1	0.88	0.44	0.439	0.439
p12	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p5	1	0.84	0.94	0.098	0.098
p4	1	0.84	0.94	0.098	0.098
p3	1	0.84	0.94	0.098	0.098
p2	1	0.54	0.60	0.060	0.060
Tubagem_ISEL	1	0.07	0.08	0.009	0.009
Network	27	0.78	0.56	0.264	0.304

Correlation Between Means: 0.804

**Tabela VIII.8.** Calibração das velocidades nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

Calibration Statistics for Velocity

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
p19	1	0.50	0.16	0.341	0.341
p18	1	2.00	1.01	0.992	0.992
p17	1	0.82	0.41	0.408	0.408
p16	1	0.85	0.42	0.426	0.426
p15	1	0.65	0.32	0.326	0.326
p14	1	0.84	0.42	0.420	0.420
p13	1	0.83	0.42	0.414	0.414
p21	1	0.98	0.79	0.186	0.186
p12	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p11	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p10	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p9	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p8	1	1.21	1.20	0.008	0.008
p7	1	1.21	1.20	0.008	0.008
p20	1	1.21	1.20	0.008	0.008
p6	1	0.87	0.43	0.435	0.435
p5	1	0.88	0.44	0.438	0.438
p4	1	1.31	1.40	0.094	0.094
p3	1	1.31	1.40	0.094	0.094
p2	1	1.31	1.40	0.094	0.094
Tubagem_ISEL	1	0.07	0.07	0.003	0.003
Network	21	0.97	0.69	0.307	0.385

Correlation Between Means: 0.792

**Tabela VIII.9.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas

$k_{wp} = -0,010 \text{ m/d}$							$k_{wp} = -0,100 \text{ m/d}$						
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre							Calibration Statistics for Cloro Residual Livre						
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error		Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	
Ponto2	7	0.52	0.58	0.189	0.258		Ponto2	7	0.52	0.48	0.235	0.255	
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.001	0.001		Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002	
Network	8	0.53	0.59	0.166	0.241		Network	8	0.53	0.51	0.206	0.238	
Correlation Between Means: 1.000							Correlation Between Means: 1.000						

$k_{wp} = -0,150 \text{ m/d}$						
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre						
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	
Ponto2	7	0.52	0.47	0.243	0.258	
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002	
Network	8	0.53	0.49	0.213	0.241	
Correlation Between Means: 1.000						

**Tabela VIII.10.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas

$k_{wp} = -0,010 \text{ m/d}$						$k_{wp} = -0,100 \text{ m/d}$					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre						Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error	Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	6	0.51	0.57	0.105	0.181	Ponto1	6	0.51	0.46	0.155	0.174
Ponto4	7	0.63	0.65	0.026	0.028	Ponto4	7	0.63	0.63	0.016	0.022
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.001	0.001	Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	14	0.58	0.62	0.058	0.120	Network	14	0.58	0.56	0.074	0.115
Correlation Between Means: 0.997						Correlation Between Means: 0.998					

$k_{wp} = -0,150 \text{ m/d}$					
Calibration Statistics for Cloro Residual Livre					
Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	6	0.51	0.44	0.168	0.180
Ponto4	7	0.63	0.63	0.017	0.023
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.66	0.002	0.002
Network	14	0.58	0.55	0.081	0.119
Correlation Between Means: 0.999					

**Tabela VIII.11.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas com qualidade inicial igual a 0,60 mg/L

Calibration Statistics for Cloro Residual Livre

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto2	7	0.52	0.54	0.209	0.249
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.60	0.061	0.061
Network	8	0.53	0.54	0.191	0.234

Correlation Between Means: 1.000

**Tabela VIII.12.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias masculinas com qualidade inicial igual a 0,30 mg/L

Calibration Statistics for Cloro Residual Livre

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto2	7	0.52	0.26	0.324	0.352
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.30	0.360	0.360
Network	8	0.53	0.27	0.329	0.353

Correlation Between Means: 1.000

**Tabela VIII.13.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas com qualidade inicial igual a 0,60 mg/L

Calibration Statistics for Cloro Residual Livre

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	6	0.51	0.52	0.121	0.171
Ponto4	7	0.63	0.59	0.041	0.047
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.60	0.061	0.061
Network	14	0.58	0.56	0.077	0.118

Correlation Between Means: 0.997

**Tabela VIII.14.** Calibração das concentrações de cloro residual livre nas tubagens da rede de distribuição das instalações sanitárias femininas com qualidade inicial igual a 0,30 mg/L

Calibration Statistics for Cloro Residual Livre

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
Ponto1	6	0.51	0.26	0.290	0.306
Ponto4	7	0.63	0.29	0.338	0.338
Ponto_Entrada_ISEL	1	0.66	0.30	0.360	0.360
Network	14	0.58	0.28	0.319	0.327

Correlation Between Means: 0.999

## Anexo IX – Rede de distribuição de água detalhada no EPANET

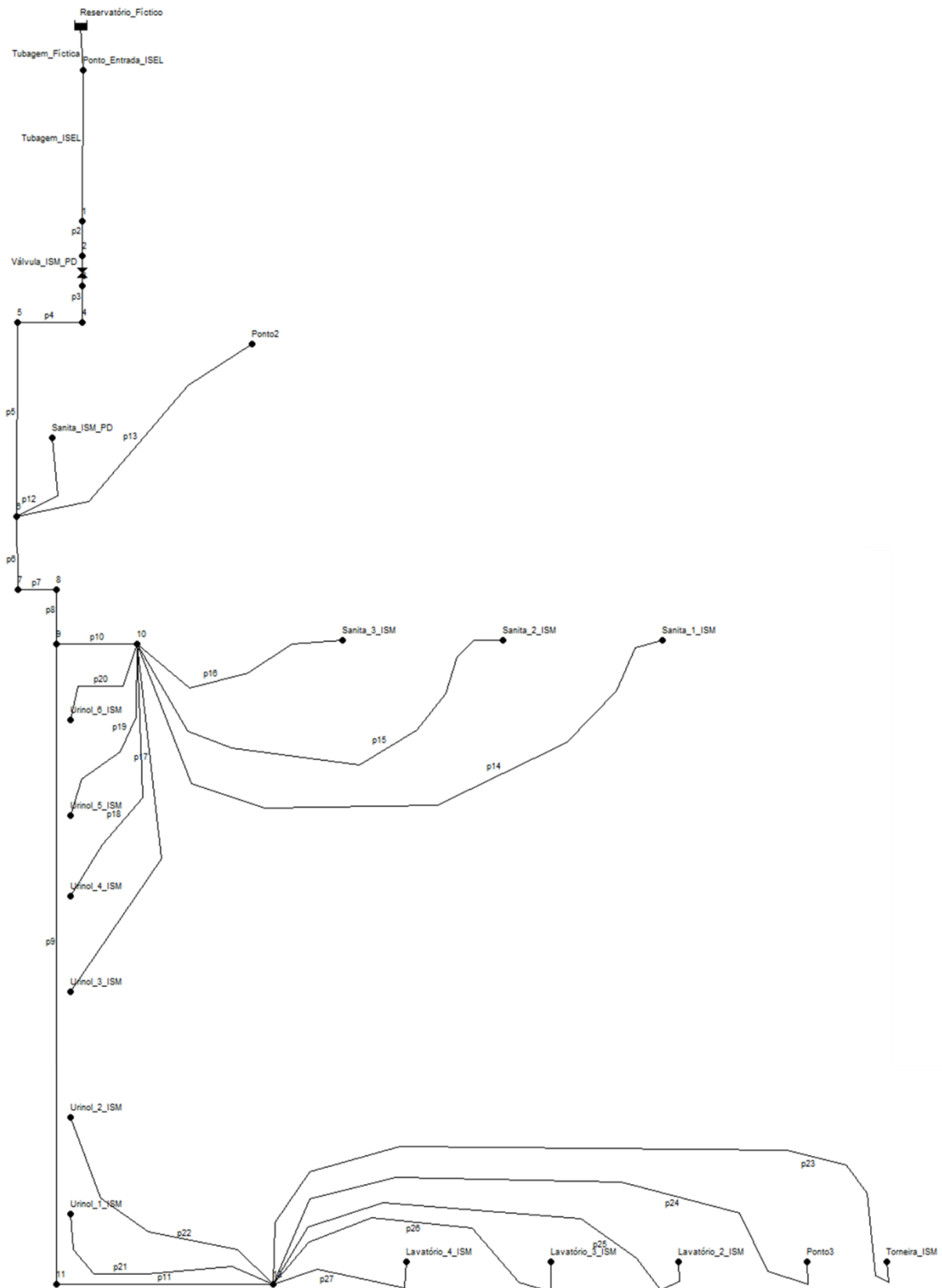
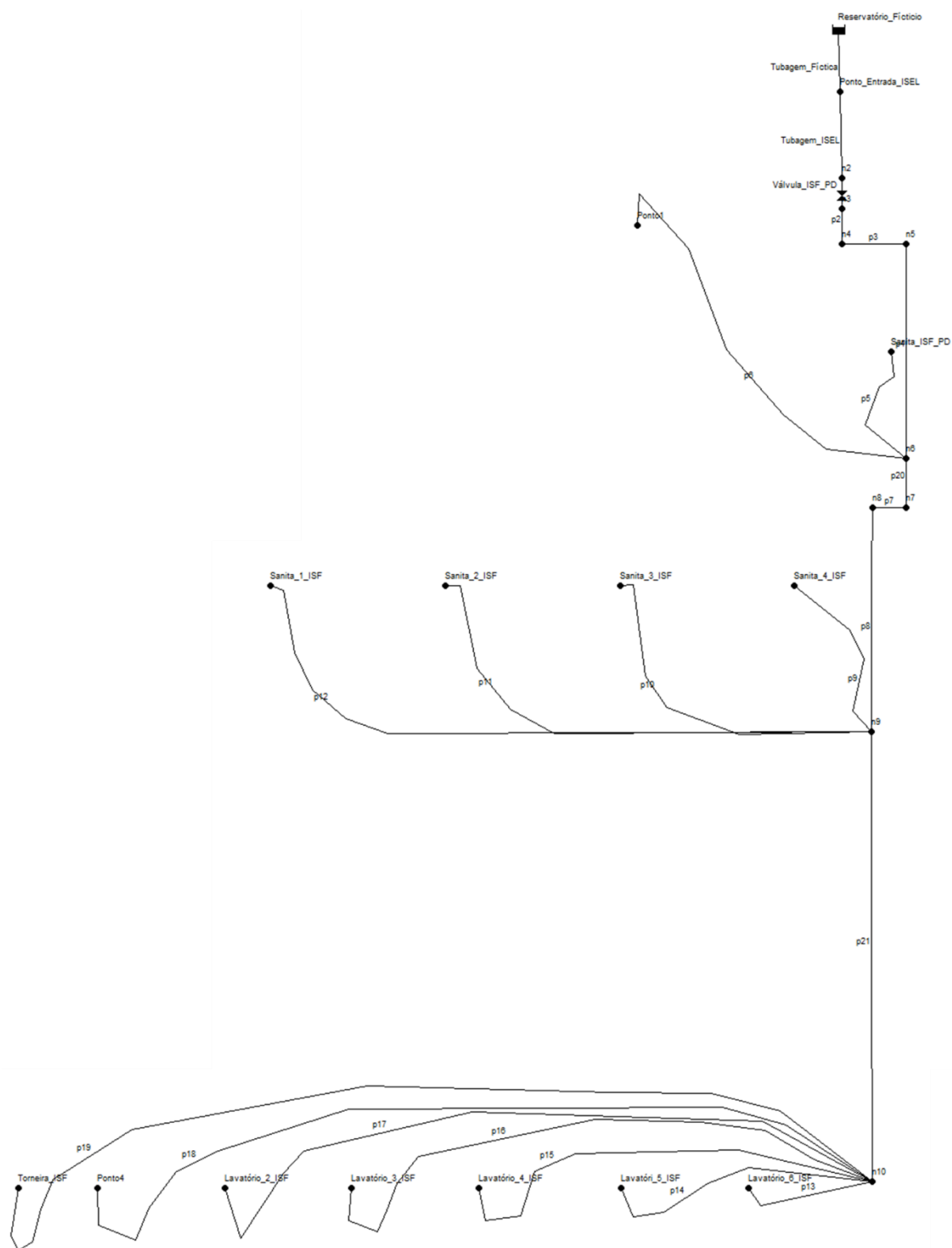


Figura IX.1. Instalações sanitárias masculinas



**Figura IX.2.** Instalações sanitárias femininas