

DESENVOLVIMENTO DE UMA METODOLOGIA PARA A GESTÃO PROATIVA DA QUALIDADE DA ÁGUA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA ÁGUAS E ENERGIA DO PORTO

JUNIOR SILVA VILELA

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM HIDRÁULICA, RECURSOS HÍDRICOS
E AMBIENTE**

Orientador: Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo

Orientador da Empresa: Engenheiro Bruno Filipe Martins de Brito

JUNHO 2026

MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2025/2026

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E GEORRECURSOS

Tel. +351-22-508 1901



m.ec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400



feup@fe.up.pt



<http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado em Engenharia Civil - 2025/2026 - Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2026*.

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos que partiram, mas nunca deixaram de fazer parte do meu caminho, esta dissertação
também é vossa!

O desenvolvimento progressivo do homem depende vitalmente da invenção

Nikola Tesla

AGRADECIMENTOS

A concretização desta dissertação de mestrado representa o culminar de um percurso académico exigente e desafiante, que não teria sido possível sem o apoio de várias pessoas e instituições.

Gostaria de começar por expressar o meu profundo agradecimento ao Professor Doutor Manuel Maria Pacheco Figueiredo, pela orientação rigorosa, disponibilidade constante, espírito crítico e apoio científico fundamentais ao longo de todo o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço igualmente ao Engenheiro Bruno Brito e ao Engenheiro Renato Silva, pelo acompanhamento durante o estágio, pela confiança depositada em mim e pela partilha de conhecimentos e experiência profissional, que enriqueceram significativamente esta investigação.

À Águas e Energia do Porto, agradeço a oportunidade concedida para a realização deste estágio, bem como a todos os colaboradores que direta, ou indiretamente, contribuíram para a concretização deste projeto, através da sua disponibilidade, colaboração e espírito de equipa.

Expresso também o meu agradecimento à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto e ao Departamento de Engenharia Civil e Georrecursos, por todo o apoio institucional e pela formação académica proporcionada ao longo deste percurso.

Aos meus colegas de mestrado, agradeço a partilha de experiências, o apoio mútuo e o companheirismo ao longo desta etapa.

À minha família, deixo um agradecimento muito especial pelo apoio incondicional, incentivo permanente e compreensão nos momentos de maior exigência.

Aos meus melhores amigos, Daniela Félix, Diogo Silva, Tiago Pires, Alexandre Correia, Jaime Cardoso, Luís Branco, Joana Freitas, Margarida Fagundes, Catarina Pinto e amigos da residência Messe Militar das Antas, agradeço a paciência, a motivação e os momentos de descontração que ajudaram a equilibrar este percurso.

Por fim, agradeço à Associação Bagos D'Ouro por todas as oportunidades pessoais e profissionais, e pelos momentos que me permitiram crescer e chegar até aqui, sois uma família para mim.

RESUMO

A gestão da qualidade da água nos sistemas de abastecimento urbano tem-se tornado cada vez mais exigente, sendo necessário recorrer a abordagens integradas que combinem dados operacionais, conhecimento do sistema e ferramentas de modelação. No contexto atual, marcado pela crescente complexidade das redes de distribuição e pela exigência de elevados níveis de serviço, torna-se essencial adotar estratégias proativas baseadas na análise de risco.

Esta dissertação tem como principal objetivo desenvolver uma metodologia integrada para a gestão proativa da qualidade da água, com aplicação ao sistema de distribuição da Águas e Energia do Porto. A abordagem proposta baseia-se na análise de dados históricos de qualidade da água, ocorrências de roturas e intervenções na rede, bem como na identificação de zonas críticas.

Numa fase complementar, recorre-se à modelação da qualidade da água através do software **EPANET**, permitindo simular a idade da água e a evolução do cloro residual nas zonas identificadas como críticas. Esta componente possibilita a análise do comportamento hidráulico e da degradação da qualidade em diferentes cenários operacionais.

Foi ainda realizada a correlação entre parâmetros de qualidade da água (incluindo cloro residual, turvação, metais e indicadores microbiológicos) e variáveis operacionais, bem como a avaliação de estratégias de recloração em pontos críticos. A metodologia inclui também a definição de um plano de monitorização proativa e a verificação da conformidade com o **Decreto-Lei n. °69/2023**.

Os resultados mostram que a abordagem proposta permite identificar zonas de risco, apoiar a tomada de decisão e melhorar a gestão operacional dos sistemas de abastecimento, constituindo um contributo relevante para a implementação de práticas alinhadas com as recomendações da **ERSAR** e os princípios dos Planos de Segurança da Água.

PALAVRAS-CHAVE: qualidade da água, redes de distribuição, modelação **EPANET**, gestão proativa, análise de risco

ABSTRACT

Water quality management in urban supply systems has become increasingly demanding, and it is necessary to resort to integrated approaches that combine operational data, system knowledge, and modeling tools. In the current context, marked by the growing complexity of distribution networks and the demand for high levels of service, it is essential to adopt proactive strategies based on risk analysis.

This dissertation aims to develop an integrated methodology for the proactive management of water quality, with application to the Porto Waters and Energy distribution system. The proposed approach is based on the analysis of historical water quality data, occurrences of ruptures and interventions in the network, as well as the identification of critical areas.

In a complementary phase, water quality modeling is used through the **EPANET** software, allowing the simulation of water age and the evolution of residual chlorine in areas identified as critical. This component enables the analysis of hydraulic behavior and quality degradation in different operational scenarios.

The correlation between water quality parameters (including residual chlorine, turbidity, metals, and microbiological indicators) and operational variables was also carried out, as well as the evaluation of rechlorination strategies at critical points. The methodology also includes the definition of a proactive monitoring plan and verification of compliance with **Decree-Law No. 69/2023**.

The results show that the proposed approach allows for the identification of risk zones, supports decision-making, and improves the operational management of supply systems, constituting a relevant contribution to the implementation of practices aligned with **ERSAR** recommendations and the principles of Water Safety Plans.

KEYWORDS: water quality, distribution networks, **EPANET** modelling, proactive management, risk assessment

Índice Geral

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO GERAL	2
1.2 ENQUADRAMENTO REGULATÓRIO E INSTITUCIONAL	2
1.3 O INDICADOR “ÁGUA SEGURA” E A SUA EVOLUÇÃO	3
1.3.1 Evolução temporal do indicador (2002-2024).....	3
1.3.2 Justificação da seleção do período de análise (2006-2024)	5
1.3.3 Período adotado para análise	5
1.3.4 Implicações para a análise subsequente	6
1.4 EVOLUÇÃO NACIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA (2006-2024)	6
1.4.1 Tendência global e níveis de desempenho	7
1.4.2 Fatores estruturais de melhoria.....	7
1.4.3 Redução das assimetrias territoriais	8
1.5 ENQUADRAMENTO METROPOLITANO - ÁREA METROPOLITANA DO PORTO	9
1.5.1 Caracterização geral da Área Metropolitana do Porto	9
1.5.2 Evolução do indicador “Água Segura” na AMP (2006-2024).....	10
1.5.3 Fatores explicativos do desempenho metropolitano	11
1.5.4 O papel da ETA de Lever.....	11
1.5.5 Comparação entre diferentes subconjuntos da AMP	13
1.5.6 Síntese do enquadramento metropolitano	14
1.6 ENQUADRAMENTO LOCAL - MUNICÍPIO DO PORTO	14
1.6.1 Caracterização geral do sistema de abastecimento.....	14
1.6.2 Especificidades infraestruturais e operacionais	15
1.6.3 Evolução do indicador “Água Segura” no município do Porto	16
1.6.4 Interpretação das oscilações observadas	17
1.6.5 Comparação com a Área Metropolitana do Porto	18
1.6.6 Síntese do enquadramento local.....	18
1.7 LIMITAÇÕES DO INDICADOR “ÁGUA SEGURA” E A NECESSIDADE DE UMA ABORDAGEM PROATIVA.....	19

1.7.1 Saturação do indicador “Água Segura”	19
1.7.2 Limitações do indicador na análise da qualidade da água	19
1.7.3 Necessidade de abordagens baseadas em variáveis operacionais	20
1.7.4 Integração da modelação hidráulica e de qualidade	20
1.7.5 Justificação da abordagem da dissertação.....	21
1.8 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	21
1.8.1 Objetivo geral	21
1.8.2 Objetivos específicos.....	22
1.9 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	23
2 ENQUADRAMENTO TEÓRICO E NORMATIVO	27
2.1 INTRODUÇÃO.....	28
2.2 ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULATÓRIO	28
2.2.1 Diretiva (UE) 2020/2184	28
2.2.2 Decreto-Lei n. °69/2023.....	29
2.3 PAPEL DA ERSAR	29
2.3.1 Indicadores de desempenho	29
2.3.2 Guias técnicos e regulação	29
2.4 GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA BASEADA NO RISCO	30
2.4.1 Evolução do paradigma	30
2.4.2 Planos de Segurança da Água (PSA).....	30
2.4.3 Contributos da International Water Association (IWA).....	31
2.5 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	31
2.5.1 Decaimento do cloro residual	31
2.5.2 Idade da água.....	32
2.5.3 Interação com materiais	32
2.5.4 Biofilmes e Sedimentos	33
2.6 VARIÁVEIS OPERACIONAIS CRÍTICAS	33
2.7 MODELAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA	34
2.7.1 Fundamentos da modelação hidráulica	34

2.7.2 Modelação no EPANET	34
2.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO.....	34
3 BASE DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DA REDE	36
3.1 INTRODUÇÃO.....	37
3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA BASE DE DADOS	37
3.2.1 Tipologia dos dados	37
3.2.2 Estrutura espacial	38
3.2.3 Estrutura temporal.....	39
3.2.4 Integração dos dados.....	39
3.3 VARIÁVEIS DA ANÁLISE.....	39
3.3.1 Enquadramento das variáveis.....	39
3.3.2 Variáveis de qualidade da água	40
3.3.3 Variáveis operacionais	42
3.3.4 Variáveis derivadas	43
3.3.5 Variáveis de apoio.....	43
4 DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DA ÁGUA.....	47
4.1 INTRODUÇÃO.....	48
4.2 ANÁLISE GLOBAL DA QUALIDADE DA ÁGUA - EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS INCUMPRIMENTOS	50
4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA - EVOLUÇÃO TOTAL DOS INCUMPRIMENTOS POR INDICADOR.....	51
4.3.1 Bactérias Coliformes	51
4.3.2 Chumbo.....	51
4.3.3 Cloro Residual.....	52
4.3.4 Clostridium Perfringens	53
4.3.5 Enterococos	54
4.3.6 Escherichia Coli	54
4.3.7 Ferro.....	55
4.3.8 Manganês	56
4.3.9 Número de Colónias a 22°C.....	57

4.3.10 Turvação.....	57
4.3.11 Roturas	58
4.3.12 Intervenções/Empreitadas	59
4.3.13 Determinação de Zonas Críticas	59
4.4 ANÁLISE TEMPORAL DOS INCUMPRIMENTOS NAS ZMC CRÍTICAS	61
5 MODELAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA	64
5.1 INTRODUÇÃO.....	65
5.2 ENQUADRAMENTO DA MODELAÇÃO.....	65
5.3 OBJETIVOS DAS SIMULAÇÕES.....	66
5.4 CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES	66
5.5 MODELAÇÃO DO CLORO RESIDUAL (DECAIMENTO).....	66
5.6 ANÁLISE DA IDADE DA ÁGUA	67
5.7 RESULTADOS POR ZONA DE ESTUDO.....	67
5.7.1 Média Central Bonfim	68
5.7.2 Congregados Alta	71
5.7.3 Pasteleira.....	73
5.8 LIMITAÇÕES DA MODELAÇÃO	76
6 METODOLOGIA PROATIVA DE GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA	79
6.1 INTRODUÇÃO.....	80
6.2 PRINCÍPIOS DA METODOLOGIA	80
6.3 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA.....	81
6.4 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA.....	81
6.4.1 Variáveis consideradas.....	81
6.4.2 Construção de indicadores normalizados.....	81
6.4.3 Índice de risco (proposta)	81

6.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS DE RISCO	82
6.6 APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO.....	83
6.7 DEFINIÇÃO DE MEDIDAS PROATIVAS	83
6.8 OTIMIZAÇÃO DA MONITORIZAÇÃO	84
6.9 INTEGRAÇÃO COM O ENQUADRAMENTO LEGAL	84
6.10 LIMITAÇÕES E BENEFÍCIOS DA METODOLOGIA	84
6.10.1 Limitações	84
6.10.2 Benefícios	85
7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	87
7.1 INTRODUÇÃO.....	88
7.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES	88
7.2.1 Desempenho global da qualidade da água	88
7.2.2 Variabilidade espacial e identificação de zonas críticas.....	88
7.2.3 Influência das condições operacionais.....	88
7.2.4 Contributo da modelação hidráulica	89
7.2.5 Avaliação de medidas corretivas.....	89
7.2.6 Contributo da metodologia proposta	89
7.3 CONTRIBUTOS DA DISSERTAÇÃO	90
7.4 LIMITAÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	90
7.5 TRABALHOS FUTUROS	90
7.5.1 Integração de técnicas de Machine Learning.....	91
A.1 TABELAS	100
A.2 FIGURAS	126

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução dos valores mínimos do indicador “Água Segura” entre 2002-2024	3
Figura 2 - Evolução do número de municípios com valores de 100% do indicador “Água Segura” entre 2002-2024	4
Figura 3 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Nacional entre 2006-2024.....	6
Figura 4 - Mapa da Área Metropolitana do Porto.....	9
Figura 5 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Metropolitano e comparação com a evolução Nacional entre 2006-2024	10
Figura 6 - Mapa de municípios da Área Metropolitana do Porto abastecidos totalmente/parcialmente pela ETA de Lever	12
Figura 7 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Metropolitano e comparação com a evolução Metropolitana abastecida pela ETA de Lever e a evolução Metropolitana abastecida por outras ETA entre 2006-2024	13
Figura 8 - Evolução do indicador “Água Segura” no município do Porto e comparação com a evolução Metropolitana e a evolução Nacional entre 2006-2024	17
Figura 9 - Mapa de Zonas de Medição e Controlo da Rede de Distribuição de Água da Águas e Energia do Porto	48
Figura 10 - Percentagem de incumprimentos totais identificados pelo PCQA e PCO, para cada indicador e média ponderada	49
Figura 11 - Incumprimentos da Qualidade da Água entre 2022-2024 e análise total	50
Figura 12 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Bactérias Coliformes.....	51
Figura 13 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Chumbo.....	51
Figura 14 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Cloro Residual	52
Figura 15 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Clostridium perfringens	53
Figura 16 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Enterococos	54
Figura 17 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Escherichia Coli	54
Figura 18 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Ferro.....	55
Figura 19 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Manganês	56
Figura 20 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Número de Colónias a 22°C	57
Figura 21 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Turvação	57
Figura 22 - Número de Roturas na Rede de Distribuição da AEdP.....	58
Figura 23 - Número de Intervenções/Empreitadas na Rede de Distribuição da AEdP	59
Figura 24 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos na Média Central Bonfim.....	61
Figura 25 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos em Congregados Alta	61
Figura 26 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos na Pasteleira	62
Figura 27 - Mapa de Zonas de Medição e Controlo críticas da Rede de Distribuição de Água da Águas e Energia do Porto	67

Figura 28 - Resultados anómalos de caudal, cloro residual e idade da água de algumas condutas da Média Central Bonfim 68

Figura A. 1 - Incumprimentos, Roturas e Empreitadas em toda a rede entre 2022-2024 126

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Limites máximos que determinam o incumprimento dos indicadores	41
Tabela 2 - Quantidade e percentagem das análises validadas (V) e incumprimentos (I) da amostra total entre 2022-2024	42
Tabela 3 - Quantidade de roturas e intervenções na Rede de Distribuição de Água da AEdP entre 2022-2024	42
Tabela 4 - Quantidade de incumprimentos de qualidade da água na Rede de Distribuição de Água da AEdP entre 2022-2024	43
Tabela 5 - Valores de cloro residual nos reservatórios da AEdP	44
Tabela 6 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água - Média Central Bonfim	69
Tabela 7 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Média Central Bonfim	69
Tabela 8 - Resultados da simulação da Média Central Bonfim da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas	70
Tabela 9 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água - Congregados Alta	71
Tabela 10 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Congregados Alta	72
Tabela 11 - Resultados da simulação de Congregados Alta da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas	72
Tabela 12 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água - Pasteleira (antes e após rechloragem)	74
Tabela 13 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Pasteleira (antes e após rechloragem)	74
Tabela 14 - Resultados da simulação da Pasteira (antes e após rechloragem) da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas	75
Tabela 15 - Comparação de valores de simulação e incumprimentos na rede	76
Tabela 16 - Classes de Risco	82
Tabela A. 1 - Incumprimentos de Bactérias Coliformes entre 2022-2024	100
Tabela A. 2 - Incumprimentos de Chumbo entre 2022-2024	101
Tabela A. 3 - Incumprimentos de Cloro Residual entre 2022-2024	102
Tabela A. 4 - Incumprimentos de Clostridium Perfringens entre 2022-2024	103
Tabela A. 5 - Incumprimentos de Enterococos entre 2022-2024	104
Tabela A. 6 - Incumprimentos de Escherichia Coli entre 2022-2024	105

Tabela A. 7 - Incumprimentos de Ferro entre 2022-2024	106
Tabela A. 8 - Incumprimentos de Manganês entre 2022-2024.....	107
Tabela A. 9 - Incumprimentos de Número de Colónias a 22°C entre 2022-2024	108
Tabela A. 10 - Incumprimentos de Turvação entre 2022-2024	109
Tabela A. 11 - Número de Roturas entre 2022-2024.....	110
Tabela A. 12 - Número de Empreitadas entre 2022-2024	111
Tabela A. 13 - Número de incumprimentos por indicador	112
Tabela A. 14 - Número de incumprimentos, roturas e empreitadas	113
Tabela A. 15 - Percentagem de incumprimentos por indicador.....	114
Tabela A. 16 - Percentagem de incumprimentos, roturas e empreitadas.....	115
Tabela A. 17 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO - Bactérias Coliformes.....	116
Tabela A. 18 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Chumbo.....	117
Tabela A. 19 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Clostridium Perfringens.....	118
Tabela A. 20 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Enterococos	119
Tabela A. 21 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Escherichia Coli	120
Tabela A. 22 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Ferro.....	121
Tabela A. 23 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Manganês.....	122
Tabela A. 24 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Número Colónias a 22°C	123
Tabela A. 25 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Turvação	124

SÍMBOLOS, ACRÓNIMOS E ABREVIATURAS

AEdP – Águas e Energia do Porto
ANF – Água Não Faturada
ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
EPANET – Software de modelação hidráulica e qualidade da água
EXCEL – Software de folha de cálculo para análise e tratamento de dados
OMS/WHO – Organização Mundial da Saúde/World Health Organization
IWA – Internacional Water Association (Associação Internacional da Água)
ZMC – Zona de Medição e Controlo
IRQ – Índice de Risco de Qualidade
IR – Índice de Risco
IR_{global} – Índice global de risco
DL – Decreto-Lei
PSA – Plano de Segurança da Água
AGR – Avaliação e Gestão de Risco
PCQA – Plano de Controlo da Qualidade da Água
PCO – Plano de Controlo Operacional
SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition (Controlo de Supervisão e Aquisição de Dados)
AMP – Área Metropolitana do Porto
ETA – Estação de Tratamento de Água
CAP – Controlo Ativo de Perdas
PVC – Policloreto de Vinilo
PEAD – Polietileno de Alta Densidade
UNT – Unidade Nefelométrica de Turvação
IQA – Incumprimentos de Qualidade de Água
BC – Bactérias Coliformes
Pb – Chumbo
Cl ou CR – Cloro Residual
CP – Clostridium Perfringens
C – Condutividade
E – Enterococos
EC – Escherichia Coli
Fe ou F – Ferro
Mn ou M – Manganês
NC – Número de Colónias a 22°C
T – Turvação
R – Roturas

E_m – Empreitadas

Q – Caudal

IA – Idade da Água

IA_{norm} – Idade da Água Normalizada

t – Tempo (em horas)

C (t) – Concentração de cloro residual no instante t [mg/L]

C₀ – Concentração de cloro residual inicial [mg/L]

k – Coeficiente de decaimento do cloro [1/h]

h – Horas

LPS ou l/s – Litros por segundo

mg/L – Miligrama por litro

X – Variável genérica

X_{norm} – Variável normalizada

X_{min} – Valor mínimo da variável

X_{max} – Valor máximo da variável

IQA_{norm} – Incumprimentos de Qualidade da Água normalizados

R_{norm} – Roturas normalizadas

Cl_{norm} – Cloro Residual normalizado

w_i – Peso associado a cada variável

ML – Machine Learning

1

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO GERAL

A água destinada ao consumo humano é um recurso essencial à vida, com um papel determinante na proteção da saúde pública, no desenvolvimento socioeconómico e na sustentabilidade ambiental. A sua qualidade e segurança são requisitos indispensáveis para garantir o bem-estar das populações, sendo internacionalmente reconhecidos como um direito humano fundamental.

Nos sistemas de abastecimento modernos, a garantia da qualidade da água não depende apenas dos processos de tratamento, mas também do comportamento da rede de distribuição. Durante o transporte até ao consumidor, a água pode sofrer alterações devido a fatores hidráulicos, físicos, químicos e operacionais, nomeadamente:

- o decaimento do cloro residual;
- o aumento da idade da água;
- a interação com materiais das condutas;
- a ocorrência de roturas e intervenções;
- a formação de biofilmes e deposição de sedimentos.

Desta forma, a gestão da qualidade da água nas redes de distribuição assume um papel particularmente crítico, exigindo abordagens integradas e sustentadas em dados.

1.2 ENQUADRAMENTO REGULATÓRIO E INSTITUCIONAL

A nível europeu, a qualidade da água para consumo humano é definida pela **Diretiva (UE) 2020/2184**, que define valores paramétricos obrigatórios, requisitos de monitorização e princípios de gestão baseada no risco.

Em Portugal, esta disposição foi transposta através do **DL n.º 69/2023**, que introduz um novo paradigma assente em:

- Avaliação e gestão de risco (**AGR**);
- Reforço da monitorização operacional;
- Maior transparência e comunicação ao consumidor;
- Integração de abordagens preventivas.

A supervisão do sector é assegurada pela **ERSAR**, que estabelece indicadores de desempenho e monitoriza a qualidade do serviço prestado pelas entidades gestoras.

Entre estes indicadores destaca-se o conceito de **Água Segura**, que representa uma percentagem de análises em conformidade com a legislação aplicável.

1.3 O INDICADOR “ÁGUA SEGURA” E A SUA EVOLUÇÃO

A Água Segura constitui uma métrica de referência no setor do abastecimento de água em Portugal, sendo amplamente utilizado pela **ERSAR** para avaliar o desempenho das entidades gestoras. Este indicador expressa a percentagem de análises em conformidade com os valores paramétricos definidos na legislação aplicável, integrando parâmetros de natureza microbiológica, química e indicadores operacionais.

Apesar da sua privacidade para caracterização global do desempenho, a análise da evolução temporal deste indicador exige uma interpretação, especialmente no que respeita à consistência dos dados disponíveis ao longo do tempo.

1.3.1 Evolução temporal do indicador (2002-2024)

A análise da evolução do indicador “Água Segura” em Portugal entre 2002 e 2024 evidencia uma melhoria global significativa dos níveis de conformidade. Contudo, a interpretação desta evolução deve considerar a qualidade e representatividade dos dados nos primeiros anos da série.

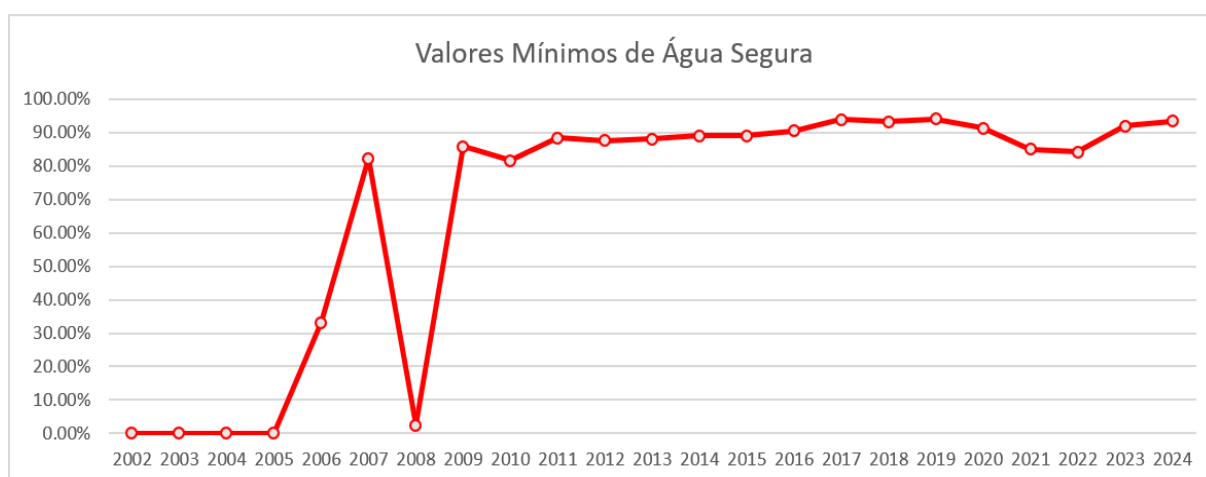


Figura 1 - Evolução dos valores mínimos do indicador “Água Segura” entre 2002-2024

A **Figura 1** apresenta a evolução dos valores mínimos identificados a nível nacional da Água Segura, permitindo identificar situações de menor desempenho ao longo do período analisado.

Desta observação pode-se concluir o seguinte:

- Nos anos iniciais (2002-2005), surgem valores nulos, algo que não corresponde necessariamente a falhas reais de qualidade, mas sim à ausência de monitorização sistemática, ao número reduzido de análises realizadas e à falta de uniformização nos critérios de comunicação à **ERSAR**;

- A partir de 2006, verifica-se uma estabilização progressiva dos valores mínimos, refletindo uma consolidação dos sistemas de controlo, uma maior exigência regulamentar e um aumento da representatividade das amostras;
- Alguns valores anómalos persistem pontualmente (2006 e 2008), mas correspondem a casos isolados e não comprometem a leitura global da tendência.

Paralelamente, a análise dos valores máximos evidencia um comportamento distinto, como se pode verificar na **Figura 2**.

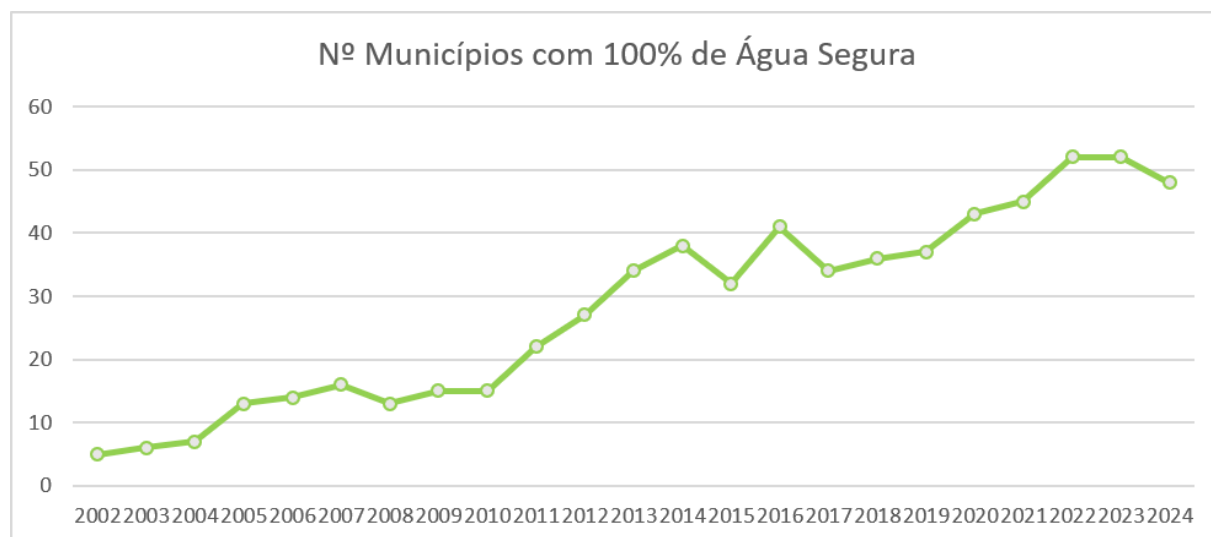


Figura 2 - Evolução do número de municípios com valores de 100% do indicador “Água Segura” entre 2002-2024

Esta evolução permite observar que já nos primeiros anos da série vários municípios encontram-se com valores máximos, existindo um crescimento bastante linear ao longo do tempo.

Nota-se também que existe um aumento mais progressivo a partir de 2010, e que nos últimos anos (2022-2024), existe uma média aproximada de 50 municípios com valores máximos, os valores mais elevados de toda a série, que justificam o seu uso no estudo desta dissertação.

Ainda que não prejudique no funcionamento das entidades gestoras, é importante confirmar que estes valores da **Figura 2** não são totalmente corretos. A existência de valores de 100% de Água Segura, é considerada impossível, algo justificado pela incoerência que existe nesta situação, já que isso propõe um conjunto de redes de distribuição de água sem incumprimentos, algo não concretizável na realidade.

Estes valores inflacionados, são justificados pelo cruzamento de vários **PCQA's** e **PCO's** usados pelas entidades gestoras, para que assim selecionem os pontos com melhores resultados à **ERSAR**, dando a entender que os resultados apresentados são perfeitos, não sendo a verdadeira situação.

Apesar destes casos parecerem ilícitos, na verdade cumprem a legislação nacional e regulamentos da entidade reguladora, já que a mesma sabe que os resultados reais se aproximam do valor máximo. Ainda assim, existe a necessidade de as entidades gestoras comunicarem esse ato à **ERSAR**, por questões éticas e informativas.

1.3.2 Justificação da seleção do período de análise (2006-2024)

Com base na análise conjunta dos valores mínimos e máximos, conclui-se que o período inicial da série (2002-2005) apresenta limitações específicas que inviabilizam a sua utilização para análise comparativa rigorosa.

As principais razões são:

- a) Inconsistência da monitorização
 - Ausência de obrigatoriedade uniforme de controlo;
 - Frequência analítica reduzida e não padronizada;
 - Cobertura territorial incompleta.
- b) Falta de maturidade regulatória
 - O enquadramento legal encontrava-se em fase de consolidação;
 - Não existiam ainda práticas harmonizadas entre entidades gestoras.
- c) Problemas de representatividade dos dados
 - Valores extremos (mínimos muito baixos), resultam frequentemente da ausência de dados e não de incumprimentos reais;
 - Impossibilidade de distinguir entre “não conformidade” e “falta de informação”.

1.3.3 Período adotado para análise

Face às limitações identificadas, a presente dissertação considera exclusivamente o período de 2006-2024 para estudo da Água Segura.

Esta escolha fundamenta-se nos seguintes critérios:

- Disponibilidade de dados consistentes e comparáveis;
- Estabilização do quadro regulatório;
- Uniformização das práticas de monitorização;
- Representatividade estatística dos resultados;
- Redução de enviesamentos associados à ausência de dados.

Assim, o período selecionado garante uma base sólida para a análise da evolução da qualidade da água, permitindo interpretações robustas e comparáveis entre diferentes sistemas e escalas territoriais.

1.3.4 Implicações para a análise subsequente

A questão da análise ao período 2006-2024 tem implicações diretas no estudo da Água Segura, tais como:

- Permissão de uma avaliação fiável da evolução nacional;
- Garantia de coerência na comparação com a Área Metropolitana e com o município do Porto;
- Desvio de interpretações enviesadas por dados incompletos;
- Garantia de alinhamento com o contexto atual de gestão da qualidade da água.

Adicionalmente, esta definição temporal estabelece a base para o aprofundamento realizado na secção seguinte, onde se analisa o comportamento do indicador a nível nacional, identificando tendências estruturais e fatores explicativos da evolução observada.

Assim, importa agora analisar de forma detalhada a evolução do indicador “Água Segura” no período 2006-2024 a nível nacional, identificando as principais tendências, fatores explicativos e implicações para a gestão dos sistemas de abastecimento.

1.4 EVOLUÇÃO NACIONAL DA QUALIDADE DA ÁGUA (2006-2024)

Na sequência da definição do período de análise (2006-2024), torna-se possível proceder a uma avaliação robusta da evolução da qualidade da água para consumo humano em Portugal, com base na Água Segura e nos dados publicados pela ERSAR.

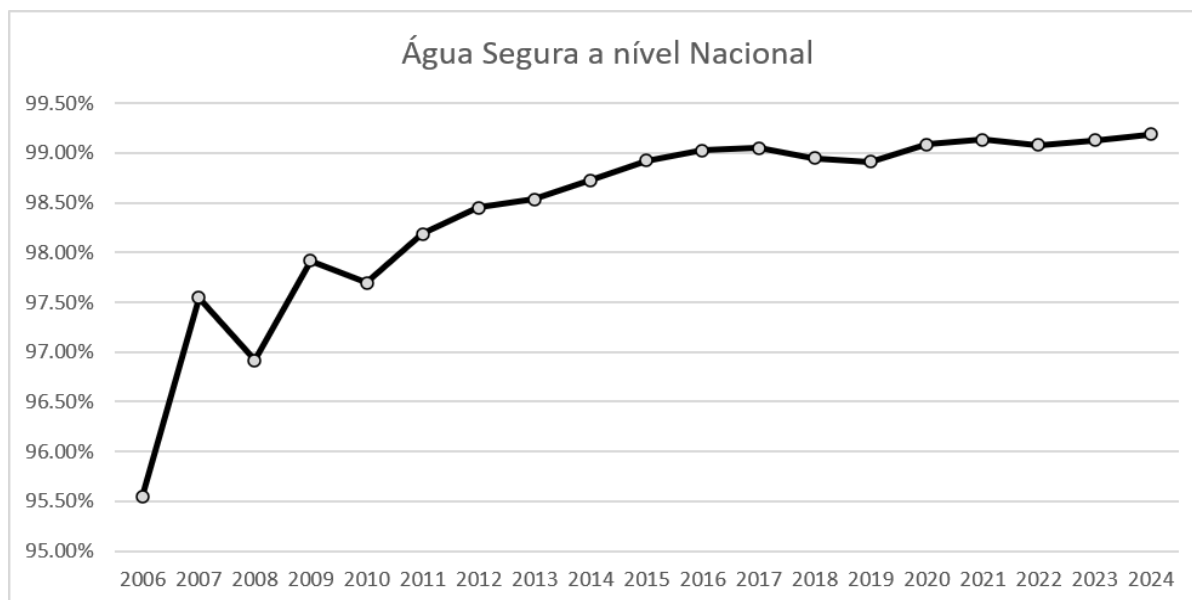


Figura 3 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Nacional entre 2006-2024

1.4.1 Tendência global e níveis de desempenho

A análise da evolução nacional do indicador “Água Segura” evidencia um desempenho globalmente elevado e em progressiva melhoria ao longo das últimas duas décadas.

Da observação da **Figura 3**, destacamos as seguintes tendências estruturais:

- a) Elevados níveis de conformidade ao longo de todo o período
 - Valores médios sempre superiores a 95%;
 - Estabilização em níveis superiores a 99% nos anos mais recentes.
- b) Melhoria progressiva e sustentada
 - Crescimento gradual desde 2006;
 - Consolidação após 2010;
 - Estagnação positiva a partir de 2014.
- c) Redução da variabilidade interanual
 - Oscilações menos pronunciadas nos anos mais recentes;
 - Maior estabilidade dos sistemas de abastecimento.

Esta evolução demonstra que o sistema nacional de abastecimento de água atingiu um elevado grau de atualização técnica e operacional.

1.4.2 Fatores estruturais de melhoria

A evolução positiva observada resulta da conjugação de vários fatores estruturais que atuaram de forma consistente ao longo do período analisado.

1.4.2.1 Consolidação do enquadramento legal

O reforço progressivo da legislação teve um impacto direto na melhoria da qualidade da água, definindo valores paramétricos mais exigentes, aumentando a frequência de monitorização, introduzindo obrigações claras para as entidades gestoras e evoluindo para modelos baseados no risco (culminando no **DL n. °69/2023**).

Esta consolidação faz com que haja um maior controlo, que por sua vez aumenta a deteção de problemas, permitindo assim a melhoria contínua dos sistemas de cada entidade gestora.

1.4.2.2 Investimento em infraestruturas

A modernização das redes de abastecimento contribuiu significativamente para a melhoria da qualidade, sendo esta executada por:

- Substituição de condutas antigas (reduz o risco de contaminação);

- Redução de roturas e infiltrações (influência direta na qualidade da água, como se verificará nesta dissertação);
- Reabilitação de reservatórios;
- Otimização dos sistemas de tratamento.

1.4.2.3 Evolução das práticas operacionais

As entidades gestoras registaram uma evolução significativa ao nível da operação, a partir da:

- Implementação de sistemas **SCADA**;
- Monitorização contínua de parâmetros;
- Melhoria da resposta a incidentes;
- Introdução de práticas preventivas.

Esta transição de gestão reativa para gestão proativa permite o desenvolvimento dos sistemas a partir da gestão do risco, algo que previne/diminui drasticamente os incumprimentos ligados à qualidade da água.

1.4.2.4 Integração de boas práticas internacionais

A incorporação de orientações da **OMS** e da **IWA** contribuiu para a evolução do setor, nomeadamente a implementação dos Planos de Segurança da Água (**PSA**), a adoção de abordagens baseadas no risco e a valorização de variáveis operacionais (cloro residual e idade da água).

1.4.3 Redução das assimetrias territoriais

Um dos aspetos mais relevantes da evolução nacional é a diminuição significativa das diferenças entre os concelhos.

A análise da **Figura 3** evidencia o seguinte:

- Aumento do número de municípios com desempenho “máximo”;
- Convergência progressiva dos valores entre regiões;
- Redução de disparidades entre zonas urbanas e rurais.

Além disso, verifica-se que nos primeiros anos existe alguma heterogeneidade, algo que se torna num sistema homogéneo e consolidado nos anos recentes, o que permite concluir que atualmente, a diferença já não está entre municípios, mas sim dentro das redes.

Embora a análise nacional evidencie uma evolução muito positiva da qualidade da água em Portugal e uma progressiva uniformização do desempenho entre os sistemas de abastecimento, torna-se essencial aprofundar esta análise à escala regional. A Área Metropolitana do Porto constitui um caso de estudo particularmente relevante, dada a sua complexidade urbana, elevada densidade populacional e forte interligação entre sistemas.

1.5 ENQUADRAMENTO METROPOLITANO - ÁREA METROPOLITANA DO PORTO

1.5.1 Caracterização geral da Área Metropolitana do Porto

A Área Metropolitana do Porto (AMP) constitui uma das principais regiões urbanas de Portugal, integrando atualmente 17 municípios, como se verifica na **Figura 4**, caracterizados por uma elevada densidade populacional, forte dinamismo económico e elevada complexidade infraestrutural.



Figura 4 - Mapa da Área Metropolitana do Porto

No contexto do abastecimento de água, a **AMP** distingue-se por:

- Elevado nível de interligação entre sistemas;
- Forte dependência de origens comuns de água;
- Elevada exigência ao nível da qualidade de serviço;
- Complexidade operacional associada a redes urbanas densas.

Estas características tornam a **AMP**, um contexto particularmente relevante para a análise da qualidade da água, permitindo uma leitura mais específica do desempenho de sistemas urbanos avançados.

1.5.2 Evolução do indicador “Água Segura” na AMP (2006-2024)

Uma análise da evolução da Água Segura na **AMP** entre 2006 e 2024 evidencia um desempenho globalmente elevado, alinhado - e frequentemente superior - à média nacional, como se verifica na **Figura 5**.

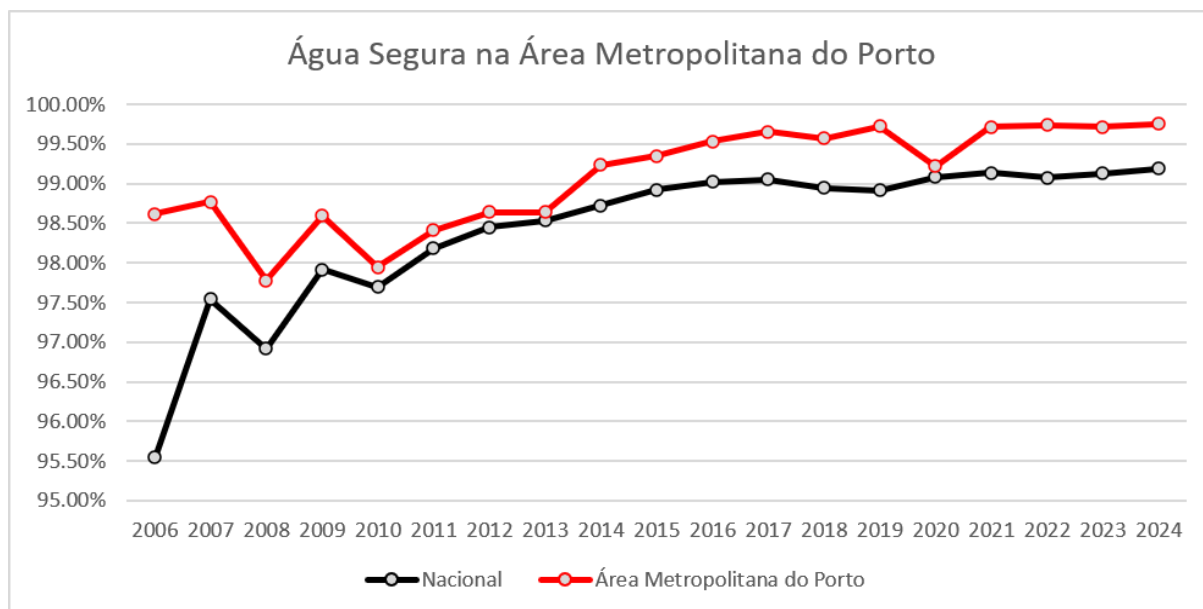


Figura 5 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Metropolitano e comparação com a evolução Nacional entre 2006-2024

Da observação da **Figura 5**, destacam-se as seguintes tendências:

- Elevados níveis de conformidade ao longo de todo o período, com valores médios consistentemente superiores a 97.50% e estabilização em níveis próximos de 99.50% a partir de 2014;
- Reduzida variabilidade interanual, isto é, oscilações pouco significativas que demonstram a elevada estabilidade dos sistemas metropolitanos;
- Convergência para valores de excelência, sendo que a partir de 2016, os municípios da **AMP** apresentam valores muito próximos do limite máximo.

1.5.3 Fatores explicativos do desempenho metropolitano

O elevado desempenho da **AMP** pode ser explicado por um conjunto de fatores estruturais específicos desta região:

- a) Elevada capacidade de investimento
 - Os municípios da **AMP** beneficiam de um maior acesso a financiamento, de programas contínuos de reabilitação de redes e da modernização de infraestruturas, o que resulta em redes mais fiáveis, numa menor incidência de roturas e num maior controlo da qualidade.
- b) Forte componente urbana
 - A elevada densidade urbana traduz-se em padrões de consumo mais estáveis, num menor tempo de residência e numa melhor manutenção do cloro residual (sendo este fator essencial para a redução da idade da água, garante o seu impacto num menor risco microbiológico).
- c) Maturidade técnica das entidades gestoras
 - As entidades gestoras da **AMP** apresentam, em geral, equipas técnicas especializadas, uma maior adoção de sistemas de monitorização e uma maior capacidade de resposta operacional.
- d) Integração de sistemas e redundância
 - A interligação entre sistemas permite uma maior resiliência, a redistribuição de caudais e a mitigação de falhas locais.

1.5.4 O papel da ETA de Lever

Um dos elementos estruturais mais relevantes no desempenho da **AMP** é a forte dependência da **ETA** de Lever, responsável pelo abastecimento de uma parte significativa da região, como se pode observar na **Figura 6**.

1.5.5 Comparação entre diferentes subconjuntos da AMP

Uma análise comparativa entre diferentes grupos de concelhos permite identificar variações relevantes dentro da própria **AMP**. Faz sentido desta forma fazer uma comparação entre o conjunto da **AMP** e os subconjuntos da mesma, abastecida pela **ETA** de Lever e abastecida por outras **ETA**, já que esta observação permite verificar melhor o impacto da **ETA** de Lever na Área Metropolitana do Porto.

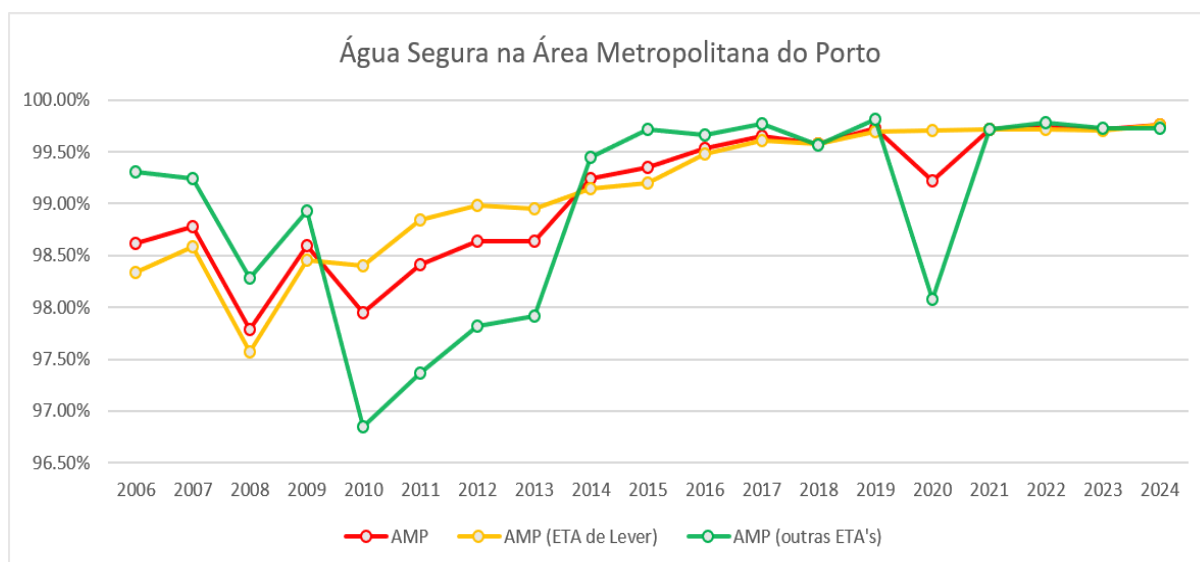


Figura 7 - Evolução do indicador “Água Segura” a nível Metropolitano e comparação com a evolução Metropolitana abastecida pela ETA de Lever e a evolução Metropolitana abastecida por outras ETA entre 2006-2024

A **Figura 7**, permite evidenciar:

- Apesar dos municípios não abastecidos pela **ETA** de Lever terem bastantes valores acima dos restantes (2006-2009 e 2014-2019), pode-se verificar um desempenho superior dos municípios abastecidos pela **ETA** de Lever, algo justificado pelos elevados níveis de conformidade ao longo do tempo dos mesmos;
- Convergência progressiva entre todos os grupos ao longo do tempo;
- Redução significativa das diferenças nos anos mais recentes.

Resumindo, nos primeiros anos existem diferenças estruturais entre sistemas, algo que se foi homogeneizando em questões de desempenho até atualmente, onde convergiram os valores para um limite quase máximo e indistinguíveis, o que permite afirmar a melhoria geral dos sistemas na **AMP**.

1.5.6 Síntese do enquadramento metropolitano

A análise da **AMP** permite retirar conclusões fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. A região apresenta níveis de excelência na qualidade da água, com valores sempre acima dos 98% de Água Segura, à exceção de 2008 e 2010. Existe uma elevada uniformidade entre municípios a partir de 2014. O indicador “Água Segura” apresenta nos últimos anos valores muito próximos do limite máximo, fazendo com que as diferenças existentes sejam cada vez mais reduzidas.

À escala metropolitana, a qualidade da água apresenta um comportamento altamente uniforme e estabilizado, dificultando a identificação de problemas específicos através de indicadores agregados.

Verificando o elevado desempenho metropolitano, torna-se particularmente relevante analisar o comportamento do município do Porto de forma individual, atendendo às suas especificidades de infraestrutura e operacionais, que poderão introduzir variabilidade adicional não captada pela análise agregada à escala da Área Metropolitana do Porto.

1.6 ENQUADRAMENTO LOCAL - MUNICÍPIO DO PORTO

1.6.1 Caracterização geral do sistema de abastecimento

O município do Porto constitui um dos sistemas urbanos de abastecimento de água mais complexos de Portugal, caracterizado por uma elevada densidade populacional, forte heterogeneidade infraestrutural e elevada exigência operacional.

A gestão da rede de distribuição é assegurada pela Águas e Energia do Porto (**AEdP**), entidade responsável pela garantia da qualidade, continuidade e eficiência do serviço de abastecimento ao consumidor final. A captação e tratamento da água são assegurados pela Águas do Douro e Paiva, através da **ETA** de Lever, sendo posteriormente distribuídos através da rede municipal.

De acordo com os dados operacionais de 2024, o sistema apresenta as seguintes características principais:

- **Extensão total da rede de distribuição:** aproximadamente 825 km;
- **Número de clientes abastecidos:** cerca de 170000 consumidores;
- **Zonas de Medição e Controlo (ZMC):** 115 zonas, 25 delas principais (abrangem as restantes);
- **Reservatórios e capacidade total de armazenamento:** 6 unidades, com cerca de 126000 m³ de capacidade conjunta;
- **Estações Elevatórias:** 1 estação elevatória ativa;
- **Volume de água distribuída anualmente:** cerca de 19 milhões de m³/ano (aproximadamente 53 mil de m³/dia);

- **Idade média da rede:** superior a 25 anos, com troços significativos de infraestruturas com mais de meio século;
- **Número de roturas/100 km:** ordem de 20 roturas e avarias em condutas (não CAP);
- **Falhas no abastecimento de água (>4h):** menos de 0.5/1000 ramais (para uma boa qualidade a ERSAR determina no indicador AA03 - **Ocorrência de falhas no abastecimento**, que este valor deve ser no máximo de 1 falha por 1000 ramais);
- **Índice de Água Não Faturada (ANF):** inferior a 13%.

Estas características refletem um sistema de grande escala, com elevada complexidade hidráulica e operacional.

1.6.2 Especificidades infraestruturais e operacionais

O sistema de abastecimento de água do concelho do Porto apresenta um conjunto de especificidades infraestruturais e operacionais que o distinguem de outros sistemas da Área Metropolitana do Porto, influenciando diretamente o comportamento da qualidade da água na rede de distribuição.

Estas especificidades resultam da interação entre características físicas da rede, condições de operação e contexto urbano, traduzindo-se numa maior complexidade na gestão do sistema e numa maior sensibilidade a variações locais da qualidade da água.

a) Características infraestruturais da rede

A nível infraestrutural, a rede de distribuição do Porto caracteriza-se por uma elevada heterogeneidade, refletindo a sua evolução histórica ao longo de várias décadas.

Destacam-se os seguintes aspetos:

- Coexistência de condutas de diferentes materiais, incluindo ferro fundido, fibrocimento, aço, **PVC** e **PEAD**;
- Presença de troços antigos, com idades superiores a 50 anos;
- Variabilidade de diâmetros e configurações estruturais;
- Integração de infraestruturas recentes com troços mais antigos, resultantes de intervenções faseadas.

Estas características têm implicações diretas na qualidade da água, tais como uma maior suscetibilidade a processos de corrosão, a libertação de metais (ferro e manganês), o aumento do consumo de desinfetante ao longo da rede e a maior propensão para acumulação de sedimentos.

b) Condicionantes operacionais do sistema

Operacionalmente, a gestão da rede do Porto é particularmente exigente devido à elevada intensidade de utilização e à necessidade frequente de intervenções.

Entre os principais fatores destacam-se:

- Elevada densidade populacional e padrões de consumo variáveis;
- Necessidade de manobras hidráulicas frequentes;
- Gestão dinâmica de pressões e caudais;
- Operação contínua de reservatórios e interligações.

Estas condições operacionais introduzem variações temporais no regime de escoamento, alterações na distribuição do cloro residual e potencial mobilização de sedimentos existentes na rede.

c) Intervenções na rede e manutenção

A operação do sistema implica um volume significativo de intervenções, incluindo a reparação de roturas, a substituição de condutas, a higienização de reservatórios e trabalhos de manutenção corretiva e preventiva.

Estas intervenções, embora fundamentais para garantir a fiabilidade do sistema, podem provocar efeitos temporários na qualidade da água, tais como o aumento da turvação, variações nos níveis de cloro residual, a re-suspensão de partículas acumuladas e alterações momentâneas das condições hidráulicas.

d) Variabilidade hidráulica e tempo de residência

Do ponto de vista hidráulico, a rede do Porto apresenta uma elevada variabilidade, influenciada por diferenças significativas de altitude, uma configuração complexa das **ZMC's** e distribuição não uniforme dos consumos.

Estas condições podem originar zonas com baixos escoamentos, elevado tempo de residência da água, maior propensão para decaimento do cloro residual e condições favoráveis ao desenvolvimento de processos microbiológicos.

1.6.3 Evolução do indicador “Água Segura” no município do Porto

A análise da evolução da Água Segura no concelho do Porto evidencia um desempenho globalmente elevado, consistente com o observado à escala metropolitana, como se pode observar na **Figura 8**.

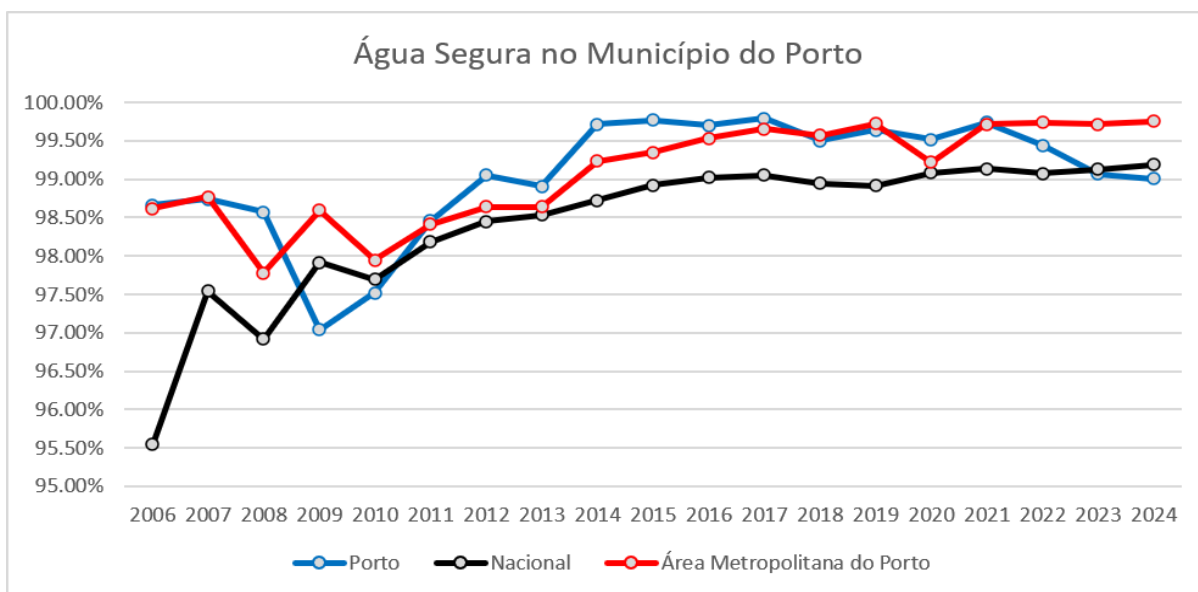


Figura 8 - Evolução do indicador “Água Segura” no município do Porto e comparação com a evolução Metropolitana e a evolução Nacional entre 2006-2024

Da **Figura 8**, destacam-se os seguintes aspetos:

- A evolução local da Água Segura assemelha-se à evolução metropolitana;
- Estabilização em níveis superiores a 99% a partir de 2012 (antes da evolução metropolitana e nacional);
- Existência de pequenas oscilações ao longo do período (2009-2010 e 2022-2024).

1.6.4 Interpretação das oscilações observadas

Embora o desempenho global seja elevado, o comportamento do indicador no Porto apresenta uma variabilidade ligeiramente superior à média da **AMP**.

Esta variabilidade pode ser explicada por fatores operacionais específicos:

- a) Intervenções na rede
 - Substituições de condutas;
 - Reparações de roturas;
 - Alterações temporárias da hidráulica.

Estas podem originar episódios pontuais de não conformidade e variações locais da qualidade.

- b) Características da rede
 - Presença de troços antigos;
 - Interações com materiais;
 - Acumulação de sedimentos.

c) Operação do sistema

- Manobras hidráulicas;
- Variações de consumo;
- Gestão de reservatórios.

1.6.5 Comparação com a Área Metropolitana do Porto

A comparação entre o Porto e os restantes concelhos da **AMP** permite destacar um aspeto fundamental, como já foi verificado na **Figura 8**:

- O Porto apresenta níveis de qualidade equivalentes ao grupo de excelência metropolitano;
- As diferenças observadas são reduzidas, pontuais e tecnicamente justificáveis (**1.6.4**).

O desempenho do Porto é elevado, mas obtido num contexto operacional significativamente mais exigente.

1.6.6 Síntese do enquadramento local

A análise do concelho do Porto permite retirar conclusões fundamentais para o desenvolvimento da dissertação:

- Pontos fortes: uma elevada qualidade global da água, o cumprimento consistente da legislação e um sistema tecnicamente robusto;
- Desafios específicos: uma rede envelhecida e heterogénea, uma elevada frequência de intervenções, uma variabilidade hidráulica significativa e a possibilidade de problemas localizados.

Apesar de apresentar níveis elevados de conformidade global, o sistema de abastecimento do Porto evidencia uma complexidade operacional que pode originar variações locais da qualidade da água, não totalmente captadas por indicadores agregados como a Água Segura.

Deste modo, torna-se pertinente analisar criticamente a capacidade do indicador “Água Segura” para representar a qualidade da água em sistemas urbanos complexos, bem como a necessidade de recorrer a abordagens mais detalhadas, baseadas em variáveis operacionais e modelação hidráulica.

1.7 LIMITAÇÕES DO INDICADOR “ÁGUA SEGURA” E A NECESSIDADE DE UMA ABORDAGEM PROATIVA

1.7.1 Saturação do indicador “Água Segura”

A análise integrada da evolução da qualidade da água à escala nacional, metropolitana e local evidencia níveis de desempenho globalmente elevados, com valores de Água Segura consistentemente próximos do limite máximo.

Conforme evidenciado na **Figura 8**:

- A nível nacional, os valores médios situam-se próximos dos 99%;
- Na Área Metropolitana do Porto, estes valores aproximam-se dos 99,5%;
- No concelho do Porto verifica-se um comportamento semelhante, com valores superiores a 99% durante grande parte do período analisado.

Este contexto conduz a um fenómeno de saturação do indicador, caracterizado pela sua aproximação sistemática ao valor máximo (100%), pela reduzida dispersão entre sistemas e pela diminuição da variabilidade interanual.

A saturação do indicador tem consequências diretas na sua capacidade analítica:

- Redução significativa do poder discriminativo;
- Dificuldade em identificar diferenças entre sistemas de elevado desempenho;
- Incapacidade de distinguir entre sistemas estáveis e sistemas com problemas pontuais, mas globalmente conformes.

Em contextos de elevada conformidade, a Água Segura deixa de ser um indicador suficiente para suportar decisões técnicas detalhadas.

1.7.2 Limitações do indicador na análise da qualidade da água

Para além desta saturação, a Água Segura apresenta também algumas limitações estruturais que condicionam a sua utilização em análises técnicas avançadas:

- a) Natureza agregada
 - O indicador sintetiza múltiplos parâmetros num único valor;
 - Não distingue entre tipos de incumprimento;
 - Não permite identificar parâmetros críticos específicos.
- b) Ausência de resolução espacial
 - Não identifica a localização das ocorrências;
 - Impossibilita a deteção de zonas críticas e troços problemáticos da rede;
 - Não permite análise ao nível das ZMC.
- c) Limitações na análise temporal
 - Baseado em resultados pontuais de campanhas analíticas;

- Não capta variações de curto prazo;
 - Não reflete eventos operacionais transitórios.
- d) Desligamento das variáveis operacionais
- O indicador não incorpora fatores fundamentais para a compreensão da qualidade da água, tais como o cloro residual, a idade da água, pressões e regimes de escoamento, roturas e intervenções na rede, materiais das condutas e incumprimentos ligados a indicadores físicos, químicos e microbiológicos que serão estudados ao longo da dissertação;
 - Não permite estabelecer relações causa-efeito entre o funcionamento da rede e a qualidade da água.

1.7.3 Necessidade de abordagens baseadas em variáveis operacionais

Face às limitações identificadas, torna-se evidente a necessidade de complementar a Água Segura com uma análise baseada em variáveis operacionais e hidráulicas.

As boas práticas internacionais, nomeadamente as recomendações da **OMS** e da **IWA**, reforçam esta abordagem, destacando a importância de parâmetros como:

- Cloro residual: indicador direto da eficácia da desinfecção, sensível ao tempo de residência e às condições da rede;
- Idade da água: relacionada com o decaimento do desinfetante e associada ao risco microbiológico e à degradação da qualidade;
- Eventos operacionais: roturas, substituições de condutas e higienizações de reservatórios;
- Características infraestruturais: materiais, idade da rede e configuração hidráulica.

1.7.4 Integração da modelação hidráulica e de qualidade

A utilização de ferramentas de modelação constitui um elemento fundamental para ultrapassar as limitações identificadas.

Em particular, o recurso ao software **EPANET** permite:

- Simular a distribuição espacial do cloro residual;
- Calcular a idade da água ao longo da rede;
- Identificar zonas de estagnação e maior risco;
- Avaliar diferentes cenários operacionais, como estratégias de recloragem.

A passagem de uma análise baseada em observações pontuais para uma análise contínua e espacialmente detalhada garante uma vantagem principal para o combate da degradação da qualidade da água.

1.7.5 Justificação da abordagem da dissertação

No contexto específico do concelho do Porto, caracterizado por uma elevada complexidade infraestrutural e operacional, a utilização exclusiva de indicadores agregados revela-se insuficiente para suportar uma gestão eficaz da qualidade da água.

Assim, a presente dissertação propõe o desenvolvimento de uma metodologia integrada que:

- Combina dados analíticos e operacionais;
- Integra modelação hidráulica e de qualidade da água;
- Incorpora uma abordagem baseada no risco;
- Permite a identificação de zonas críticas;
- Apoia a tomada de decisão de forma proativa.

A abordagem proposta assenta nos seguintes pilares:

- Análise de dados históricos (qualidade, roturas e intervenções);
- Definição de indicadores de risco;
- Modelação em **EPANET** (cloro residual e idade da água);
- Proposta de um plano de monitorização proativa.

Neste enquadramento, torna-se claro que a gestão eficaz da qualidade da água em sistemas urbanos complexos exige ferramentas analíticas mais avançadas e integradas. Neste sentido, a presente dissertação tem como objetivo desenvolver uma metodologia proativa que permita identificar, avaliar e mitigar riscos associados à qualidade da água na rede de distribuição da Águas e Energia do Porto.

1.8 OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

1.8.1 Objetivo geral

O principal objetivo desta dissertação é desenvolver uma metodologia integrada e proativa para a gestão da qualidade da água na rede de distribuição da Águas e Energia do Porto, baseada na análise de dados operacionais, na modelação hidráulica e na avaliação de risco.

Esta metodologia visa:

- Apoiar a tomada de decisão técnica;
- Permitir a identificação antecipada de zonas críticas;
- Contribuir para a melhoria contínua da qualidade da água;
- Promover uma abordagem alinhada com os princípios de gestão baseada no risco, definidos no **DL n. °69/2023** e nas boas práticas internacionais.

1.8.2 Objetivos específicos

De forma a concretizar o objetivo geral, a dissertação desenvolve-se em torno dos seguintes objetivos específicos:

- a) **Análise da qualidade da água**
 - Caracterizar a evolução recente da qualidade da água na rede de distribuição do Porto (período 2022-2024);
 - Analisar parâmetros microbiológicos, físico-químicos e operacionais, nomeadamente o cloro residual, turvação, condutividade, ferro, manganês, chumbo e indicadores microbiológicos (Bactérias Coliformes, Clostridium Perfringens, Enterococos, Escherichia Coli e Número de Colónias a 22°C).
- b) **Integração e análise de dados operacionais**
 - Analisar a influência de fatores operacionais na qualidade da água, incluindo roturas na rede, substituição de condutas e higienização de reservatórios;
 - Identificar possíveis relações entre eventos operacionais e variações da qualidade da água.
- c) **Identificação de zonas críticas e avaliação de risco**
 - Definir critérios para a identificação de zonas de maior risco;
 - Integrar dados analíticos e variáveis operacionais;
 - Desenvolver uma abordagem baseada em indicadores de risco.
- d) **Modelação hidráulica e de qualidade da água**
 - Simular a idade da água na rede de distribuição e o decaimento do cloro residual;
 - Identificar zonas com elevado tempo de residência e maior suscetibilidade à degradação da qualidade.
- e) **Proposta de metodologia proativa de gestão**
 - Desenvolver uma metodologia aplicável à realidade da Água e Energia do Porto;
 - Propor estratégias de monitorização otimizada, melhores localizações de pontos de amostragem e medidas de mitigação (exemplo: recloragem em pontos críticos);
 - Garantir o alinhamento com os requisitos legais, recomendações da **ERSAR** e princípios dos Planos de Segurança da Água (**OMS**).
- f) **Validação e aplicação ao caso de estudo**
 - Aplicar a metodologia desenvolvida à rede do município do Porto;

- Validar resultados em articulação com as equipas operacionais e o laboratório de qualidade da água;
- Avaliar a aplicabilidade prática e o potencial de implementação.

A concretização destes objetivos permitirá desenvolver uma abordagem inovadora e tecnicamente fundamentada, capaz de ultrapassar as limitações dos indicadores tradicionais e de suportar uma gestão mais eficiente, preventiva e orientada para o risco da qualidade da água em redes urbanas complexas.

1.9 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação encontra-se organizada em oito capítulos, estruturados de forma a assegurar uma progressão lógica desde o enquadramento do problema até à proposta e validação de uma metodologia de gestão proativa da qualidade da água.

a) Capítulo 1 - Introdução

Apresenta o enquadramento geral da problemática da qualidade da água para consumo humano, incluindo:

- Evolução do indicador “Água Segura” a nível nacional;
- Análise à escala da Área Metropolitana do Porto;
- Caracterização do município do Porto enquanto caso de estudo;
- Identificação das limitações dos indicadores tradicionais;
- Justificação da necessidade de uma abordagem proativa.

São ainda definidos os objetivos da dissertação e a sua estrutura global.

b) Capítulo 2 - Enquadramento Teórico e Normativo

Apresenta a base conceptual e regulamentar que sustenta o trabalho desenvolvido, incluindo:

- Legislação europeia e nacional aplicável (**Diretiva (UE) 2020/2184** e **DL n.º 69/2023**);
- Papel da **ERSAR** e indicadores de desempenho;
- Conceitos de gestão baseada no risco e Planos de Segurança da Água;
- Processos de degradação da qualidade da água em redes de distribuição;
- Variáveis operacionais críticas;
- Fundamentos da modelação hidráulica e de qualidade com recurso ao **EPANET**.

c) Capítulo 3 - Base de Dados e Caracterização da Rede

Descreve o sistema de abastecimento de água do concelho do Porto e os dados utilizados na dissertação:

- Caracterização da rede (infraestruturas, **ZMC**, reservatórios);
- Dados de qualidade da água (parâmetros analíticos);
- Dados operacionais (roturas, substituições, higienizações);
- Dados utilizados na modelação;
- Dados utilizados na modelação;
- Procedimentos de tratamento, validação e integração de dados.

d) Capítulo 4 - Diagnóstico da Qualidade da Água

Apresenta a análise detalhada da qualidade da água na rede de distribuição do Porto:

- Análise de parâmetros microbiológicos, físico-químicos e operacionais;
- Identificação de tendências temporais (2022–2024);
- Análise espacial ao nível das **ZMC**;
- Correlação entre a qualidade da água e as variáveis operacionais;
- Identificação preliminar de zonas críticas.

e) Capítulo 5 - Modelação Hidráulica e de Qualidade da Água

Desenvolve a componente de modelação com recurso ao **EPANET**:

- Modelação da evolução do cloro residual;
- Cálculo da idade da água;
- Identificação de zonas de estagnação e vulnerabilidade;
- Interpretação dos resultados no âmbito da qualidade da água.

f) Capítulo 6 - Metodologia Proativa de Gestão da Qualidade da Água

Apresenta a metodologia desenvolvida na dissertação:

- Definição de critérios de avaliação de risco;
- Integração de dados analíticos, operacionais e de modelação;
- Desenvolvimento de indicadores de risco;
- Construção de uma matriz de classificação de zonas críticas;
- Estruturação de um modelo de apoio à decisão.

g) Capítulo 7 - Conclusões e Trabalhos Futuros

Apresenta as principais conclusões da dissertação, entre as quais:

- Síntese dos resultados obtidos;
- Avaliação do cumprimento dos objetivos;
- Contributos científicos e técnicos do trabalho;
- Limitações da metodologia;
- Propostas de desenvolvimento futuro.

h) Capítulo 8 - Bibliografia e Anexos

Inclui referências bibliográficas ou web gráficas utilizadas ao longo da dissertação e anexos com informação complementar como dados detalhados, resultados adicionais, parâmetros de modelação e eventual código ou métodos de cálculo.

2

ENQUADRAMENTO TEÓRICO E NORMATIVO

2.1 INTRODUÇÃO

A qualidade da água para consumo humano é um elemento central na proteção da saúde pública e na sustentabilidade dos sistemas de abastecimento. Nas últimas décadas, tem-se verificado uma evolução significativa dos paradigmas de gestão, passando de abordagens baseadas na verificação da conformidade para modelos preventivos, suportados pela análise de risco e monitorização contínua.

De acordo com a Organização Mundial de Saúde (**OMS**), a garantia de água segura deve assentar numa abordagem integrada que considere todas as etapas do sistema, incluindo a rede de distribuição, onde podem ocorrer processos de degradação da qualidade (**WHO, 2017**).

Este capítulo apresenta o enquadramento teórico e normativo que sustenta a metodologia proposta, abordando:

- A legislação europeia e nacional aplicável;
- O papel da **ERSAR**;
- Os princípios de gestão baseada no risco;
- Os contributos da **OMS** e da **IWA**;
- Os processos de degradação da qualidade da água em redes;
- As variáveis operacionais críticas;
- Os fundamentos da modelação hidráulica e de qualidade.

2.2 ENQUADRAMENTO LEGAL E REGULATÓRIO

2.2.1 Diretiva (UE) 2020/2184

A **Diretiva (UE) 2020/2184** estabelece o quadro legal europeu para a qualidade da água destinada ao consumo humano, introduzindo um conjunto de avanços significativos face à legislação anterior.

Entre os principais aspetos destacam-se:

- A adoção de uma abordagem baseada na avaliação do risco ao longo de toda a cadeia de abastecimento;
- A introdução de novos parâmetros e limites mais restritivos;
- A exigência de maior transparência e acesso à informação por parte dos consumidores.

A diretiva reforça a necessidade de controlo operacional da qualidade da água na rede de distribuição, reconhecendo que esta constitui uma fase crítica no sistema (**Comissão Europeia, 2020**).

2.2.2 Decreto-Lei n.º 69/2023

Em Portugal, a Diretiva foi transposta através do **DL n.º 69/2023**, que estabelece o regime jurídico da qualidade da água para consumo humano.

O presente diploma introduz um modelo estruturado de Avaliação e Gestão do Risco (**AGR**), abrangendo origem da água, tratamento, transporte, distribuição e edifícios prioritários (sendo apenas estudada a distribuição nesta dissertação).

De acordo com este enquadramento, as entidades gestoras passam a ter a responsabilidade de identificar perigos e avaliar riscos, implementar medidas preventivas, monitorizar variáveis operacionais críticas e garantir a qualidade da água até ao ponto de consumo. Este paradigma aproxima-se diretamente dos princípios dos Planos de Segurança da Água (**PSA**).

2.3 PAPEL DA ERSAR

A **ERSAR** desempenha um papel fundamental na regulação do sector em Portugal, garantindo a qualidade do serviço e a proteção dos consumidores.

2.3.1 Indicadores de desempenho

A **ERSAR** define um conjunto de indicadores que permitem avaliar o desempenho das entidades gestoras, incluindo:

- Água Segura;
- Continuidade do serviço;
- Eficiência operacional;
- Água Não Faturada.

Segundo a **ERSAR (2023)**, estes indicadores são essenciais para o “benchmarking” e melhoria contínua do setor.

2.3.2 Guias técnicos e regulação

A **ERSAR** disponibiliza diversos instrumentos de apoio, como Planos de Controlo da Qualidade da Água (**PCQA**), guias de amostragem, metodologias de avaliação de desempenho e orientações para gestão baseada no risco.

2.4 GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA BASEADA NO RISCO

2.4.1 Evolução do paradigma

Tradicionalmente, a gestão da qualidade da água assentava em amostragem periódica e verificação de conformidade com valores paramétricos.

Contudo, esta abordagem apresenta limitações, nomeadamente na deteção de eventos pontuais e na compreensão das causas dos incumprimentos.

Atualmente, verifica-se uma transição para modelos preventivos, baseados na identificação de perigos, na avaliação de risco, na implementação de medidas de controlo e na monitorização operacional.

Esta mudança foi consolidada através da adoção dos Planos de Segurança da Água (**PSA**), que promovem uma abordagem sistemática baseada na avaliação e gestão do risco ao longo de todo o sistema de abastecimento. Assim, a monitorização da qualidade da água deixa de depender exclusivamente da verificação da conformidade analítica, passando a incorporar a identificação preventiva de perigos e vulnerabilidades operacionais.

2.4.2 Planos de Segurança da Água (PSA)

Os **PSA** constituem a abordagem recomendada pela **OMS** para garantir a qualidade da água de forma preventiva (**WHO, 2017**).

Os **PSA** incluem:

- Identificação de perigos;
- Avaliação de risco;
- Definição de pontos críticos de controlo;
- Monitorização contínua;
- Implementação de medidas corretivas.

A avaliação de riscos desenvolvida no âmbito dos **PSA** baseia-se na identificação dos perigos existentes, na estimativa da probabilidade da sua ocorrência e na avaliação das consequências para a qualidade da água e para a saúde pública. Esta abordagem encontra-se alinhada com os requisitos introduzidos pela **Diretiva (UE) 2020/2184** e pelo **Decreto-Lei n.º 69/2023**, que reforçam a necessidade de implementação de sistemas preventivos de gestão do risco.

Segundo a Organização Mundial de Saúde, a gestão preventiva baseada no risco apresenta maior eficácia do que as abordagens puramente corretivas, uma vez que permite atuar antes da ocorrência de incumprimentos, reduzindo a probabilidade de falhas no sistema de abastecimento e promovendo uma gestão contínua da segurança da água.

2.4.3 Contributos da International Water Association (IWA)

A **IWA** tem contribuído para o desenvolvimento de metodologias de gestão avançadas, nomeadamente:

- Modelos de gestão de ativos (**Alegre et al., 2016**);
- Indicadores de desempenho normalizados;
- Integração de dados operacionais e analíticos.

No âmbito da avaliação de desempenho e da gestão baseada no risco, a **IWA** promove igualmente a utilização de indicadores normalizados, permitindo comparar sistemas com diferentes dimensões, características operacionais e níveis de serviço. A normalização converte variáveis expressas em diferentes unidades para uma escala comum, facilitando a integração de múltiplos fatores na construção de índices de desempenho e de risco.

Esta abordagem constitui a base conceptual da metodologia proposta nesta dissertação, onde diferentes variáveis operacionais e de qualidade da água serão posteriormente normalizadas e integradas numa única métrica de avaliação do risco.

A **IWA** destaca a importância de variáveis operacionais como o cloro residual, o tempo de residência, a pressão e o caudal.

2.5 PROCESSOS DE DEGRADAÇÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A qualidade da água pode deteriorar-se significativamente durante a distribuição, devido a processos físicos, químicos e biológicos.

2.5.1 Decaimento do cloro residual

O cloro residual é fundamental para garantir a segurança microbiológica da água na rede. O seu comportamento pode ser descrito por modelos cinéticos de 1ª ordem (**Rossman, 2000**):

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (1.1)$$

Onde:

- $C(t)$ [mg/L]: Concentração de cloro no instante t ;
- C_0 [mg/L]: Concentração inicial (no instante $t=0$);
- t [h]: tempo decorrido (em horas);
- k [h^{-1}]: Constante cinética de decaimento (velocidade de reação, dependente da temperatura, materiais e qualidade da água).

A expressão anterior corresponde a uma formulação teórica baseada numa cinética de primeira ordem, muito utilizada para representar a redução da concentração de cloro residual ao longo do tempo, sendo a mesma usada pelo software **EPANET**. Contudo, em sistemas reais de distribuição, o decaimento depende não apenas do tempo de residência da água, mas também da temperatura, da matéria orgânica presente, da rugosidade das condutas e das interações entre a água e os materiais da rede.

O decaimento ocorre tanto na massa de água (bulk) como nas paredes das condutas (wall reactions). No software **EPANET**, estes mecanismos são representados através de coeficientes de reacção associados à massa de água e às paredes das condutas. No caso da rede da **AEdP** foram utilizados os coeficientes globais calibrados de -1.78 para o decaimento na massa de água e 0.05 para as reacções nas paredes das condutas, valores adotados nos modelos atualmente utilizados pela entidade gestora.

2.5.2 Idade da água

A idade da água é uma variável crítica na qualidade da água (**Grayman et al., 2009**):

- Uma idade elevada implica numa maior degradação da qualidade;
- A mesma pode ser correlacionada com a perda de cloro, com o crescimento microbiológico e com o aumento da turvação.

A idade da água é frequentemente utilizada como um indicador indireto do risco de degradação da qualidade da água. À medida que o tempo de residência aumenta, tendem a verificar-se menores concentrações de cloro residual, maior probabilidade de desenvolvimento microbiológico e maior suscetibilidade à acumulação de subprodutos resultantes de interações químicas na rede. Por este motivo, a idade da água constitui uma das variáveis mais utilizadas em análises de risco e modelação da qualidade da água.

2.5.3 Interação com materiais

Os materiais das condutas influenciam significativamente a qualidade da água:

- A interação água - ferro fundido gera corrosão;
- A interação água - fibrocimento provoca a libertação de partículas tóxicas;

- A interação da água com materiais mais antigos implica num maior consumo de cloro.

A influência dos materiais assume particular relevância em sistemas de distribuição com elevada heterogeneidade construtiva. A coexistência de diferentes materiais e diferentes idades das condutas pode originar comportamentos distintos ao nível da corrosão, da libertação de metais e do consumo de desinfetante. Consequentemente, a caracterização dos materiais presentes na rede constitui um elemento importante nos processos de avaliação de risco recomendados pelos Planos de Segurança da Água.

No caso da rede de distribuição do Porto, coexistem materiais como o ferro fundido, o aço, o fibrocimento, o **PVC** e o **PEAD**, bem como troços com várias décadas de serviço. Estas características podem contribuir para fenómenos de corrosão, libertação de ferro ou manganês, acumulação de depósitos e aumento do consumo de cloro residual, influenciando diretamente a qualidade da água distribuída.

2.5.4 Biofilmes e Sedimentos

Os biofilmes formam-se nas superfícies internas das condutas e podem proteger microrganismos, libertar contaminantes e aumentar o consumo de desinfetante (**Berry et al., 2006**).

A presença de biofilmes e sedimentos está frequentemente associada a zonas com baixos caudais e elevados tempos de residência da água. Estas condições favorecem a redução do cloro residual disponível e podem contribuir para o aparecimento de incumprimentos microbiológicos, justificando a utilização de variáveis hidráulicas e operacionais na avaliação do risco da qualidade da água.

Os processos descritos nas secções anteriores encontram-se fortemente interligados. O decaimento do cloro residual, a idade da água, a interação com os materiais das condutas e a formação de biofilmes constituem alguns dos principais mecanismos de degradação da qualidade da água nas redes de distribuição. Consequentemente, estas variáveis assumem um papel central na avaliação de risco e na interpretação dos resultados de modelação hidráulica e de qualidade da água desenvolvidos nos capítulos seguintes.

2.6 VARIÁVEIS OPERACIONAIS CRÍTICAS

A literatura identifica variáveis-chave para a gestão da qualidade da água (**Alegre et al., 2016**):

- Cloro residual;
- Idade da água;
- Roturas;
- Substituições de condutas;
- Higienização de reservatórios;
- Pressão e caudal.

Estas variáveis com os indicadores físico-químicos e microbiológicos, permitem estabelecer relações causa-efeito e constituem a base da metodologia desta dissertação.

2.7 MODELAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

2.7.1 Fundamentos da modelação hidráulica

A modelação hidráulica baseia-se na resolução das equações de Continuidade e Energia, permitindo simular o comportamento da rede (**Todini & Pilati, 1988**).

2.7.2 Modelação no EPANET

O software **EPANET (Rossman, 2000)** permite simular caudais e pressões, modelar transporte de substâncias e calcular quantidades de cloro residual e a idade da água.

No caso de estudo apenas interessa a capacidade de cálculo do cloro residual ao longo da rede e a idade da água (os caudais apenas servirão para a deteção de anomalias a desconsiderar nos resultados das simulações). A modelação permite a identificação de zonas de estagnação, avaliar o risco de degradação, testar estratégias de recloração e apoiar decisões operacionais.

2.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Este capítulo consolidou o enquadramento teórico e normativo da dissertação, evidenciando:

- A transição para modelos de gestão baseados no risco;
- A importância das variáveis operacionais na qualidade da água;
- O papel da modelação na análise de sistemas complexos;
- A necessidade de abordagens integradas para a gestão da qualidade da água em redes de distribuição.

3

BASE DE DADOS E CARACTERIZAÇÃO DA REDE

3.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo descreve a base de dados utilizada na dissertação e caracteriza o sistema de distribuição de água do concelho do Porto, explorado pela **AEdP**.

A análise baseia-se na integração de diferentes fontes de dados operacionais e analíticos, nomeadamente:

- Dados de qualidade da água;
- Registos de incumprimentos;
- Dados de roturas e intervenções;
- Dados de monitorização de cloro residual em reservatórios.

Esta integração permite uma abordagem multidimensional, essencial para o desenvolvimento de uma metodologia de gestão proativa da qualidade da água.

3.2 DESCRIÇÃO GERAL DA BASE DE DADOS

A base de dados utilizada resulta da integração de diferentes tipos de informação relativos ao sistema de abastecimento de água do concelho do Porto, permitindo uma análise conjunta da qualidade da água e das condições de funcionamento da rede de distribuição. Esta base de dados foi estruturada de forma a garantir a coerência espacial e temporal, estando organizada ao nível das **ZMC** e abrangendo o período compreendido entre 2022 e 2024.

3.2.1 Tipologia dos dados

A informação disponível pode ser agrupada em três categorias principais:

- a) Dados de qualidade da água

Incluem a informação relativa aos resultados analíticos obtidos no âmbito dos programas de controlo da qualidade da água, nomeadamente:

- o número de análises realizadas;
- o registo de incumprimentos dos valores paramétricos;
- a distribuição dos incumprimentos por tipo de parâmetro;
- os indicadores agregados de qualidade da água.

Estes dados permitem avaliar o desempenho do sistema em termos de conformidade com a legislação e identificar padrões espaciais e temporais de ocorrência de incumprimentos.

b) Dados operacionais da rede

Incluem informação relativa à exploração e manutenção do sistema de distribuição, nomeadamente:

- as roturas na rede de abastecimento;
- as intervenções estruturais, como substituição de condutas;
- os registos agregados por **ZMC** e por ano.

Estes dados são fundamentais para compreender a influência das condições operacionais na qualidade da água, permitindo estabelecer relações entre eventos na rede e variações nos resultados analíticos.

c) Dados de monitorização do desinfetante

Incluem medições de cloro residual livre obtidas em diferentes pontos do sistema de abastecimento, nomeadamente em reservatórios e em pontos da rede de distribuição. No entanto, devido à sua maior consistência temporal e importância como pontos de alimentação das diferentes **ZMC**, os dados dos reservatórios constituíram a principal fonte de informação utilizada na modelação da qualidade da água desenvolvida nesta dissertação.

Estes dados caracterizam:

- a concentração de desinfetante ao longo do sistema;
- a sua evolução temporal;

O comportamento da água após o tratamento.

A elevada resolução temporal destas medições permite analisar a variabilidade do cloro residual e interpretar fenómenos associados ao tempo de residência da água e à dinâmica hidráulica da rede.

3.2.2 Estrutura espacial

A base de dados encontra-se organizada ao nível das **ZMC**, que constituem a unidade espacial de referência para a análise.

Cada **ZMC** representa um subconjunto da rede com características hidráulicas homogéneas, permitindo:

- Identificar padrões locais de qualidade da água;
- Avaliar o impacto de condições operacionais específicas;
- Comparar o desempenho entre diferentes zonas do sistema.

Adicionalmente, os dados de monitorização do cloro residual estão associados a pontos específicos da rede, nomeadamente reservatórios, permitindo uma leitura complementar do comportamento do sistema, que servirá como dados de cloro residual nos reservatórios para as simulações em **EPANET**.

3.2.3 Estrutura temporal

A análise desenvolvida incide sobre o período 2022-2024, garantindo consistência entre variáveis, representatividade dos dados e correspondência com a informação operacional disponível.

Os dados apresentam diferentes níveis de resolução temporal:

- Anual, no caso dos dados agregados de qualidade da água e operação;
- Contínua (horária), no caso da monitorização do cloro residual nas simulações em EPANET.

Esta diferença de resolução é considerada na análise, permitindo uma abordagem integrada que combina a visão global e o detalhe local.

Apesar da existência de informação temporal mais detalhada para algumas variáveis operacionais e de qualidade da água, a presente dissertação privilegiou uma análise agregada anual. Esta opção deve-se ao objectivo principal do trabalho, centrado na identificação de padrões espaciais de risco, na selecção de zonas críticas e na avaliação do comportamento global da rede.

Uma análise sazonal ou mensal dos incumprimentos poderá constituir um desenvolvimento futuro relevante, permitindo avaliar eventuais influências associadas à temperatura, à variação dos consumos e às condições de funcionamento ao longo do ano.

3.2.4 Integração dos dados

A organização da base de dados permite a integração de diferentes dimensões do sistema:

- Integração espacial: associação de dados de qualidade e operação às **ZMC**;
- Integração temporal: articulação entre dados agregados e séries temporais;
- Integração funcional: relação entre qualidade da água, condições de operação e comportamento do desinfetante.

3.3 VARIÁVEIS DA ANÁLISE

3.3.1 Enquadramento das variáveis

A análise desenvolvida na presente dissertação baseia-se na utilização de um conjunto de variáveis que permitem caracterizar, de forma integrada, a qualidade da água e as condições de funcionamento da rede de distribuição.

Estas variáveis encontram-se organizadas em três grupos principais:

- Variáveis de qualidade da água;
- Variáveis operacionais;
- Variáveis derivadas (indicadores).

A definição rigorosa destas variáveis é fundamental para assegurar a consistência da análise e suportar o desenvolvimento da metodologia proposta.

3.3.2 Variáveis de qualidade da água

As variáveis de qualidade da água correspondem ao registo de incumprimentos dos valores paramétricos definidos na legislação, agregados ao nível das **ZMC**.

Os incumprimentos são discriminados pelos seguintes parâmetros:

- **Bactérias Coliformes (BC):** indicador microbiológico frequentemente associado a falhas no tratamento de águas, contaminação ambiental ou intrusões na rede de abastecimento;
- **Chumbo (Pb):** metal pesado cuja presença na água é associada à corrosão de tubagens e materiais das redes de abastecimento, constituindo um potencial risco para a saúde pública;
- **Cloro Residual (Cl):** concentração de desinfetante remanescente na água após o tratamento; indicador da eficácia da desinfecção e da proteção microbiológica ao longo da rede de abastecimento;
- **Clostridium Perfringens (CP):** bactéria formadora de esporos de elevada resistência; indicador de contaminação fecal persistente e possíveis falhas na eficácia do tratamento da água;
- **Condutividade (C):** indicador da quantidade de iões dissolvidos na água e da sua composição química (neste caso de estudo não foram verificados quaisquer incumprimentos deste indicador, logo não entrará nesta investigação, exceto na identificação do limite máximo permitido como se pode verificar na **Tabela 1**);
- **Enterococos (E):** indicador microbiológico de contaminação fecal e de falhas no tratamento;
- **Escherichia Coli (EC):** bactéria indicadora de contaminação fecal recente com potencial risco microbiológico devido a falhas de tratamento, ou à integridade da rede de abastecimento;
- **Ferro (Fe):** parâmetro químico com presença na água devido à dissolução de minerais naturais ou da corrosão de tubagens, afetando a qualidade estética e operacional do sistema de abastecimento;
- **Manganês (Mn):** semelhante ao Ferro, mas costuma vir diretamente da origem de captação de águas;

- **Número de Colónias a 22°C (NC):** contagem de microrganismos heterotróficos em crescimento a temperatura ambiente, muitas das vezes correlacionado à ausência de desinfetante;
- **Turvação (T):** presença de partículas em suspensão na água que reduzem a transparência e podem afetar a eficácia dos processos de desinfecção e a qualidade estética da água.

Estes têm limites máximos à exceção do cloro residual, que apresenta apenas recomendações entre os 0.2-0.6 mg/L, isto é, desconsiderando o valor de 5 mg/L, que corresponde ao valor de cloro considerado corrosivo para consumo humano, apesar de não existirem valores acima do 1 mg/L em toda a rede. Apesar disso, nesta tese por questões de avaliação de risco, considerar-se-á um incumprimento de cloro residual, caso este apresente uma amostra com valor inferior a 0.2 mg/L e um incumprimento da mesma amostra no número de colónias a 22 °C, já que valores baixos de cloro propensa valores altos de número de colónias a 22 °C (informação obtida no laboratório da AEdP).

Na presente dissertação considera-se incumprimento qualquer resultado analítico que não respeite os valores paramétricos ou critérios definidos na legislação aplicável à qualidade da água para consumo humano. Para os parâmetros microbiológicos, químicos e indicadores definidos no **Decreto-Lei n.º 69/2023**, o incumprimento corresponde à ultrapassagem dos respetivos valores paramétricos. No caso do cloro residual, devido à inexistência de um valor paramétrico legal mínimo, foi adoptado um critério operacional específico descrito mais à frente.

Pode-se verificar as limitações de cada indicador na **Tabela 1**.

Tabela 1 - Limites máximos que determinam o incumprimento dos indicadores

Indicador	BC	Pb	Cl	CP	C	E	EC	Fe	Mn	NC	T
Limite máximo	0	10	-	0	2500	0	0	200	50	20	4
Unidades	N/100 mL	µg/L	mg/L	N/100 mL	µS/cm	N/100 mL	N/100 mL	µg/L Fe	µg/L Mn	N/mL	UNT

A partir destes limites é possível determinar a quantidade e percentagem de incumprimentos existentes na amostra total de análises em cada ano e no total, para que depois seja possível comparar com os incumprimentos apresentados à **ERSAR** a partir do **PCQA** e do **PCO**, isto é, torna-se necessário determinar se os pontos críticos selecionados são suficientes para o estudo

da gestão proativa da qualidade da água, ou se o estudo deve ser realizado para os incumprimentos da amostra total (no próximo Capítulo realizar-se-á essa comparação).

Na **Tabela 2**, pode-se verificar como dito anteriormente, a quantidade e percentagem de incumprimentos na amostra total.

Tabela 2 - Quantidade e percentagem das análises validadas (V) e incumprimentos (I) da amostra total entre 2022-2024

Análises								
2022		2023		2024		Total		
V	I	V	I	V	I	V	I	Totais
34853	710	41255	818	39288	1041	115396	2569	117965
29.55%	0.60%	34.97%	0.69%	33.30%	0.88%	97.82%	2.18%	100.00%

Como se pode verificar, as quantidades de incumprimentos comparados à amostra total entre 2022-2024 são quase nulas, pouco mais de dois por cento, mas objetivamente ultrapassam os 2500 incumprimentos, algo que leva a querer que não se deve ignorar os incumprimentos e sim analisar e prever os mesmos para assim criar-se estratégias de mitigação.

3.3.3 Variáveis operacionais

As variáveis operacionais descrevem o estado e a dinâmica da rede de distribuição, sendo fundamentais para a interpretação dos resultados de qualidade da água, sendo estas as roturas e as intervenções (Empreitadas).

Na **Tabela 3** pode-se verificar o valor destas variáveis entre 2022-2024.

Tabela 3 - Quantidade de roturas e intervenções na Rede de Distribuição de Água da AEdP entre 2022-2024

Indicador	2022	2023	2024	Total
Roturas	568	554	508	1630
Intervenções	22	25	42	89

3.3.4 Variáveis derivadas

As variáveis derivadas são obtidas através da agregação ou transformação das variáveis base anteriormente apresentadas. Neste trabalho, a principal variável derivada corresponde ao indicador **IQA**, calculado a partir da soma dos incumprimentos observados para os diferentes parâmetros de qualidade da água em cada **ZMC** e período temporal considerado.

Na **Tabela 4** verifica-se a quantidade de incumprimentos de qualidade da água entre 2022-2024, que permitem verificar a consistência dos dados comparado com os valores da **Tabela 2**.

Tabela 4 - Quantidade de incumprimentos de qualidade da água na Rede de Distribuição de Água da AEdP entre 2022-2024

Indicador	2022	2023	2024	Total
IQA	710	818	1041	2569

Apesar da sua utilidade, o **IQA** apresenta limitações associadas à natureza agregada dos dados, não permitindo a identificação de problemas localizados nem a análise de variáveis operacionais associadas.

3.3.5 Variáveis de apoio

Embora não integrada diretamente na análise quantitativa principal, a variável cloro residual é utilizada como suporte interpretativo, já que o dado de quantidades de cloro residual nos reservatórios será útil para as simulações em **EPANET** onde serão precisos valores iniciais de cloro para garantir uma boa modelação das zonas críticas.

Para além dos valores de cloro residual utilizados nesta dissertação, o volume armazenado nos reservatórios constitui uma variável operacional relevante para a compreensão do comportamento da qualidade da água na rede. Esta variável influencia diretamente o tempo de residência da água, a renovação dos volumes armazenados e o decaimento do cloro residual, podendo contribuir para uma interpretação mais detalhada dos fenómenos observados.

Embora a informação relativa aos volumes dos reservatórios estivesse disponível, a sua integração não foi desenvolvida no âmbito da presente dissertação devido às limitações temporais associadas ao trabalho realizado. Ainda assim, considera-se que a incorporação desta variável poderá constituir um aprofundamento relevante em trabalhos futuros, nomeadamente na análise da idade da água e na avaliação da eficiência operacional das albufeiras.

Na **Tabela 5**, pode-se observar os valores iniciais de cloro residual em cada reservatório.

Tabela 5 - Valores de cloro residual nos reservatórios da AEdP

Reservatórios	2022	2023	2024	Média
Entrada de Pedrouços - Reservatório	0.87	0.91	0.91	0.89
Reservatório Congregados - Saída	0.60	0.58	0.59	0.57
Reservatório Congregados 1	0.74	0.74	0.72	0.72
Reservatório Congregados 2	0.61	0.60	0.62	0.61
Reservatório Congregados 3	0.61	0.70	0.80	0.55
Reservatório Congregados Torre	0.76	0.78	0.76	0.73
Reservatório de Santo Isidro 1	0.74	0.76	0.66	0.70
Reservatório de Santo Isidro 2	0.66	0.62	0.57	0.55
Reservatório do Bonfim 1	0.77	0.74	0.75	0.72
Reservatório do Bonfim 2	0.74	0.70	0.72	0.69
Reservatório do Bonfim 3	0.36	0.24	0.36	0.31
Reservatório do Bonfim 4	0.37	0.27	0.35	0.32
Reservatório do Carvalhido - Saída	0.57	0.56	0.54	0.55
Reservatório do Carvalhido 1	0.50	0.60	0.53	0.56
Reservatório do Carvalhido 2	0.44	0.60	0.49	0.50
Reservatório Nova Sintra - Saída	0.65	0.67	0.61	0.63
Reservatório Nova Sintra 1	0.56	0.66	0.63	0.61
Reservatório Nova Sintra 2	0.61	0.61	0.50	0.55
Reservatório Nova Sintra 3	0.74	0.71	0.67	0.68
Reservatório Nova Sintra 4	0.72	0.65	0.60	0.61
Reservatório Novo da Pasteleira Tanque A	0.26	0.22	0.17	0.22
Reservatório Novo da Pasteleira Tanque B	0.38	0.28	0.27	0.31

A análise da **Tabela 5** permite concluir que existe uma variabilidade significativa dos valores médios de cloro residual entre reservatórios. Observam-se concentrações mais elevadas nos reservatórios de entrada do sistema e valores mais reduzidos em alguns reservatórios periféricos, nomeadamente na Pasteleira e em alguns reservatórios do Bonfim. Esta variabilidade sugere diferentes condições de residência da água e diferentes consumos de desinfetante ao longo do sistema, justificando a utilização destes valores como condições iniciais nas simulações de qualidade da água desenvolvidas no **Capítulo 5**.

4

DIAGNÓSTICO DA QUALIDADE DA ÁGUA

4.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo caracterizar e analisar o comportamento da qualidade da água na rede de distribuição do concelho do Porto, com base nas variáveis definidas no **Capítulo 3**.

A análise incide sobre o período 2022–2024 e é desenvolvida com base na informação agregada por Zonas de Medição e Controlo (**ZMC**), integrando indicadores de qualidade da água, incumprimentos por parâmetro e variáveis operacionais (roturas e intervenções). Não foi realizada uma avaliação sazonal ou mensal, uma vez que o objectivo principal consistiu na comparação entre **ZMC** e na identificação de zonas críticas à escala da rede.

A abordagem adotada visa identificar padrões espaciais e temporais, bem como relações entre a qualidade da água e as condições de operação da rede, permitindo a identificação de zonas críticas, sendo necessário primeiramente, conhecer o caso de estudo, ou seja, o mapa de **ZMC** do município do Porto, como se pode verificar na **Figura 9**.

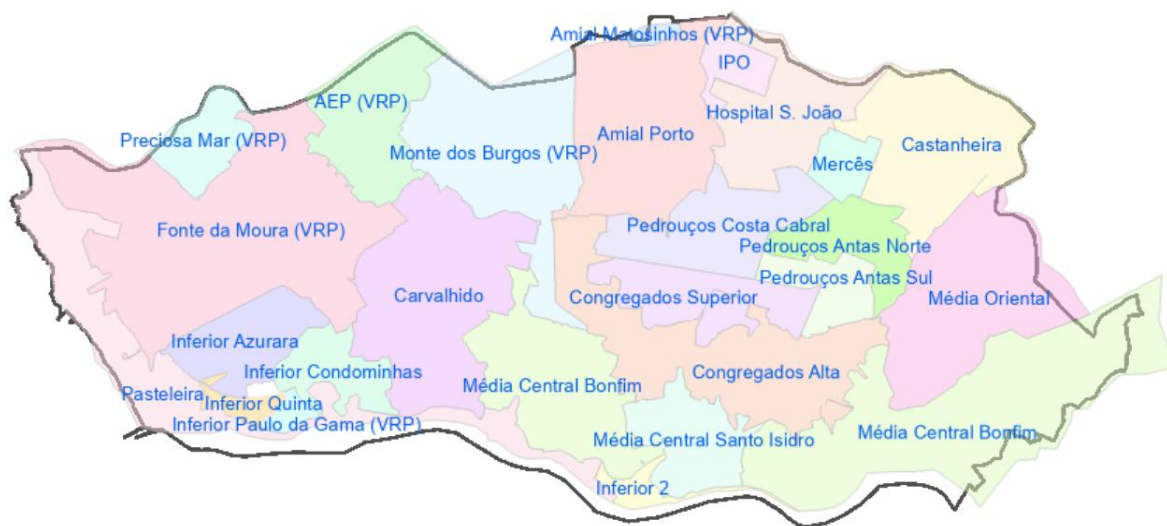


Figura 9 - Mapa de Zonas de Medição e Controlo da Rede de Distribuição de Água da Águas e Energia do Porto

Para além disso, foi feita a análise como dito no capítulo anterior, para verificação da compatibilidade dos incumprimentos do **PCQA** e **PCO** em relação aos incumprimentos totais de cada indicador, como se pode observar na **Figura 10**.

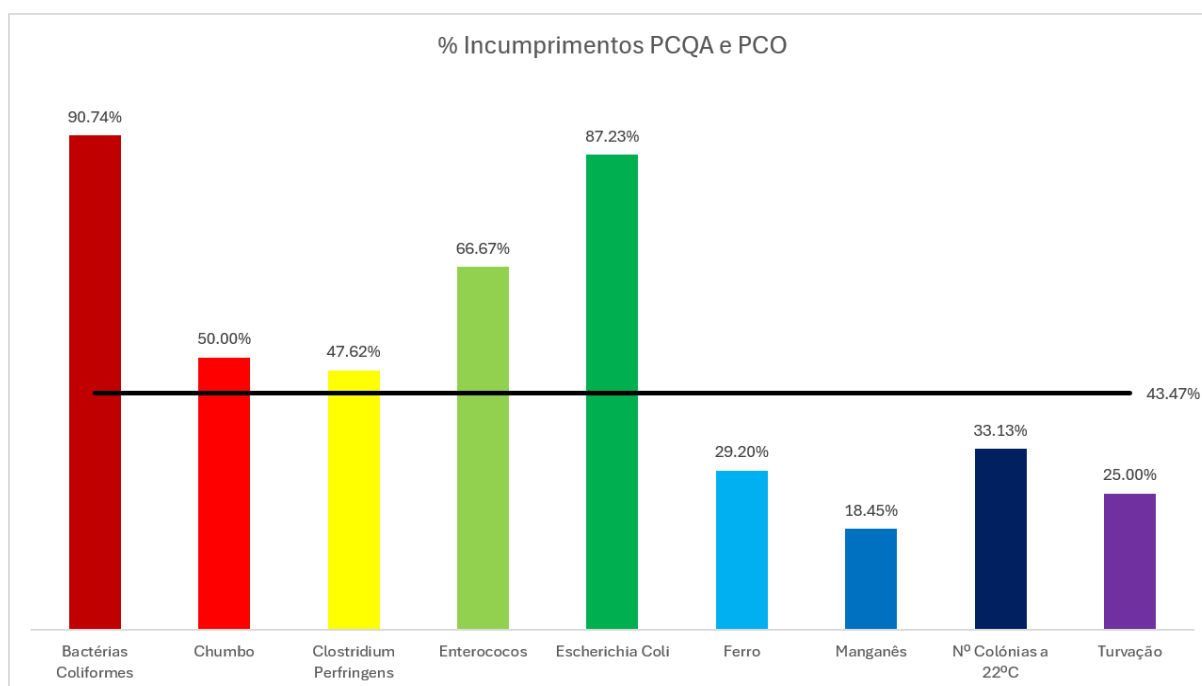


Figura 10 - Percentagem de incumprimentos totais identificados pelo PCQA e PCO, para cada indicador e média ponderada

Como se pode observar na **Figura 10**, existe uma boa cobertura dos incumprimentos de Bactérias Coliformes e Escherichia Coli pelo **PCQA** e o **PCO**, mas em geral e verificando a média dos indicadores, não existe sequer metade da cobertura dos incumprimentos totais, algo que determinou de imediato o estudo para a amostra de incumprimentos totais.

A **Figura 10** apresenta a percentagem de incumprimentos totais identificada pelos programas **PCQA** e **PCO** relativamente ao número total de incumprimentos observados para cada indicador. Desta forma, valores mais elevados representam uma maior capacidade dos programas de monitorização para identificar situações de não conformidade existentes na rede.

O **IQA** (Indicador de Qualidade da Água) corresponde à agregação dos incumprimentos observados nos diferentes parâmetros de qualidade da água considerados na presente dissertação. Este indicador não substitui os indicadores regulamentares, sendo utilizado exclusivamente como ferramenta comparativa para a identificação de zonas críticas.

Ainda assim, pode-se afirmar que este valor médio de 43.47%, corresponde a uma realidade bastante positiva, demonstrando o trabalho de excelência da **AEdP**, já que é comum apresentarem-se a nível nacional valores de cerca 25% no máximo.

4.2 ANÁLISE GLOBAL DA QUALIDADE DA ÁGUA - EVOLUÇÃO TEMPORAL DOS INCUMPRIMENTOS

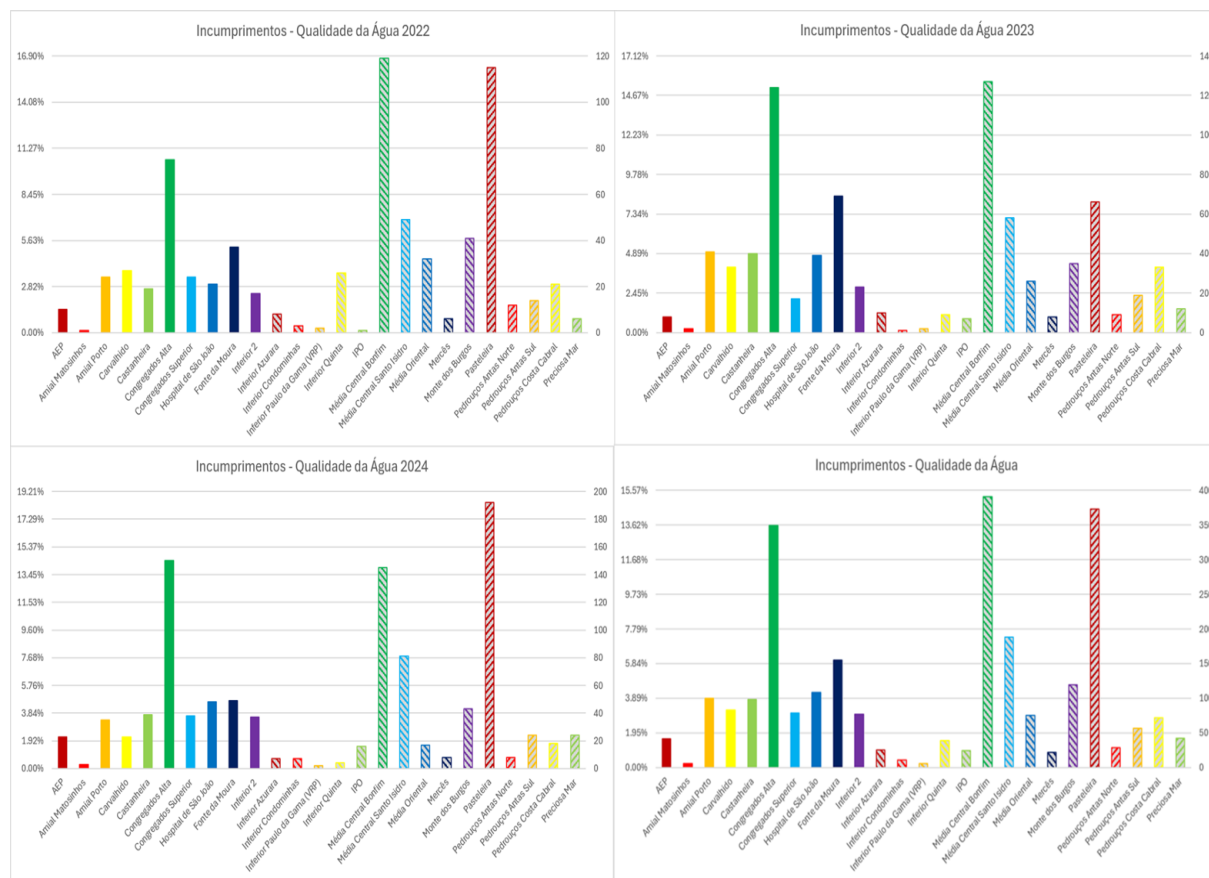


Figura 11 - Incumprimentos da Qualidade da Água entre 2022-2024 e análise total

Da **Figura 11**, é possível retirar as seguintes conclusões:

- Ao verificar o indicador **IQA**, pode-se prever três zonas como as mais críticas para o caso de estudo, Média Central Bonfim, Pesteleira e Congregados Alta, tendo também atenção às **ZMC** da Fonte da Moura e da Média Central Santo Isidro por questão de comparações futuras;
- Nestes gráficos é possível verificar o aumento de incumprimentos ao decorrer da evolução temporal.

Importa referir que a presente análise utiliza valores absolutos de incumprimentos, não sendo efetuada uma normalização em função da população abastecida, extensão da rede ou número de consumidores. Consequentemente, as **ZMC** com maior dimensão podem apresentar naturalmente um número absoluto superior de ocorrências.

4.3 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA - EVOLUÇÃO TOTAL DOS INCUMPRIMENTOS POR INDICADOR

4.3.1 Bactérias Coliformes

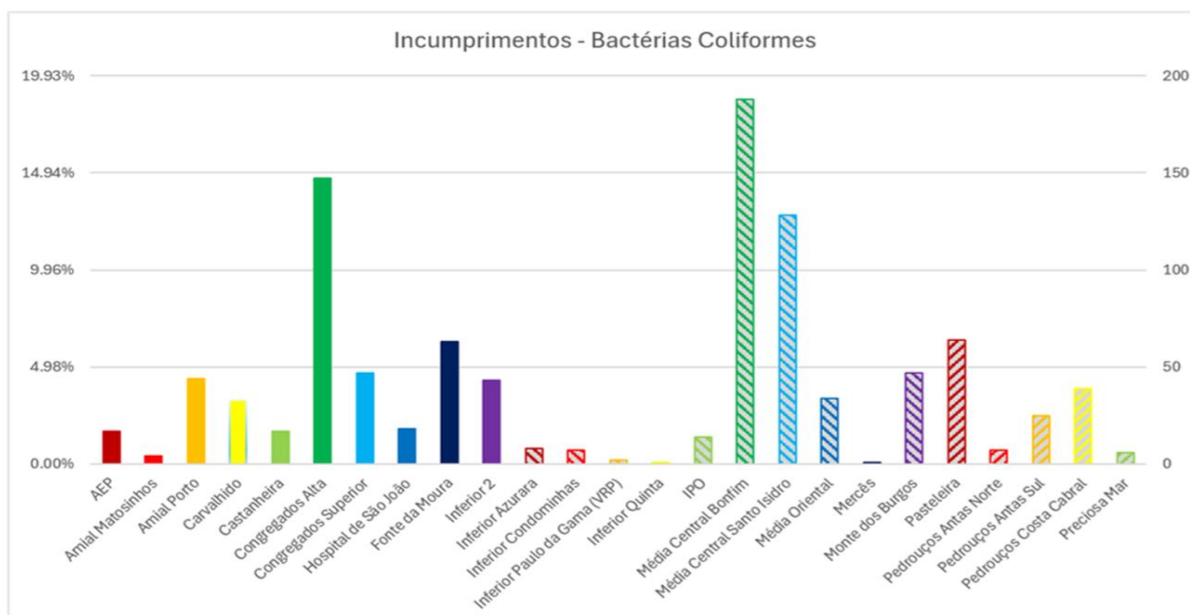


Figura 12 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Bactérias Coliformes

Na **Figura 12**, evidencia-se também um maior número de incumprimentos a partir das cinco ZMC referidas em 4.2, com valores superiores a 50 incumprimentos detetados em todas.

4.3.2 Chumbo

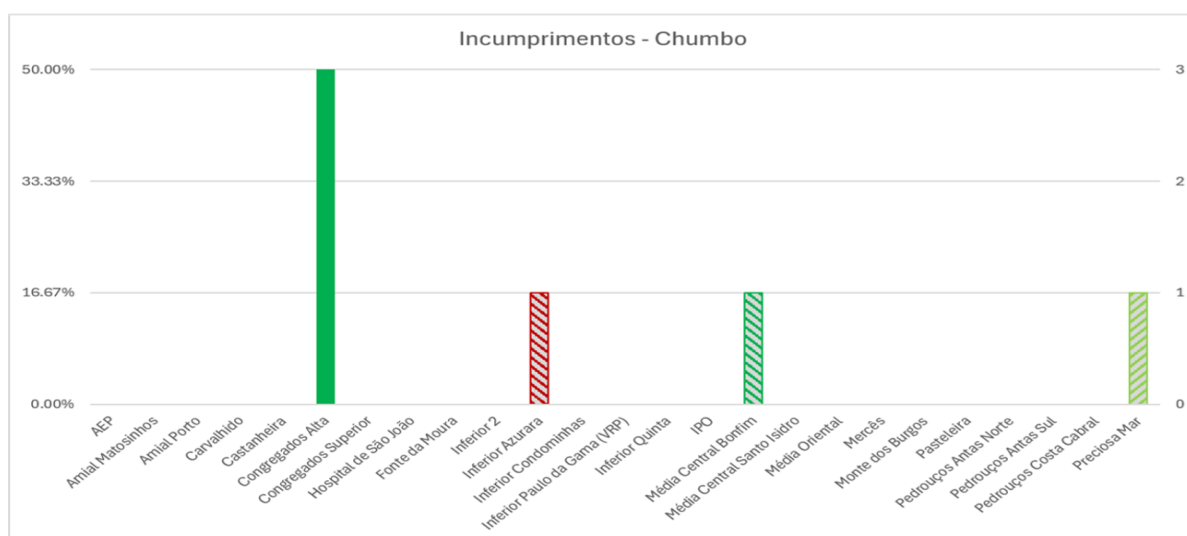


Figura 13 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Chumbo

Embora se verifiquem alguns incumprimentos pontuais de chumbo na **Figura 13**, a frequência absoluta destas ocorrências é significativamente inferior à observada para os restantes indicadores analisados.

4.3.3 Cloro Residual

Como já foi referido anteriormente, não existe na legislação o incumprimento da qualidade da água de cloro residual, mas sabe-se dos riscos existentes na garantia da mesma quando o desinfetante é insuficiente, principalmente no efeito dos incumprimentos por número de colónias a 22 °C, assim, foi determinado um conjunto de “incumprimentos de cloro residual”, que combina amostras que apresentem incumprimentos no número de colónias a 22 °C e valores de desinfetante inferiores ao recomendado (0.2 mg/L), como se observa na **Figura 14**. Os valores de cloro residual considerados nesta análise resultam de medições efetuadas na rede de distribuição e dos registos operacionais disponibilizados pela **AEdP**, sendo posteriormente associados às respetivas **ZMC** para análise espacial dos incumprimentos.

Embora exista uma relação teórica entre a redução do cloro residual e o aumento da atividade microbiológica, os resultados obtidos sugerem que o número de colónias a 22 °C pode ser influenciado por múltiplos fatores, incluindo o tempo de residência da água, as condições hidráulicas, a presença de biofilmes e as características dos materiais da rede. Assim, o cloro residual deve ser interpretado como um dos fatores explicativos e não como a única variável condicionante.

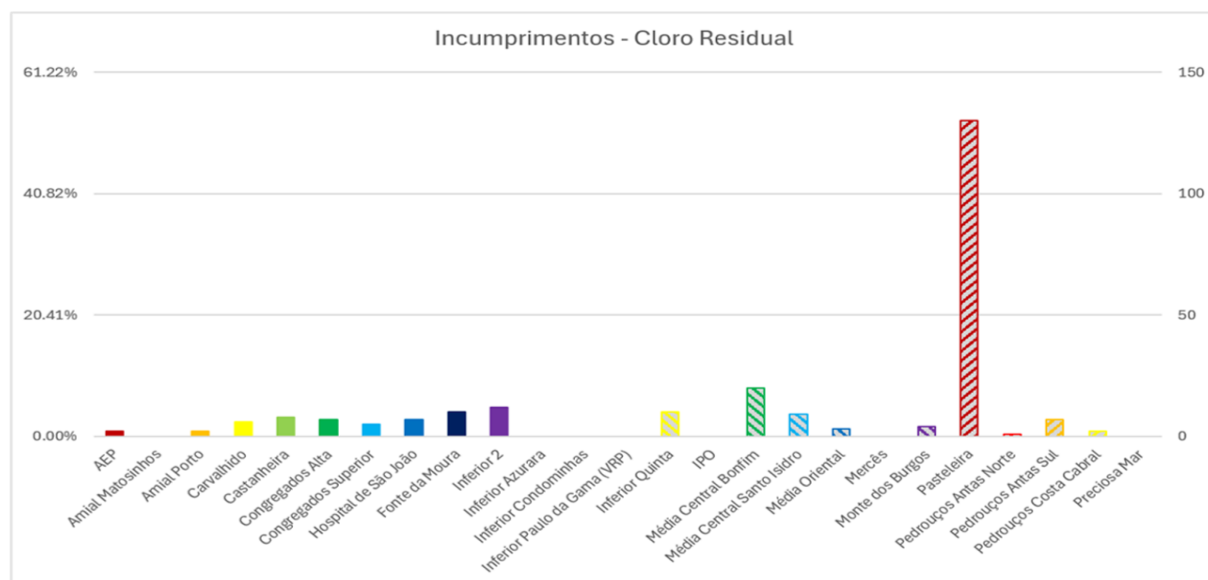


Figura 14 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Cloro Residual

A **Figura 14** mostra que os problemas associados ao cloro residual se concentram maioritariamente na Pasteleira, algo que comprova a necessidade de rechloragem nessa **ZMC**. Ainda se verifica algumas anomalias na Média Central Bonfim, mas em geral, as **ZMC** apresentam valores bastante semelhantes.

Importa referir que os reduzidos valores de cloro residual observados em determinadas zonas da rede são consistentes com as concentrações registadas nos respetivos reservatórios de alimentação, nomeadamente na Pasteleira e em alguns reservatórios do Bonfim. Esta situação sugere que parte da variabilidade observada na rede pode ter origem nas condições iniciais de alimentação do sistema.

4.3.4 Clostridium Perfringens

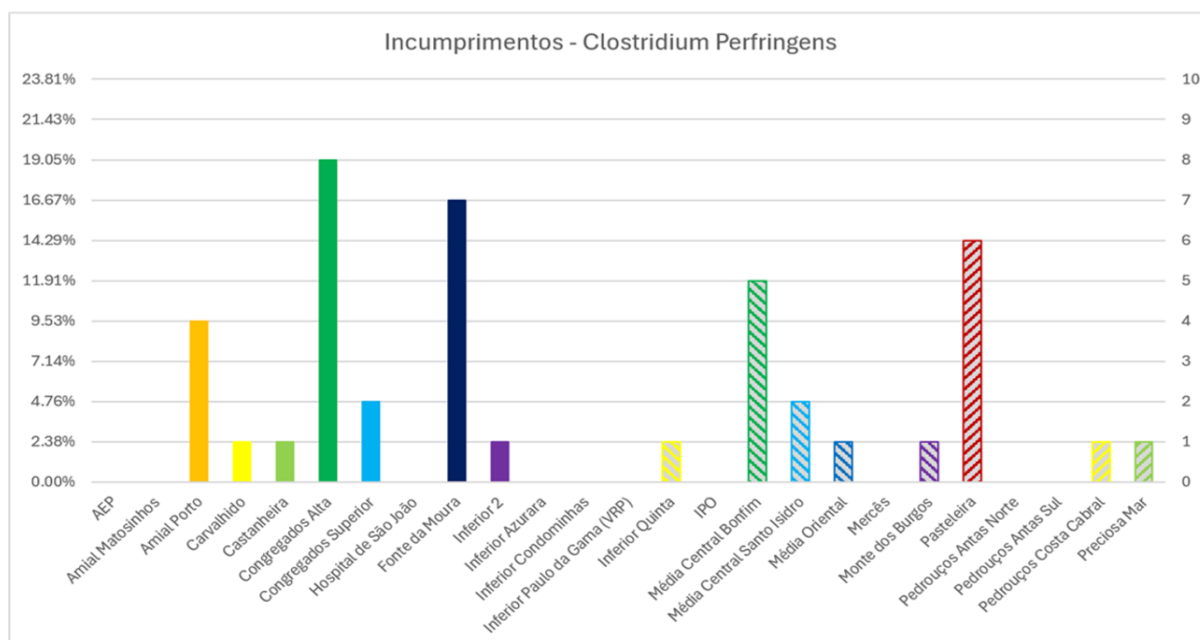


Figura 15 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Clostridium perfringens

No caso da **Figura 15**, observa-se mais uma vez as **ZMC** mais frequentes nesta análise de incumprimentos, à exceção do Amial Porto, que aparece nas cinco **ZMC** mais afetadas neste indicador.

4.3.5 Enterococos

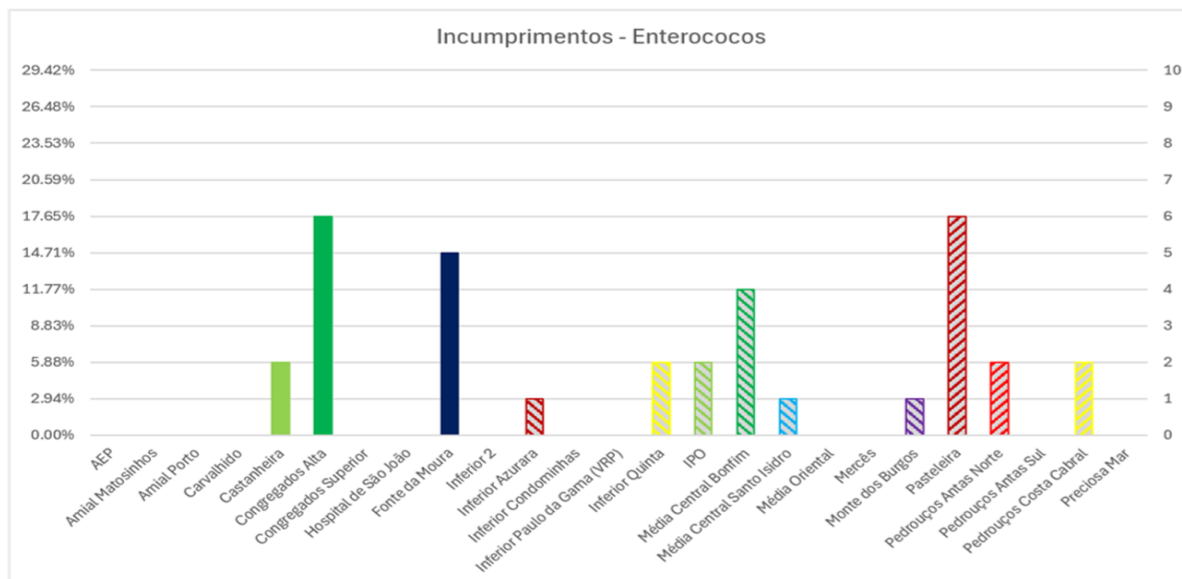


Figura 16 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Enterococos

Nesta **Figura 16**, verificam-se também baixos valores de incumprimentos, e as **ZMC** do costume a atingir os valores máximos de não conformidades.

4.3.6 Escherichia Coli

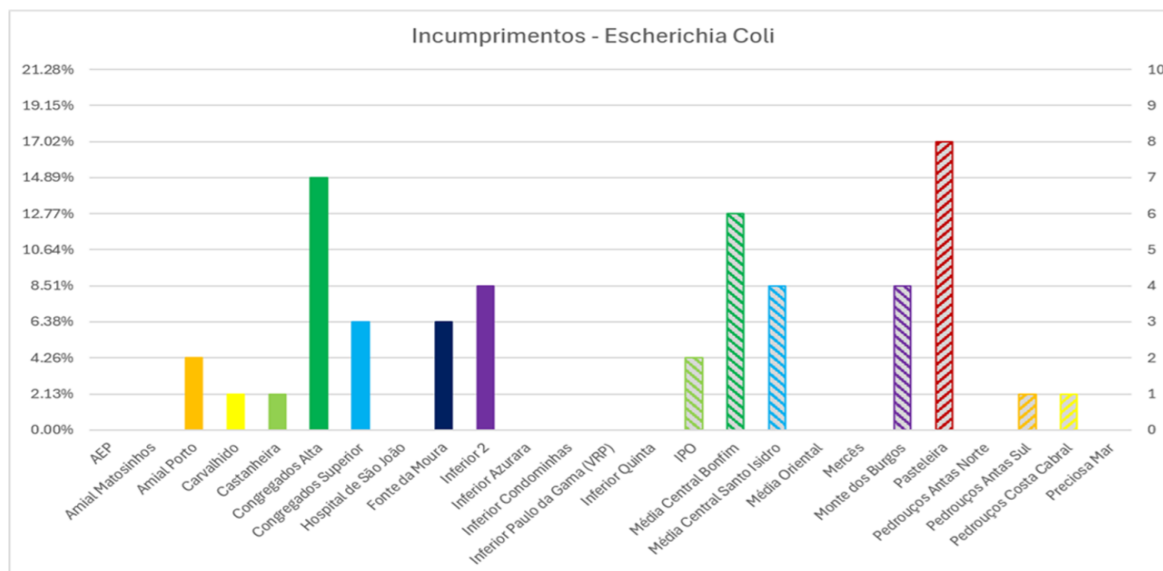


Figura 17 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Escherichia Coli

Como se pode observar na **Figura 17**, mais uma vez valores de não conformidades relativamente baixos, e para além das ZMC regulares, desta vez verifica-se a necessidade de prestar atenção a Inferior 2 e Monte dos Burgos.

4.3.7 Ferro

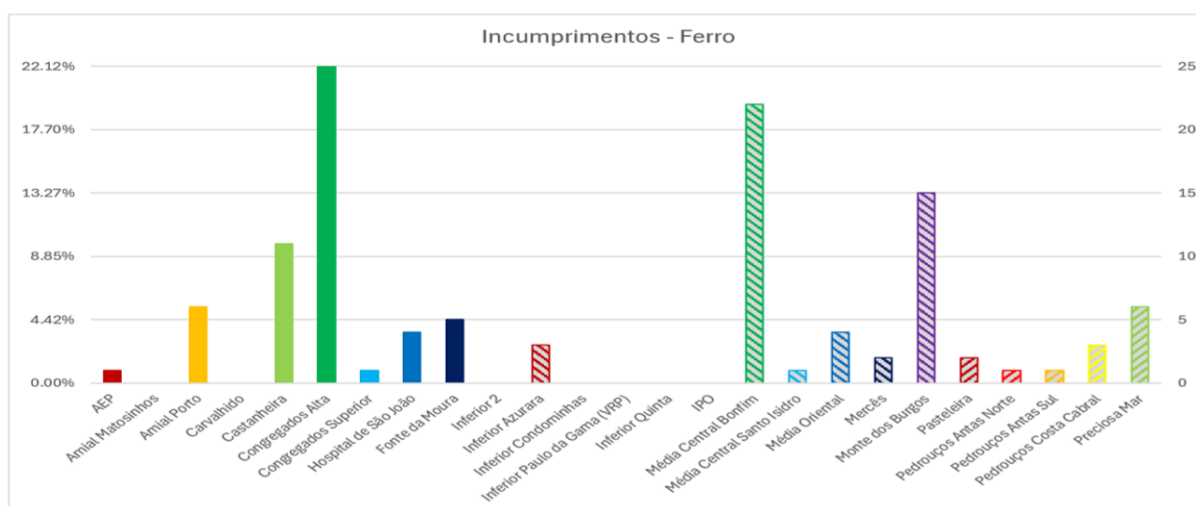


Figura 18 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Ferro

Retira-se da **Figura 18**, uma análise na base dos materiais das condutas e idade das mesmas, já que incumprimentos de ferro, tendem a existir claramente em zonas de rede em aço, por exemplo, e em regiões de condutas mais antigas, onde é comum a corrosão em excesso das tubagens. Sendo assim, é possível determinar que muitos dos locais com maior densidade férrea e antiguidade encontram-se em Congregados Alta, Média Central Bonfim, Monte dos Burgos e Castanheira.

4.3.8 Manganês

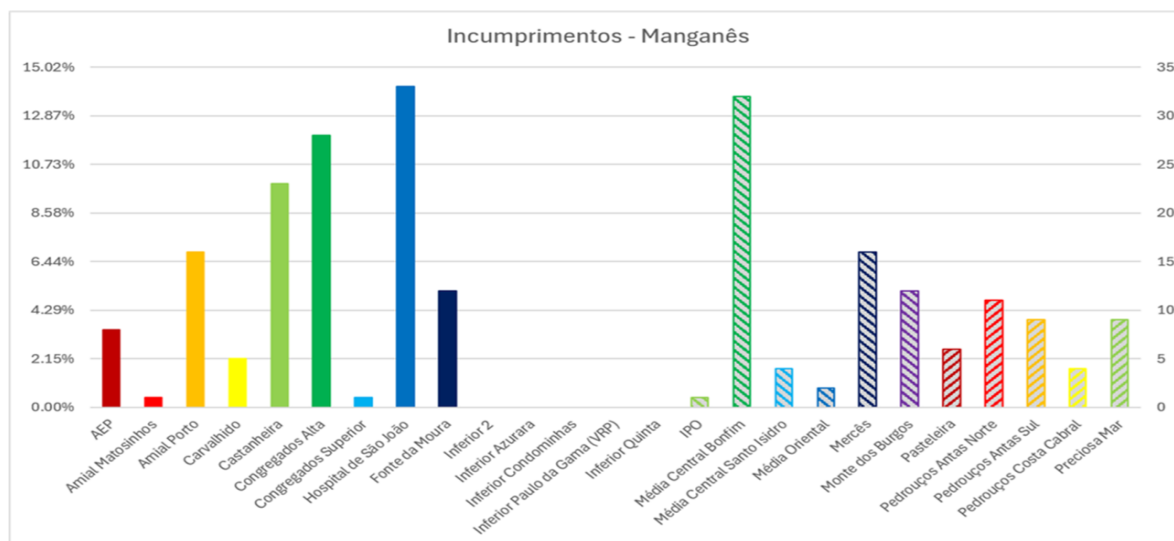


Figura 19 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Manganês

O Manganês é das poucas variáveis sem capacidade de controlo das entidades gestoras, já que o problema vem da origem da captação da água. Assim, é expectável os resultados da **Figura 19**, onde os maiores casos de incumprimentos, estão sobre as **ZMC** com reservatórios (Média Central Bonfim e Congregados Alta), ou sobre as que se encontram próximas do abastecimento direto pelas adutoras vindas dos reservatórios da Águas do Douro e Paiva na região de Pedrouços (Hospital de São João e Castanheira).

A existência do hospital nesta região e a necessidade de lhe assegurar uma qualidade da água mais exigente, é importante comunicar estas não conformidades com a empresa que capta e trata a água (Águas de Douro e Paiva), para que eles possam trabalhar a qualidade da mesma, para que possam participar desta gestão proativa, evitando implicações por venda de água de baixa qualidade.

4.3.9 Número de Colónias a 22°C

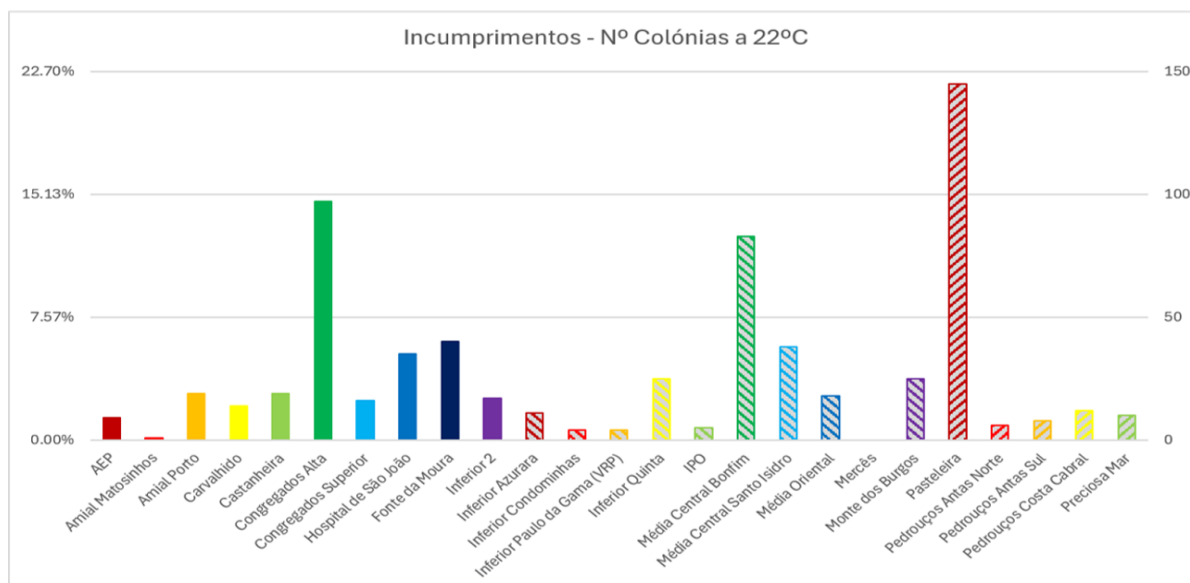


Figura 20 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Número de Colónias a 22°C

Na situação da **Figura 20**, como era de se esperar devido aos resultados da **Figura 14**, verificam-se elevadas não conformidades na Pasteleira, Média Central Bonfim e Congregados Alta, como já tem sido na maioria dos indicadores.

4.3.10 Turvação

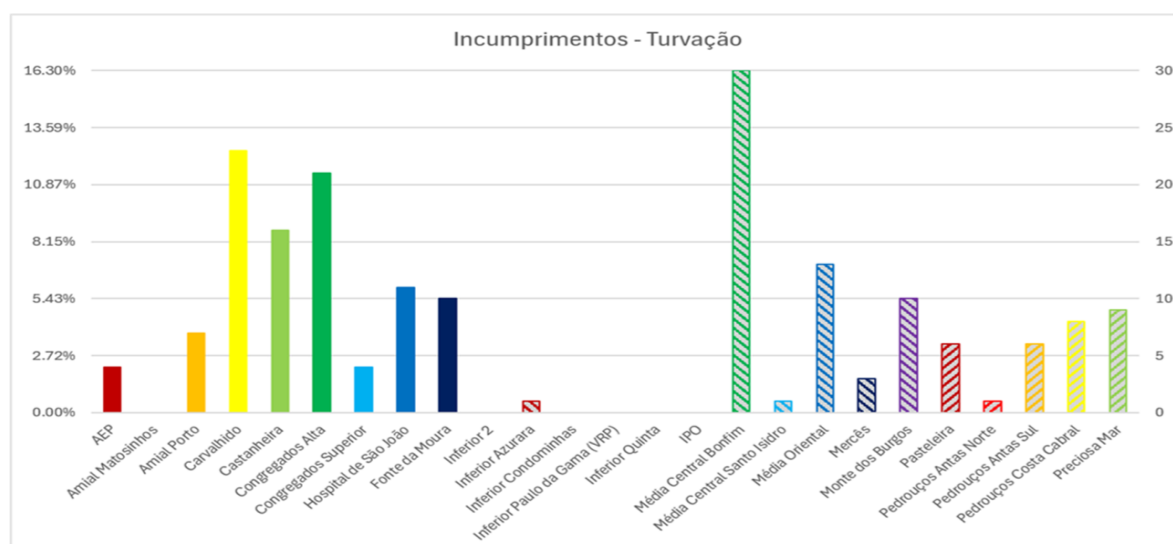


Figura 21 - Incumprimentos Totais da Qualidade da Água - Turvação

Normalmente a turvação é um indicador frequentemente momentâneo, isto é, gerado por contaminações a partir de roturas ou intervenções que na execução dos trabalhos permitem a entrada de sedimentos. Apesar disso com o consumo é frequente este incumprimento se resolver sozinho devido à redundância da rede.

Na **Figura 21**, verificamos elevados valores de não conformidades na Média Central Bonfim, Carvalhido, Congregados Alta e Castanheira.

4.3.11 Roturas

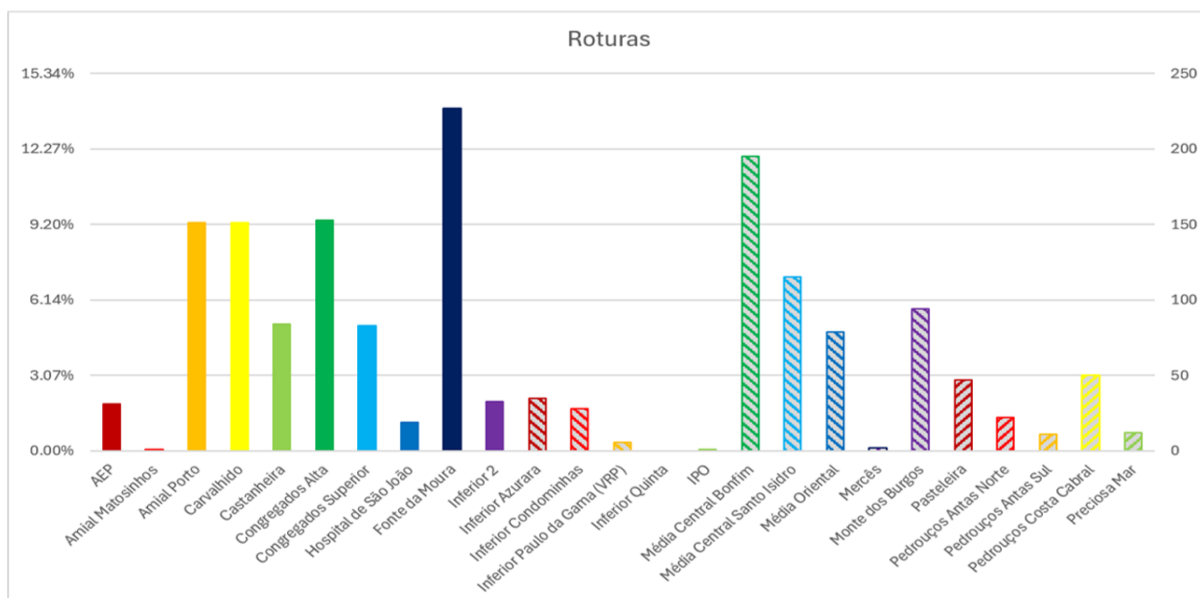


Figura 22 - Número de Roturas na Rede de Distribuição da AEdP

Nesta **Figura 22**, representa-se o número de roturas em cada **ZMC**, ideal para demonstração da correlação entre roturas e incumprimentos de qualidade da água em vários indicadores.

Apesar de Fonte da Moura apresentar-se sempre fora do pódio de incumprimentos, esta **ZMC** ainda assim apresenta-se entre as cinco mais afetadas por incumprimentos, como se verá na identificação de zonas críticas, e agora demonstra apresentar o maior número de roturas a avaliar mais diretamente mais à frente nesta dissertação.

Média Central Bonfim e Congregados Alta não surpreendem por terem tantas roturas, já que estas **ZMC** se encontram no pódio de incumprimentos. Apesar da Pasteleira também se encontrar na situação de pódio, esta apresenta valores inferiores de roturas, algo que fará sentido já que os maiores incumprimentos relacionados à **ZMC** são de desinfetante, normalmente afetado por outras variáveis como a falta de escoamento e tempo elevado de residência.

No caso do Amial Porto e Carvalhido existem valores elevados de roturas algo que justifica os casos de incumprimentos de turvação ou até mesmo de ferro (corrosão leva a roturas).

4.3.12 Intervenções/Empreitadas

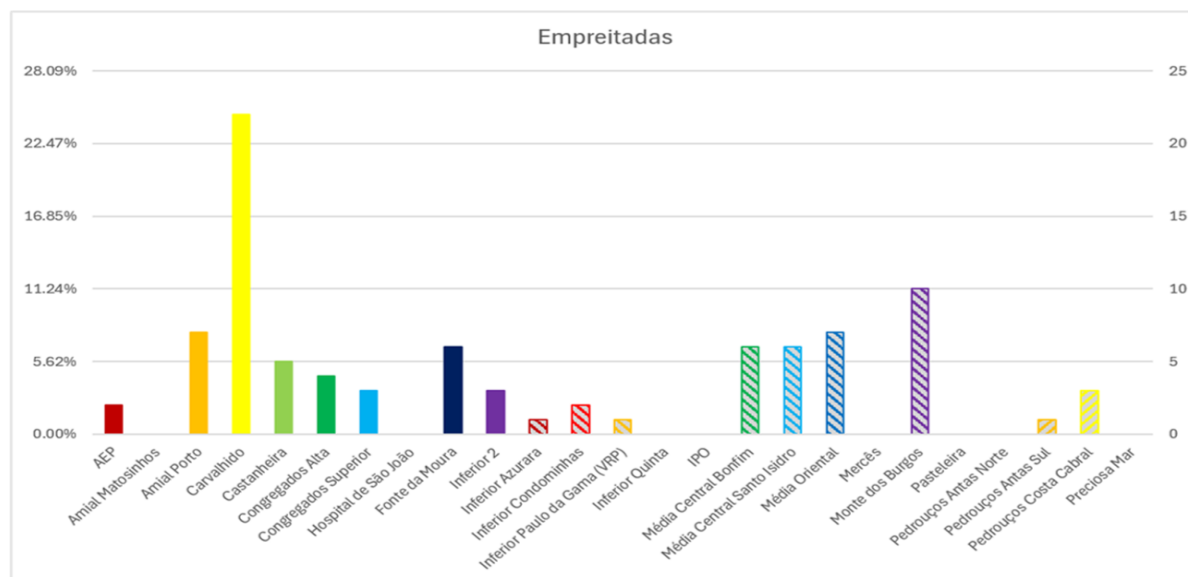


Figura 23 - Número de Intervenções/Empreitadas na Rede de Distribuição da AEdP

As intervenções na rede são boas estratégias de combate ao risco, diminuindo incumprimentos e roturas ao longo do tempo.

Como se pode verificar na **Figura 23**, o maior número de intervenções aconteceu no Carvalhido, Monte dos Burgos, Monte Oriental e Amial Porto.

4.3.13 Determinação de Zonas Críticas

Para a determinação das zonas críticas foi escolhido um sistema-base de pontuação de pódio por indicadores, ou seja:

- a) Bactérias Coliformes
 - 1) Média Central Bonfim (3 Pontos);
 - 2) Congregados Alta (2 Pontos);
 - 3) Média Central Santo Isidro (1 Ponto).
- b) Chumbo
 - 1) Congregados Alta (3 Pontos);
 - 2) Inferior Azurara, Média Central Bonfim e Preciosa Mar (2 Pontos).
- c) Cloro residual
 - 1) Pasteleira (3 Pontos);
 - 2) Média Central Bonfim (2 Pontos);
 - 3) Inferior 2 (1 Ponto).
- d) Clostridium Perfringens
 - 1) Congregados Alta (3 Pontos);
 - 2) Fonte da Moura (2 Pontos);

- 3) Pasteleira (1 Ponto).
- e) Enterococos
 - 1) Congregados Alta e Pasteleira (3 Pontos);
 - 2) Fonte da Moura (2 Pontos);
 - 3) Média Central Bonfim (1 Ponto).
- f) Escherichia Coli
 - 1) Pasteleira (3 Pontos);
 - 2) Congregados Alta (2 Pontos);
 - 3) Média Central Bonfim (1 Ponto).
- g) Ferro
 - 1) Congregados Alta (3 Pontos);
 - 2) Média Central Bonfim (2 Pontos);
 - 3) Monte dos Burgos (1 Ponto).
- h) Manganês
 - 1) Hospital de São João (3 Pontos);
 - 2) Média Central Bonfim (2 Pontos);
 - 3) Congregados Alta (1 Ponto).
- i) Número de Colónias a 22°C
 - 1) Pasteleira (3 Pontos);
 - 2) Congregados Alta (2 Pontos);
 - 3) Média Central Bonfim (1 Ponto).
- j) Turvação
 - 1) Média Central Bonfim (3 Pontos);
 - 2) Carvalhido (2 Pontos);
 - 3) Congregados Alta (1 Ponto).
- k) Roturas
 - 1) Fonte da Moura (3 Pontos);
 - 2) Média Central Bonfim (2 Pontos);
 - 3) Congregados Alta (1 Ponto).
- l) Intervenções
 - 1) Carvalhido (3 Pontos);
 - 2) Monte dos Burgos (2 Pontos);
 - 3) Média Oriental e Amial Porto (1 Ponto).

Após a soma dos pontos, obtiveram-se os seguintes resultados:

- 1º **ZMC** mais crítica: Congregados Alta (21 Pontos);
- 2º **ZMC** mais crítica: Média Central Bonfim (19 Pontos);
- 3º **ZMC** mais crítica: Pasteleira (13 pontos).

Estes resultados sempre foram expectáveis ao longo da apresentação de resultados, mas com esta avaliação, é possível justificar o uso destas **ZMC** para as simulações em **EPANET**.

4.4 ANÁLISE TEMPORAL DOS INCUMPRIMENTOS NAS ZMC CRÍTICAS

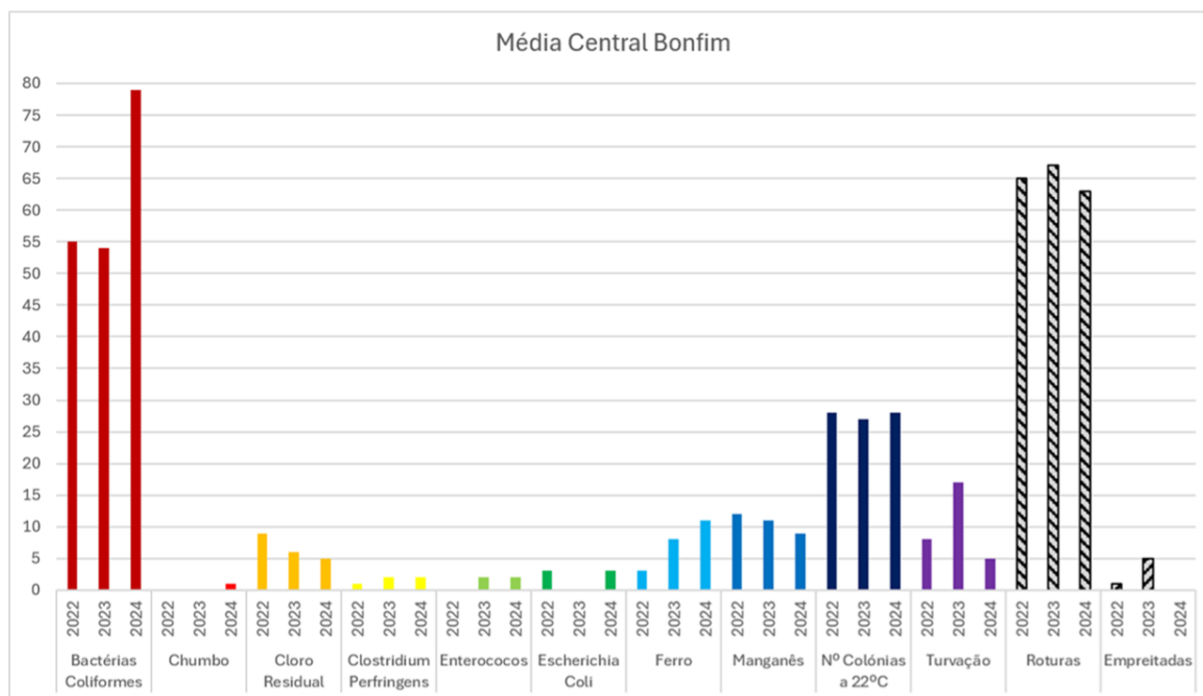


Figura 24 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos na Média Central Bonfim

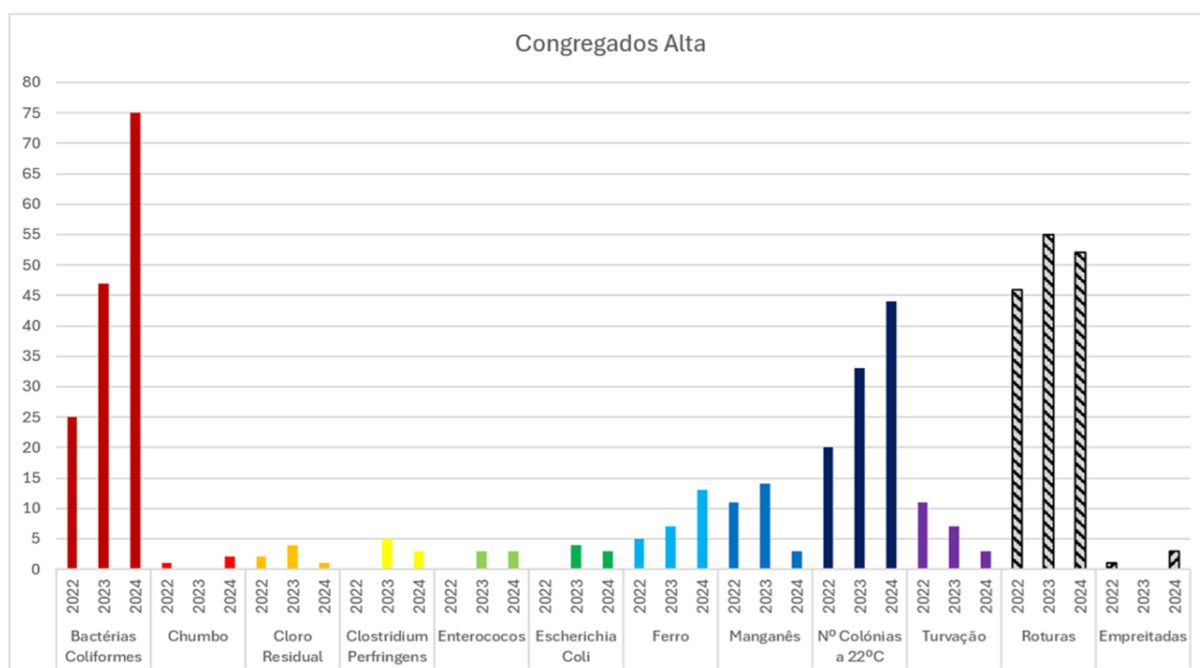


Figura 25 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos em Congregados Alta

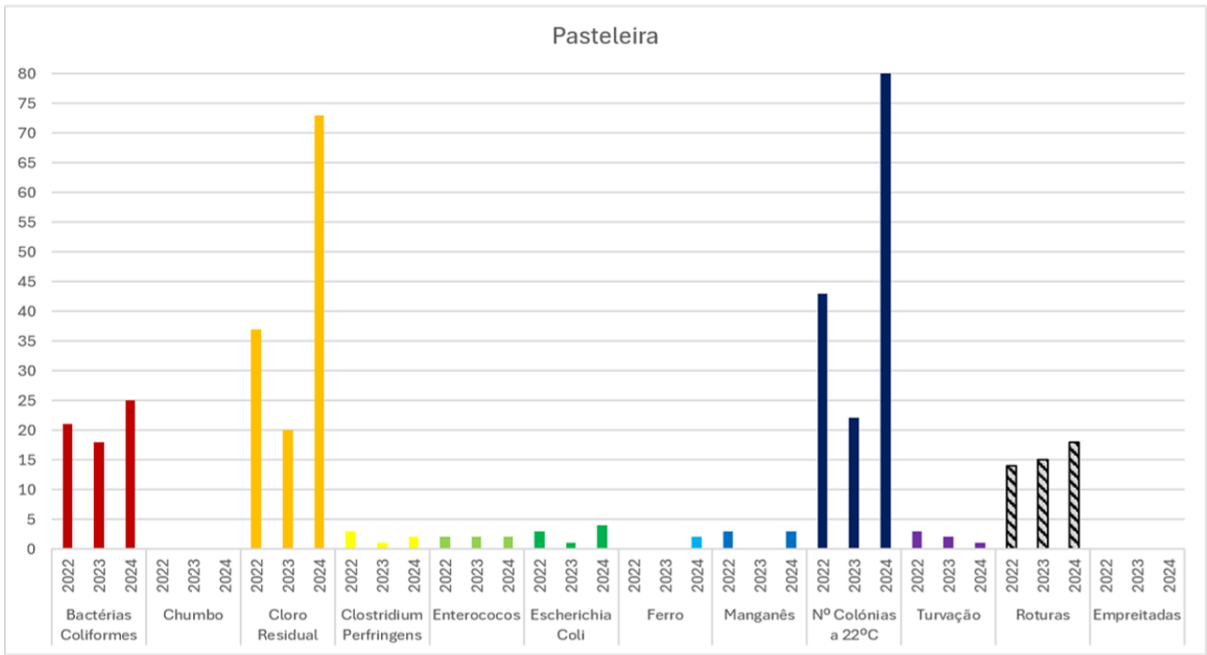


Figura 26 - Análise temporal 2022-2024 dos incumprimentos na Pasteleira

A análise da evolução temporal dos incumprimentos nas Zonas de Medição e Controlo identificadas como críticas permite compreender a consistência dos problemas observados e avaliar a sua persistência ao longo do tempo.

Na **Figura 24**, verifica-se que a **ZMC** da Média Central Bonfim apresenta um comportamento mais estável, com flutuações associadas a eventos específicos, indicando um sistema globalmente mais robusto.

Na **ZMC** de Congregados Alta, conforme a **Figura 25**, observa-se uma maior variabilidade interanual, sugerindo uma forte influência dos fatores operacionais e da variabilidade do regime hidráulico.

Por sua vez, na **Figura 26**, retira-se que na **ZMC** da Pasteleira existe um comportamento sistematicamente desfavorável ao longo do período 2022–2024, evidenciando a persistência de condições estruturais que contribuem para a degradação da qualidade da água, mais propriamente, nos indicadores fortemente relacionados à decadência do cloro residual.

5

MODELAÇÃO HIDRÁULICA E DE QUALIDADE DA ÁGUA

5.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo tem como objetivo aplicar um modelo hidráulico e de qualidade da água previamente calibrado da rede de distribuição do concelho do Porto, com recurso ao software **EPANET**, com vista à análise de zonas críticas identificadas no diagnóstico.

Ao contrário das abordagens centradas na construção do modelo, o presente trabalho baseia-se na utilização de um modelo já validado, permitindo focar a análise na simulação de cenários operacionais e na avaliação do comportamento da qualidade da água em condições reais de exploração.

5.2 ENQUADRAMENTO DA MODELAÇÃO

Os modelos hidráulicos utilizados no presente trabalho correspondem a uma representação previamente desenvolvida da rede de distribuição do concelho do Porto, encontrando-se ajustado para reproduzir os principais comportamentos globais do sistema.

Contudo, importa referir que os modelos apresentam algumas limitações estruturais, nomeadamente:

- Existência de nós sem consumo atribuído;
- Presença de troços com reduzido ou inexistente escoamento;
- Simplificações inerentes à representação da rede real.

Estas condições inviabilizam uma calibração clássica baseada em variáveis hidráulicas locais (caudal), tendo sido adotada uma abordagem centrada na calibração indireta através de variáveis de qualidade da água.

Face às limitações associadas à representação do consumo e ao reduzido escoamento em certas zonas da rede, a calibração dos modelos foi efetuada com base na coerência dos resultados globais e no comportamento esperado das variáveis de qualidade da água, em particular do cloro residual e da idade da água.

Os valores de caudal apresentados correspondem aos resultados produzidos pelos modelos hidráulicos existentes da rede de distribuição, desenvolvidos e calibrados pela **AEdP**. O cloro residual resulta da simulação da qualidade da água realizada no **EPANET**, utilizando os valores iniciais registados nos reservatórios e os coeficientes de reacção adoptados pela entidade gestora.

5.3 OBJETIVOS DAS SIMULAÇÕES

A modelação foi orientada para a análise de zonas críticas identificadas no **Capítulo 4**, com os seguintes objetivos:

- a) Objetivos principais
 - Avaliar a distribuição do cloro residual;
 - Determinar a idade da água;
 - Identificar mecanismos hidráulicos associados à degradação da qualidade e à variabilidade espacial.
- b) Zonas analisadas
 - As simulações foram realizadas para as seguintes **ZMC**: Média Central Bonfim, Congregados Alta e Pasteleira;
 - Estas foram seleccionadas pelos seus níveis elevados de incumprimentos, forte influência de fatores operacionais e comportamento representativo de diferentes dinâmicas da rede.

5.4 CONFIGURAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

As redes modeladas apresentam zonas onde o consumo não se encontra explicitamente representado e o escoamento é reduzido ou inexistente.

Estas condições têm um impacto direto na modelação, nomeadamente no aumento artificial da idade da água, na redução da renovação do volume armazenado e na influência no comportamento do cloro residual.

Nestas condições, os resultados da modelação devem ser interpretados como indicadores qualitativos do comportamento hidráulico e da qualidade da água, e não como valores absolutos locais.

5.5 MODELAÇÃO DO CLORO RESIDUAL (DECAIMENTO)

O cloro residual foi utilizado como principal variável de validação dos resultados da modelação, uma vez que a sua evolução está diretamente associada ao tempo de permanência da água e aos processos de degradação da qualidade. Assim, valores extremamente reduzidos de cloro residual em locais onde não seria de esperar um consumo significativo do desinfetante foram considerados potenciais indicadores de anomalias do modelo.

Embora o decaimento do cloro residual seja frequentemente representado através da expressão cinética de primeira ordem apresentada no **Capítulo 2**, as simulações realizadas nesta dissertação utilizaram directamente os coeficientes de reacção calibrados nos modelos **EPANET** da **AEdP**. Consequentemente, o cálculo do decaimento não foi realizado através da aplicação directa da fórmula teórica, mas sim através da resolução efectuada pelo próprio software a partir dos coeficientes bulk (-1,78) e wall (0,05).

5.6 ANÁLISE DA IDADE DA ÁGUA

A idade da água corresponde ao tempo de permanência entre a entrada no sistema e o ponto de consumo. Apesar desta ser a definição, no **EPANET** apenas temos o tempo de permanência após o começo da simulação, ou seja, deve-se ter em conta que um dado resultado obtido não contabiliza o tempo ocorrido desde a entrada da água no sistema do município do Porto até o seu armazenamento no devido reservatório de abastecimento da **ZMC**, algo que prejudica na avaliação de risco.

Ainda assim é importante a observação deste indicador já que indiretamente apoia o estudo da qualidade da água e a estabilidade do cloro residual. Para além disso permite avaliar zonas críticas dentro das **ZMC**, sendo estas detetadas em regiões com uma idade de água elevada. Quando os valores da idade da água são baixos, significa que são pontos onde existe uma renovação de água frequente, sendo estes ótimos para identificação de anomalias na simulação (valores incoerentes de cloro).

5.7 RESULTADOS POR ZONA DE ESTUDO

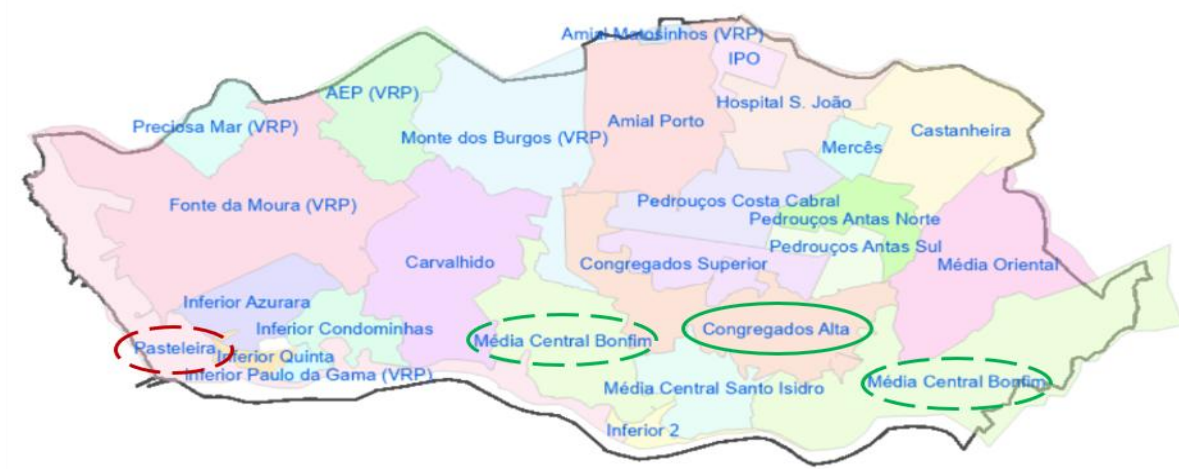


Figura 27 - Mapa de Zonas de Medição e Controlo críticas da Rede de Distribuição de Água da Águas e Energia do Porto

5.7.1 Média Central Bonfim

5.7.1.1 Características da ZMC

Esta Zona de Medição e Controlo é definida pela sua elevada densidade de consumo, rede complexa e histórico de incumprimentos.

Para além disso abrange uma grande quantidade de reservatórios, algo que mostra o impacto da mesma na Rede de Distribuição de Água da AEdP.

5.7.1.2 Resultados da modelação

Como já se referiu anteriormente, após a obtenção dos resultados das simulações em EPANET, viu-se necessária a correção de valores, a partir do cloro residual, onde valores inferiores a 0.03 mg/L, são considerados anómalos.

Para a demonstração das anomalias desses valores, apresenta-se a **Figura 28**, que representa alguns pontos da ZMC, onde os valores de cloro não excedem o valor referido e os valores de idade da água são demasiado elevados para uma região que apresenta elevados valores de consumo.

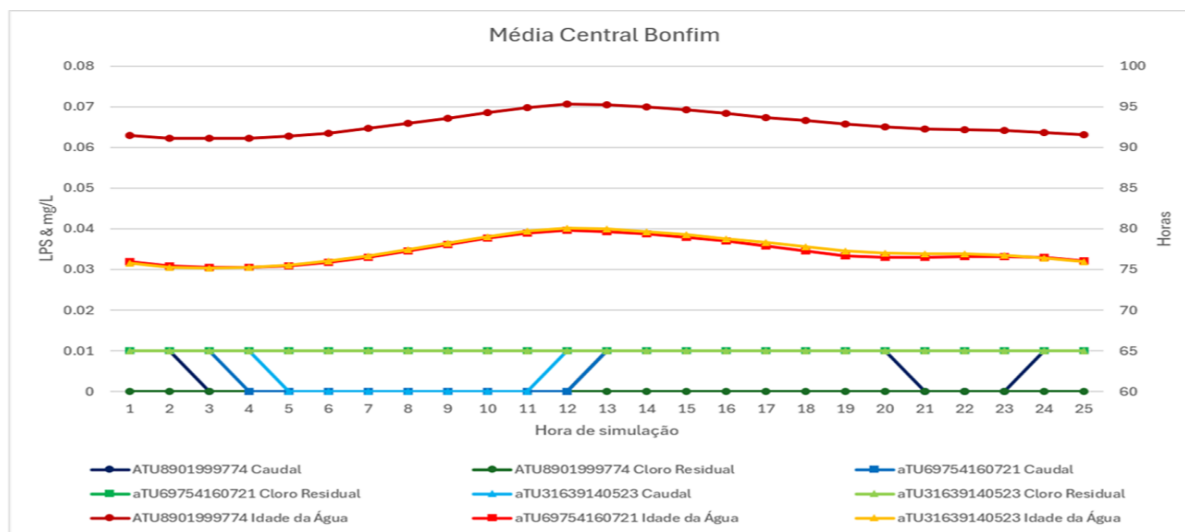


Figura 28 - Resultados anómalos de caudal, cloro residual e idade da água de algumas condutas da Média Central Bonfim

A partir de resultados como os verificados na **Figura 28**, retirou-se os valores máximos de cada indicador para todas as condutas do modelo e a partir desses foram identificados todos os pontos com valores iguais ou inferiores ao valor considerado incoerente, e divididos por intervalos de idade de água para garantir a precisão da correção dos resultados.

A **Tabela 6** e a **Tabela 7** apresentam os valores anómalos para esta ZMC.

Tabela 6 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água - Média Central Bonfim

Média Central Bonfim		
Q (=0 LPS)	CR (<=0.03 mg/L)	IA (>72 h)
1437	1105	1162

Tabela 7 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Média Central Bonfim

Horas	Média Central Bonfim
0-24h	15
24-72h	6
72-168h	26
168-360h	1058
Total	1105

Na **Tabela 6** verifica-se diferentes valores para cada um dos indicadores. No caso usa-se o cloro residual como o fator corretivo pois é o que apresenta um menor valor, evitando o dano da amostra e da precisão dos resultados. Existem locais sem consumo que realmente sejam veredictos na rede e não pela ausência dessa informação, logo ao escolher-se o caudal como fator corretivo, iria-se remover parte de resultados pertencentes à amostra desejada. No caso da idade da água, como é um indicador indireto de apoio ao cloro residual, e não existe uma precisão nos seus resultados para identificação de anomalias (a decisão de superior a 72 horas, é subjetiva, pois é ligada ao risco da qualidade da água e não a precisão numérica regulatória).

A prova da imprecisão do indicador da idade de água é apresentada na **Tabela 7** onde se verifica anomalias de cloro residual até num intervalo de menos de 24 h de idade da água. Ainda assim é possível verificar a precisão de deteção de anomalias do cloro residual já que nos intervalos estudados, encontra-se falhas de resultados em todos eles, mas a grande maioria situa-se entre uma e duas semanas de idade da água (sendo a simulação de 15 dias, espera-se que a quantidade de condutas com uma idade de água superior a uma semana seja quase nula).

Esta correção permite avaliar se o modelo se encontra atualizado e a sua utilidade na gestão proativa para avaliações de reclusagem nas diferentes **ZMC** (os modelos da **AEdP** são de 2017 enquanto os dados analisados nesta dissertação são de 2022-2024).

Tabela 8 - Resultados da simulação da Média Central Bonfim da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas

Média Central Bonfim	Antes da correção		Após correção	
Horas	IA	%	IA	%
0-24h	6190	82.00%	6175	95.83%
24-72h	197	2.61%	191	2.96%
72-168h	57	0.76%	31	0.48%
168-360h	1105	14.64%	47	0.73%
Total	7549	100.00%	6444	100.00%
mg/L	CR	%	CR	%
0-0.2	1237	16.39%	132	2.05%
0.2-0.4	278	3.68%	278	4.31%
0.4-0.6	2113	27.99%	2113	32.79%
0.6-1	3921	51.94%	3921	60.85%
Total	7549	100.00%	6444	100.00%

Como se pode verificar na **Tabela 8**, antes da correção existiam mais de mil condutas com valores de idade da água entre uma e duas semanas, e que apresentavam valores quase nulos de cloro residual, uma anomalia que correspondia a mais de 10% dos resultados da simulação.

Após a remoção dessas incoerências, verifica-se que a água não demora mais que um dia a se renovar na rede (após a saída desta do reservatório) em mais de 95% dos casos, e não os 82% antes da correção, e quase 98% dos casos estão entre os valores recomendáveis de cloro ou acima desses valores (excesso explicado pela quantidade de reservatórios existentes na **ZMC** e que armazenam a água de outros reservatórios antes da sua distribuição).

Os resultados obtidos sugerem que o modelo reproduz de forma coerente o comportamento esperado da rede, particularmente no que respeita à distribuição do cloro residual e da idade da água. Contudo, esta análise não constitui uma validação ou calibração formal do modelo. Sendo assim, o modelo da Média Central Bonfim apresentam valores satisfatórios, que majoram resultados que possibilitam incumprimentos, algo que permite avaliar pontos críticos e propícios a não conformidades (132 casos de cloro residual com menos de 0.2 mg/L de concentração e mais de 200 casos de idade da água superiores a três dias, comparados a 103 casos de incumprimentos de cloro e número de colónias a 22°C).

5.7.2 Congregados Alta

5.7.2.1 Características da ZMC

Esta Zona de Medição e Controlo é uma zona central altamente interligada, também com bastantes reservatórios e uma elevada pressão operacional.

5.7.2.2 Resultados da modelação

Da mesma forma que se realizou a correção de resultados na Média Central Bonfim, apresenta-se os fatores corretivos e as anomalias para cada intervalo de idade da água, visíveis na **Tabela 9** e na **Tabela 10**.

Para além disso, apresenta-se os resultados a analisar na **Tabela 11**.

Tabela 9 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água -
Congregados Alta

Congregados Alta		
Q (=0 LPS)	CR (<=0.03 mg/L)	IA (>72 h)
1823	1276	1479

Tabela 10 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Congregados Alta

Horas	Congregados Alta
0-24h	31
24-72h	3
72-168h	71
168-360h	1171
Total	1276

Tabela 11 - Resultados da simulação de Congregados Alta da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas

Congregados Alta	Antes da correção		Após correção	
Horas	IA	%	IA	%
0-24h	7473	81.6%	7442	94.4%
24-72h	211	2.3%	208	2.6%
72-168h	202	2.2%	131	1.7%
168-360h	1277	13.9%	106	1.3%
Total	9163	100.0%	7887	100.0%
mg/L	CR	%	CR	%
0-0.2	1508	16.5%	232	2.9%
0.2-0.4	277	3.0%	277	3.5%
0.4-0.6	3512	38.3%	3512	44.5%
0.6-1	3866	42.2%	3866	49.0%
Total	9163	100.0%	7887	100.0%

Ao observar a **Tabela 11**, conclui-se que antes da correção existiam novamente, mais de mil condutas com valores de idade da água entre uma e duas semanas, e que apresentavam valores quase nulos de cloro residual, uma anomalia semelhante à da Média Central Bonfim de mais de 10% dos resultados da simulação.

Após a remoção das incoerências, verifica-se que a água não demora mais que um dia a se renovar na rede em quase 95% dos casos, e não os 82% aproximados antes da correção, e mais de 97% dos casos estão entre os valores recomendáveis de cloro ou acima desses valores (excesso explicado pela mesma situação da **ZMC** anteriormente analisada).

Com estes valores, pode-se concluir que apesar de modelos e valores de cloro residual nos reservatórios diferentes, a rede em geral deverá se comportar na maioria dos casos de forma semelhante, o que qualquer mudança significativa, poderá representar um problema a analisar de rechloragem. Para além disso, mais uma vez é verificada a calibração do modelo comparado aos incumprimentos registados (neste caso, 232 casos de cloro residual com menos de 0.2 mg/L de concentração e mais de 400 casos de idade da água superiores a três dias, comparados a 104 casos de incumprimentos de cloro e número de colónias a 22°C).

5.7.3 Pasteleira

5.7.3.1 Características da ZMC

Esta Zona de Medição e Controlo é uma zona mais periférica, com uma rede muito extensa, e claramente uma zona com problemas de cloro residual, levando à decisão de se realizar uma simulação com rechloragem no reservatório com o valor máximo recomendado (0.6 mg/L).

A **ZMC** da Pasteleira localiza-se na zona ocidental do concelho do Porto, sendo alimentada pelo Reservatório Novo da Pasteleira. Caracteriza-se por uma densidade de consumo relativamente reduzida quando comparada com as zonas centrais da cidade e por uma rede extensa, fatores que favorecem tempos de residência mais elevados.

5.7.3.2 Resultados da modelação

Realizou-se de igual forma a correção de resultados na Pasteleira como nas restantes, apresentando-se os fatores corretivos e as anomalias para cada intervalo de idade da água, visíveis na **Tabela 12** e na **Tabela 13**, com os resultados da Pasteleira antes e após rechloragem. Para além disso, os resultados a analisar na **Tabela 14**, com o mesmo método comparativo.

Tabela 12 - Identificação de possíveis anomalias por caudal, cloro residual e idade da água - Pasteleira (antes e após recloração)

Pasteleira		
Q (=0 LPS)	CR (<=0.03 mg/L)	IA (>72 h)
375	321	303
Pasteleira (Recloração)		
Q (=0 LPS)	CR (<=0.03 mg/L)	IA (>72 h)
375	313	303

É possível observar na **Tabela 12** a redução de valores a considerar anómalos, o que transmite a possibilidade de ainda assim haver alguma percentagem reduzida de valores que poderá ser contabilizado nas simulações em caso de melhorias de concentração de cloro residual. O mesmo acontece na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Anomalias de cloro residual por intervalos relevantes de idade da água - Pasteleira (antes e após recloração)

Horas	Pasteleira	Pasteleira (Recloração)
0-24h	6	3
24-72h	15	10
72-168h	7	7
168-360h	293	293
Total	321	313

Tabela 14 - Resultados da simulação da Pasteira (antes e após recloração) da Idade da Água (IA) e do Cloro Residual (CR) nas condutas

Pasteleira	Antes da correção		Após correção		Antes da correção (Recloração)		Após correção (Recloração)	
Horas	IA	%	IA	%	IA	%	IA	%
0-24h	1815	82.7%	1809	96.5%	1811	82.5%	1808	96.1%
24-72h	77	3.5%	62	3.3%	81	3.7%	71	3.8%
72-168h	7	0.3%	0	0.0%	7	0.3%	0	0.0%
168-360h	296	13.5%	3	0.2%	296	13.5%	3	0.2%
Total	2195	100.0%	1874	100.0%	2195	100.0%	1882	100.0%
mg/L	CR	%	CR	%	CR	%	CR	%
0-0.2	746	34.0%	425	22.7%	364	16.6%	51	2.7%
0.2-0.4	1449	66.0%	1449	77.3%	473	21.5%	473	25.1%
0.4-0.6	0	0.0%	0	0.0%	1358	61.9%	1358	72.2%
0.6-1	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%	0	0.0%
Total	2195	100.0%	1874	100.0%	2195	100.0%	1882	100.0%

Com a **Tabela 14**, conclui-se que antes da correção existiam, diferentes das **ZMC** analisadas anteriormente, menos de trezentas condutas com valores de idade da água entre uma e duas semanas, e que apresentavam menos de oitocentos valores quase nulos de cloro residual, uma anomalia com uma realidade de 34% dos resultados da simulação. No caso de recloração os valores de idade da água mantêm-se, mas os de cloro são reduzidos para menos de quatrocentos casos, com uma correspondência de resultados semelhante ao da Média Central Bonfim e Congregados Alta.

Após a remoção das incoerências, verifica-se que a água não demora mais que um dia a se renovar na rede em mais de 95% dos casos, e não os 82% aproximados antes da correção, tanto antes como após a recloração, e mais de 77% dos casos estão entre os valores recomendáveis de cloro para a Pasteleira no caso atual, e mais de 97% dos casos na simulação de recloração da Pasteleira, valor que se assemelha às **ZMC** anteriores, garantindo a sua necessidade.

Com estes valores, pode-se concluir que a rechloragem da Pasteleira permite a aproximação desta aos restantes casos de estudo, já que neste caso, existem 425 casos de cloro residual para 51 após rechloragem, com menos de 0.2 mg/L de concentração e 65 casos de idade da água superiores a três dias para 74 após a rechloragem, comparados a 275 casos de incumprimentos de cloro e número de colónias a 22°C. Os incumprimentos apenas podem ser usados para a comparação antes da rechloragem, ou seja, se usar-se uma razão para estimar os incumprimentos para a Pasteleira após a rechloragem, obtém-se um valor estimado de 27 incumprimentos (-919%), como pode-se verificar na **Tabela 15**, onde a razão da rechloragem, é obtida pela média das razões de Média Central Bonfim e Congregados Alta, **ZMC** com um comportamento hidráulico semelhante a este. A razão retrata o número de incumprimentos de cloro residual e número de colónias a 22°C sobre o número de casos insatisfatórios de idade da água e cloro residual obtidos.

Tabela 15 - Comparação de valores de simulação e incumprimentos na rede

ZMC	CR+IA	CR+NC	Razão
Média Central Bonfim	547	103	0.19
Congregados Alta	445	104	0.23
Pasteleira	490	275	0.56
Pasteleira (Rechloragem)	125	27	0.21

Este resultado sugere uma possível associação entre a degradação do cloro residual e os incumprimentos observados, sem que seja possível estabelecer uma relação causal direta apenas com base nos dados analisados.

5.8 LIMITAÇÕES DA MODELAÇÃO

Estas simulações apresentaram um resultado bastante satisfatório, mas ainda assim é possível identificar três limitações existentes neste trabalho:

- Dependência de parâmetros calibrados (sem dados calibrados corre-se o risco de comparações desviadas da realidade podendo levar a decisões degradantes do processo de gestão proativa);
- Simplificação de fenómenos transientes (é normal fazer-se apenas um estudo mais geral por simplificação, havendo o risco de ignorância de problemas locais);

- Ausência de modelação de roturas em tempo real (não existindo uma ligação direta a roturas, é possível que haja complicações na precisão de resultados).

Ainda assim, a modelação permitiu a validação dos resultados do diagnóstico, a identificação de indicadores de degradação da qualidade, a avaliação de soluções operacionais e o suporte no desenvolvimento da metodologia baseada no risco.

Importa referir que os limiares adotados nesta dissertação têm uma natureza operacional e interpretativa, não correspondendo necessariamente a limites regulamentares. O valor de 0.03 mg/L foi utilizado para identificação de situações potencialmente anómalas de cloro residual na modelação, enquanto o limiar de 72 horas para a idade da água foi adotado como indicador de tempos de residência elevados e potencial degradação da qualidade da água. Estes critérios foram definidos com base no comportamento esperado da rede e na experiência operacional associada à sua exploração.

6

METODOLOGIA PROATIVA DE GESTÃO DA QUALIDADE DA ÁGUA

6.1 INTRODUÇÃO

A gestão da qualidade da água em redes de distribuição tem evoluído no sentido da adoção de abordagens preventivas, assentes na identificação e mitigação de riscos ao longo do sistema.

Os resultados obtidos nos capítulos anteriores evidenciam que:

- Os indicadores agregados apresentam limitações na deteção de problemas localizados;
- Existe uma relação entre incumprimentos e condições operacionais;
- O comportamento hidráulico influencia diretamente a qualidade da água.

O presente capítulo propõe o desenvolvimento de uma metodologia de gestão proativa, baseada na integração de dados analíticos, variáveis operacionais e resultados de modelação hidráulica e de qualidade da água.

Embora as variáveis consideradas anteriormente apresentem relações conceptuais entre si, não foi realizada uma análise estatística formal de correlação no âmbito desta dissertação. Assim, a integração destas variáveis baseia-se no seu potencial contributo para a avaliação do risco da qualidade da água e não numa dependência estatística comprovada entre todas elas.

6.2 PRINCÍPIOS DA METODOLOGIA

A metodologia proposta assenta nos seguintes princípios fundamentais:

- a) Abordagem baseada no risco
 - Identificação de zonas críticas;
 - Priorização de intervenções;
 - Alinhamento com o **DL n. °69/2023** e os Planos de Segurança da Água (**OMS**).
- b) Integração multidimensional
 - Combinação de qualidade da água, operação da rede e comportamento hidráulico.
- c) Foco espacial
 - Análise ao nível das **ZMC**;
 - Identificação de padrões locais.
- d) Natureza proativa
 - Antecipação de problemas;
 - Apoio à decisão operacional;
 - Otimização da monitorização.

6.3 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA

Esta metodologia é composta por quatro etapas principais:

- 1) Recolha e tratamento de dados;
- 2) Diagnóstico (análise de indicadores);
- 3) Avaliação de risco;
- 4) Definição de medidas.

A metodologia desenvolvida estrutura-se como um processo iterativo, permitindo a atualização contínua da avaliação de risco em função da evolução do sistema.

6.4 ESTRUTURA GERAL DA METODOLOGIA

6.4.1 Variáveis consideradas

A avaliação de riscos baseia-se nas variáveis definidas anteriormente:

- **IQA** – Incumprimentos totais da qualidade de água;
- **CI** – Cloro Residual (valores analíticos e modelados inferiores ao recomendável);
- **Em** – Empreitadas (intervenções de grande escala na rede);
- **R** – Roturas (considerando o tempo desde que ocorre até existir a intervenção de arranjo);
- **IA** – Idade da Água (valores modelados).

6.4.2 Construção de indicadores normalizados

Para permitir a comparação entre **ZMC**, as variáveis são normalizadas:

$$X_{norm} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (1.2)$$

6.4.3 Índice de risco (proposta)

Define-se assim um índice de risco global:

$$IR_{global} = w_1 \cdot IQA_{norm} + w_2 \cdot Cl_{norm} + w_3 \cdot R_{norm} + w_4 \cdot IA_{norm} \quad (1.3)$$

Onde:

- **IQA**: incumprimentos totais da qualidade de água;

- Cl: cloro residual;
- R: roturas;
- IA: idade da água;
- w_i : pesos.
- w_1 : diretamente relacionado ao impacto da qualidade no risco;
- w_2 : diretamente relacionado ao impacto da desinfeção no risco;
- w_3 : diretamente relacionado ao impacto da estrutura no risco;
- w_4 : diretamente relacionado ao impacto da hidráulica no risco.

A variável E_m não se encontra neste índice, pois o seu impacto ocorre na ação da mesma e não no cálculo, já que esta reduz o risco de incumprimentos como se pode verificar no caso de estudo.

O índice de risco definido permite integrar diferentes dimensões do sistema numa métrica única, facilitando a comparação entre zonas e a priorização de intervenções.

6.5 CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS DE RISCO

O índice de risco permite classificar as zonas em diferentes níveis, como se pode ver na **Tabela 16**:

- Residual: funcionamento normal;
- Baixo: monitorização reduzida;
- Moderado: monitorização reforçada;
- Elevado: intervenção necessária;
- Crítico: ação imediata.

Tabela 16 - Classes de Risco

Intervalo	Classe
< 0.2	Residual
0.2-0.4	Baixo
0.4-0.6	Moderado
0.6-0.8	Elevado
> 0.8	Crítico

6.6 APLICAÇÃO AO CASO DE ESTUDO

Por limitações de tempo de trabalho não se realizou o cálculo direto do índice de risco, até porque teria de existir uma discussão com as equipas técnicas em relação aos pesos existentes.

Ainda assim, é possível comentar os resultados esperados a partir de todas as componentes analisadas nesta dissertação.

a) Média Central Bonfim

Sendo uma **ZMC** de sistema mais estável, espera-se um risco baixo/moderado.

b) Congregados Alta

Esta **ZMC** apresenta uma forte variabilidade, logo é de se esperar um risco moderado com tendência a convergir para o risco elevado.

c) Pasteleira

O excesso de tempo de residência da água no sistema e o reduzido valor de desinfetante, adicionados à quantia elevada de incumprimentos gerais, permite estimar a existência de um risco elevado, ou até mesmo crítico (neste caso, a recloragem do sistema de abastecimento).

A aplicação da metodologia confirma a robustez do modelo proposto na identificação de zonas críticas, sendo consistente com os resultados obtidos no diagnóstico e na modelação hidráulica.

6.7 DEFINIÇÃO DE MEDIDAS PROATIVAS

As medidas proativas são divididas da seguinte forma:

a) Medidas operacionais

- Ajuste de pressões;
- Gestão de reservatórios;
- Limpeza de rede.

b) Medidas estruturais

- Substituição de condutas;
- Redução de zonas mortas;

c) Medidas de qualidade

- Recloragem (aplicável a zonas críticas);
- Higienização de reservatórios.

A simulação de cenários de recloragem demonstra a eficácia desta medida na mitigação dos efeitos associados ao elevado tempo de residência da água.

6.8 OTIMIZAÇÃO DA MONITORIZAÇÃO

Uma boa monitorização proativa baseia-se no reforço da amostragem nas zonas críticas e a sua redução nas zonas estáveis. Esta proposta permite obter uma maior eficiência e uma melhor deteção de problemas.

6.9 INTEGRAÇÃO COM O ENQUADRAMENTO LEGAL

Como dito no **Capítulo 2**, existe uma integração legislativa a esta gestão proativa:

- a) **DL n. °69/2023**
 - Alinhamento com **AGR** (gestão baseada no risco)

- b) **OMS**
 - Planos de Segurança da Água (**PSA**)

- c) **IWA**
 - Indicadores operacionais

6.10 LIMITAÇÕES E BENEFÍCIOS DA METODOLOGIA

6.10.1 Limitações

Existem quatro limitações principais na metodologia:

- Dependência da qualidade dos dados;
- Simplificações no modelo hidráulico;
- Necessidade de atualização contínua;
- Incerteza nos pesos do índice.

A classificação apresentada constitui uma proposta metodológica destinada a futuras aplicações da abordagem desenvolvida, não tendo sido possível efectuar a sua implementação quantitativa completa no âmbito da presente dissertação.

Não foi efetuada uma análise de sensibilidade aos pesos adotados, pelo que o impacto da variação destes parâmetros na classificação final das zonas de risco não foi avaliado.

6.10.2 Benefícios

A metodologia desenvolvida permite:

- Integrar a qualidade, o funcionamento e a hidráulica;
- Identificar zonas críticas;
- Apoiar as decisões operacionais;
- Promover uma gestão proativa baseada no risco.

A abordagem proposta constitui uma ferramenta eficaz para a gestão integrada da qualidade da água em redes de distribuição urbanas, permitindo ultrapassar as limitações dos indicadores tradicionais e promover uma atuação preventiva e orientada para o risco.

7

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 INTRODUÇÃO

O presente capítulo sintetiza os principais resultados e contributos da dissertação, avaliando o cumprimento dos objetivos definidos e identificando oportunidades de desenvolvimento futuro.

A dissertação teve como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia para a gestão proativa da qualidade da água na rede de distribuição da Águas e Energia do Porto, baseada na integração de dados analíticos, variáveis operacionais e modelação hidráulica.

7.2 PRINCIPAIS CONCLUSÕES

7.2.1 Desempenho global da qualidade da água

A análise efetuada permitiu concluir que:

- O sistema apresenta elevados níveis globais de qualidade da água;
- Os indicadores agregados evidenciam uma elevada conformidade com os requisitos legais;
- No entanto, estes indicadores apresentam baixa sensibilidade à variabilidade espacial e não permitem identificar problemas localizados.

A qualidade global elevada pode ocultar situações de risco a nível local.

7.2.2 Variabilidade espacial e identificação de zonas críticas

A análise ao nível das **ZMC** evidenciou uma forte heterogeneidade na distribuição dos incumprimentos, uma existência de zonas com comportamento sistematicamente crítico e uma concentração dos problemas em áreas específicas da rede. Neste caso de estudo, foram identificadas como principais zonas críticas as **ZMC** Média Central Bonfim, Congregados Alta e Pasteleira.

A qualidade da água deve ser analisada numa perspetiva espacial e não apenas global.

7.2.3 Influência das condições operacionais

A integração de dados operacionais permitiu verificar:

- Relação entre roturas na rede e ocorrência de incumprimentos;
- Impacto das intervenções (empreitadas) na qualidade da água;
- Importância da condição estrutural da rede.

A qualidade da água não depende apenas do tratamento, sendo fortemente influenciada pelas condições de funcionamento da rede de distribuição.

7.2.4 Contributo da modelação hidráulica

A utilização do modelo **EPANET** permitiu:

- Avaliar a distribuição do cloro residual;
- Determinar a idade da água (apenas à saída do reservatório; necessária a obtenção de dados relacionados à idade da água ao entrar no sistema);
- Identificar zonas com comportamento hidráulico desfavorável.

Destacam-se os seguintes resultados:

- A **ZMC** da Pasteleira tem elevados tempos de residência e níveis reduzidos de cloro residual;
- Congregados Alta apresenta forte variabilidade hidráulica;
- A Média Central Bonfim apresenta o comportamento mais estável das três.

Existe uma clara correspondência entre zonas com pior qualidade da água e condições hidráulicas desfavoráveis.

7.2.5 Avaliação de medidas corretivas

A simulação de um cenário de recloragem na Pasteleira permite demonstrar:

- Aumento significativo do cloro residual;
- Redução de zonas com défice de desinfecção;
- Melhoria da uniformidade da qualidade da água.

A recloragem constitui uma medida eficaz e aplicável para a mitigação de riscos em zonas críticas, tendo apenas como ponto a observar, o facto de haver necessidade de recloragem gradual, podendo ser um processo demorado até que se introduza o valor desejado. Isto ocorre, devido à mudança repentina de concentrações de cloro residual que poderá impactar diretamente no sabor da água, levando ao aumento de reclamações diretas à empresa.

7.2.6 Contributo da metodologia proposta

A metodologia desenvolvida permitiu integrar diferentes dimensões do sistema (qualidade da água, operação e comportamento hidráulico), definir um índice de risco global, identificar e classificar zonas críticas da rede e apoiar a tomada de decisão operacional.

A abordagem desenvolvida demonstra que a integração de dados analíticos, operacionais e de modelação constitui uma ferramenta essencial para a gestão proativa da qualidade da água, permitindo ultrapassar as limitações dos indicadores tradicionais e apoiar a tomada de decisão baseada no risco.

Além disso permitiu ao laboratório da **AEdP** confirmar os seus resultados gerais que por si só, poderiam falhar por haver avaliações globais em vez de locais.

7.3 CONTRIBUTOS DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação contribui para o desenvolvimento de abordagens proativas, sendo estes divididos nas seguintes classes contributivas:

- a) Contributos técnicos
 - Integração de dados reais de qualidade e operação;
 - Aplicação prática de modelação **EPANET**;
 - Desenvolvimento de indicadores de risco;
 - Proposta de medidas operacionais concretas.
- b) Contributos científicos
 - Metodologia integrada baseada no risco;
 - Demonstração da influência das variáveis operacionais;
 - Ligação entre hidráulica e qualidade da água;
 - Estrutura replicável a outros sistemas urbanos.
- c) Contributos para a Água e Energia do Porto
 - Identificação de zonas prioritárias;
 - Apoio à gestão operacional;
 - Base para a otimização da monitorização;
 - Apoio à implementação de estratégias preventivas.

7.4 LIMITAÇÕES DA DISSERTAÇÃO

Apesar dos resultados obtidos, o trabalho apresenta algumas limitações:

- Representação simplificada do modelo hidráulico;
- Existência de zonas com reduzido escoamento;
- Ausência de dados contínuos de qualidade na rede;
- Limitação na resolução temporal dos dados analíticos;
- Incerteza associada à definição de pesos no índice de risco.

7.5 TRABALHOS FUTUROS

Para obter melhores resultados de uma gestão proativa, deve-se realizar os seguintes trabalhos futuros:

- a) Melhoria da base de dados
 - Integração de dados em tempo real;
 - Aumento da densidade de pontos de monitorização;
 - Digitalização e automatização de registos operacionais.
- b) Evolução da modelação hidráulica
 - Inclusão de consumos mais representativos;
 - Modelação de transitórios hidráulicos;
 - Integração com sistemas de telemetria.
- c) Otimização da estratégia de monitorização
 - Definição dinâmica de pontos de amostragem;
 - Monitorização dirigida pelo risco;
 - Redução de redundâncias analíticas.

Para além das melhorias metodológicas propostas, os dados já disponíveis permitem o desenvolvimento de análises mais avançadas, nomeadamente a implementação eficaz do índice de risco proposto, estudos de correlação entre variáveis operacionais e de qualidade da água, análises de sensibilidade aos pesos do índice e o desenvolvimento de modelos preditivos para identificação antecipada de zonas críticas.

7.5.1 Integração de técnicas de Machine Learning

Uma das principais oportunidades de desenvolvimento futuro reside na integração de técnicas de Machine Learning (**ML**) na análise e gestão da qualidade da água.

A utilização de **ML** torna possível as seguintes aplicações:

- Previsão de incumprimentos – modelos preditivos baseados em dados históricos;
- Detecção de anomalias – identificação automática de comportamentos atípicos;
- Modelação da relação qualidade da água-operação – aprendizagem de padrões não lineares;
- Otimização operacional – Definição automática de estratégias de gestão.

O uso da **ML**, desenvolve um conjunto de vantagens na gestão proativa da qualidade da água. Este apresenta uma capacidade de análise de grandes volumes de dados com enorme precisão e reduzido tempo de estruturação da base de dados, identifica padrões complexos, melhora a capacidade preditiva da metodologia e dá apoio à decisão em tempo real.

O modelo desenvolvido na presente dissertação pode constituir a base para a integração de **ML** através da utilização dos indicadores de risco como variáveis de entrada, a calibração automatizada de pesos do índice de risco, o desenvolvimento de sistemas de alerta precoce e a integração com plataformas digitais da entidade gestora.

A integração de técnicas de Machine Learning representa uma evolução natural da metodologia proposta, permitindo transformar a abordagem atual, baseada na análise de dados históricos, num sistema preditivo e adaptativo, alinhado com os princípios da gestão inteligente de infraestruturas urbanas.

A evolução dos sistemas de abastecimento de água para modelos de gestão mais inteligentes e proativos dependerá da capacidade de integrar dados, modelação e ferramentas avançadas de análise, como a **ML**, que garantirá a sustentabilidade e segurança dos sistemas no futuro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Alegre, H., Baptista, J. M., Cabrera, E. Indicadores de desempenho para serviços de abastecimento de água. IWA Publishing, Londres, 2016.
- [2] Berry, D., Xi, C., Raskin, L. Microbial ecology of drinking water distribution systems. *Current Opinion in Biotechnology*, 2006, 17(3), 297–302.
- [3] Clark, R. M., Sivaganesan, M. Predicting chlorine residuals in drinking water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2002, 128(2), 152–161.
- [4] Decreto-Lei n.º 69/2023. Regime da qualidade da água destinada ao consumo humano. *Diário da República*, Portugal, 2023.
- [5] Comissão Europeia. Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption. *Jornal Oficial da União Europeia*, 2020.
- [6] ERSAR. Sistema de avaliação da qualidade do serviço prestado aos utilizadores. ERSAR, Lisboa, 2010.
- [7] ERSAR. Guia técnico para a qualidade da água destinada ao consumo humano. ERSAR, Lisboa, 2017.
- [8] ERSAR. Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal (RASARP 2023). ERSAR, Lisboa, 2023.
- [9] Grayman, W. M., Loucks, D. P., Saito, L. Manual de sistemas de distribuição de água. McGraw-Hill, New York, 2009.

- [10] Hallam, N. B., West, J. R., Forster, C. F., Powell, J. C., Spencer, I. The decay of chlorine associated with the pipe wall in water distribution systems. *Water Research*, 2002, 36(14), 3479–3488.
- [11] International Water Association. *The Bonn Charter for Safe Drinking Water*. IWA, Londres, 2004.
- [12] Kirmeyer, G. J., Friedman, M., Clement, J. A. *Guidance manual for maintaining distribution system water quality*. AWWA Research Foundation, Denver, 2000.
- [13] Kusiak, A., Li, M., Zhang, Z. A data-driven approach for prediction of water quality. *Applied Soft Computing*, 2013, 13(6), 2937–2945.
- [14] Lambert, A., Brown, T., Takizawa, M., Weimer, D. A review of performance indicators for real losses from water supply systems. *Journal of Water Supply: Research and Technology—AQUA*, 1999, 48(6), 227–237.
- [15] Mays, L. W. *Manual de sistemas de distribuição de água*. McGraw-Hill, New York, 2000.
- [16] Rana, M., Arora, A. S., Kothari, R. Machine learning approaches for predicting drinking water quality: A review. *Water Resources Management*, 2018, 32(1), 1–17.
- [17] Romano, M. J., Kapelan, Z., Savić, D. A. Automated detection of pipe bursts using data mining and artificial intelligence. *Water Research*, 2014, 62, 125–138.
- [18] Rossman, L. A. *EPANET 2 users manual*. Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos, Cincinnati, 2000.

- [19] Rossman, L. A., Clark, R. M., Grayman, W. M. Modeling chlorine residuals in drinking water distribution systems. *Journal AWWA*, 1994, 86(7), 83–95.
- [20] Todini, E., Pilati, S. A gradient method for the analysis of pipe networks. In *Aplicações informáticas em abastecimento de água*, 1988, pp. 63–77. Research Studies Press, Reino Unido.
- [21] Organização Mundial de Saúde. Water safety plan manual: Step-by-step risk management for drinking-water suppliers. WHO Press, Genebra, 2009.
- [22] Organização Mundial de Saúde. Guidelines for drinking-water quality. WHO Press, Genebra, 2017.
- [23] Zhang, Q., Zheng, F., Kapelan, Z. Machine learning methods for water quality prediction: A review. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 138, 104995.
- [24] Wu, Z. Y., Walski, T. Pressure-dependent demand modelling in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2005, 131(3), 204–211.
- [25] ERSAR. Dados de base do sector da água. <https://www.ersar.pt/pt/setor/grandes-numeros/dados-de-base>. Acesso em junho de 2026.
- [26] ERSAR. Qualidade da água por entidade gestora. <https://www.ersar.pt/pt/consumidor/qualidade-da-agua/pesquisa-por-entidade>. Acesso em março de 2026.

[27] ERSAR. Qualidade da água por concelho. <https://www.ersar.pt/pt/consumidor/qualidade-da-agua/pesquisa-por-concelho>. Acesso em março de 2026.

[28] ERSAR. Publicações técnicas – guias. <https://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/guias>. Acesso em março de 2026.

[29] ERSAR. Publicações técnicas – relatórios. <https://www.ersar.pt/pt/publicacoes/publicacoes-tecnicas/relatorios>. Acesso em março de 2026.

[30] Águas e Energia do Porto. Relatórios e contas. <https://aguasdoporto.pt/informacao-legal/relatorios-e-contas>. Acesso em março de 2026.

[31] Águas e Energia do Porto. Análises da rede pública. <https://aguasdoporto.pt/analises-da-rede-publica>. Acesso em março de 2026.

[32] Águas do Douro e Paiva. Relatório e contas 2025. <https://www.addp.pt/content/uploads/2026/03/AdDP-RC-2025.pdf>. Acesso em março de 2026.

ANEXOS

A.1 TABELAS

Tabela A. 1 - Incumprimentos de Bactérias Coliformes entre 2022-2024

Indicador	Bactérias Coliformes		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	2	6	9
Amial Matosinhos	1	2	1
Amial Porto	7	21	16
Carvalhido	10	7	16
Castanheira	8	7	2
Congregados Alta	25	47	75
Congregados Superior	7	16	24
Hospital de São João	5	6	7
Fonte da Moura	18	24	21
Inferior 2	6	17	20
Inferior Azurara	1	2	5
Inferior Condominhas	3	1	3
Inferior Paulo da Gama (VRP)	1	0	1
Inferior Quinta	1	0	0
IPO	1	6	7
Média Central Bonfim	55	54	79
Média Central Santo Isidro	23	48	57
Média Oriental	11	15	8
Mercês	0	0	1
Monte dos Burgos	12	13	22
Pasteleira	21	18	25
Pedrouços Antas Norte	0	3	4
Pedrouços Antas Sul	4	8	13
Pedrouços Costa Cabral	14	18	7
Preciosa Mar	0	2	4
Rede_AA_AEdP	236	341	427

Tabela A. 2 - Incumprimentos de Chumbo entre 2022-2024

Indicador	Chumbo		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	0	0
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	0	0
Carvalhido	0	0	0
Castanheira	0	0	0
Congregados Alta	1	0	2
Congregados Superior	0	0	0
Hospital de São João	0	0	0
Fonte da Moura	0	0	0
Inferior 2	0	0	0
Inferior Azurara	0	1	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	0	0	1
Média Central Santo Isidro	0	0	0
Média Oriental	0	0	0
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	0	0	0
Pasteleira	0	0	0
Pedrouços Antas Norte	0	0	0
Pedrouços Antas Sul	0	0	0
Pedrouços Costa Cabral	0	0	0
Preciosa Mar	0	0	1
Rede_AA_AEdP	1	1	4

Tabela A. 3 - Incumprimentos de Cloro Residual entre 2022-2024

Indicador	Cloro Residual		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	2	0	0
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	2	0	0
Carvalhido	1	4	1
Castanheira	0	8	0
Congregados Alta	2	4	1
Congregados Superior	2	0	3
Hospital de São João	0	2	5
Fonte da Moura	1	4	5
Inferior 2	4	2	6
Inferior Azurara	0	0	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	8	1	1
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	9	6	5
Média Central Santo Isidro	3	1	5
Média Oriental	0	1	2
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	2	0	2
Pasteleira	37	20	73
Pedrouços Antas Norte	1	0	0
Pedrouços Antas Sul	4	1	2
Pedrouços Costa Cabral	0	0	2
Preciosa Mar	0	0	0
Rede_AA_AEdP	78	54	113

Tabela A. 4 - Incumprimentos de Clostridium Perfringens entre 2022-2024

Indicador	Clostridium Perfringens		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	0	0
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	4	0
Carvalhido	1	0	0
Castanheira	0	1	0
Congregados Alta	0	5	3
Congregados Superior	1	0	1
Hospital de São João	0	0	0
Fonte da Moura	1	6	0
Inferior 2	1	0	0
Inferior Azurara	0	0	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	1	0
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	1	2	2
Média Central Santo Isidro	1	0	1
Média Oriental	1	0	0
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	0	1	0
Pasteleira	3	1	2
Pedrouços Antas Norte	0	0	0
Pedrouços Antas Sul	0	0	0
Pedrouços Costa Cabral	0	1	0
Preciosa Mar	0	0	1
Rede_AA_AEdP	10	22	10

Tabela A. 5 - Incumprimentos de Enterococos entre 2022-2024

Indicador	Enterococos		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	0	0
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	0	0
Carvalhido	0	0	0
Castanheira	2	0	0
Congregados Alta	0	3	3
Congregados Superior	0	0	0
Hospital de São João	0	0	0
Fonte da Moura	1	2	2
Inferior 2	0	0	0
Inferior Azurara	1	0	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	1	1
IPO	0	1	1
Média Central Bonfim	0	2	2
Média Central Santo Isidro	1	0	0
Média Oriental	0	0	0
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	1	0	0
Pasteleira	2	2	2
Pedrouços Antas Norte	0	1	1
Pedrouços Antas Sul	0	0	0
Pedrouços Costa Cabral	0	1	1
Preciosa Mar	0	0	0
Rede_AA_AEdP	8	13	13

Tabela A. 6 - Incumprimentos de Escherichia Coli entre 2022-2024

Indicador	Escherichia Coli		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	0	0
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	2	0
Carvalhido	1	0	0
Castanheira	1	0	0
Congregados Alta	0	4	3
Congregados Superior	2	0	1
Hospital de São João	0	0	0
Fonte da Moura	0	3	0
Inferior 2	0	2	2
Inferior Azurara	0	0	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	2
Média Central Bonfim	3	0	3
Média Central Santo Isidro	2	0	2
Média Oriental	0	0	0
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	4	0	0
Pasteleira	3	1	4
Pedrouços Antas Norte	0	0	0
Pedrouços Antas Sul	0	1	0
Pedrouços Costa Cabral	0	1	0
Preciosa Mar	0	0	0
Rede_AA_AEdP	16	14	17

Tabela A. 7 - Incumprimentos de Ferro entre 2022-2024

Indicador	Ferro		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	0	1
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	3	3
Carvalhido	0	0	0
Castanheira	0	1	10
Congregados Alta	5	7	13
Congregados Superior	0	0	1
Hospital de São João	0	4	0
Fonte da Moura	0	3	2
Inferior 2	0	0	0
Inferior Azurara	0	3	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	3	8	11
Média Central Santo Isidro	0	1	0
Média Oriental	3	1	0
Mercês	0	2	0
Monte dos Burgos	5	9	1
Pasteleira	0	0	2
Pedrouços Antas Norte	0	1	0
Pedrouços Antas Sul	0	1	0
Pedrouços Costa Cabral	0	2	1
Preciosa Mar	0	3	3
Rede_AA_AEdP	16	49	48

Tabela A. 8 - Incumprimentos de Manganês entre 2022-2024

Indicador	Manganês		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	3	0	5
Amial Matosinhos	0	0	1
Amial Porto	5	6	5
Carvalhido	0	2	3
Castanheira	3	4	16
Congregados Alta	11	14	3
Congregados Superior	1	0	0
Hospital de São João	12	17	4
Fonte da Moura	3	6	3
Inferior 2	0	0	0
Inferior Azurara	0	0	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	1
Média Central Bonfim	12	11	9
Média Central Santo Isidro	3	1	0
Média Oriental	2	0	0
Mercês	4	5	7
Monte dos Burgos	4	3	5
Pasteleira	3	0	3
Pedrouços Antas Norte	9	0	2
Pedrouços Antas Sul	0	5	4
Pedrouços Costa Cabral	1	3	0
Preciosa Mar	2	2	5
Rede_AA_AEdP	78	79	76

Tabela A. 9 - Incumprimentos de Número de Colónias a 22°C entre 2022-2024

Indicador	Nº Colónias a 22°C		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	3	1	5
Amial Matosinhos	0	0	1
Amial Porto	6	3	10
Carvalhido	6	5	3
Castanheira	4	13	2
Congregados Alta	20	33	44
Congregados Superior	8	0	8
Hospital de São João	0	7	28
Fonte da Moura	9	17	14
Inferior 2	6	2	9
Inferior Azurara	6	3	2
Inferior Condominhas	0	0	4
Inferior Paulo da Gama (VRP)	1	2	1
Inferior Quinta	17	6	2
IPO	0	0	5
Média Central Bonfim	28	27	28
Média Central Santo Isidro	16	6	16
Média Oriental	7	4	7
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	8	6	11
Pasteleira	43	22	80
Pedrouços Antas Norte	2	3	1
Pedrouços Antas Sul	5	1	2
Pedrouços Costa Cabral	4	2	6
Preciosa Mar	3	1	6
Rede_AA_AEdP	202	164	295

Tabela A. 10 - Incumprimentos de Turvação entre 2022-2024

Indicador	Turvação		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	0	1	3
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	4	2	1
Carvalhido	8	15	0
Castanheira	1	6	9
Congregados Alta	11	7	3
Congregados Superior	3	1	0
Hospital de São João	4	3	4
Fonte da Moura	4	4	2
Inferior 2	0	0	0
Inferior Azurara	0	1	0
Inferior Condominhas	0	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	8	17	5
Média Central Santo Isidro	0	1	0
Média Oriental	8	5	0
Mercês	2	1	0
Monte dos Burgos	5	3	2
Pasteleira	3	2	1
Pedrouços Antas Norte	0	1	0
Pedrouços Antas Sul	1	2	3
Pedrouços Costa Cabral	2	5	1
Preciosa Mar	1	4	4
Rede_AA_AEdP	65	81	38

Tabela A. 11 - Número de Roturas entre 2022-2024

Indicador	Roturas		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	12	14	5
Amial Matosinhos	0	1	0
Amial Porto	69	48	34
Carvalhido	43	61	47
Castanheira	29	27	28
Congregados Alta	46	55	52
Congregados Superior	22	25	36
Hospital de São João	6	7	6
Fonte da Moura	78	74	75
Inferior 2	6	11	16
Inferior Azurara	7	15	13
Inferior Condominhas	15	5	8
Inferior Paulo da Gama (VRP)	2	3	1
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	1	0
Média Central Bonfim	65	67	63
Média Central Santo Isidro	42	40	33
Média Oriental	36	23	20
Mercês	0	0	2
Monte dos Burgos	36	35	23
Pasteleira	14	15	18
Pedrouços Antas Norte	8	7	7
Pedrouços Antas Sul	5	4	2
Pedrouços Costa Cabral	22	14	14
Preciosa Mar	5	2	5
Rede_AA_AEdP	568	554	508

Tabela A. 12 - Número de Empreitadas entre 2022-2024

Indicador	Empreitadas		
ZMC	2022	2023	2024
AEP	1	0	1
Amial Matosinhos	0	0	0
Amial Porto	0	4	3
Carvalhido	3	4	15
Castanheira	1	0	4
Congregados Alta	1	0	3
Congregados Superior	0	0	3
Hospital de São João	0	0	0
Fonte da Moura	1	3	2
Inferior 2	0	1	2
Inferior Azurara	1	0	0
Inferior Condominhas	2	0	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	1	0	0
Inferior Quinta	0	0	0
IPO	0	0	0
Média Central Bonfim	1	5	0
Média Central Santo Isidro	2	1	3
Média Oriental	3	3	1
Mercês	0	0	0
Monte dos Burgos	2	3	5
Pasteleira	0	0	0
Pedrouços Antas Norte	0	0	0
Pedrouços Antas Sul	0	1	0
Pedrouços Costa Cabral	3	0	0
Preciosa Mar	0	0	0
Rede_AA_AEdP	22	25	42

Tabela A. 13 - Número de incumprimentos por indicador

ZMC	BC	Pb	CR	CP	E	EC	F	M	NC	T
AEP	17	0	2	0	0	0	1	8	9	4
Amial Matosinhos	4	0	0	0	0	0	0	1	1	0
Amial Porto	44	0	2	4	0	2	6	16	19	7
Carvalhido	33	0	6	1	0	1	0	5	14	23
Castanheira	17	0	8	1	2	1	11	23	19	16
Congregados Alta	147	3	7	8	6	7	25	28	97	21
Congregados Superior	47	0	5	2	0	3	1	1	16	4
Hospital de São João	18	0	7	0	0	0	4	33	35	11
Fonte da Moura	63	0	10	7	5	3	5	12	40	10
Inferior 2	43	0	12	1	0	4	0	0	17	0
Inferior Azurara	8	1	0	0	1	0	3	0	11	1
Inferior Condominhas	7	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Inferior Paulo da Gama (VRP)	2	0	0	0	0	0	0	0	4	0
Inferior Quinta	1	0	10	1	2	0	0	0	25	0
IPO	14	0	0	0	2	2	0	1	5	0
Média Central Bonfim	188	1	20	5	4	6	22	32	83	30
Média Central Santo Isidro	128	0	9	2	1	4	1	4	38	1
Média Oriental	34	0	3	1	0	0	4	2	18	13
Mercês	1	0	0	0	0	0	2	16	0	3
Monte dos Burgos	47	0	4	1	1	4	15	12	25	10
Pasteleira	64	0	130	6	6	8	2	6	145	6
Pedrouços Antas Norte	7	0	1	0	2	0	1	11	6	1
Pedrouços Antas Sul	25	0	7	0	0	1	1	9	8	6
Pedrouços Costa Cabral	39	0	2	1	2	1	3	4	12	8
Preciosa Mar	6	1	0	1	0	0	6	9	10	9
Rede_AA_AEdP	1004	6	245	42	34	47	113	233	661	184

Tabela A. 14 - Número de incumprimentos, roturas e empreitadas

ZMC	IQA	R	Em
AEP	41	31	2
Amial Matosinhos	6	1	0
Amial Porto	100	151	7
Carvalhido	83	151	22
Castanheira	98	84	5
Congregados Alta	349	153	4
Congregados Superior	79	83	3
Hospital de São João	108	19	0
Fonte da Moura	155	227	6
Inferior 2	77	33	3
Inferior Azurara	25	35	1
Inferior Condominhas	11	28	2
Inferior Paulo da Gama (VRP)	6	6	1
Inferior Quinta	39	0	0
IPO	24	1	0
Média Central Bonfim	391	195	6
Média Central Santo Isidro	188	115	6
Média Oriental	75	79	7
Mercês	22	2	0
Monte dos Burgos	119	94	10
Pasteleira	373	47	0
Pedrouços Antas Norte	29	22	0
Pedrouços Antas Sul	57	11	1
Pedrouços Costa Cabral	72	50	3
Preciosa Mar	42	12	0
Rede_AA_AEdP	2569	1630	89

Tabela A. 15 - Percentagem de incumprimentos por indicador

ZMC	BC	C	CR	CP	E	EC	F	M	NC	T
AEP	1.7%	0.0%	0.8%	0.0%	0.0%	0.0%	0.9%	3.4%	1.4%	2.2%
Amial Matosinhos	0.4%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.4%	0.2%	0.0%
Amial Porto	4.4%	0.0%	0.8%	9.5%	0.0%	4.3%	5.3%	6.9%	2.9%	3.8%
Carvalhido	3.3%	0.0%	2.4%	2.4%	0.0%	2.1%	0.0%	2.1%	2.1%	12.5%
Castanheira	1.7%	0.0%	3.3%	2.4%	5.9%	2.1%	9.7%	9.9%	2.9%	8.7%
Congregados Alta	14.6%	50.0%	2.9%	19.0%	17.6%	14.9%	22.1%	12.0%	14.7%	11.4%
Congregados Superior	4.7%	0.0%	2.0%	4.8%	0.0%	6.4%	0.9%	0.4%	2.4%	2.2%
Hospital de São João	1.8%	0.0%	2.9%	0.0%	0.0%	0.0%	3.5%	14.2%	5.3%	6.0%
Fonte da Moura	6.3%	0.0%	4.1%	16.7%	14.7%	6.4%	4.4%	5.2%	6.1%	5.4%
Inferior 2	4.3%	0.0%	4.9%	2.4%	0.0%	8.5%	0.0%	0.0%	2.6%	0.0%
Inferior Azurara	0.8%	16.7%	0.0%	0.0%	2.9%	0.0%	2.7%	0.0%	1.7%	0.5%
Inferior Condominhas	0.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.6%	0.0%
Inferior Quinta	0.1%	0.0%	4.1%	2.4%	5.9%	0.0%	0.0%	0.0%	3.8%	0.0%
IPO	1.4%	0.0%	0.0%	0.0%	5.9%	4.3%	0.0%	0.4%	0.8%	0.0%
Média Central Bonfim	18.7%	16.7%	8.2%	11.9%	11.8%	12.8%	19.5%	13.7%	12.6%	16.3%
Média Central Santo Isidro	12.7%	0.0%	3.7%	4.8%	2.9%	8.5%	0.9%	1.7%	5.7%	0.5%
Média Oriental	3.4%	0.0%	1.2%	2.4%	0.0%	0.0%	3.5%	0.9%	2.7%	7.1%
Mercês	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.8%	6.9%	0.0%	1.6%
Monte dos Burgos	4.7%	0.0%	1.6%	2.4%	2.9%	8.5%	13.3%	5.2%	3.8%	5.4%
Pasteleira	6.4%	0.0%	53.1%	14.3%	17.6%	17.0%	1.8%	2.6%	21.9%	3.3%
Pedrouços Antas Norte	0.7%	0.0%	0.4%	0.0%	5.9%	0.0%	0.9%	4.7%	0.9%	0.5%
Pedrouços Antas Sul	2.5%	0.0%	2.9%	0.0%	0.0%	2.1%	0.9%	3.9%	1.2%	3.3%
Pedrouços Costa Cabral	3.9%	0.0%	0.8%	2.4%	5.9%	2.1%	2.7%	1.7%	1.8%	4.3%
Preciosa Mar	0.6%	16.7%	0.0%	2.4%	0.0%	0.0%	5.3%	3.9%	1.5%	4.9%
Rede_AA_AEdP	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Tabela A. 16 - Percentagem de incumprimentos, roturas e empreitadas

ZMC	IQA	R	Em
AEP	1.6%	1.9%	2.2%
Amial Matosinhos	0.2%	0.1%	0.0%
Amial Porto	3.9%	9.3%	7.9%
Carvalhido	3.2%	9.3%	24.7%
Castanheira	3.8%	5.2%	5.6%
Congregados Alta	13.6%	9.4%	4.5%
Congregados Superior	3.1%	5.1%	3.4%
Hospital de São João	4.2%	1.2%	0.0%
Fonte da Moura	6.0%	13.9%	6.7%
Inferior 2	3.0%	2.0%	3.4%
Inferior Azurara	1.0%	2.1%	1.1%
Inferior Condominhas	0.4%	1.7%	2.2%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0.2%	0.4%	1.1%
Inferior Quinta	1.5%	0.0%	0.0%
IPO	0.9%	0.1%	0.0%
Média Central Bonfim	15.2%	12.0%	6.7%
Média Central Santo Isidro	7.3%	7.1%	6.7%
Média Oriental	2.9%	4.8%	7.9%
Mercês	0.9%	0.1%	0.0%
Monte dos Burgos	4.6%	5.8%	11.2%
Pasteleira	14.5%	2.9%	0.0%
Pedrouços Antas Norte	1.1%	1.3%	0.0%
Pedrouços Antas Sul	2.2%	0.7%	1.1%
Pedrouços Costa Cabral	2.8%	3.1%	3.4%
Preciosa Mar	1.6%	0.7%	0.0%
Rede_AA_AEdP	100.0%	100.0%	100.0%

Tabela A. 17 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO - Bactérias Coliformes

Incumprimentos	Bactérias Coliformes		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	17	17	100.00%
Amial Matosinhos	4	4	100.00%
Amial Porto	44	39	88.64%
Carvalhido	33	25	75.76%
Castanheira	17	13	76.47%
Congregados Alta	147	132	89.80%
Congregados Superior	47	46	97.87%
Hospital de São João	18	16	88.89%
Fonte da Moura	63	53	84.13%
Inferior 2	43	42	97.67%
Inferior Azurara	8	8	100.00%
Inferior Condominhas	7	7	100.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	2	0	0.00%
Inferior Quinta	1	1	100.00%
IPO	14	14	100.00%
Média Central Bonfim	188	163	86.70%
Média Central Santo Isidro	128	125	97.66%
Média Oriental	34	34	100.00%
Mercês	1	1	100.00%
Monte dos Burgos	47	41	87.23%
Pasteleira	64	59	92.19%
Pedrouços Antas Norte	7	4	57.14%
Pedrouços Antas Sul	25	23	92.00%
Pedrouços Costa Cabral	39	38	97.44%
Preciosa Mar Aldoar	6	6	100.00%
Total	1004	911	90.74%

Tabela A. 18 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Chumbo

Incumprimentos	Chumbo		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	0	0	0.00%
Amial Matosinhos	0	0	0.00%
Amial Porto	0	0	0.00%
Carvalhido	0	0	0.00%
Castanheira	0	0	0.00%
Congregados Alta	3	2	66.67%
Congregados Superior	0	0	0.00%
Hospital de São João	0	0	0.00%
Fonte da Moura	0	0	0.00%
Inferior 2	0	0	0.00%
Inferior Azurara	1	0	0.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	0	0	0.00%
IPO	0	0	0.00%
Média Central Bonfim	1	0	0.00%
Média Central Santo Isidro	0	0	0.00%
Média Oriental	0	0	0.00%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	0	0	0.00%
Pasteleira	0	0	0.00%
Pedrouços Antas Norte	0	0	0.00%
Pedrouços Antas Sul	0	0	0.00%
Pedrouços Costa Cabral	0	0	0.00%
Preciosa Mar Aldoar	1	1	100.00%
Total	6	3	50.00%

Tabela A. 19 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Clostridium Perfringens

Incumprimentos	Clostridium Perfringens		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	0	0	0.00%
Amial Matosinhos	0	0	0.00%
Amial Porto	4	0	0.00%
Carvalhido	1	0	0.00%
Castanheira	1	1	100.00%
Congregados Alta	8	5	62.50%
Congregados Superior	2	1	50.00%
Hospital de São João	0	0	0.00%
Fonte da Moura	7	3	42.86%
Inferior 2	1	1	100.00%
Inferior Azurara	0	0	0.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	1	1	100.00%
IPO	0	0	0.00%
Média Central Bonfim	5	1	20.00%
Média Central Santo Isidro	2	0	0.00%
Média Oriental	1	1	100.00%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	1	0	0.00%
Pasteleira	6	5	83.33%
Pedrouços Antas Norte	0	0	0.00%
Pedrouços Antas Sul	0	0	0.00%
Pedrouços Costa Cabral	1	0	0.00%
Preciosa Mar Aldoar	1	1	100.00%
Total	42	20	47.62%

Tabela A. 20 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Enterococos

Incumprimentos	Enterococos		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	0	0	0.00%
Amial Matosinhos	0	0	0.00%
Amial Porto	0	0	0.00%
Carvalhido	0	0	0.00%
Castanheira	2	2	100.00%
Congregados Alta	4	2	50.00%
Congregados Superior	0	0	0.00%
Hospital de São João	0	0	0.00%
Fonte da Moura	4	2	50.00%
Inferior 2	0	0	0.00%
Inferior Azurara	1	1	100.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	1	1	100.00%
IPO	1	1	100.00%
Média Central Bonfim	4	3	75.00%
Média Central Santo Isidro	2	1	50.00%
Média Oriental	0	0	0.00%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	2	1	50.00%
Pasteleira	5	3	60.00%
Pedrouços Antas Norte	2	1	50.00%
Pedrouços Antas Sul	0	0	0.00%
Pedrouços Costa Cabral	1	1	100.00%
Preciosa Mar Aldoar	1	1	100.00%
Total	30	20	66.67%

Tabela A. 21 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Escherichia Coli

Incumprimentos	Escherichia Coli		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	0	0	0.00%
Amial Matosinhos	0	0	0.00%
Amial Porto	2	2	100.00%
Carvalhido	1	0	0.00%
Castanheira	1	1	100.00%
Congregados Alta	7	7	100.00%
Congregados Superior	3	2	66.67%
Hospital de São João	0	0	0.00%
Fonte da Moura	3	1	33.33%
Inferior 2	4	4	100.00%
Inferior Azurara	0	0	0.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	0	0	0.00%
IPO	2	2	100.00%
Média Central Bonfim	6	6	100.00%
Média Central Santo Isidro	4	4	100.00%
Média Oriental	0	0	0.00%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	4	3	75.00%
Pasteleira	8	7	87.50%
Pedrouços Antas Norte	0	0	0.00%
Pedrouços Antas Sul	1	1	100.00%
Pedrouços Costa Cabral	1	1	100.00%
Preciosa Mar Aldoar	0	0	0.00%
Total	47	41	87.23%

Tabela A. 22 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Ferro

Incumprimentos	Ferro		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	1	1	100.00%
Amial Matosinhos	0	0	0.00%
Amial Porto	6	5	83.33%
Carvalhido	0	0	0.00%
Castanheira	11	0	0.00%
Congregados Alta	25	12	48.00%
Congregados Superior	1	1	100.00%
Hospital de São João	4	0	0.00%
Fonte da Moura	5	1	20.00%
Inferior 2	0	0	0.00%
Inferior Azurara	3	0	0.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	0	0	0.00%
IPO	0	0	0.00%
Média Central Bonfim	22	7	31.82%
Média Central Santo Isidro	1	0	0.00%
Média Oriental	4	1	25.00%
Mercês	2	0	0.00%
Monte dos Burgos	15	2	13.33%
Pasteleira	2	0	0.00%
Pedrouços Antas Norte	1	0	0.00%
Pedrouços Antas Sul	1	0	0.00%
Pedrouços Costa Cabral	3	0	0.00%
Preciosa Mar Aldoar	6	3	50.00%
Total	113	33	29.20%

Tabela A. 23 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Manganês

Incumprimentos	Manganês		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	8	7	87.50%
Amial Matosinhos	1	0	0.00%
Amial Porto	16	8	50.00%
Carvalhido	5	2	40.00%
Castanheira	23	0	0.00%
Congregados Alta	28	6	21.43%
Congregados Superior	1	0	0.00%
Hospital de São João	33	0	0.00%
Fonte da Moura	12	3	25.00%
Inferior 2	0	0	0.00%
Inferior Azurara	0	0	0.00%
Inferior Condominhas	0	0	0.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	0	0	0.00%
Inferior Quinta	0	0	0.00%
IPO	1	1	100.00%
Média Central Bonfim	32	5	15.63%
Média Central Santo Isidro	4	0	0.00%
Média Oriental	2	0	0.00%
Mercês	16	1	6.25%
Monte dos Burgos	12	5	41.67%
Pasteleira	6	0	0.00%
Pedrouços Antas Norte	11	0	0.00%
Pedrouços Antas Sul	9	0	0.00%
Pedrouços Costa Cabral	4	1	25.00%
Preciosa Mar Aldoar	9	4	44.44%
Total	233	43	18.45%

Tabela A. 24 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Número Colónias a 22°C

Incumprimentos	Nº Colónias a 22°C		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	9	4	44.44%
Amial Matosinhos	1	0	0.00%
Amial Porto	19	7	36.84%
Carvalhido	14	0	0.00%
Castanheira	19	2	10.53%
Congregados Alta	97	23	23.71%
Congregados Superior	16	8	50.00%
Hospital de São João	35	15	42.86%
Fonte da Moura	40	13	32.50%
Inferior 2	17	9	52.94%
Inferior Azurara	11	0	0.00%
Inferior Condominhas	4	3	75.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	4	0	0.00%
Inferior Quinta	25	10	40.00%
IPO	5	1	20.00%
Média Central Bonfim	83	26	31.33%
Média Central Santo Isidro	38	9	23.68%
Média Oriental	18	6	33.33%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	25	6	24.00%
Pasteleira	145	61	42.07%
Pedrouços Antas Norte	6	2	33.33%
Pedrouços Antas Sul	8	6	75.00%
Pedrouços Costa Cabral	12	5	41.67%
Preciosa Mar Aldoar	10	3	30.00%
Total	661	219	33.13%

Tabela A. 25 - Incumprimentos Totais – Amostra Total, PCQA+PCO, percentagem de amostra abrangida pelo PCQA+PCO – Turvação

Incumprimentos	Nº Colónias a 22°C		
Ano	Total		
Amostras de incumprimentos	Amostra Total	PCQA+PCO	%
AEP	9	4	44.44%
Amial Matosinhos	1	0	0.00%
Amial Porto	19	7	36.84%
Carvalhido	14	0	0.00%
Castanheira	19	2	10.53%
Congregados Alta	97	23	23.71%
Congregados Superior	16	8	50.00%
Hospital de São João	35	15	42.86%
Fonte da Moura	40	13	32.50%
Inferior 2	17	9	52.94%
Inferior Azurara	11	0	0.00%
Inferior Condominhas	4	3	75.00%
Inferior Paulo da Gama (VRP)	4	0	0.00%
Inferior Quinta	25	10	40.00%
IPO	5	1	20.00%
Média Central Bonfim	83	26	31.33%
Média Central Santo Isidro	38	9	23.68%
Média Oriental	18	6	33.33%
Mercês	0	0	0.00%
Monte dos Burgos	25	6	24.00%
Pasteleira	145	61	42.07%
Pedrouços Antas Norte	6	2	33.33%
Pedrouços Antas Sul	8	6	75.00%
Pedrouços Costa Cabral	12	5	41.67%
Preciosa Mar Aldoar	10	3	30.00%
Total	661	219	33.13%

A.2 FIGURAS

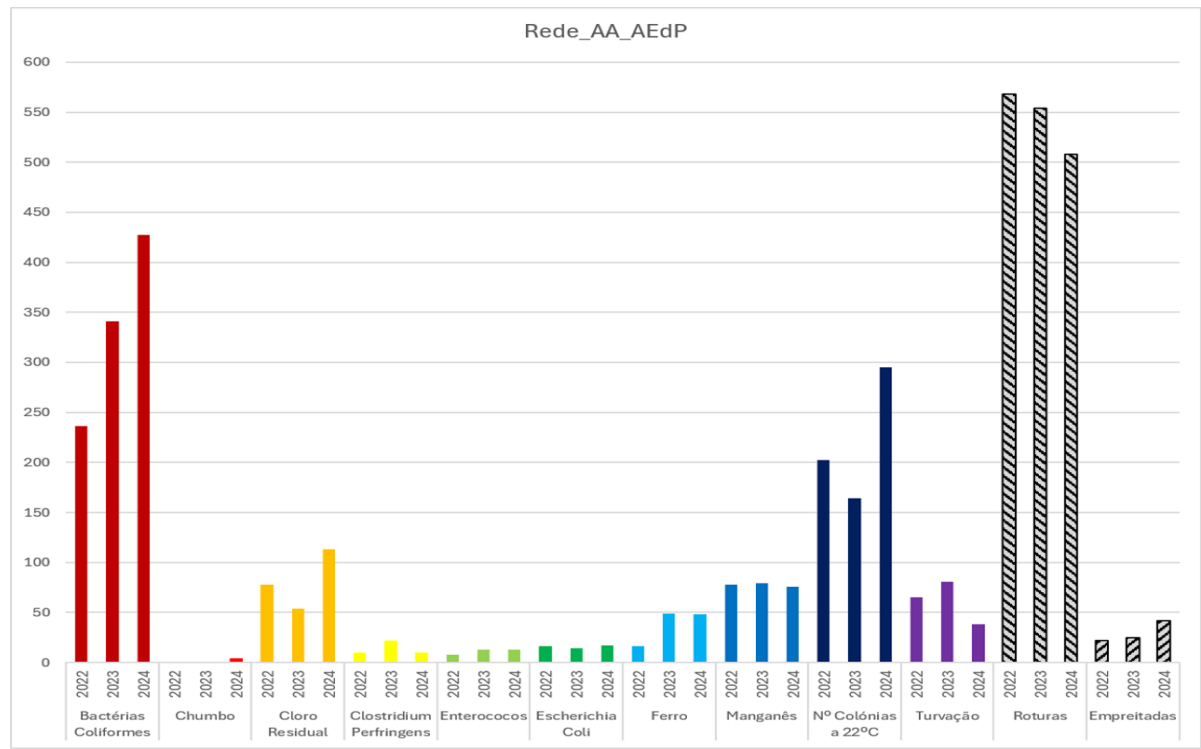


Figura A. 1 - Incumprimentos, Roturas e Empreitadas em toda a rede entre 2022-2024