



Definição das velocidades de escoamento e monitorização da qualidade da água no Sistema Adutor X/Y (ETA – extremo da rede)

UMinho | 2021

Ana Rita Sousa Castro



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Ana Rita Sousa Castro

**Definição das velocidades de escoamento e monitorização da qualidade da água ao longo do Sistema Adutor X/Y (ETA – extremo da rede)**

Dezembro 2021

Este trabalho é financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia, I.P., no âmbito do projeto DSAIPA/AI/0099/2019.





**Universidade do Minho**

Escola de Engenharia

Ana Rita Sousa Castro

**Definição das velocidades de escoamento  
e monitorização da qualidade da água ao  
longo do Sistema Adutor X/Y (ETA –  
extremo da rede)**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Biológica

Ramo de Tecnologia Ambiental

Trabalho realizado sob a orientação de

**Professora Doutora Maria Alcina Alpoim de Sousa  
Pereira**

**Engenheiro Adriano José Pereira de Magalhães**

## DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIROS

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada. Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

### *Licença concedida aos utilizadores deste trabalho*



**Atribuição-NãoComercial-Compartilhalgual**

**CC BY-NC-SA**

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Doutora Maria Alcina Alpoim de Sousa Pereira, pela orientação, dedicação, incentivo e conhecimento técnico que tanto me ajudou e acompanhou ao longo de todo o projeto.

Ao engenheiro Adriano José Pereira de Magalhães, ao Jorge Pereira do Gago e a todos os operadores da ETA Y e da ETA X que tão bem me receberam desde o primeiro dia. Apesar das condições atípicas que se viveram, mostraram sempre disponibilidade e prontidão para me ajudarem em qualquer tarefa, fazendo-me sentir parte integrante da empresa.

Ao Pedro Oliveira, elemento do Centro ALGORITMI da Escola de Engenharia da Universidade do Minho, pela importante colaboração e ajuda que me foi prestada.

E por último, mas não menos importante, aos meus pais, irmãos, João, amigos e colegas, por todo o apoio e incentivo, principalmente nos momentos em que achei que não isto seria possível.

## **DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE**

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho acadêmico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração.

Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

## Definição das velocidades de escoamento e monitorização da qualidade da água ao longo do sistema adutor X/Y (ETA – Extremo da rede)

### RESUMO

A principal preocupação das entidades gestoras de Sistemas de Abastecimento de Água (SAA) é a qualidade da água e a sua manutenção ao longo dos sistemas de distribuição. Além de ser a maior preocupação, é também uma tarefa difícil de realizar, devido à complexidade das redes de abastecimento.

Posto isto, o principal objetivo deste trabalho passa por disponibilizar informação relativa à evolução da qualidade da água ao longo do sistema adutor em estudo. Além disso, pretendeu-se também desenvolver uma ferramenta de predição da evolução da qualidade da água, que possa depois ser utilizada pela empresa.

Para isso, recorreu-se a 3 formas de modelação do sistema em estudo: *software* EPANET, ajuste a modelos cinéticos em Excel e com recurso a um modelo de *machine learning* (árvores de decisão).

A modelação em EPANET revelou-se ser uma tarefa muito complexa, uma vez que é uma ferramenta que necessita de algum conhecimento técnico para uma correta abordagem. Também a dificuldade em gerar os dados necessários para a construção e calibração do modelo fez com que não se tornasse possível obter uma modelação adequada ao SAA em estudo.

O método mais rudimentar utilizado, por aplicação de modelos cinéticos em Excel, já utilizado por certa forma pela empresa, mostrou apresentar alguns erros, uma vez que não considera todas as variáveis que provocam o decaimento de cloro. Contudo, é uma ferramenta fácil de utilizar e dá uma ideia aproximada do decaimento de cloro global.

Por fim, recorreu-se ao modelo de Árvores de Decisão, que mostrou ser um modelo com uma taxa de erro relativamente baixa, pelo que é o modelo que mais se aproxima ao sistema real.

**Palavras-Chave:** decaimento de cloro; modelação hidráulica; EPANET; *machine learning*; qualidade da água; sistemas de abastecimento de água

# Definition of flow velocities and monitoring of water quality along the aductor system X/Y

## ABSTRACT

The main concern of managing entities of Water Supply Systems is the water quality and its maintenance throughout the distribution systems. In addition to being the biggest concern, it is also a difficult task to carry out due to the complexity of supply networks.

That said, the main objective of this work is to provide information about the evolution of water quality along the system under study. Moreover, it was also intended to develop a tool to predict the evolution of water quality, which can then be used by the company itself.

For that, 3 ways of modelling the system under study were used: EPANET software, adjustment to kinetic models in Excel and using a machine learning model (decision trees).

Modelling in EPANET turned out to be a very complex task, as it is a tool that needs some technical knowledge for a correct approach. Also, the difficulty in generating the data provided for the construction and calibration of the model made it impossible to obtain an adequate modelling for the system under study.

The most rudimentary method used, by applying kinetic models in Excel, already used by the company, showed some errors, since it does not consider all the variables that cause chlorine decay. However, it is an easy-to-use tool and gives an idea about the global chlorine decay.

Finally, the decision trees model was used, which proved to be a model with a relatively low error rate, making it the closest model to the real system.

**Key words:** chlorine decay; hidraulic modelling; EPANET; machine learning; water quality; water supply systems



## ÍNDICE

Agradecimentos .....	iii
Resumo.....	v
Abstract .....	vi
Lista de Figuras .....	ix
Lista de Tabelas .....	xii
Lista de Abreviaturas, Siglas e Acrónimos.....	xiii
1. Introdução.....	14
1.1 Enquadramento e motivação .....	14
1.2 Objetivos e metodologia .....	15
1.3 Estrutura da dissertação.....	16
2. Revisão bibliográfica .....	17
2.1 Sistemas de abastecimento de água .....	17
2.2 Tratamento da água em sistemas de abastecimento de água .....	18
2.3 Qualidade da água em sistemas de abastecimento de água .....	19
2.3.1 Qualidade da água em Portugal.....	20
2.4 Modelação de sistemas de abastecimento de água .....	22
2.4.1 EPANET .....	25
2.5 <i>Machine Learning</i> .....	28
2.5.1 Árvores de Decisão.....	30
2.6 Decaimento de cloro .....	31
2.6.1 Decaimento de cloro no seio líquido .....	32
2.6.2 Decaimento de cloro nas paredes da tubagem .....	34
3. Caso prático .....	37
3.1 Águas do Norte .....	37
3.2 Subsistema X/Y .....	38
3.2.1 Captação e tratamento de água.....	38
3.2.2 Constituição e descrição do subsistema .....	40

4. Metodologia.....	44
4.1 EPANET .....	44
4.1.1 Calibração do modelo hidráulico .....	49
4.1.2 Calibração da qualidade da água .....	51
4.2 Modelos cinéticos.....	54
4.3 Árvores de decisão .....	55
5. Resultados e discussão .....	58
5.1 EPANET .....	58
5.2 Modelação cinética de 1ª ordem .....	58
5.3 Árvores de Decisão .....	62
6. Conclusões e recomendações.....	65
Bibliografia .....	67
Anexo I – Descrição dos reservatórios do subsistema.....	70
Anexo II – Esquema da rede.....	71
Anexo III – Dados dos consumos na rede inseridos no EPANET .....	76
Anexo IV – Gráficos de interseção para determinação de $k_b$ experimentalmente, para as amostras 2 e 3 .....	77
Anexo V – Consumos da rede nos reservatórios e pontos de entrega.....	78
Anexo VI – Resultados de TRH obtidos .....	80
Anexo VII – Gráficos de dispersão $\lg (C/C_0)$ em função do tempo.....	81
Anexo VIII – Gráficos de dispersão de cloro medido e estimado pelo modelo .....	85
Anexo IX – Visualização de variáveis importantes .....	88

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fases do tratamento de água convencional. Adaptado de (CAWST, 2013). .....	18
Figura 2 - Evolução da percentagem de água segura em Portugal. Fonte: ERSAR, 2021.....	22
Figura 3 - Componentes físicos de um sistema de distribuição de água. Adaptado de: Rossman, 2000.....	26
Figura 4 - Exemplo esquemático do modelo de Árvore de Decisão. ....	30
Figura 5 - Decaimento característico segundo diferentes leis cinéticas.....	34
Figura 6 - Esquema captação da água bruta. ....	39
Figura 7 - Mapa representativo da conduta desde a captação X até ao Nó 3. ....	40
Figura 8 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 3 até ao PE 08. ....	40
Figura 9 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 3 até ao Nó 10.....	41
Figura 10 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 10 até ao PE 06. ....	42
Figura 11 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 10 até ao Nó 16A. ....	42
Figura 12 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 16A até ao RR Q09.....	43
Figura 13 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 16A até ao RR Q21. ....	43
Figura 14 - Dados de entrada a introduzir no EPANET para nós a), RNF b) e troços c). ....	45
Figura 15 - Dados de entrada a introduzir no EPANET para bombas e válvulas.....	46
Figura 16 - Características das bombas.....	47
Figura 17 - Padrão de consumo ajustado a 24 horas adicionado no EPANET. ....	48
Figura 18 - Mapa da rede de distribuição construída no EPANET. ....	48
Figura 19 - Dados de pressão inseridos no EPANET.....	49
Figura 20 - Relatório de calibração de pressão extraído do EPANET.....	50
Figura 21 - Gráfico de correlação entre os valores reais e os observados extraído do EPANET. ....	50
Figura 22 - Gráfico de comparação entre as médias de pressão reais e observadas extraído do EPANET.....	51
Figura 23 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 1. ....	53
Figura 24 - Organização dos dados necessários para a determinação da constante de decaimento de cloro. ....	54
Figura 25 - Exemplo de um documento de dados utilizado em Árvores de Decisão. ....	56
Figura 26 – Perfil de concentração de cloro obtido pelo modelo EPANET.....	58

Figura 27 - Gráfico $\lg (C_t/C_0)$ em função do tempo para o mês de janeiro.....	59
Figura 28 - Gráfico $\lg (C_t/C_0)$ em função do tempo para o mês de agosto. ....	60
Figura 29 - Dados de cloro medidos e estimados para o mês de janeiro.....	60
Figura 30 - Dados de cloro medidos e estimados para o mês de agosto. ....	61
Figura 31 - Visualização das variáveis importantes no RL02, extraído no PyCharm.....	63
Figura 32 - Esquema da rede.....	71
Figura 33 - Esquema da rede (continuação). ....	72
Figura 34 - Esquema da rede (continuação). ....	73
Figura 35 - Esquema da rede (continuação). ....	74
Figura 36 - Esquema da rede (continuação). ....	75
Figura 37 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 2. ....	77
Figura 38 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 3. ....	77
Figura 39 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de fevereiro. ....	81
Figura 40 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de março.....	81
Figura 41 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de abril.....	82
Figura 42 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de maio.....	82
Figura 43 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de junho.....	83
Figura 44 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de julho. ....	83
Figura 45 - Gráfico $\lg (C/C_0)$ em função do tempo para o mês de setembro. ....	84
Figura 46 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de fevereiro.....	85
Figura 47 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de março. ....	85
Figura 48 - Gráfico de valores de cloro medidos e estimados para o mês de abril.....	85
Figura 49 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de maio. ....	86
Figura 50 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de junho. ....	86
Figura 51 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de julho. ....	86
Figura 52 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de setembro.....	87
Figura 53 - Visualização das variáveis importantes para o PE A. ....	88
Figura 54 - Visualização das variáveis importantes para o PE EV. ....	88
Figura 55 - Visualização das variáveis importantes para o PE S.....	89
Figura 56 - Visualização das variáveis importantes para o PE 08. ....	89
Figura 57 - Visualização das variáveis importantes para o RR R02.....	90

Figura 58 - Visualização das variáveis importantes para o RR R03B.....	90
Figura 59 - Visualização das variáveis importantes para o RR R05.....	91
Figura 60 - Visualização das variáveis importantes para o RR R06.....	91
Figura 61 - Visualização das variáveis importantes para o RR R07.....	92
Figura 62 - Visualização das variáveis importantes para o RR R08.....	92
Figura 63 - Visualização das variáveis importantes para o RR R09.....	93
Figura 64 - Visualização das variáveis importantes para o RR R11.....	93

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos cinéticos propostos para descrever o decaimento de cloro em sistemas de distribuição de água .....	33
Tabela 2 - Coeficientes das fórmulas de perda de carga para tubulações .....	46
Tabela 3 - Dados para determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio do líquido (kb) .....	52
Tabela 4 - Valores de constante de decaimento de cloro no seio da água obtidos experimentalmente.....	53
Tabela 5 - Determinação do volume acumulado em cada troço da rede.....	54
Tabela 6 - Hiper-parâmetros considerados para o modelo .....	56
Tabela 7 - Resultados de tempo de retenção hidráulica obtidos nos meses de janeiro e agosto .....	59
Tabela 8 - Resultados obtidos nos hiper-parâmetros e métricas nas árvores de decisão .....	63
Tabela 9 - Valores de cloro previstos pela árvore de decisão.....	64
Tabela 10 - Descrição dos reservatórios do subsistema .....	70
Tabela 11 - Dados de consumos na rede inseridos no EPANET .....	76
Tabela 12 - Consumos nos reservatórios da rede no ano 2021.....	78
Tabela 13 - Dados dos consumos nos pontos de entrega da rede no ano 2021 .....	79
Tabela 14 - Resultados de TRH obtidos pelo modelo .....	80

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

AdN	Águas do Norte, S.A.
AI	Inteligência Artificial
ERSAR	Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos
ETA	Estação de Tratamento de Água
ML	<i>Machine Learning</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
PCQA	Plano de Controlo da Qualidade da Água
PE	Ponto de entrega
PENSAAR	Plano Estratégico de Abastecimento de Águas e de Saneamento de Águas Residuais
PSA	Plano de Segurança da Água
RNA	Redes Neurais Artificiais
RNF	Reservatório de nível fixo
RNV	Reservatório de nível variável
RR	Reservatório de reserva de água
SAA	Sistema de abastecimento de água
TRH	Tempo de retenção hidráulico

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Enquadramento e motivação

A presente Dissertação de Mestrado insere-se no Plano de Estudos do Mestrado Integrado em Engenharia Biológica e enquadra uma investigação em ambiente industrial, nomeadamente na empresa Águas do Norte (AdN). A investigação consiste na definição das velocidades de escoamento, bem como na monitorização da qualidade da água, ao longo do sistema adutor X/Y, desde a ETA até ao extremo da rede.

O abastecimento de água à população de algumas regiões de ww e xx implica a ligação dos SAA X e Y. A água captada e tratada na ETA X é transportada ao longo do SAA X até à zona poente de ww, onde se liga ao SAA Y, que assegura depois o abastecimento de água às regiões de ww. O subsistema X/Y constitui assim uma conduta numa extensão de cerca de 140 km (incluindo todos os extremos da rede), num diâmetro compreendido entre 400 a 700 mm.

Tratando-se de um sistema tão extenso, é expectável que haja alterações na qualidade da água relativamente a alguns parâmetros do Plano de Controlo Operacional, como o cloro residual, o pH, a temperatura, o alumínio e a condutividade.

O principal parâmetro a ter em atenção é o cloro, utilizado para a desinfecção da água durante o seu tratamento, uma vez que concentrações de cloro fora da gama permitida por lei pode originar água com qualidade alterada à chegada aos consumidores.

A concentração de cloro residual diminui durante o percurso da água ao longo do sistema, podendo chegar a concentrações tão baixas que é promovido o crescimento microbiano, sendo que as condições mais críticas são atingidas nas extremidades da rede devido aos elevados tempos de residência da água (Simard, Pelletier, & Rodriguez, 2011).

Além das variações de velocidade de escoamento, também as condições das condutas, como o diâmetro, podem levar a mudanças nas taxas de decomposição do cloro residual (Menaia, Coelho, Lopes, Fonte, & Palma, 2003). O pH e a temperatura são também tidos como fatores a ter em conta na diminuição da concentração de cloro residual (Simard, Pelletier, & Rodriguez, 2011).

Assim, ao determinar as velocidades de escoamento e cruzá-las com os dados de decaimento do cloro, para uma análise conjunta, faz com que se perceba onde está a água com qualidade alterada para que sejam tomadas as estratégias adequadas. Uma das estratégias que se pode



adotar é a rechloragem, que consiste no reforço de cloro num ponto específico da rede, onde a concentração de cloro é demasiado baixa.

Para tal, é necessário fazer-se uma modelação/simulação do sistema hidráulico, que permita que se tenha uma previsão do comportamento da água e dos parâmetros de qualidade.

Os modelos hidráulicos reproduzem, através das características da rede e da sua forma de operação, o comportamento hidráulico do sistema que representam, permitindo a realização de diagnósticos e otimizações do sistema.

## 1.2 Objetivos e metodologia

O principal objetivo deste trabalho consiste em disponibilizar informação relativa à evolução da qualidade da água ao longo do sistema adutor e com isso desenvolver uma ferramenta de predição dessa evolução.

Para atingir o objetivo, foram testadas 3 ferramentas diferentes que permitem modelar/simular o sistema de abastecimento em estudo, de forma a poder escolher aquela que é de mais fácil utilização e a que se aproxima melhor ao sistema real. Assim, disponibilizando esta informação, a empresa poderá optar pela escolha de um dos modelos para utilização futura em ambiente de trabalho.

A metodologia adotada para a realização deste estudo passou pela construção de um modelo hidráulico no *software* EPANET 2.0, pela monitorização utilizando modelos cinéticos de decaimento de cloro com recurso ao Excel e pela utilização de um modelo de *machine learning*, para comparação de resultados.

Inicialmente, pensou-se em utilizar modelos de redes neuronais artificiais (RNA) mas, como se trata de um sistema relativamente novo, os dados disponíveis não seriam suficientes, pelo que se optou pela utilização de um modelo de árvores de decisão, através do programa PyCharm. Para a realização do estudo através das árvores de decisão, contou-se com a ajuda dos elementos do centro de investigação ALGORITMI, da Universidade do Minho, responsável pela plataforma PAMWater.

A escolha do *software* EPANET está relacionada com vários fatores, entre os quais a utilização livre, gratuita e de fácil acesso, a fiabilidade e o facto de ser um dos principais modelos de simulação hidráulica.

Assim, o presente estudo compreendeu as seguintes etapas:

- Levantamento e caracterização do subsistema;
- Levantamento dos dados existentes referentes a cloro, pH, temperatura, turvação, condutividade e caudal (inseridos no Plano de Controlo de Qualidade) em todos os pontos da rede;
- Construção do modelo EPANET;
- Calibração do modelo EPANET construído;
- Modelação da rede com recurso ao Excel;
- Aplicação dos modelos cinéticos de decaimento de cloro em Excel;
- Aplicação de um modelo de *machine learning* (Árvores de decisão);
- Análise dos dados obtidos.

### 1.3 Estrutura da dissertação

O presente trabalho é composto por 6 capítulos, que contêm a informação necessária e relevante para a investigação.

No Capítulo 1 é feita uma introdução ao tema de dissertação, com respetivo enquadramento e motivação, e onde são mencionados os objetivos e metodologia utilizada.

O Capítulo 2 refere-se a uma revisão bibliográfica da informação necessária à realização deste trabalho. Aqui, é feito um enquadramento teórico sobre os sistemas de abastecimento de água, o tratamento de água em sistemas de abastecimento e respetiva qualidade. É feito, também, um enquadramento sobre os meios utilizados para atingir os objetivos do trabalho, como a modelação de sistemas de abastecimento e o *machine learning*. Por fim, é feito um enquadramento sobre o decaimento de cloro em redes de distribuição de água.

Todo o caso prático é descrito no Capítulo 3, no qual se dá a conhecer a empresa Águas do Norte e o subsistema em estudo.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia utilizada na realização do presente estudo.

O Capítulo 5 inclui todos os resultados obtidos e respetiva discussão.

Por fim, no capítulo 6 estão presentes as conclusões e recomendações.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Sistemas de abastecimento de água**

Um sistema de abastecimento e distribuição de água consiste na infraestrutura responsável pela captação de água no meio natural e respetivo tratamento, elevação, transporte, armazenamento e distribuição aos consumidores, em níveis qualitativos e quantitativos admitidos pela legislação em vigor.

A primeira fase é a captação da água, que resulta da extração de água bruta no meio hídrico, de acordo com a disponibilidade hídrica e a necessidade de consumo. A captação pode ser feita por meio de um poço drenante na margem do leito de água, com recurso a uma jangada ou por captação submersa. O modo mais utilizado é o de captação com jangada, uma vez que apresenta menor impacto ambiental e permite a captação no ponto mais elevado da coluna de água, onde esta tem menos sedimentos, favorecendo assim a durabilidade do sistema. Nesta etapa, a água passa por um sistema de grades que impede a passagem de elementos grosseiros contidos na água, como folhas, galhos e pedras.

Segue-se o tratamento da água, normalmente realizado em Estações de Tratamento de Água (ETA), que consiste na correção das características físicas, químicas e microbiológicas da água, permitindo produzir água potável que respeite as normas de qualidade.

Através de estações elevatórias, a água é elevada para pontos de desnível positivo (a partir de um ponto de uma cota mais baixa para um ponto de cota mais elevada), fazendo com que circule sob pressão e vença barreiras orográficas. A água tratada é transportada através de adutores, aquedutos e canais até à zona de consumo e distribuição, bem como até às zonas de armazenamento. O armazenamento da água tratada é normalmente feito em reservatórios e assegura a continuidade do abastecimento.

A última etapa compreende a distribuição da água pelos consumidores em quantidade e pressão adequadas ao seu consumo.

Devido à grande extensão e complexidade dos SAA, estes são divididos em sistemas em alta e sistemas em baixa, de acordo com a sua função. Os sistemas em alta são constituídos por componentes a montante da rede de distribuição, estabelecendo uma ligação do meio hídrico aos sistemas em baixa. Por sua vez, os sistemas em baixa, são constituídos por componentes

que se ligam ao utilizador final, prestando aos consumidores o serviço de abastecimento de água.

## 2.2 Tratamento da água em sistemas de abastecimento de água

A proteção da saúde humana deverá ser sempre o principal objetivo num SAA para o consumo humano. Deste modo, qualquer água (superficial ou subterrânea) necessita de tratamento antes de ser consumida, para assegurar que esta não represente qualquer perigo para o consumidor final.

A água pode ser tratada numa central local, em grandes volumes, para depois ser distribuída para vários consumidores através de redes de abastecimento ou então, em volumes mais pequenos, nos locais de consumos, como instituições, escolas, clínicas ou nas próprias habitações. Os dois sistemas seguem o mesmo processo de tratamento, com as etapas fundamentais de sedimentação, filtração e desinfecção, como representado no esquema na figura 1 (CAWST, 2013).

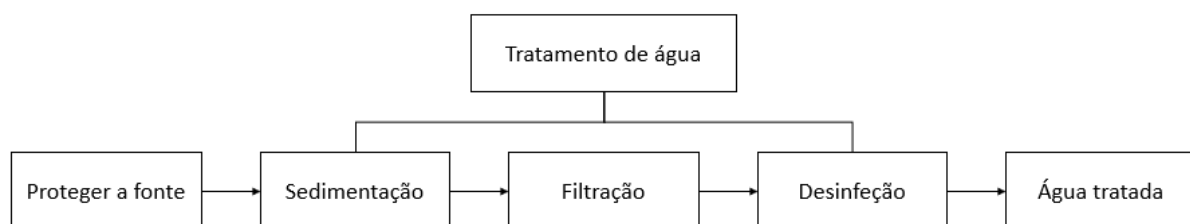


Figura 1 - Fases do tratamento de água convencional. Adaptado de (CAWST, 2013).

A etapa de sedimentação permite a remoção de partículas sólidas e de mais de 50% dos organismos patogénicos presentes na água, fazendo uso das forças gravitacionais para separar as partículas de densidade superior à da água, depositando-as na superfície.

Para facilitar o processo de sedimentação, são realizados também os processos de coagulação e floculação. O processo de coagulação consiste na adição de um coagulante, em agitação violenta da água, que facilita a aglomeração das partículas. O coagulante mais utilizado no tratamento de água é o sulfato de alumínio. Após a coagulação, há uma mistura lenta da água que permite a formação de flocos de maior dimensão. Com o aumento do diâmetro das partículas, há um aumento da velocidade de sedimentação.

Após a etapa fundamental de sedimentação, segue-se a filtração. Nesta fase, a água atravessa um leito poroso, para remoção de partículas mais pequenas que não foram removidas na etapa de sedimentação e de mais de 90% dos organismos patogénicos. Normalmente, o material filtrante mais utilizado é o de areia.

Por fim, procede-se à desinfecção da água, com recurso a um desinfetante que destrói os organismos patogénicos ainda nela existentes até esta fase. O desinfetante mais utilizado no tratamento de água é o cloro pois, além do preço, é bastante eficaz na remoção dos organismos patogénicos e na remoção de gostos e cheiros da água. A concentração de cloro deve ser em quantidade suficiente para inativar os microrganismos existentes e para permitir manter uma concentração residual no sistema de abastecimento. A concentração residual de cloro evita a degradação da qualidade da água e garante a qualidade da água até ao consumidor final, inibindo o crescimento de microrganismos que não tenham sido eliminados completamente ou que tenham sido introduzidos na rede por contaminação externa. De acordo com o Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, é recomendável que as concentrações de cloro residual livre estejam compreendidas entre 0,2 mg/L e 0,6 mg/L.

A água desinfetada é armazenada em local seguro e protegido, sem que seja alterada a qualidade, antes de seguir para a rede de abastecimento.

### **2.3 Qualidade da água em sistemas de abastecimento de água**

A água pode ser encontrada em diferentes locais, dependendo do lugar onde vivemos, e segundo várias origens. Existem três principais fontes utilizadas para recolher água: água subterrânea, que representa cerca de metade da totalidade da água captada em todo o mundo; água superficial, que provém de rios, lagos ou fontes; e água das chuvas, que é recolhida e armazenada com recurso a um telhado, uma superfície no solo ou bacia hidrográfica (CAWST, 2013).

A qualidade da água vai-se alterando de local para local, com as estações do ano e com o tipo de rochas e solo que vai atravessando durante o seu ciclo natural. Também a atividade humana tem uma grande influência na mudança da qualidade da água, por meio de tratamentos de água residual inadequados, deposição de lixo a céu aberto e em locais não destinados ao mesmo, práticas agrícolas como o uso de fertilizantes e pesticidas e derrames de produtos químicos e industriais nos leitos de água.

A melhor forma de reduzir o risco de água não segura para consumo consiste numa abordagem que compreende cinco passos:

1. Proteção da fonte de água;
2. Sedimentação;
3. Filtração;
4. Desinfecção;
5. Armazenamento da água em local seguro.

Cada passo deste processo ajuda a reduzir o risco de doenças relacionadas com o consumo de água com qualidade inadequada (CAWST, 2013).

Mesmo que, à primeira vista, a água pareça estar limpa, é necessário assegurar que é segura para o consumo. Para isso, é importante considerar os seguintes parâmetros:

- Microbiológico, pela presença de bactérias, vírus e protozoários, uma vez que a água tem de ser livre de agentes patogénicos;
- Químico, assegurando que há uma baixa concentração em químicos tóxicos;
- Físico, com controlo da temperatura, cor, cheiro, sabor e turvação.

Deste modo, a manutenção da qualidade da água é um dos maiores desafios dos SAA, dadas as variações espaço-temporais dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), cerca de 2,1 mil milhões de pessoas ainda não tem acesso a serviços de água potável com segurança, sendo a principal causa de morte de crianças com menos de 5 anos. Por esta e por outras razões, foi definido, em 2015, que na Agenda 2030, um dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS) será alcançar o acesso universal e equitativo à água potável e segura para todos até ao ano de 2030.

### 2.3.1 Qualidade da água em Portugal

Em Portugal, a Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR) é a autoridade responsável por garantir o cumprimento da legislação relativa à qualidade da água, para que esta seja a mais adequada para os consumidores.

A ERSAR é responsável por proceder a uma aprovação anual dos programas de controlo da qualidade da água a que cada entidade gestora é obrigada a elaborar, controlando a fiabilidade dos resultados laboratoriais e fiscalizando as entidades gestoras dos sistemas

públicos de abastecimento, de forma a verificar se todos os requisitos de legislação são cumpridos. Além disso, comunica com as autoridades de saúde no sentido de resolver problema relacionados com a qualidade de água que possam surgir.

O Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, estabelece o regime de qualidade da água destinada ao consumo humano, procedendo à revisão do Decreto-Lei n.º 243/2001, de 5 de setembro, que transpôs para o ordenamento jurídico interno a Diretiva n.º 98/83/CE, do Conselho, de 3 de novembro, tendo por objetivo proteger a saúde humana dos efeitos nocivos resultantes da eventual contaminação dessa água e assegurar a disponibilização tendencialmente universal de água salubre, limpa e equilibrada na sua composição. Define, ainda, as atribuições e competências das entidades gestoras dos sistemas de abastecimento público. O Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, com alterações introduzidas pelo Decreto-Lei n.º 152/2017, de 7 de dezembro, aplica-se no âmbito do controlo da qualidade da água para consumo humano em estabelecimentos do setor alimentar, nomeadamente estabelecimentos ligados ao sistema de abastecimento público e estabelecimentos com sistemas de abastecimento particular.

Relativamente às águas doces superficiais e águas subterrâneas destinadas à produção de água para o consumo humano, é o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, que define os seus níveis de qualidade, estabelecendo critérios relativos à frequência mínima de amostragem e análise para a monitorização da qualidade, conforme a classificação das águas.

A Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro, denominada Lei da Água, realiza o enquadramento para a gestão sustentável tanto das águas superficiais como das subterrâneas e transpôs para o direito interno um conjunto de normas essenciais da Diretiva 200/60/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 23 de outubro de 2000, que estabelece um quadro de ação comunitário no domínio da política da água. Além destes, existem ainda outros diplomas legais pertinentes para as atividades de captação, tratamento e distribuição, controlo da qualidade da água destinada à produção de água para consumo humano e controlo da água para consumo humano.

Em Portugal, tem-se verificado uma evolução positiva em relação à qualidade da água distribuída, tendo-se verificado, em 2020, uma percentagem de água segura de 98,85%. O valor do indicador de água segura para o consumidor reflete o cumprimento dos requisitos da

qualidade da água (valores paramétricos) e a realização do número mínimo de análises regulamentares.

Um dos objetivos definido pelo Plano Estratégico de Abastecimento de Água e de Saneamento de Águas Residuais 2020 (PENSAAR 2020) foi o de alcançar a percentagem de 99% de água segura para o ano de 2020. Como se pode observar pelo gráfico da figura 2, esse objetivo foi alcançado logo no ano de 2015.

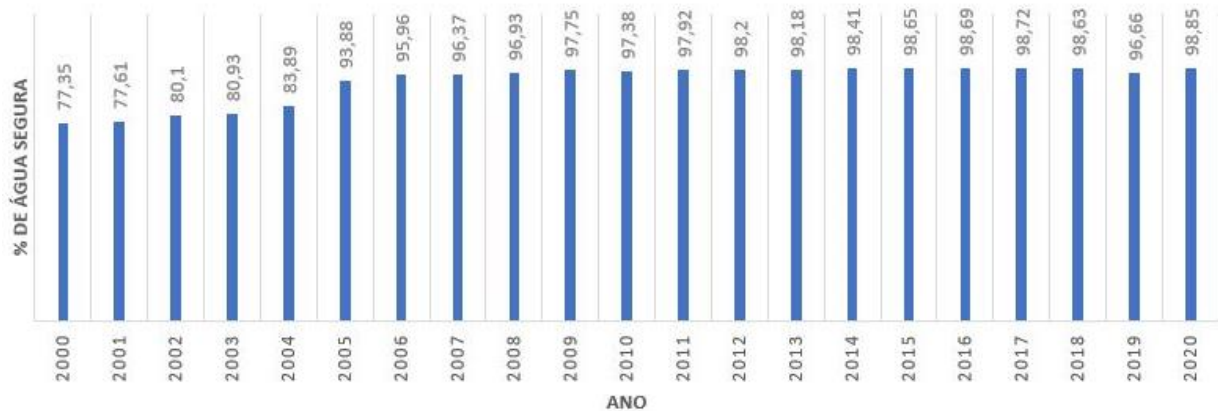


Figura 2 – Evolução da percentagem de água segura em Portugal. Fonte: ERSAR, 2021.

Em relação às análises realizadas, a evolução tem sido também positiva. Em 2020, registaram-se cerca de 99,94% de análises na torneira do consumidor (em relação às exigidas), havendo registo de 100% em 264 concelhos do país. Isto traduz um controlo muito exigente no que toca à qualidade da água, estando muito próximo do cumprimento integral deste requisito legal (APA, 2021).

## 2.4 Modelação de sistemas de abastecimento de água

O controlo do estado dos sistemas de abastecimento de água, por medição de pressão, caudal ou concentração de parâmetros de qualidade da água é insuficiente no tempo e espaço, devido à elevada complexidade das redes, ao número de pontos de consumo e à variabilidade deste. Além de toda a sua complexidade, os SAA têm a maioria das suas infraestruturas enterradas no solo, tornando a inspeção de todos os componentes físicos muito difícil ou mesmo impossível de realizar. Por estas razões, acompanhar o comportamento do sistema ao longo do tempo de forma direta é um trabalho árduo e por vezes tardio, uma vez que, em



muitas situações, as anomalias são apenas detetadas através de sintomas exteriores (baixa pressão, elevados volumes de perda de água, fugas de água, coloração ou turvação da água, etc). Daqui surge a necessidade da utilização de instrumentos de apoio baseados na modelação e análise dos SAA.

Os modelos de simulação são instrumentos computacionais que permitem, com uma margem de erro estimável, analisar e prever o comportamento hidráulico e de parâmetro de qualidade da água do sistema, a partir dos seus componentes, da sua forma de operação e dos consumos solicitados. Assim, os modelos permitem uma rápida e eficaz realização de análises sensoriais e a simulação dos mais variados cenários com suficiente aproximação, sem que seja necessário interferir com o sistema em questão (Coelho, Loureiro , & Alegre, 2006).

De um modo geral, um modelo de simulação hidráulica de um SAA é composto por:

1. conjunto de dados das características físicas do sistema, das suas solicitações (consumos) e das suas condições operacionais;
2. conjunto de equações matemáticas que reproduzem o comportamento hidráulico dos componentes individuais e do sistema no geral, expressas em termos de variáveis de estado e instanciadas pelos dados descritivos mencionados no ponto 1;
3. algoritmos numéricos necessários para a resolução desse conjunto de equações matemáticas.

Estes modelos de simulação são os instrumentos computacionais mais utilizados no projeto e diagnóstico do funcionamento de sistemas de transporte e distribuição de água, sendo uma preciosa ferramenta para todos os técnicos envolvidos, uma vez que os problemas podem ser antecipados e as soluções avaliadas antes de ser realizado qualquer investimento (Coelho, Loureiro , & Alegre, 2006).

Os modelos permitem a simulação estática e a simulação dinâmica de um sistema de distribuição de água. A simulação estática representa o funcionamento do sistema num dado momento e é utilizada para determinar o comportamento do mesmo em condições estabilizadas. Por sua vez, a simulação dinâmica simula o comportamento do sistema num dado período de tempo, permitindo prever o enchimento e esvaziamento de reservatórios, a regulação de válvulas e as alterações de pressão e caudal em condições de variação de consumos no tempo (Vaz, 2015).

Existem vários programas que permitem a modelação de SAA que são, na generalidade, semelhantes em termos de cálculo dos principais parâmetros hidráulicos e de qualidade da água, diferindo apenas em alguns acessórios de cálculo, na interface gráfica e na capacidade de processamento de dados.

No processo de escolha do modelo mais adequado é necessário ter em consideração as necessidades de simulação e o fim a que esta se destina. Para isso, é necessário realizar uma comparação das características dos modelos disponíveis no mercado com a informação disponibilizada por cada um dos fornecedores e pela experiência dos utilizadores.

Devem ser analisados vários aspetos de cada modelo, nomeadamente:

- o custo do modelo;
- a facilidade de utilização;
- a flexibilidade do modelo na entrada de dados;
- a robustez;
- a velocidade de processamento;
- apoio técnico por meio de manuais de utilização e documentação escrita;
- a possibilidade de simulação da qualidade da água.

São vários os programas computacionais disponíveis que permitem a simulação de redes de distribuição de água, sendo os mais populares o EPANET, o HidroCAD, o WaterCAD, e o SynerGEE Water.

O HidroCAD realiza análises estáticas e é capaz de modelar redes de incêndio e de emergência, porém, não realiza análises de qualidade da água e é de natureza comercial (HydroCAD Software Solutions LLC, 2011).

O modelo WaterCAD realiza análises estáticas e dinâmicas e é capaz de realizar modelações utilizando as funções de perda de carga de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning-Stickler. É também capaz de modelar redes de emergência e de incêndio e executa análises de qualidade, nomeadamente determinação da idade da água, determinação do percurso da água e cinética de reações no seio da água e nas paredes das condutas. É de natureza comercial e é necessário o AutoCAD para inserir os dados de entrada (Haestad Methods, 2003).

À semelhança do WaterCAD, o SynerGEE Water também executa análises estáticas e dinâmicas, utiliza funções de perda de carga de Darcy-Weisbach, Hazen-Williams e Manning-Stickler e é de natureza comercial. Este modelo permite realizar análises de qualidade como a determinação da idade da água, determinação do percurso da água e a determinação de concentração de duas substâncias em simultâneo.

O EPANET é um dos modelos mais utilizados pelas entidades gestoras, consultores, investigadores e académicos, sendo o escolhido para a realização deste trabalho. Além disso, também o facto de ser possível a sua utilização gratuita sem restrições, da existência de documentação de fácil acesso relativa ao modelo e a fiabilidade demonstrada pela investigação desenvolvida em Portugal pelo LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil levou à escolha deste *software*.

Porém, no seio das entidades gestoras, apenas recentemente se começou a refletir sobre a utilização deste tipo de ferramentas. Além disso, não investem muito neste tipo de tecnologia, sendo até ao ano de 2000 considerada como um acessório e não considerada como uma ferramenta de apoio.

A verdade é que só é possível tirar o devido proveito da modelação matemática dos sistemas de distribuição de água quando os procedimentos internos das entidades gestoras estão bem definidos, de forma que seja possível construir, atualizar e explorar modelos fiáveis e eficientes.

O desenvolvimento de modelos de simulação de sistemas de abastecimento de água pode, e deve, constituir um bom motivo para integrar a informação existente arquivada nos diversos sistemas internos de informação utilizados (sistemas de informação geográfica, de gestão de clientes e faturação, de apoio à manutenção, etc.), permitindo melhorar a qualidade dos dados disponíveis (Coelho, Loureiro, & Alegre, 2006).

#### 2.4.1 EPANET

O EPANET é um programa computacional desenvolvido pela *U.S. Environmental Protection Agency* (USEPA) que executa, de forma gratuita, simulações estáticas ou dinâmicas do comportamento hidráulico e de qualidade da água de sistemas de abastecimento de água. Este programa constitui uma ferramenta de apoio à análise de sistemas de distribuição,

melhorando o conhecimento sobre o transporte e o destino dos constituintes da água para consumo humano.

No EPANET, uma rede de distribuição é constituída por tubagens, nós (que representam as junções das tubagens), bombas, válvulas, reservatórios de nível fixo (RNF) e/ou reservatórios de nível variável (RNV), e permite obter resultados de caudal em cada uma das tubagens, da pressão em cada nó, da altura da água em cada reservatório de nível variável e da concentração de espécies químicas ao longo da rede. Além das espécies químicas, o modelo simula também o cálculo da idade da água e o rastreio da origem de água em qualquer ponto da rede (Rossman L. A., 2000).

A modelação de um sistema de distribuição de água em EPANET compreende, geralmente, os seguintes passos (Rossman L. A., 2000):

1. Desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição ou importar uma descrição-base do sistema a partir de um arquivo de texto;
2. Editar as propriedades dos objetos que constituem o sistema;
3. Descrever as condições de operacionalidade do sistema;
4. Selecionar um conjunto de opções de simulação;
5. Executar uma simulação hidráulica ou de qualidade da água;
6. Visualizar os resultados de simulação.

O EPANET modela os objetos físicos que constituem o sistema de distribuição de água, assim como os parâmetros operacionais associados. Nos componentes físicos inclui-se os nós, os reservatórios de nível fixo, os reservatórios de nível variável, as tubulações, as bombas e as válvulas, tal como representado na figura 3 (Rossman L. A., 2000).

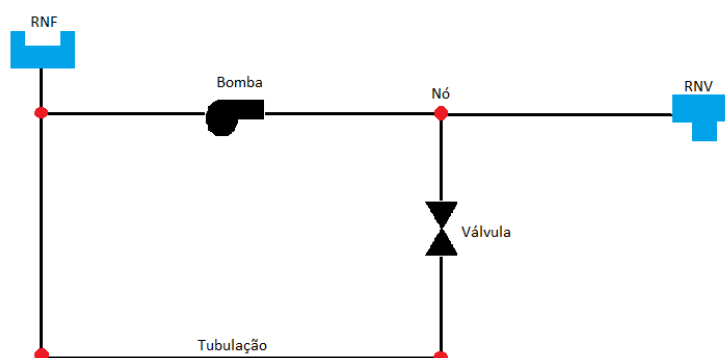


Figura 3 - Componentes físicos de um sistema de distribuição de água. Adaptado de: Rossman, 2000.

Os nós são os pontos de união de cada troço do sistema, onde a água entra e sai da rede e representam conexões, RNF e RNV. Em cada instante de tempo da simulação, o software fornece informação sobre a carga hidráulica total (nível da água no caso de RNF e RNV), a pressão e qualidade da água em cada nó.

Os reservatórios de nível fixo representam nós especiais com um volume de armazenamento de água, de capacidade ilimitada e carga hidráulica constante. Simulam lagos, rios ou aquíferos ou ainda, e de forma mais frequente, ligações a outros sistemas. Podem, ainda, servir como pontos de origem de qualidade da água.

Os reservatórios de nível variável funcionam também como nós especiais da rede, mas ao contrário dos RNF, possuem uma capacidade de armazenamento limitada e o volume de água armazenado pode variar ao longo do tempo de simulação. A cada instante da simulação, o EPANET produz resultados de carga hidráulica e de qualidade da água nestes pontos.

As tubulações representam as condutas que transportam a água entre os vários pontos da rede. Durante a simulação, são obtidos resultados de caudal, velocidade, perda de carga, fator de resistência, valor médio da taxa de reação e concentração média para o parâmetro de qualidade de água.

Relativamente às bombas, estas representam troços da rede que transferem energia para o escoamento, aumentando a sua altura manométrica. Como principais resultados durante a simulação, inclui-se o caudal bombeado e a altura manométrica.

Por sua vez, as válvulas são troços que limitam a pressão ou o caudal num ponto particular da rede de distribuição. Os principais resultados obtidos na simulação são o caudal e a perda de carga (Rossman L. A., 2000).

Os componentes não-físicos do modelo de simulação EPANET, que correspondem aos parâmetros operacionais, definem três categorias de informação sobre a rede: curvas, padrões temporais e controlos.

As curvas são descritas como objetos que contêm pares de dados que representam uma relação entre duas grandezas. Os tipos de curva utilizados pelo modelo são:

- > Curva da Bomba, que representa uma relação entre a altura de elevação e o caudal, definindo as condições de funcionamento da mesma, para uma velocidade de rotação nominal;

- > Curva de Rendimento, que relaciona o rendimento do grupo com o caudal bombeado e utilizada apenas para cálculos energéticos;
- > Curva de Volume, que determina o modo como o volume de água armazenado num RNV varia com a altura da água;
- > Curva de Perda de Carga, que é utilizada para descrever a perda de carga através de uma Válvula Genérica (GPV), em função do caudal.

Os padrões temporais são constituídos por um conjunto de fatores multiplicativos que podem ser aplicados ao valor de uma determinada grandeza, por forma de traduzir a sua variação no tempo.

Os controlos representam um conjunto de instruções que estabelecem o modo como a rede opera ao longo do tempo, especificando o estado dos troços selecionados ao longo do tempo, altura de água num RNV e valores de pressão em pontos específicos da rede. Os controlos podem ser simples ou programados (Rossman L. A., 2000).

## **2.5 Machine Learning**

*Machine learning* (ML) trata-se de um subconjunto da inteligência artificial (AI) que envolve algoritmos de computação projetados para simular a inteligência humana, no sentido de mudar o seu comportamento à medida que aprendem com os seus erros. Assim, o conceito de ML resulta na criação de modelos e ferramentas que estão em constante aprendizagem, de forma a melhorar o seu desempenho segundo uma recolha contínua de dados que permitem ao modelo ter experiência e conhecimento. Desta forma, ML não pretende imitar o comportamento humano, mas sim utilizá-lo como uma potencialidade especial para complementar a inteligência humana, e assim desenvolver tarefas que vão além das capacidades humanas, como a capacidade de examinar e processar uma grande quantidade de dados.

Este processo computacional usa dados de entrada (*input data*) para alcançar a tarefa desejada, sem que seja necessário ser programado para produzir um resultado específico. Os algoritmos alteram e adaptam a sua arquitetura, por meio da repetição de dados, para que se tornem cada vez mais precisos na realização dessa tarefa. Neste processo de adaptação (que tem o nome de *training*), são fornecidos vários dados de entrada, juntamente com os resultados desejados. Desta forma, o algoritmo é otimizado de maneira que possa produzir,

não apenas o resultado desejado quando apresentado com os dados de entrada do processo de *training*, mas também resultados a partir de novos dados (*learning*). O *training* não tem necessariamente de se limitar a uma adaptação inicial, podendo prolongar-se à medida que são processados novos dados (El Naqa & Murphy, 2015).

É possível então dizer-se que este campo da AI se concentra na construção de algoritmos para detetar padrões e prever classes a partir dos dados. A sua tarefa é identificar a função  $f: x \rightarrow y$ , onde  $x$  representa a entrada e  $y$  a saída, ou seja, os padrões ou previsões (Silva C. , 2020). São vários os modelos de *machine learning* existentes, cada um com o seu nível de complexidade, entre eles:

- Árvores de Decisão;
- *Random Forest*;
- Redes Neurais Artificiais (RNA);
- Redes Neurais Recorrentes (RNR).

O modelo de *random forest*, tal como o nome indica, consiste num elevado número de árvores de decisão individuais, que funcionam em conjunto. Cada árvore de decisão gera uma classe de previsão, e a classe selecionada pela maioria das árvores é aquela que se torna a previsão do modelo (Yiu, 2019).

O modelo de RNA simula os processos do cérebro humano por meio de sistemas computacionais e matemáticos. Estes modelos têm uma arquitetura específica, inspirada no sistema nervoso biológico e, tal como o cérebro humano, o modelo consiste em neurónios numa forma complexa e não-linear. O modelo é aplicado para resolver problemas do mundo real, desde a área financeira à hidrologia e enquadram três categorias: classificação de padrões, previsão e controlo e otimização (Maleikian & Chitsaz, 2021).

O modelo RNR é utilizado em problemas relacionados com processos sequenciais, como aprendizagem sequencial e modelos de linguagem. Tem também várias aplicações no mundo real, nomeadamente a previsão de trânsito, de modo a planear o tráfego rodoviário e pedestre (Zhang, Li, Ye, Zhu, & Li, 2021).

Como as Árvores de Decisão são o modelo de mais simples utilização, e os dados disponíveis não são suficientes para utilizar os restantes modelos, recorreu-se a este para a realização do presente trabalho.

### 2.5.1 Árvores de Decisão

Uma Árvore de Decisão é um tipo de algoritmo de *machine learning* que representa uma tabela de decisão sob a forma de uma árvore, com uma variável alvo pré-definida. Esta estrutura adotada pelas Árvores de Decisão está representada na figura 4.

Este tipo de algoritmo é considerado um dos melhores e mais utilizados métodos de ML, uma vez que são modelos preditivos de alta precisão, estabilidade e facilidade de interpretação. Além disso, a sua principal vantagem é a tomada de decisões tendo em consideração os atributos mais relevantes, além dos compreensíveis para a maioria das pessoas. Uma vez que escolhem e apresentam os atributos por ordem de importância, as Árvores de Decisão permitem aos seus usuários conhecer quais os fatores que influenciam as suas pesquisas (Lemos, Steiner, & Nievola, 2005).

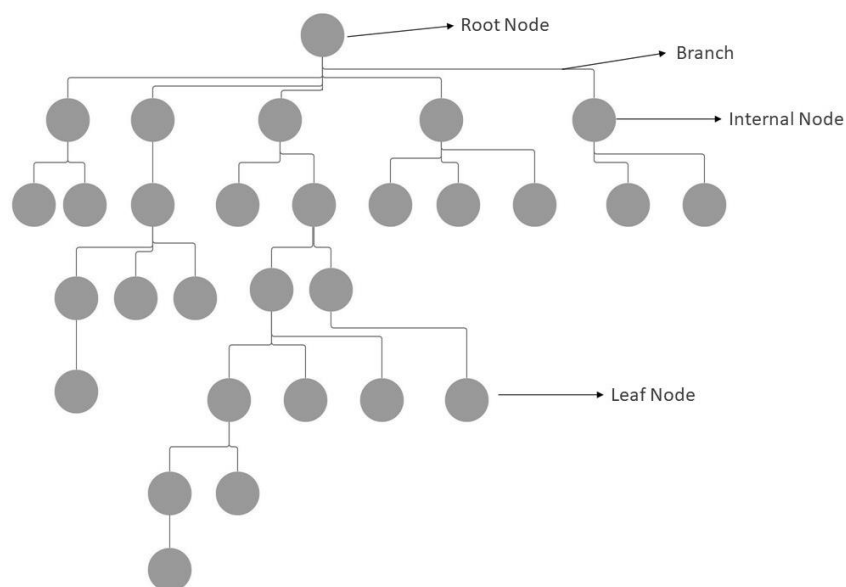


Figura 4 - Exemplo esquemático do modelo de Árvore de Decisão.

Os principais constituintes de uma árvore de decisão são (Silva C. , 2020):

- Nó de raiz (*Root Node*), que representa a variável alvo e é o primeiro nó da Árvore;
- Ramo (*Branch*), que representa o resultado de cada teste executado num nó. O resultado de cada teste da Árvore de Decisão é utilizado para decidir qual o ramo que se segue;



- Nó interno (*Internal Node*), que também representa a variável e envolve todos os nós da árvore, exceto o nó de raiz e o nó final;
- Nó da folha (*Leaf Node*), que representa o nó final da folha.

Os algoritmos mais utilizados na construção de Árvores de Decisão são o algoritmo ID3 (*Iterative Dichotomiser 3*), o algoritmo C4.5 e o algoritmo CART (*Classification And Regression Tree*).

O algoritmo ID3, criado por Ross Quinlan, é usado para gerar Árvores de Decisão a partir de um *dataset* (conjunto de dados). Este constrói uma árvore de forma simples, desde a raiz até às folhas (*top-down construction*), estando limitado apenas a variáveis nominais e, conseqüentemente, a ser usado em problemas de classificação. Para resolver este problema, Quinlan criou o algoritmo C4.5.

Este algoritmo, considerado como uma melhoria do algoritmo ID3, permite o uso contínuo de variáveis numéricas e é capaz de lidar com problemas de regressão, além dos problemas de classificação. Permite também a remoção de ramos que provoquem “ruído” nos dados, aperfeiçoando a precisão da previsão.

O algoritmo CART é muito semelhante ao C4.5, usado também em modelos de classificação e regressão.

## 2.6 Decaimento de cloro

O cloro é o desinfetante mais utilizado no tratamento de água devido à sua eficácia, simplicidade de utilização e custo reduzido. Além disso, a característica que permite a este desinfetante se diferenciar de todos os outros é o facto de permanecer na água mesmo depois de sair da ETA, ficando disponível para reagir (denominado de “cloro residual” ou “cloro residual livre”). A manutenção da concentração de cloro residual durante a rede de distribuição de água é um dos mais importantes problemas e desafios das entidades gestoras. O decaimento de cloro é afetado por diversos fatores, entre eles (Kim, Kim, & Koo, 2015):

- Parâmetros de qualidade da água, como a concentração orgânica, a concentração inicial de cloro, o teor de ferro, o número de pontos de reforço de cloro e a temperatura;

- Parâmetros do sistema, como a idade das tubagens, a variação da pressão e as condições de fluxo de água.

Desta forma, a concentração de cloro residual decai com o tempo devido a reações com compostos contidos na água (decaimento no seio líquido) e ao material acumulado na parede das tubagens ou com o próprio material de que é constituída a rede (decaimento do cloro na parede). Portanto, as reações associadas ao seio líquido são normalmente separadas das relacionadas com a parede da tubagem. Desta forma, a constante global de decaimento de primeira ordem é dada pela **Equação 1**.

$$k = k_b + k_w \quad (1)$$

Onde:

$k$  – Constante global de decaimento de primeira ordem ( $t^{-1}$ );

$k_b$  – Constante de decaimento no seio líquido ( $t^{-1}$ );

$k_w$  – Constante de decaimento na parede da tubagem ( $t^{-1}$ ).

Tal como acontece em todas as reações rápidas em fluxos de água, as taxas de decaimento de cloro nas redes de distribuição são influenciadas também pelos regimes de escoamento, turbulência, velocidade de escoamento e pelo diâmetro e material do tubo. Devido aos diferentes diâmetros das tubagens e às variações de velocidade de escoamento, o regime de escoamento varia muito no espaço e no tempo, levando a mudanças nas taxas de decaimento de cloro residual. Desta forma, é possível afirmar que existe uma correlação significativa entre a velocidade de escoamento da água e o decaimento de cloro do seio líquido (Menaia, Coelho, Lopes, Fonte, & Palma, 2003). Existem estudos que afirmam também que há uma forte relação entre o número de Reynolds (que define o regime de escoamento) e o coeficiente de decaimento para o modelo de ordem  $n$  e ordem  $n$  limitada (Kim, Kim, & Koo, 2015).

### 2.6.1 Decaimento de cloro no seio líquido

O decaimento de cloro no seio líquido representa o consumo de cloro devido às substâncias orgânicas e inorgânicas presentes na água.

O modelo mais simples de quantificar o decaimento de cloro no seio líquido em sistemas de distribuição de água utiliza a **Equação 2** de primeira ordem, cuja integração resulta na **Equação 3**.

$$\frac{dC}{dt} = -kC \quad (2)$$

$$C = C_0 e^{-kt} \quad (3)$$

Onde:

$C$  – Concentração de cloro no tempo  $t$  (m/V);

$C_0$  – Concentração inicial de cloro (m/V).

Este modelo de primeira ordem é baseado na hipótese de que a velocidade de reação é proporcional à concentração de cloro. Desta forma, o modelo tem apenas um parâmetro ajustável ( $k$ ) e apresenta uma boa previsão da concentração de cloro (Kim, Kim, & Koo, 2015). Apesar de ser largamente utilizado, o modelo de primeira ordem mostra-se muitas vezes inadequado para prever com exatidão o decaimento de cloro na modelação de um sistema de distribuição de água.

Na tabela 1 estão representados os vários outros modelos cinéticos propostos para descrever o decaimento de cloro.

Tabela 1 - Modelos cinéticos propostos para descrever o decaimento de cloro em sistemas de distribuição de água

Adaptado de: Kim, Kim, & Koo, 2015

Título	Equação de decaimento de cloro	Integração (C=)	Parâmetros ajustáveis
Primeira ordem	$\frac{dC}{dt} = -kC$	$e^{-kt}$	$k$
Ordem n	$\frac{dC}{dt} = -kC^n$ Com $n \geq 1$	$(kt(n-1) + \left(\frac{1}{C_0}\right)^{(n-1)})^{\frac{-1}{(n-1)}}$	$k, n$
Primeira ordem limitada	$\frac{dC}{dt} = -k(C - C^*)$	$C^* + (C_0 - C^*)e^{-kt}$	$k, C^*$
Primeira ordem paralela	$\frac{dC_1}{dt} = -k_1C_1$ $\frac{dC_2}{dt} = -k_2C_2$ Com: $C_{1,0} = x_1C_0$ $C_{2,0} = x_2C_0$ $= (1 - x_1)C_0$	$C_0xe^{-k_1t} + C_0(1-x)e^{-k_2t}$	$k_1, k_2, x$

O modelo cinético de ordem  $n$  é muito similar ao de primeira ordem, mas neste caso, a velocidade de reação é proporcional à potência de ordem  $n$  da concentração de cloro. Quando o expoente  $n$  toma o valor 2, diz-se que é um modelo cinético de segunda ordem, o que significa que se verifica um decaimento inicial mais rápido (Kim, Kim, & Koo, 2015) (Neves, 2016).

O modelo de ordem limitada assume que uma parte da concentração de cloro ( $C^*$ ) não reage com a água, mantendo-se inalterada, e apenas o restante ( $C_0 - C^*$ ) decai de forma exponencial.

Por sua vez, o modelo de primeira ordem paralela assume que a taxa de decaimento de cloro pode ser dividida em dois grupos de processos de decaimento: com componentes rápidos e lentos.

Nos modelos cinéticos,  $C^*$  (m/V) é a fração de cloro residual inicial que não reage,  $k_1$  ( $t^{-1}$ ) é a constante de decaimento de cloro das reações rápidas,  $k_2$  ( $t^{-1}$ ) é a constante de decaimento de cloro das reações lentas,  $n$  é a ordem da reação e  $x$  é a componente do cloro residual.

A figura 5 ilustra o comportamento dos modelos cinéticos que descrevem o decaimento de cloro.

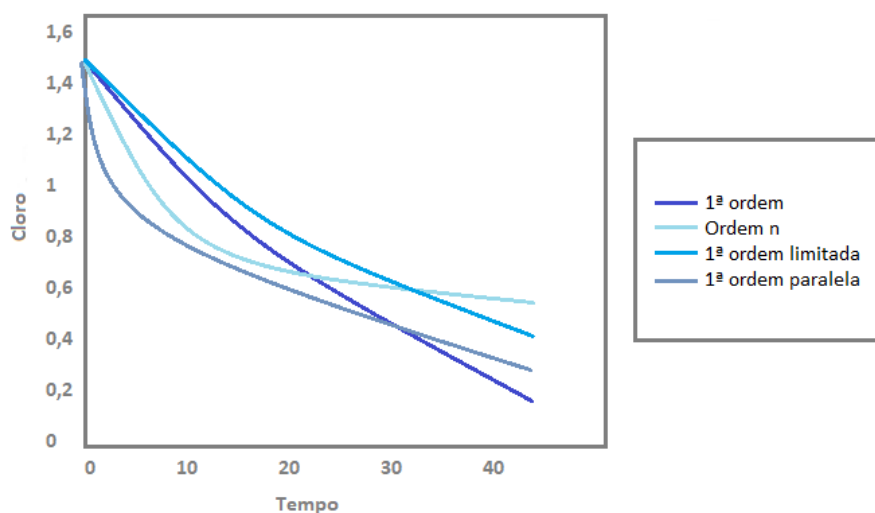


Figura 5 - Decaimento característico segundo diferentes leis cinéticas.

## 2.6.2 Decaimento de cloro nas paredes da tubagem

No decorrer do processo de distribuição de água através das tubagens da rede, as substâncias dissolvidas interagem com as paredes da mesma. Desta interação resultam reações da água

com o material da tubagem e com biofilmes e sedimentos nela depositados, resultando numa diminuição da concentração de cloro residual.

A área das tubagens disponível para a reação e a taxa de transferência de massa entre o seio de escoamento e a parede também têm influência na taxa de reação com as paredes. Com base nisso, e considerando as leis de primeira ordem, Rossman *et al.* (1994) apresentaram um modelo de decaimento de cloro nas paredes que define a velocidade de reação e é traduzida pela **Equação 4**.

$$r = \frac{2k_w k_f C}{R(k_w + k_f)} \quad (4)$$

Onde:

$r$  – Velocidade de reação (L/t);

$k_f$  – Coeficiente de transferência de massa entre o seio líquido e a parede ( $t^{-1}$ )

$R$  – Raio da tubagem (L).

O coeficiente de transferência de massa é normalmente expresso em termos do número adimensional de Sherwood, e cujo valor depende da difusão molecular das espécies reativas e do número de Reynolds. O coeficiente é obtido segundo a **Equação 5**.

$$k_f = Sh (D/d) \quad (5)$$

Onde:

$Sh$  - Número adimensional de Sherwood (adimensional);

$D$  – Difusão molecular do cloro na água ( $L^2/t$ );

$d$  – Diâmetro da tubagem (L).

Uma vez que o número de Sherwood depende do número de Reynolds ( $Re$ ), é necessário definir o tipo de regime de escoamento.

Se  $Re \leq 2100$ , então trata-se de escoamento laminar e, neste caso, o número de Sherwood é escrito pela **Equação 6**, que recorre ao número de Schmidt (**Equação 7**).

$$Sh = 3,65 + \frac{0,0668 \times \left(\frac{d}{L}\right) \times Re \times Sc}{1 + 0,04 \left[\left(\frac{d}{L}\right) \times Re \times Sc\right]^{2/3}} \quad (6)$$

Com:

$$Sc = \nu/D \quad (7)$$

Onde:

$L$  – Comprimento da tubagem (L);

$Re$  – Número de Reynolds (adimensional);

$Sc$  – Número de Schmidt (adimensional);

$\nu$  – Viscosidade cinemática da água (A/t).

Por outro lado, se  $Re \geq 4000$ , estamos perante um regime de escoamento turbulento. Neste caso, o número de Sherwood é dado pela **Equação 8**.

$$Sh = 0,0149 \times Re^{0,88} \times Sc^{1/8} \quad (8)$$

### 3. CASO PRÁTICO

#### 3.1 Águas do Norte

A AdN, que pertence ao Grupo Águas de Portugal, é a entidade gestora responsável pelo sistema multimunicipal de abastecimento de água e saneamento da zona norte de Portugal. Foi constituída pelo Decreto-Lei n.º 93/2015, de 29 de maio, mediante agregação das empresas Águas do Douro, S. A., Águas do Noroeste, S. A., Águas de Trás-os-Montes e Alto Douro, S. A. e SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S. A., integradas no Grupo Águas de Portugal. Atualmente, integra 63 municípios e abrange uma população de cerca de 1,06 milhões de pessoas em abastecimento de água e 944 mil pessoas em tratamento de águas residuais. Além disso, é também responsável por prestar serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais diretamente às populações de certos municípios (Martins, 2014).

A sua missão passa por conceber, explorar e gerir o sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento da zona norte de Portugal e o sistema de águas da região do Noroeste e visiona ser uma empresa de referência nacional no setor da água no que diz respeito a qualidade do serviço público prestado (Águas do Norte, s.d.).

A estratégia utilizada pela AdN centra-se em 4 pontos principais: a proximidade com o cliente, a satisfação dos acionistas e parceiros, a orientação para o cliente e a eficiência económica, social e ambiental.

A segurança da água abastecida para a população é a preocupação central da AdN, dando permanente atenção à verificação da conformidade da água, à proteção da saúde do consumidor e à gestão de riscos em todas as fases do sistema de abastecimento. Para isso, a AdN tem implementado um Programa de Controlo de Qualidade da Água (PCQA), que cumpre integralmente os requisitos do Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto e que é aprovado anualmente pela Entidade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

Além disso, a empresa possui um Plano de Controlo Operacional e um Plano de Vigilância para verificação da qualidade da água em toda a extensão do sistema de abastecimento (captação, tratamento, reserva, adução e entrega) e deteção de eventuais alterações da qualidade, indo além do que é exigido por lei.

A empresa tem ainda implementado um Plano de Segurança da Água (PSA) que consiste numa metodologia de avaliação e gestão de riscos, elaborado segundo as mais recentes recomendações da Organização Mundial de Saúde.

### **3.2 Subsistema X/Y**

Os subsistemas de abastecimento de água X e Y são parte integrante da AdN. O subsistema X, com captação no concelho W, foi projetado para abastecer uma população de cerca de 60 000 habitantes, tendo também no seu projeto inicial o objetivo de abastecer mais concelhos vizinhos. Por sua vez, no subsistema Y, prevê-se o abastecimento de cerca de 65 000 habitantes até ao ano de 2038 (Martins, 2014).

O subsistema X funciona também como um reforço aos subsistemas Y e Z. Em situação de avaria ou impossibilidade de captação, este subsistema assegura o abastecimento ao município xx, através de uma ligação direta ao reservatório de água tratada da ETA Z e Y. Desta forma, e de modo a garantir o abastecimento de água à população de xy, yy, e zz, foi feita a ligação do subsistema X ao subsistema Y.

#### **3.2.1 Captação e tratamento de água**

Como se pode observar pela figura 6, a água bruta captada sofre filtração grosseira, sendo depois encaminhada para a estação elevatória de captação com recurso a duas bombas. A água fica no reservatório até ser elevada cerca de 200 metros até à ETA X, com recurso a três bombas, e através de uma conduta em aço de cerca de 1700 metros de comprimento e 700 milímetros de diâmetro.

Chegada à ETA X, a água é submetida a um pré-tratamento de oxidação (pré-oxidação) com ozono ou, em alternativa, com o cloro gasoso, de modo a facilitar a remoção de matéria orgânica e metais. Durante o período de realização deste trabalho, a pré-oxidação foi realizada com cloro gasoso.

Após o pré-tratamento, inicia-se a etapa de remineralização, com adição de anidrido carbónico (CO<sub>2</sub>), leite de cal (neutralizante) e policlorosulfato básico de carbono (coagulante) nas câmaras de mistura. Esta etapa permite ajustar o pH aos valores exigidos nas etapas seguintes.



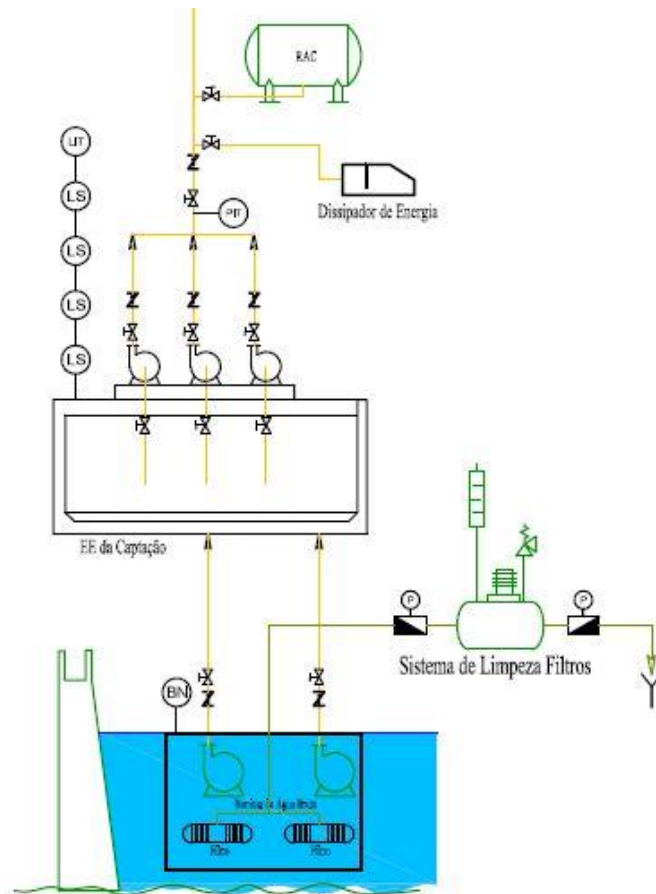


Figura 6 - Esquema captação da água bruta.

Finalizada a etapa de remineralização, segue-se a filtração em filtro de areia para remover sedimentos e partículas. A ETA possui quatro filtros de areia, sendo utilizados apenas três. A água filtrada é armazenada no reservatório de água filtrada.

A última etapa é a de desinfecção, onde é adicionado cloro à água para remoção/destruição de organismos patogênicos, prejudiciais à saúde humana. Neste caso, como existe uma rede de abastecimento bastante próximo da ETA, a concentração de cloro é apenas a suficiente para que cumpra a gama de valores admitidos por lei à chegada dos consumidores.

Por fim, a água tratada é então distribuída pelos consumidores através da rede de abastecimento de água. Uma pequena parte segue para laboratórios para testes de qualidade. À parte do tratamento de água, a ETA possui também ao tratamento das lamas. Este tratamento compreende as fases de espessamento gravítico e desidratação em filtro prensa, sendo as escorrências encaminhadas para o processo de tratamento de água e as lamas desidratadas a destino final adequado.

### 3.2.2 Constituição e descrição do subsistema

Após o processo de tratamento na ETA X, a água é armazenada no Reservatório de Água Tratada com denominação RR R01. Depois, a água é aduzida pela conduta até ao Nó 1, onde há um reforço de cloro, uma vez que, na ETA, não é adicionado cloro suficiente para que chegue a este ponto dentro da gama admitida por lei. Daí, a água segue a conduta até ao reservatório RR R02 e ao Nó 2, que serve de ligação ao RR R03A e ao Nó 3. Toda a conduta até ao Nó 3 é de aço inoxidável, com diâmetros compreendidos entre os 80 e os 700 milímetros, e está representada na figura 7.



Figura 7 - Mapa representativo da conduta desde a captação X até ao Nó 3.

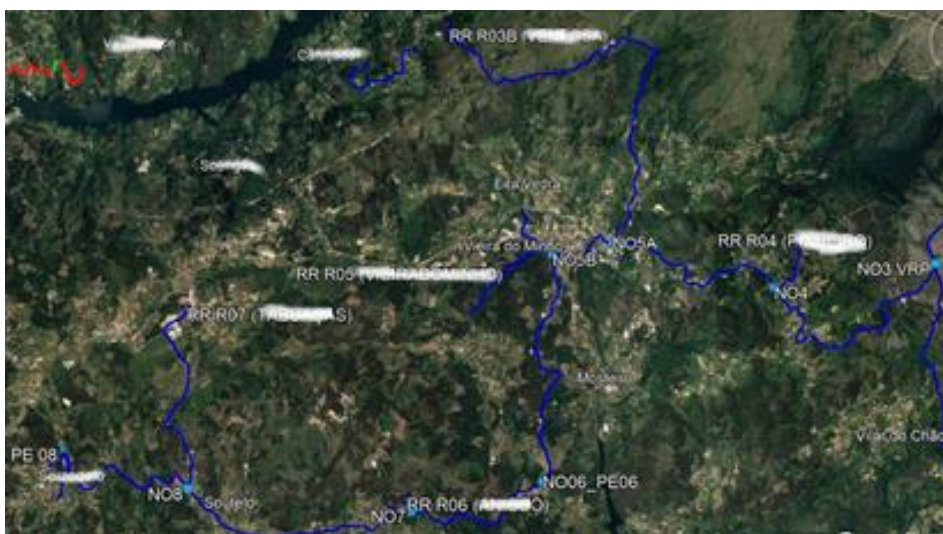


Figura 8 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 3 até ao PE 08.

A partir do Nó 3, a conduta segue diferentes direções: uma para a zona centro W e outra para xx e ww.

A conduta que abastece a zona de W, que está representada no mapa da figura 8, é constituída por ferro fundido dúctil, com diâmetros de 80 a 200 milímetros.

Ao longo desta conduta, existem os reservatórios RE R04, que está neste momento fora de serviço, RR R03B, RR R05, RR R06 e o RR R07 e vários pontos de entrega, que abastecem a zona xx.

Na outra direção do Nó 3, a água é encaminhada para a zona este de xx, onde se encontra o PE x, o reservatório RR R08 e o Nó 10, que faz ligação ao reservatório RR R09, que entrou em serviço apenas em agosto de 2021, ao RR L2 e ainda vários pontos de entrega. Esta conduta é constituída por polietileno até ao RR R09 e por ferro fundido dúctil no restante comprimento, com diâmetros compreendidos entre os 80 e os 400 milímetros.

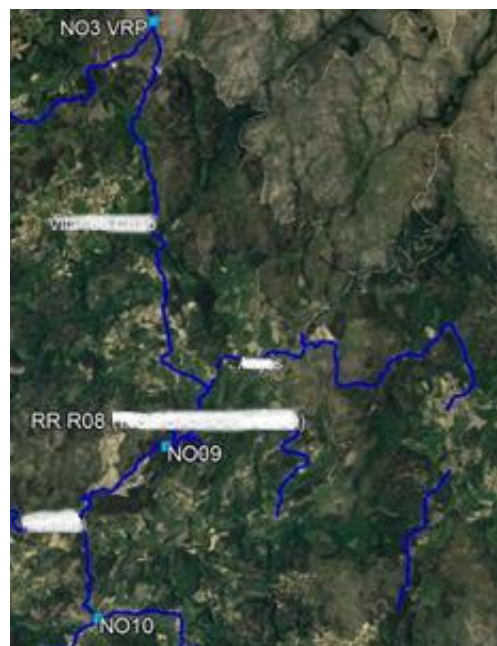


Figura 9 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 3 até ao Nó 10.

Do outro lado da bifurcação do Nó 10, onde continua a conduta, encontra-se os reservatórios RR R10, RR R11 e RR R12, que está fora de serviço. Tal como está representado na figura 11, uma parte é depois aduzida para a ETA Z, concelho xx.

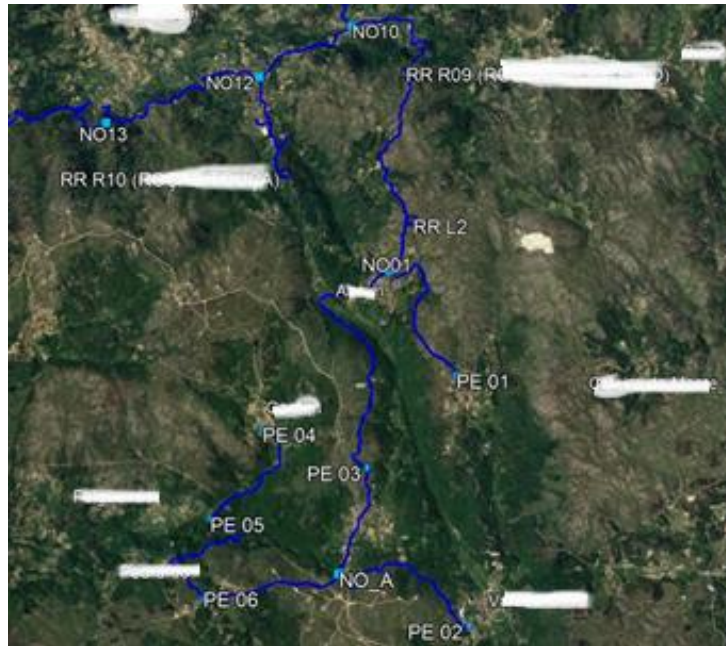


Figura 10 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 10 até ao PE 06.



Figura 11 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 10 até ao Nó 16A.

Chegada ao Nó 16A, a conduta volta a dividir-se por dois lados opostos. Por um lado, representado na figura 12, segue em direção aos reservatórios RR Q08 e RR Q09, em conduta de ferro fundido dúctil com diâmetros entre 100 e 300 milímetros.

É nesta parte da conduta que se faz a ligação do subsistema X ao subsistema Y. Esta ligação foi realizada no mês de junho do ano de 2021.



Figura 12 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 16A até ao RR Q09.

Por outro lado, a conduta segue para o lado mais oeste de ww, como mostra a figura 13. Nesta direção, inclui-se os reservatórios RR Q15 e RR Q16, que estão neste momento a ser abastecidos pelo subsistema Y, com previsão de ligação a este subsistema no futuro. Inclui-se ainda os reservatórios RR Q17, RR Q18, RR Q20, RR Q21 e vários pontos de entrega.

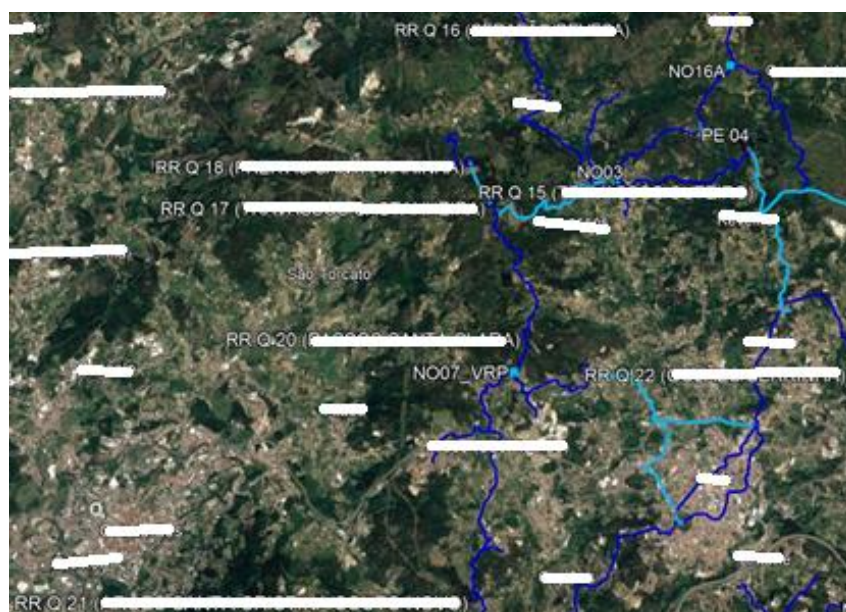


Figura 13 - Mapa representativo da conduta desde o Nó 16A até ao RR Q21.

Esta conduta é constituída em ferro fundido dúctil em toda a sua extensão e possui diâmetro compreendido entre 80 e 400 milímetros.

No **Anexo I** encontra-se uma tabela com a informação relativa à cota e capacidade dos reservatórios que constituem este sistema.

## 4. METODOLOGIA

Para efetuar o estudo da evolução da qualidade da água ao longo de todo o subsistema, recorreu-se a três diferentes meios: *software* EPANET, ajuste a modelos cinéticos em Excel e com recurso a um modelo de *machine learning*. Seguiram-se diferentes formas de obter resultados para que assim se pudesse decidir qual o modelo de mais fácil utilização e qual se aproxima mais ao sistema real, com menor margem de erro.

Antes de iniciar qualquer cálculo, foi necessário reunir toda a informação acerca do subsistema, no que diz respeito a dimensões (comprimento da conduta, diâmetro...), tipo de material da conduta e cotas. Para isso, foi criado um esquema que representa o subsistema, com todas essas características.

O esquema, representado no **Anexo II**, inclui todos os reservatórios e pontos de entrega do subsistema com a informação da cota e capacidade de cada um. Além disso, representa as distâncias entre cada reservatório ou ponto de entrega, bem como o diâmetro da conduta e o material.

Este esquema mostrou ser uma grande ajuda para a Águas do Norte, pois facilita a obtenção de informação acerca das características físicas de todo o subsistema de forma simplificada, além de ter toda essa informação, juntamente com informação de reservatórios e pontos de entrega, num só documento.

### 4.1 EPANET

O desenvolvimento do modelo em software EPANET foi realizado segundo os passos descritos no capítulo 2.4.1.

Para tal, na construção do modelo, são adicionados todos os componentes físicos e não-físicos do subsistema em estudo.

#### *Componentes físicos*

O primeiro passo passou por desenhar uma representação esquemática do sistema de distribuição. Nesta fase, foram adicionados os elementos no sistema de distribuição, como os nós e os troços (componentes físicos). Após isso, são adicionadas as propriedades desses objetos.

Na figura 14 está representada a informação solicitada pelo EPANET para os nós, RNF e tubulações, respetivamente.

Property	Value a)	Property	Value b)	Property	Value c)
*Junction ID	No1	*Reservoir ID	RR01	*Pipe ID	4
X-Coordinate	8615.385	X-Coordinate	9685.063	*Start Node	No1
Y-Coordinate	7333.333	Y-Coordinate	7523.206	*End Node	REspindo
Description		Description		Description	
Tag		Tag		Tag	
*Elevation	742	*Total Head	890	*Length	6564
Base Demand	0	Head Pattern		*Diameter	700
Demand Pattern	1	Initial Quality	1.34	*Roughness	140
Demand Category	1	Source Quality	1.34	Loss Coeff.	0
Emitter Coeff.		Net Inflow	#N/A	Initial Status	CV
Initial Quality	1.34	Elevation	#N/A	Bulk Coeff.	
Source Quality		Pressure	#N/A	Wall Coeff.	
Actual Demand	#N/A	Quality	#N/A	Flow	#N/A

Figura 14 - Dados de entrada a introduzir no EPANET para nós a), RNF b) e troços c).

Nos nós, foram inseridos dados da cota topográfica e o consumo base (que muitas vezes é zero, uma vez que não se trata de pontos de entrega, mas sim junções de condutas). No caso dos RNF, foram inseridos dados do nível da água. O reservatório RR R01 foi considerado como RNF uma vez que se admite que o nível de água se mantém próximo da capacidade.

O comprimento, diâmetro interno e o coeficiente de rugosidade foram os dados inseridos para as tubulações.

O coeficiente de rugosidade das condutas é uma das principais incógnitas na construção de modelos de simulação e, conseqüentemente, um dos principais fatores de incerteza. Como aproximação, adota-se o coeficiente de rugosidade em função das características do material da conduta e nos termos da fórmula do calcula da perda de carga, apresentados na tabela 2. Neste caso de estudo, foi utilizada a fórmula de *Hazen-Williams*. O subsistema é constituído por condutas em aço (na sua maioria), ferro fundido dúctil e polietileno.

Foram também adicionadas bombas e válvulas no modelo. A informação a inserir no EPANET é a representada na figura 15.

Tabela 2 - Coeficientes das fórmulas de perda de carga para tubulações

Fonte: Rossman, 2000

Material	Hazen-Williams – C (adimensional)	Darcy-Weisbach – $\epsilon$ (mm)	Manning's – n (adimensional)
Ferro fundido	130 – 140	00,25	0,012 – 0,015
Cimento	120 – 140	0,3 – 3	0,012 – 0,017
Ferro galvanizado	120	0,15	0,015 – 0,017
PVC	140 – 150	0,0015	0,011 – 0,015
Aço	140 – 150	0,03	0,015 – 0,017
Argila vitrificada	110	0,3	0,0131 – 0,015

Property	Value
*Pump ID	20
*Start Node	PERuaCM
*End Node	RR05
Description	
Tag	
Pump Curve	
Power	2.2
Speed	
Pattern	
Initial Status	Open
Effic. Curve	
Energy Price	
Price Pattern	

Property	Value
*Valve ID	19
*Start Node	No12
*End Node	No13
Description	
Tag	
*Diameter	450
*Type	TCV
*Setting	0
Loss Coeff.	0
Fixed Status	Open
Flow	18.67
Velocity	0.03
Headloss	0.00

Figura 15 - Dados de entrada a introduzir no EPANET para bombas e válvulas.

Para as bombas, os dados a serem inseridos são os de curva da bomba (combinação de valores de altura manométrica e caudal que definem a curva característica) ou então, no caso de não ser possível obter estes dados, a bomba pode ser representada por um parâmetro que forneça um valor constante de energia. Como não foi possível obter dados para uma curva de bomba, foram utilizados dados de potência da bomba, segundo a informação nela presente, tal como



se pode observar na figura 16. No subsistema, existem apenas duas bombas: uma no reservatório RR R05 e outra no reservatório RR Q17.

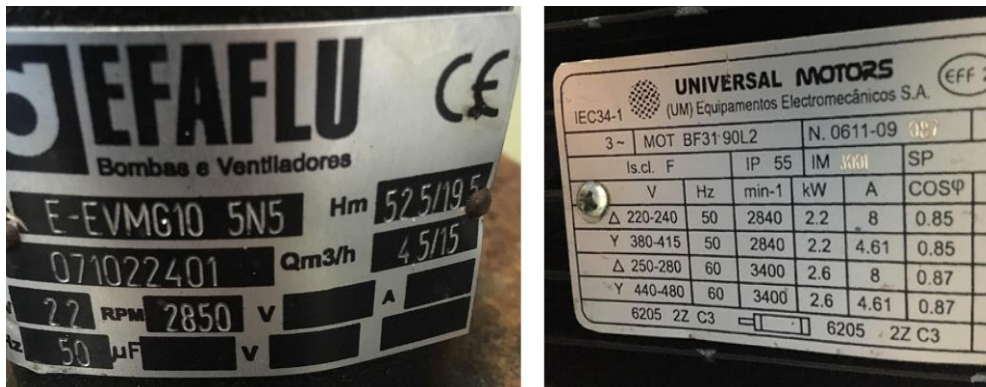


Figura 16 - Características das bombas.

No caso das válvulas, os dados de entrada necessários são os de diâmetro, parâmetro de controlo na válvula (tipo de válvula) e o estado (aberto/fechado). Neste caso de estudo, as válvulas existentes são: Válvula Redutora de Pressão no PE A (PRV) e Válvulas de Sobrevelocidade e Seccionamento em vários pontos da rede.

As Válvulas Redutoras de Pressão, tal como o nome indica, limitam a pressão de saída na válvula num determinado ponto da rede. As Válvulas de Seccionamento destinam-se a impedir ou estabelecer a passagem de água para ambos os sentidos (Rossman L. A., 2000).

#### *Componentes não-físicos*

Além dos componentes físicos, o EPANET define também um conjunto de componentes não-físicos do sistema de distribuição, como curvas de bomba, padrões de consumo e controlos (Rossman L. A., 2000).

Os consumos adicionados foram obtidos pela base de dados da Águas do Norte disponibilizada pela ferramenta NAVIA (ferramenta utilizada pela Águas do Norte, onde são registados todos os dados de análises de água).

Foram adicionados valores de consumo apenas nos pontos que representam reservatórios e pontos de entrega ligados a pontos de distribuição de água à população. Reuniu-se os valores de julho e agosto, uma vez que são os meses de maior consumo e os dois subsistemas já se encontravam ligados. Esta informação encontra-se no **Anexo III**.

Foi adicionado um padrão de consumo adimensional, ajustado a 24 horas. Este padrão, representado na figura 17, traduz o perfil de consumo da rede e foi disponibilizado pela AdN.

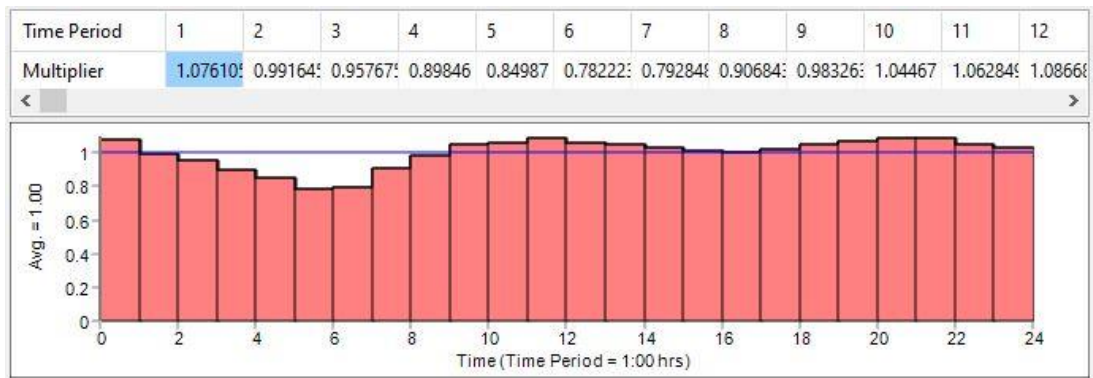


Figura 17 - Padrão de consumo ajustado a 24 horas adicionado no EPANET.

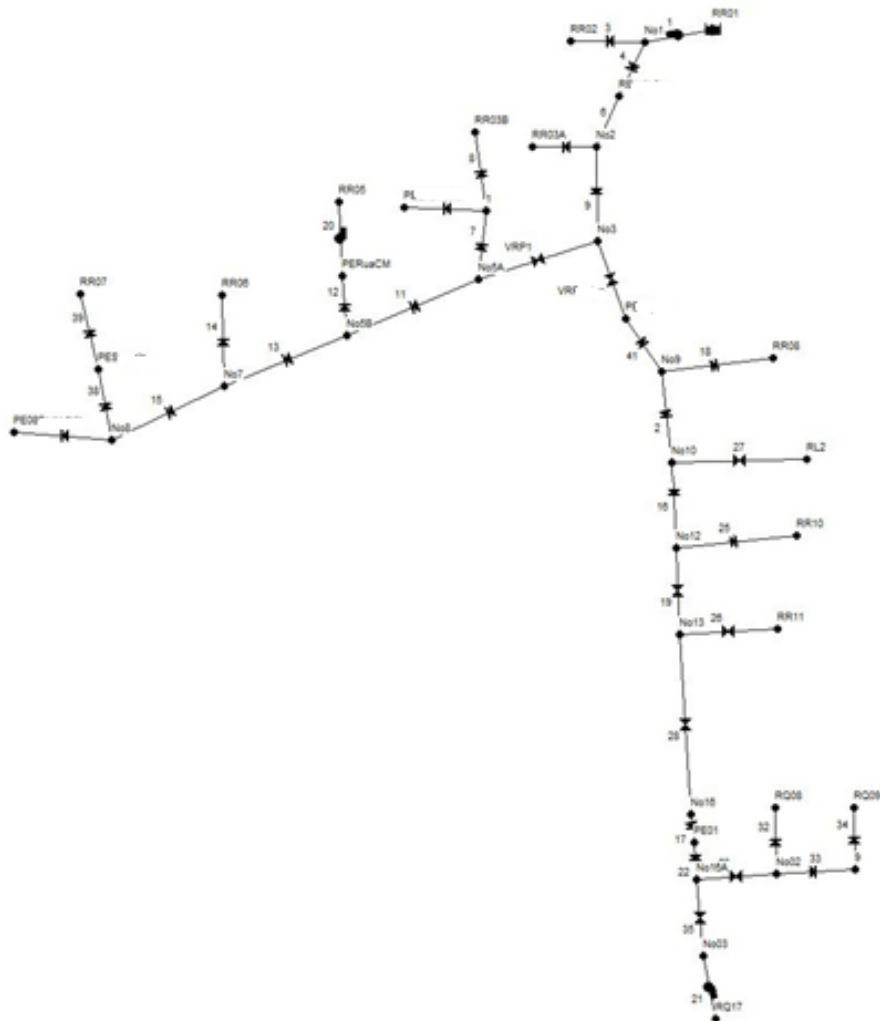


Figura 18 - Mapa da rede de distribuição construída no EPANET.

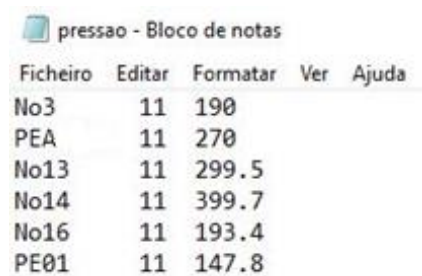
Por observação da figura, verifica-se um maior consumo nas horas de almoço e jantar. O pico de consumo que se verifica entre as 00h e a 01h deve-se ao facto de o reservatório RR R01 encher durante a noite.

Desta forma, foi possível fazer uma representação do sistema de distribuição de água em estudo, como se pode observar na figura 18. A forma como os objetos estão dispostos não interfere na modelação.

#### 4.1.1 Calibração do modelo hidráulico

O processo de calibração do modelo é efetuado com base na comparação entre os resultados de medições realizadas no sistema físico e os resultados obtidos pelo EPANET, de forma a perceber se o modelo reproduz o comportamento real. Para calibração do modelo hidráulico foram utilizados dados de pressão, onde foram realizadas várias tentativas para que se aproximasse os valores de pressão obtidos pelo modelo aos reais, medidos da rede, pelo método de tentativa erro. Estas tentativas consistiram em mudanças na rede, com adição, eliminação ou alteração dos objetos que alteram a variação de pressão ao longo da rede.

Para isso, foi criado um ficheiro, com extensão *.DAT* com os valores de pressão conhecidos no sistema, em metros por coluna de água (mca) e a hora (considerou-se 11h, pois é a hora de maior consumo na rede) que foi carregado no *software* EPANET, e está representado na figura 19.



Ficheiro	Editar	Formatar	Ver	Ajuda
No3	11	190		
PEA	11	270		
No13	11	299.5		
No14	11	399.7		
No16	11	193.4		
PE01	11	147.8		

Figura 19 - Dados de pressão inseridos no EPANET.

Depois, extraiu-se do EPANET o relatório de calibração da pressão, no qual são comparados os valores reais introduzidos com os simulados pelo modelo e respetivo erro médio absoluto, desvio padrão e correlação entre as médias.

O relatório de calibração da pressão é o apresentado na figura 20, onde é possível observar que o modelo não se encontra calibrado, uma vez que, segundo o *Water Research Centre* (1989) um modelo está calibrado se cumprir os seguintes critérios:

- 85% dos valores medidos na rede satisfazem a maior das duas tolerâncias:  $\pm 0,50$  m ou  $\pm 5\%$  da maior perda de carga verificada na rede;
- 95% dos valores medidos na rede satisfazem a maior das duas tolerâncias:  $\pm 0,75$  m ou  $\pm 7,5\%$  da maior perda de carga verificada na rede;
- 100% dos valores medidos na rede satisfazem a maior das duas tolerâncias:  $\pm 2$  m ou  $\pm 15\%$  da maior perda de carga verificada na rede.

Location	Num Obs	Observed Mean	Computed Mean	Mean Error	RMS Error
No3	1	190.00	201.88	11.877	11.877
PEA	1	270.00	300.88	30.877	30.877
No13	1	299.50	381.86	82.355	82.355
No16	1	193.40	505.86	312.455	312.455
PE01	1	147.80	268.85	121.045	121.045
Network	5	220.14	331.86	111.722	155.021

Correlation Between Means: 0.214

Figura 20 - Relatório de calibração de pressão extraído do EPANET.

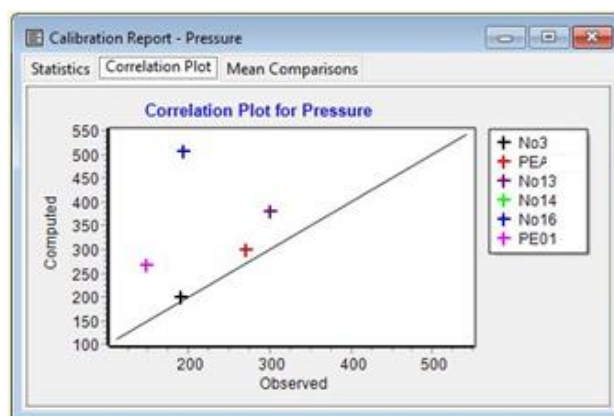


Figura 21 - Gráfico de correlação entre os valores reais e os observados extraído do EPANET.

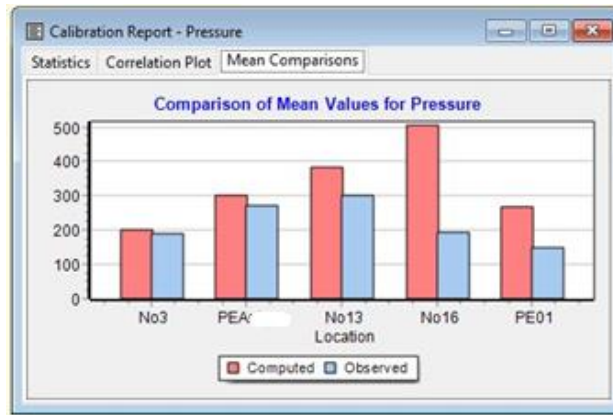


Figura 22 - Gráfico de comparação entre as médias de pressão reais e observadas extraído do EPANET.

Nos gráficos de correlação e comparação entre as médias dos valores reais e observados, figuras 21 e 22, respetivamente, é possível verificar que os valores obtidos pelo modelo são sempre superiores aos valores reais, principalmente a partir do Nó 16.

Por observação do gráfico da figura 22, nota-se que o modelo segue um crescimento do valor da pressão desde o Nó 3 até ao Nó 13, tanto nos valores reais como nos observados. O ponto com maior diferença entre o valor real e o observado é o Nó 16.

#### 4.1.2 Calibração da qualidade da água

O EPANET considera as reações de cloro no seio da água e nas paredes das tubulações, através das respetivas constantes cinéticas. Como tal, é necessário determinar as duas constantes ( $k_b$  e  $k_w$ ).

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

Uma vez que o decaimento do cloro no seio da água depende das características da mesma, e não dos materiais das tubagens, a constante de decaimento de cloro no seio do líquido é uma propriedade específica para cada água. A determinação da constante de decaimento pode ser efetuada por testes em laboratório que caracterizem esse decaimento e simulam o sistema real, denominado por “teste de garrafa”.

Como não existe nenhum procedimento padrão para a execução deste teste, foi adaptado o procedimento descrito em Coelho *et al.* (2006) aos materiais e condições disponíveis no laboratório da ETA X, onde foram realizados os ensaios.

O “teste de garrafa” foi realizado em agosto de 2021, com amostras recolhidas à saída do Reservatório de Água Tratada RR R01, de acordo com o seguinte procedimento:

1. Recolha de uma amostra de água à saída do reservatório;
2. Divisão da amostra em 3 frascos de vidro;
3. Manutenção dos frascos a uma temperatura constante;
4. Ao fim de intervalos de tempo pré-definidos, determinação da concentração de cloro residual;
5. Representação gráfica dos valores de concentração de cloro em função do tempo para cada amostra.

A temperatura da água das amostras manteve-se nos 22,5 °C ao longo da execução do teste. A determinação da concentração de cloro (Cl) foi realizada de 10 em 10 minutos durante uma hora, perfazendo um total de 7 determinações, representadas na tabela 3. Alguns valores foram desprezados de forma que se diminuísse o erro.

Com estes dados, fez-se uma representação gráfica para se obter a equação da reta da linha tendência, como apresentado na figura 23 (para o exemplo da Amostra 1). As representações gráficas dos resultados de concentração de cloro obtidos experimentalmente das amostras 2 e 3 encontram-se no **Anexo IV**.

*Tabela 3 - Dados para determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio do líquido (kb)*

Tempo (min)	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3	
	Cl (mg/L)	lg (C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub> )	Cl (mg/L)	lg (C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub> )	Cl(mg/L)	lg (C <sub>t</sub> /C <sub>0</sub> )
0	0,92	0	0,85	0	0,76	0
10	0,71	-0,1125295	0,84	-0,0051396	0,75	Desprezado
20	0,67	Desprezado	0,84	Desprezado	0,75	-0,0057523
30	0,64	Desprezado	0,83	Desprezado	0,69	Desprezado
40	0,64	-0,1576079	0,81	-0,0209339	0,69	-0,0419645
50	0,64	Desprezado	0,79	-0,0317918	0,69	Desprezado
60	0,58	-0,2003598	0,75	Desprezado	0,66	-0,0612697

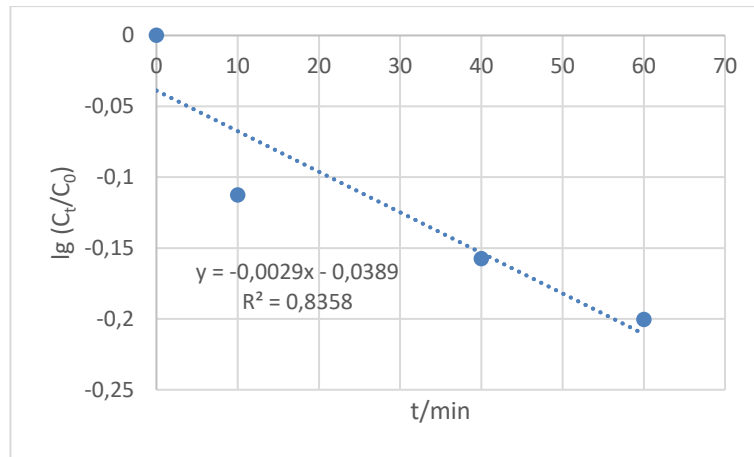


Figura 23 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 1.

Os valores de  $k_b$  estão representados na tabela 4, onde se pode observar que se obteve um  $k_b$  médio de 0,0015/min (2,2080/d).

Tabela 4 - Valores de constante de decaimento de cloro no seio da água obtidos experiencialmente

Amostra	$k_b$ (min <sup>-1</sup> )	$k_b$ médio (min <sup>-1</sup> )
1	0,0029	0,0015 ± 0,0007
2	0,0006	
3	0,0011	

#### Determinação da constante de decaimento de cloro nas paredes da tubagem ( $k_w$ )

A determinação experimental da constante cinética de decaimento de cloro nas paredes da tubagem é uma tarefa extremamente complexa, uma vez que o valor da rugosidade interna dos tubos teria de ser ajustado manualmente de forma individual para cada tubo e, devido a fenómenos de corrosão/erosão, é difícil estimar o diâmetro interno exato dos tubos. Assim, a determinação da constante  $k_w$  é feita através de um processo iterativo de tentativa-erro, onde o valor da constante é ajustado de forma que se reduza a diferença entre os valores de cloro reais aos observados no modelo EPANET.

Uma vez que o modelo hidráulico não se encontra calibrado, não se consegue determinar a constante de decaimento do cloro nas paredes da tubagem pelo método de tentativa-erro, pois os valores de cloro observados no modelo nunca se vão aproximar dos reais.

## 4.2 Modelos cinéticos

Para determinar o decaimento de cloro no sistema, o primeiro passo consistiu em determinar o volume acumulado nas condutas entre cada ponto, segundo a expressão do volume do cilindro, como representado na tabela 5.

De seguida, reuniu-se informação sobre os volumes consumidos em cada ponto do subsistema, como representado no **Anexo V**, para determinar o caudal.

Na figura 24 está representado, para o exemplo do mês de janeiro, como esses dados foram organizados.

Tabela 5 - Determinação do volume acumulado em cada troço da rede

Troço	DN (mm)	Extensão (m)	Volume (m³)	Volume acumulado (m³)
ETA - Nó 1	700	1974,18	759,75	759,75
Nó 1 - Nó 2	700	8141,81	3133,34	3893,09
Nó 2 - Nó 3	600	4351,93	1230,48	5123,57
Nó 3 - Nó 9	600	3924,4	1109,60	6233,17
Nó 9 - Nó 10	600	2374,19	671,29	6904,45
Nó 10 - Nó 12	450	1595,61	253,77	7158,22
Nó 12 - Nó 13	450	3081,43	490,08	7648,30
Nó 13 - Nó 16	450	6558,87	1043,14	8691,45
Nó 16 - Nó 16A	450	7498	1192,51	9883,95
Nó 16A - Nó 03	400	3682,61	462,77	10346,72
Nó 03 - RR Q17	200	3210,71	100,87	10447,59

					Janeiro		
Troço	DN (mm)	Extensão (m)	Volume (m³)	Volume acumulado (m³)		m³/mês	m³/dia
ETA - Nó 1	700	1974,18	759,75	759,75	Nó 1 = RE R02 + RE E	90437	2917,32
Nó 1 - Nó 2	700	8141,81	3133,34	3893,09	Nó 2 = RE R03A + Nó 3	82462	2660,06
Nó 2 - Nó 3	600	4351,93	1230,48	5123,57	Nó 3 = PE A + CX* + Nó 9	80153	2585,58
Nó 3 - Nó 9	600	3924,4	1109,60	6233,17	Nó 9 = PE 09 + RE R08 + Nó 10	39043	1259,45
Nó 9 - Nó 10	600	2374,19	671,29	6904,45	Nó 10 = RR R09 + RR L2 + PE 12 + Nó 12	33370	1076,45
Nó 10 - Nó 12	450	1595,61	253,77	7158,22	Nó 12 = RR R10 + Nó 13	31449	1014,48
Nó 12 - Nó 13	450	3081,43	490,08	7648,30	Nó 13 = RR R11 + Nó 16	29925	965,32
Nó 13 - Nó 16	450	6558,87	1043,14	8691,45	Nó 16 = RR R12 + PE 01 + PE 02 + Nó 16A	26600	858,06
Nó 16 - Nó 16A	450	7498	1192,51	9883,95	Nó 16A = PE 03 + RR Q08 + RR Q09 + PE 04 + Nó 03	26600	858,06
Nó 16A - Nó 03	400	3682,61	462,77	10346,72	Nó 03 = RR Q17	16109	519,65
Nó 03 - RR Q17	200	3210,71	100,87	10447,59	RR Q 17 = RRQ18 + RRQ20	16109	519,65
-----							
*CX							
					Janeiro		
Troço	DN (mm)	Extensão (m)	Volume (m³)	Volume acumulado (m³)		m³/mês	m³/dia
Nó 3 - Nó 4	250	3565,27	175,01	175,01	Nó 4 = RE R04 + Nó 5A	39454	1272,71
Nó 4 - Nó 5A	200	2717,75	85,38	260,39	Nó 5A = PE EV + RE R03B + Nó 5B	39454	1272,71
Nó 5A - Nó 5B	200	1039,17	32,65	293,04	Nó 5B = RE R05 + PE S + PE RDCM + PE 06 + Nó 7	31110	1003,55
Nó 5B - Nó 7	125	5520,61	67,75	360,78	Nó 7 = RR R06 + Nó 8	10209	329,323
Nó 7 - Nó 8	100	3016,68	23,69	384,48	Nó 8 = PE S + PE T + RR R07 + PE 08	8616	277,935

Figura 24 - Organização dos dados necessários para a determinação da constante de decaimento de cloro.



Os cálculos foram realizados por troço entre cada nó, uma vez que possuem igual diâmetro interno, o que facilita o processo de cálculo do volume acumulado. O caudal de cada nó foi calculado segundo a soma do volume consumido nos reservatórios/pontos de entrega que se encontrem depois do mesmo.

A partir dos valores de volume de cada troço e caudal, determinou-se o tempo de residência hidráulico (*TRH*), segundo a **Equação 9**.

$$TRH = \frac{V}{Q} \quad (9)$$

Onde:

*V* - Volume (L<sup>3</sup>);

*Q* - Caudal (L<sup>3</sup>/t).

Com os valores de cloro reais, medidos ao longo da rede, foi determinada a constante de decaimento de cloro no seio líquido para cada mês, usando a equação de decaimento de cloro de primeira ordem (Equação 3). Foi escolhido o modelo de 1ª ordem por ser o mais simples e cujo decaimento característico (figura 5) melhor se aproxima da variação dos valores de cloro medidos ao longo da rede.

Fazendo a derivação da **Equação 3**, obteve-se:

$$\log \frac{C}{C_0} = -kt + C \quad (10)$$

Assim, determinou-se  $\log \frac{C}{C_0}$  e traçou-se o gráfico em função do tempo (*t*). A partir da equação da reta obteve-se a constante de decaimento de cloro.

Pela análise dos gráficos obtidos, optou-se por utilizar o modelo de primeira ordem para o cálculo da concentração de cloro ao longo da rede, uma vez que é o que melhor se aproxima.

Obtida a constante *k*, foi possível aplicar a **Equação 3** para calcular a concentração de cloro (estimada pelo modelo) ao longo da rede.

### 4.3 Árvores de decisão

Para a realização do estudo com recurso ao algoritmo de árvores de decisão, foi recebido apoio do centro de investigação ALGORITMI, da Universidade do Minho, responsável pela plataforma PAMWater. Com esta ajuda, foi criado um código em linguagem Python que permite prever o valor de cloro para o dia seguinte ao último registado, de acordo com as restantes constantes.

A primeira fase consistiu na recolha do máximo de dados possível, de cloro, condutividade, turvação, pH, temperatura e caudal nos reservatórios e pontos de entrega do subsistema X. Devido à reduzida base de dados de alguns dos pontos, foram apenas considerados os dados dos reservatórios RR R02, RR R03B, RR R05, RR R06, RR R07, RR R08, RR R10, RR R11 e RL02 e dos pontos de entrega PE A, PE EV, PE S e PE08. Os dados obtidos são apenas desde o ano de 2016.

Todos os dados recolhidos foram introduzidos em folhas de Excel, segundo o exemplo do apresentado na figura 25.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Year,"Month (number)",	"Day of month",	"Volume",	"Caudal dia",	"Turvação",	"Condutividade",	"Alumínio",	"pH",	"Temperatura de leitura do pH",	"cloro"					
2	2016,8,3,76,38,0.73,195.5,0,6.96,16.622429906542056,0.46														
3	2016,8,4,29,29,0.19043103448275855,127.59310344827571,20.47878787878788,7.407316017316014,16.622429906542056,0.45														
4	2016,8,5,27,27,0.26,206.1,20,7.04,16.622429906542056,1.38														
5	2016,8,8,144,48,0.21,161.7,20,8.05,16.622429906542056,0.76														
6	2016,8,10,114,57,0.21,157.4,30,7.69,16.622429906542056,0.58														
7	2016,8,16,196,32.67,0.11,177.8,0,7.86,16.622429906542056,0.5														
8	2016,8,17,72,72,0.23,188.1,20,7.45,16.622429906542056,0.54														
9	2016,8,22,136,27.2,0.28,192.5,20,7.15,16.622429906542056,0.56														
10	2016,8,24,72,36,0.25,192.1,10,7.18,21.1,0.55														
11	2016,8,29,206,41.2,0.19,258,10,7.71,16.622429906542056,0.49														
12	2016,8,31,29,29,0.14,303,20,7.66,20.4,0.53														
13	2016,9,5,147,29.4,0.34,197.1,30,7.82,30.8,0.1														
14	2016,9,7,58,29,0.2,225,30,7.63,25.7,0.97														
15	2016,9,12,154,30.8,0.22,167.9,20,7.82,16.622429906542056,0.77														
16	2016,9,14,117,58.5,0.22,183.5,30,7.45,20.6,0.52														
17	2016,9,19,197,39.4,0.08,190.4,10,7.41,17.4,0.62														
18	2016,9,21,88,44,0.1,195.7,0,7.28,21.7,0.56														
19	2016,9,26,193,38.6,0.11,186,10,7.25,20.2,0.33														
20	2016,9,30,156,39.0,21,178.1,0,7.31,18.5,0.39														
21	2016,10,3,169,56.33,0.1,163.5,0,7.4,20.4,0.66														
22	2016,10,7,113,28.25,0.11,167,0,7.35,19.2,0.53														
23	2016,10,10,122,41.0,17,168.8,0,7.21,18.0,22														

Figura 25 -Exemplo de um documento de dados utilizado em Árvores de Decisão.

Depois, foram testados vários hiper-parâmetros (parâmetro cujo valor é usado para o processo de *training*) de forma a encontrar a melhor combinação para o modelo. A procura pelo melhor hiper-parâmetro está apresentada na tabela 6, com os respetivos valores considerados.

Tabela 6 - Hiper-parâmetros considerados para o modelo

Parâmetro	Valores considerados
Max Depth	[5,6,7,8,9,10]
Min Samples Leaf	[2,3,4]
Min Samples Split	[2,3,4,5,6]

O parâmetro “Max Depth”, tal como o nome indica, estabelece uma profundidade/tamanho máxima para a árvore e é utilizado para controlar o sobre ajuste do modelo, pois uma maior profundidade permite ao modelo aprender relações cada vez mais específicas da amostra de dados. O parâmetro “Min Samples Leaf” limita um número mínimo de amostras necessárias para um nó de folha. Por outro lado, o parâmetro “Min Samples Split” representa o número mínimo de amostras necessárias para dividir cada nó interno.

Além dos hiper-parâmetros, foram ainda consideradas duas métricas de validação do modelo. Uma das métricas utilizadas foi a MAE (*Mean Absolute Error*), que mede a magnitude média dos erros num conjunto de previsões. Ou seja, calcula o erro médio absoluto dos erros entre os valores esperados (reais) e as previsões (hipóteses) e é dado pela **Equação 11**.

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |y_j - \hat{y}_j| \quad (11)$$

Onde:

$n$  – Número de amostras;

$y_j$  – Valor real;

$\hat{y}_j$  – Valor previsto.

Outra métrica usada foi a RMSE (*Root Mean Square Error*), uma regra quadrática que se baseia na média das diferenças entre as previsões e as observações reais, e é dada pela **Equação 12**.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)^2} \quad (12)$$

As duas métricas expressam o erro médio da previsão do modelo, em unidades da variável de interesse e apresentam valores (entre 0 e infinito) com orientação negativa, ou seja, quanto mais baixos forem os resultados melhor é o modelo. Em casos reais, o RMSE tem sempre valores superiores ao MAE.

Após considerados os hiper-parâmetros e as métricas, foram introduzidos os dados no *software* PyCharm, de modo a encontrar as variáveis mais importantes (variáveis com importância/influência no valor de cloro) em cada um dos pontos.

Na segunda fase, foram retirados os valores das variáveis sem importância em cada um dos pontos nas folhas de dados do Excel. Posteriormente, foram novamente introduzidas as folhas de dados no *software*, apenas com as variáveis com importância no valor de cloro, e assim obter uma previsão do valor de cloro para o dia seguinte ao último registado.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 EPANET

Uma vez que não foi possível efetuar uma correta calibração do modelo hidráulico, este não representa de forma fiável e válida o sistema real. Desta forma, o modelo não tem capacidade para reproduzir as condições existentes, traduzindo-se numa má previsão das condições do sistema. A figura 26, onde está representado o perfil de concentração de cloro para cada um dos pontos, na hora de maior consumo da rede, comprova esta afirmação.

Como se pode observar, a partir do reservatório RR R03A, a concentração de cloro mantém-se constante ao longo de toda a rede, situação que não ocorre no sistema real, uma vez que é esperada uma evolução da qualidade da água relativamente aos parâmetros de qualidade da água.

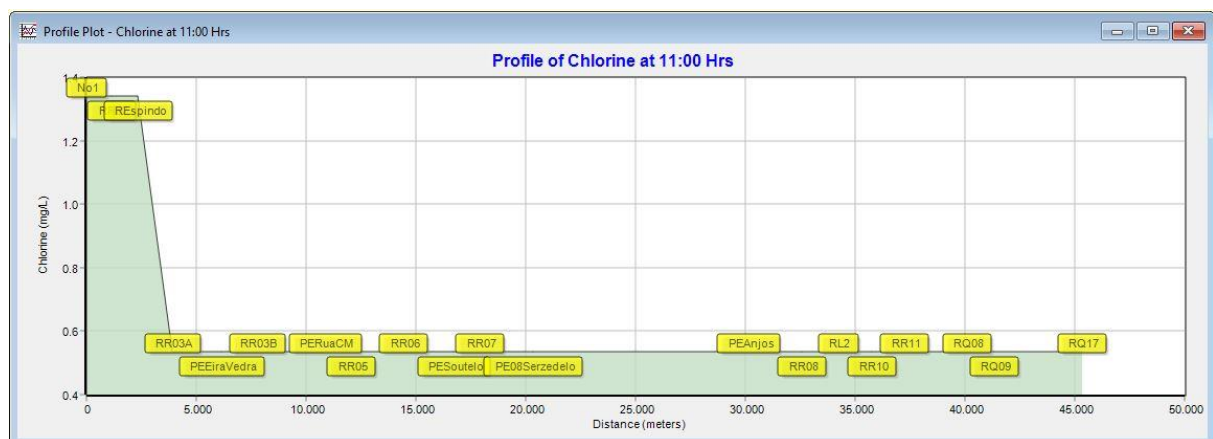


Figura 26 – Perfil de concentração de cloro obtido pelo modelo EPANET.

### 5.2 Modelação cinética de 1ª ordem

Para análise dos resultados da modelação do decaimento segundo uma cinética de 1ª ordem (cálculos realizados em Excel), são utilizados os meses de janeiro e agosto como exemplo. Desta forma, é analisado um mês de inverno com pouco consumo e um mês de verão, que é o mês de maior consumo na rede e, além disso, os dois subsistemas já estavam ligados. Todos os resultados dos restantes meses encontram-se nos **Anexos VI, VII e VII**.

Na tabela 7 estão reunidos os resultados do tempo de retenção hidráulico, por dia, obtidos nos meses de janeiro e agosto, respetivamente. Pela análise da tabela e da informação

presente no **Anexo VI**, verifica-se que a água demora entre 6 a 9 dias a chegar desde a ETA até ao RR Q17, valores confirmados pelos operários responsáveis por este subsistema, o que confirma que este método é fiável para o cálculo do TRH. Observa-se, também, que nos meses de inverno, onde há menor consumo de água na rede, o tempo de residência é maior, ou seja, a água demora mais tempo a percorrer a rede (e, conseqüentemente, tem uma velocidade de escoamento menor).

Tabela 7 - Resultados de tempo de retenção hidráulica obtidos nos meses de janeiro e agosto

Troço da conduta	Janeiro	Agosto
	TRH (d)	
ETA – Nó 1	0,260	0,185
Nó 1 – Nó 2	1,438	1,016
Nó 2 – Nó 3	1,914	1,356
Nó 3 – Nó 9	2,795	2,013
Nó 9 – Nó 10	3,419	2,461
Nó 10 – Nó 12	3,669	2,652
Nó 12 – Nó 13	4,177	3,051
Nó 13 – Nó 16	5,392	4,051
Nó 16 – Nó 16A	6,782	5,165
Nó 16A – Nó 03	7,673	5,948
Nó 03 – RR Q17	7,867	6,116

Nos gráficos de dispersão das figuras 27 e 28 estão representados os valores de  $\lg(C_t/C_0)$  em função do tempo, e respetiva linha de tendência linear, para os meses de janeiro e agosto, respetivamente.

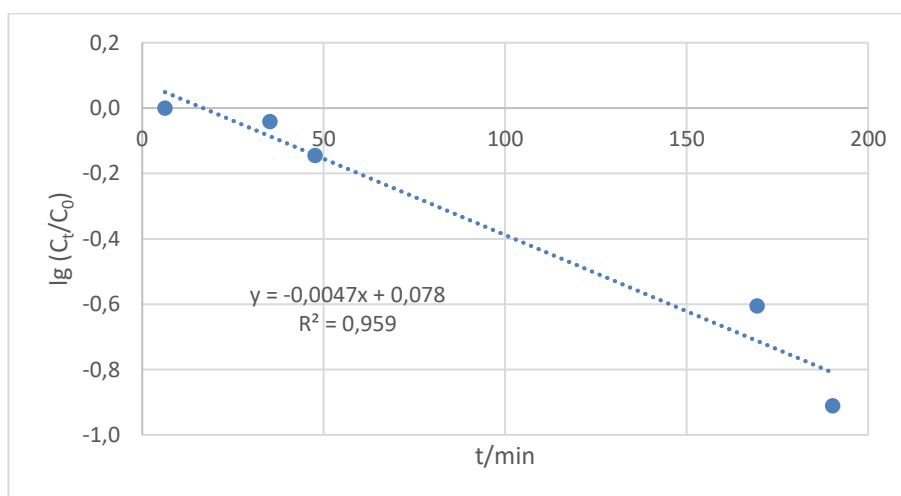


Figura 27 - Gráfico  $\lg(C_t/C_0)$  em função do tempo para o mês de janeiro.

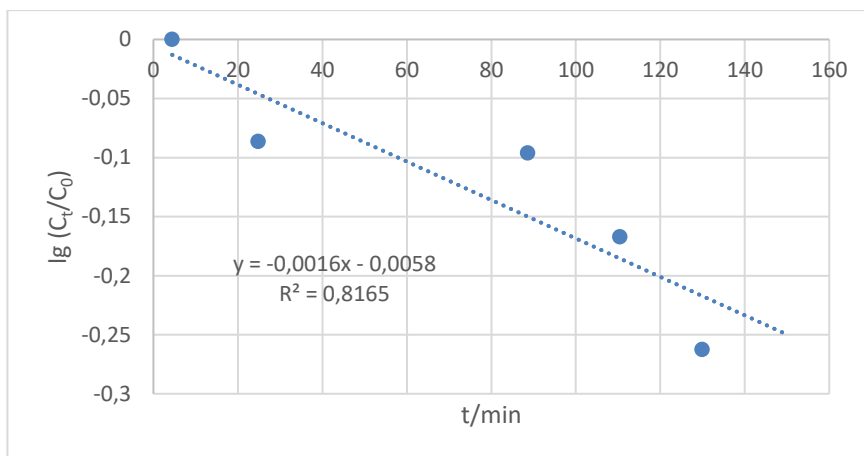


Figura 28 - Gráfico  $\lg(C_t/C_0)$  em função do tempo para o mês de agosto.

Pelo declive da reta obteve-se o valor da constante de decaimento de cloro no seio do líquido para cada mês. No mês de janeiro obteve-se um valor de  $k_b = (0,0047 \pm 0,0018) h^{-1}$  e, em agosto, obteve-se  $k_b = (0,0016 \pm 0,0014) h^{-1}$ .

A constante de decaimento de cloro é maior no mês de janeiro, uma vez que, como verificado acima, o tempo de retenção da água é maior. Assim, pode dizer-se que o cloro decai mais rapidamente nos meses de inverno (de menor consumo) relativamente aos meses de verão (maior consumo).

Os gráficos das figuras 29 e 30 permitem a comparação dos valores de cloro reais com os estimados segundo o modelo de cinética de decaimento de primeira ordem e segundo o modelo de regressão linear simples, para os meses de janeiro e agosto, respetivamente.

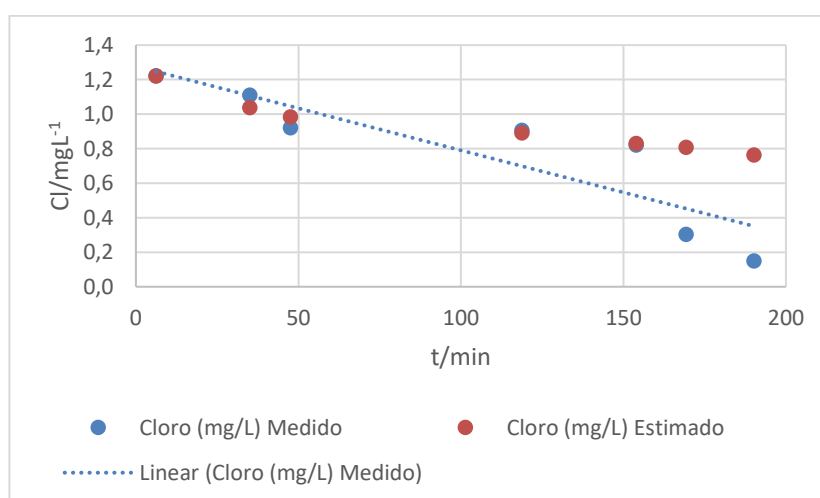


Figura 29 - Dados de cloro medidos e estimados para o mês de janeiro.

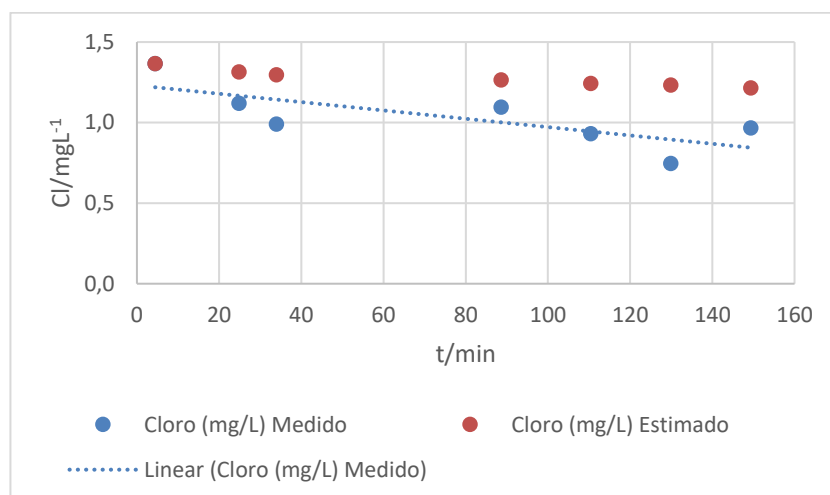


Figura 30 - Dados de cloro medidos e estimados para o mês de agosto.

Por análise dos gráficos, verifica-se que, no mês de janeiro, os valores de cloro estimados pelo modelo de 1ª ordem estão muito próximos dos medidos, observando-se uma maior dispersão nos valores da parte final do trecho, nomeadamente os últimos dois pontos. O mesmo acontece para os restantes meses de menor consumo (como fevereiro, março, abril e maio). Observa-se, também, o decaimento de cloro mais rápido no mês de janeiro tanto nos valores de cloro estimados como nos reais, em relação ao mês de agosto.

No mês de agosto, bem como nos meses de junho, julho e setembro (cujas representações gráficas dos dados de cloro medidos e estimados pelo modelo se encontram no **Anexo VIII**), os valores de cloro estimados pelo modelo cinético de 1ª ordem encontram-se acima dos valores de cloro medidos. Nestes meses, existe uma maior incerteza, uma vez que se fez a ligação dos dois subsistemas a 19 de junho, provocando variações na rede que não se observavam anteriormente. Além de já serem, habitualmente, os meses de maior consumo, a ligação a mais reservatórios e condutas provoca uma mudança significativa na variável cloro, bem como no TRH. Além disso, os valores reais de cloro são por vezes escassos e muito inconstantes (o que dificulta a análise), devido a todas as alterações observadas nestes primeiros meses de ligação entre subsistemas.

Assim, verifica-se que o modelo de cinética de decaimento de 1ª ordem aplicado não descreve o comportamento do decaimento de cloro no sistema real, permitindo, no entanto, ter uma ideia aproximada do decaimento de cloro global. Neste sentido, a utilização de um modelo de

regressão linear simples, de mais simples aplicação, constitui uma melhor opção para obter uma estimativa aproximada do decaimento de cloro global.

A comparação dos valores de cloro reais e observados é feita apenas até ao reservatório RR R11, pois neste ponto é feita recloração por bomba doseadora. Com a adição de cloro, os valores reais não podem ser comparados aos estimados.

Os erros associados a este modelo podem ser justificados pelo facto de se ter considerado apenas o decaimento de cloro no seio do líquido e o tempo de retenção hidráulico, e na realidade, há muitos outros fatores que influenciam esse decaimento (decaimento nas paredes da tubagem, condições hidráulicas como o caudal e a pressão, etc.) (Menaia, Coelho, Lopes, Fonte, & Palma, 2003; Simard, Pelletier, & Rodriguez, 2011).

Além disso, o local de medição de cloro e o facto de haver poucos registos dos valores reais, também leva a mais incertezas na aplicação do modelo, uma vez que quanto maior for a base de dados mais fiáveis estes se tornam. Existem, até, alguns pontos da rede sem registos em alguns meses.

### **5.3 Árvores de Decisão**

Relativamente ao modelo de árvores de decisão, estão apresentados na tabela 8 os resultados obtidos relativamente aos hiper-parâmetros e métricas, para cada um dos pontos.

Pela análise da tabela, observa-se que, em relação aos hiper-parâmetros, existe uma homogeneidade de resultados, o que mostra uma boa performance do modelo. Observa-se apenas alguns desvios mais significativos no parâmetro “Min Samples Split” nos pontos RR R02 e RR R06, o que significa que para esses dois pontos do subsistema são necessárias mais amostras para dividir os nós internos.

Em relação às métricas, o reservatório RL02 é o que apresenta valores mais baixos, o que significa que o modelo apresenta menores erros entre os valores reais e os previstos neste ponto. Observa-se, também que, tal como esperado, os valores do RMSE são sempre superiores aos do MAE.

Com isto, foi possível obter informação sobre as variáveis importantes para cada um dos pontos, tal como representado na figura 31, para o exemplo de menor erro.



Tabela 8 - Resultados obtidos nos hiper-parâmetros e métricas nas árvores de decisão

	<b>Max Depth</b>	<b>Min Samples Leaf</b>	<b>Min Samples Split</b>	<b>RMSE</b>	<b>MAE</b>
<b>RR R02</b>	5	2	5	0,166	0,138
<b>RR R03B</b>	5	2	2	0,200	0,153
<b>RR R05</b>	5	2	2	0,180	0,130
<b>RR R06</b>	5	2	5	0,207	0,154
<b>RR R07</b>	5	3	2	0,264	0,204
<b>RR R08</b>	5	3	2	0,218	0,171
<b>RR R10</b>	5	3	2	0,351	0,273
<b>RR R11</b>	6	3	2	0,214	0,165
<b>RL02</b>	5	3	2	0,168	0,129
<b>PE A</b>	5	3	2	0,204	0,169
<b>PE08</b>	5	3	2	0,204	0,169
<b>PE EV</b>	5	3	2	0,382	0,235
<b>PE S</b>	5	2	2	0,234	0,195



Figura 31 - Visualização das variáveis importantes no RL02, extraído no PyCharm.

No caso do reservatório RL02, a variável mais importante na determinação do valor de cloro é a condutividade, no valor de 0,252. As variáveis cujos valores não apresentam qualquer influência para a previsão do valor de cloro são o caudal e a temperatura.

As figuras de visualização das variáveis importantes dos restantes pontos da rede encontram-se no **Anexo IX**, onde se pode observar que as variáveis mais importantes variam muito de ponto para ponto.

Por fim, obteve-se o valor previsto de cloro para o dia seguinte àquele de que há registo nas folhas de dados em Excel, tal como apresentado na tabela 9.

Para o caso do reservatório RL02, é possível observar que o valor previsto é muito próximo do último valor real. Este facto comprova o bom comportamento do modelo de árvores de decisão utilizado.

*Tabela 9 - Valores de cloro previstos pela árvore de decisão*

	Cl (mg/L)		
	Últimos registos		Previsão
<b>RR R02</b>	0,92	0,89	0,8923
<b>RR R03B</b>	1,08	0,84	0,8489
<b>RR R05</b>	0,96	0,87	0,8720
<b>RR R06</b>	1,03	0,96	0,9588
<b>RR R07</b>	0,62	0,43	0,4233
<b>RR R08</b>	1,05	0,86	0,8654
<b>RR R10</b>	0,62	0,48	0,6100
<b>RL02</b>	1,26	1,06	1,0533
<b>RR R11</b>	0,93	0,91	0,8183
<b>PE EV</b>	0,87	0,87	0,8737
<b>PE S</b>	0,95	0,55	0,5530
<b>PE A</b>	0,98	0,88	0,8800
<b>PE 08</b>	0,61	0,79	0,7825

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A elaboração deste trabalho permitiu disponibilizar informação acerca da evolução da qualidade da água ao longo do sistema adutor, bem como indicar a melhor ferramenta que permite acompanhar essa evolução.

No que diz respeito à modelação em *software* EPANET, não se conseguiu obter qualquer informação sobre a evolução da qualidade da água, uma vez que não foi possível calibrar o modelo hidráulico.

Para a utilização do EPANET, é necessária alguma especialização técnica para uma correta abordagem ao desenvolvimento de modelos, podendo este ser um dos motivos pelos quais o modelo não representa corretamente o sistema real aqui estudado. Também a dificuldade em gerar os dados necessários para construir e manter o modelo, devido ao facto de estes serem insuficientes, se encontrarem dispersos ou não possuírem a qualidade pretendida, e o facto de a manutenção dos modelos exigir a definição de procedimentos sistemáticos são outros fatores que limitam a utilização destas ferramentas (Tavares, 2011), e que limitaram a utilização da mesma neste caso específico.

De facto, as entidades gestoras portuguesas não fazem, de momento, um grande investimento neste tipo de tecnologia que pode facilitar de forma significativa a gestão dos seus recursos. Deste modo, uma das recomendações é exatamente o investimento na especialização e conhecimento técnico em modelação de sistemas de abastecimento de água por parte desta entidade gestora. E como se trata de um sistema extenso e muito complexo, esta necessidade torna-se ainda maior, pois iria facilitar bastante a monitorização da qualidade da água e a deteção de problemas.

A aplicação de um modelo de cinética de decaimento de 1ª ordem revelou não fornecer uma descrição adequada do comportamento de decaimento de cloro no sistema real, permitindo, no entanto, ter uma ideia aproximada do decaimento de cloro global.

Neste modelo, observou-se que existe uma diferença significativa entre os meses de menor consumo e os de maior consumo ao nível de decaimento de cloro. Nos meses de menor consumo (como janeiro, fevereiro, março, abril e maio), o decaimento de cloro é mais significativo, uma vez que o tempo de retenção é mais elevado pois, tal como referido por Simard, Pelletier, & Rodriguez (2011), as condições mais críticas a nível de teor de cloro são devidas aos elevados tempos de residência da água. Ou seja, quanto maior for o TRH (ou

quanto menor for a velocidade de escoamento), maior será o decaimento de cloro. Isto obriga a uma maior atenção e supervisão do sistema por parte dos operadores durante estes meses. Tratando-se de um método de cálculo muito manual torna-se um processo mais moroso pois, para utilização deste modelo, é necessária uma constante recolha e adição de dados e, em ambiente de trabalho, é preferível utilizar um método mais rápido e mais objetivo.

Mesmo assim, este método não deixa de ser uma alternativa válida para acompanhar a evolução da qualidade da água ao longo da rede.

O modelo de Árvores de Decisão mostrou ser aquele que representa melhor o sistema em estudo, uma vez que apresenta pouca margem de erro e prevê valores de cloro próximos do real.

Contudo, uma vez que só existem dados desde agosto de 2016 (5 anos de dados) e, em muitas situações, existem poucos dados em alguns pontos (como registos recolhidos em intervalos de duas semanas ou até de mês em mês), o modelo pode ser melhorado.

Desta forma, outra das recomendações é efetuar uma recolha mais sistemática de dados dos parâmetros incluídos no Plano de Controlo de Qualidade da Água, mais concretamente dos teores de cloro.

A variabilidade de consumos, tempos de retenção e conseqüente teor de cloro durante o ano dificulta a modelação deste sistema, sendo este um dos maiores desafios deste projeto, pois obriga a modelar-se o sistema consoante a altura do ano que se quer tratar.

## BIBLIOGRAFIA

- Águas do Norte. (s.d.). *Missão, Visão e Estratégia*. Obtido em 19 de outubro de 2021, de Águas do Norte - Grupo Águas de Portugal: <https://www.adnorte.pt/pt/aguas-do-norte/missao,-visao-e-estrategia/?id=6>
- APA. (12 de outubro de 2021). *Água para consumo humano*. Obtido em 25 de outubro de 2021, de Portal do estado do ambiente: <https://rea.apambiente.pt/content/%C3%A1gua-para-consumo-humano>
- CAWST. (2013). *Introduction of Drinking Water Quality Testing*. Canada. Obtido em 22 de outubro de 2021, de [www.cawst.org](http://www.cawst.org)
- Coelho, S., Loureiro, D., & Alegre, H. (2006). *Modelação e análise de sistemas de abastecimento de água*. Instituto Regulador de Águas e Resíduos; Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Obtido de <http://epanet-curso.Inec.pt/artigos/GT4.pdf>
- Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto. *Diário da República n.º 176/1998, Série I-A de 1998-08-01*. Lisboa: Ministério do Ambiente.
- Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto. *Diário da República n.º 164/2007, Série I de 2007-08-27*. Lisboa: Ministério do Ambiente, do Ordenamento do Território e do Desenvolvimento Regional
- El Naqa, I., & Murphy, M. (2015). What is Machine Learning? *Machine Learning in Radiation Oncology*. pp. 3-11. Obtido em 9 de outubro de 2021, de [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3\\_1](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-18305-3_1)
- Haestad Methods. (2003). *WaterCAD User's Guide*. Waterbury.
- HydroCAD Software Solutions LLC. (2011). *HydroCAD Stormwater Modeling System - Owner's Manual*. Chocorua. Obtido de [www.hydrocad.net](http://www.hydrocad.net)
- Kim, H., Kim, S., & Koo, J. (2015). Modelling Chlorine Decay in a Pilot Scale Water Distribution System Subjected to Transient. *13th Computer Control for Water Industry Conference, CCWI 2015*, (pp. 370-378).
- Lei n.º 58/2005, de 29 de dezembro. *Diário da República n.º 249/2005, Série I-A de 2005-12-29*. Lisboa.

- Lemos, E., Steiner, M., & Nievola, J. (2005). Análise de crédito bancário por meio de redes neurais e árvores de decisão: uma aplicação simples de data mining. *Revista de Administração*, 40(3), 225-234.
- Maleikian, A., & Chitsaz, N. (2021). Concepts, procedures, and applications of artificial neural network models in streamflow forecasting. Em P. Sharma, & D. Machiwal, *Advances in Streamflow Forecasting* (pp. 115-147). Elsevier.
- Martins, V. R. (2014). *Análise de perdas de água dos sistemas de captação, tratamento e adução dos subsistemas de abastecimento de água de Andorinhas, Queimadela e Rabagão*. Universidade do Minho, Braga. Obtido de <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/35462/1/Disserta%20a7%20a3o%20Valdo%20Martins.pdf>
- Menaia, J., Coelho, S., Lopes, A., Fonte, E., & Palma, J. (2003). Dependency of bulk chlorine decay rates on flow velocity in water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*, 3(1-2), 209-214.
- Neves, L. (2016). *Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água - Caso de Estudo Águas da Azambuja*. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. Lisboa.
- Rossman, L. A. (2000). *EPANET 2.0 - Manual do Usuário*.
- Rossman, L., Clark, R., & Grayman, W. (1994). Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of Environmental Engineering*, 120(4), 803-820.
- Silva, C. (2020). *A Machine Learning Approach to Environmental Sustainability*. Universidade do Minho. Braga.
- Silva, G., Meira, C., Santana, C., Coura, M., Oliveira, R., Nascimento, R., & Santos, W. (2019). Simulação do decaimento de cloro residual livre em reservatórios de distribuição de água. *Revista DAE*, 67(218).
- Simard, A., Pelletier, G., & Rodriguez, M. (2011). Water residence time in distribution system and its impact on disinfectant residuals and trihalomethanes. *Journal of Water Supply: Research and Technology*, 375-390.
- Tavares, I. d. (2011). *Gestão da Pressão na Modelação Hidráulica e Exploração de Sistemas de Distribuição de Água*. Universidade da Beira Interior, Covilhã.

- Vaz, L. (2015). *Aplicação de um modelo de simulação hidráulica num sub-bloco do Aproveitamento Hidroagrícola da Cova da Beira*. Instituto Politécnico de Castelo Branco, Castelo Branco.
- Water Research Centre. (1989). *Network Analysis: A code of practice*. Reino Unido.
- Yiu, T. (12 de junho de 2019). *Understanding Random Forest*. Obtido de Towards data science: <https://towardsdatascience.com/understanding-random-forest-58381e0602d2>
- Zhang, C., Li, S., Ye, M., Zhu, C., & Li, X. (2021). Learning various length dependence by dual recurrent neural network. *Neurocomputing*, 466, 1-15.

## ANEXO I – DESCRIÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DO SUBSISTEMA

Tabela 10 - Descrição dos reservatórios do subsistema

Reservatório	Subsistema	Capacidade (m <sup>3</sup> )	Cota (m)	Observações
RR R01	X	800	881	Reservatório de água tratada
RR R02	X	200	628	
RR R03A	X	250	590	Sem consumo em abril
RR R03B	X	250	573	
RR R04	X	300	603	Fora de serviço
RR R05	X	1500	494	
RR R06	X	200	577	
RR R07	X	600	575	
RR R08	X	300	639	
RR R09	X	300	601	Entrou em funcionamento em agosto
RL02	X	500	745	
RR R10	X	400	513	Com reforço de cloro com pastilhas
RR R11	X	300	510	
RR R12	X	500	410	Entrou em funcionamento em setembro
RR Q08	Y	200	640	
RR Q09	Y	500	600	
RR Q15	Y	500	390	
RR Q16	Y	400	332	
RR Q17	Y	200	559	
RR Q18	Y	300	582	
RR Q20	Y	1000	524	
RR Q21	Y	800	358	
RR Q22	Y	230	365	



## ANEXO II – ESQUEMA DA REDE

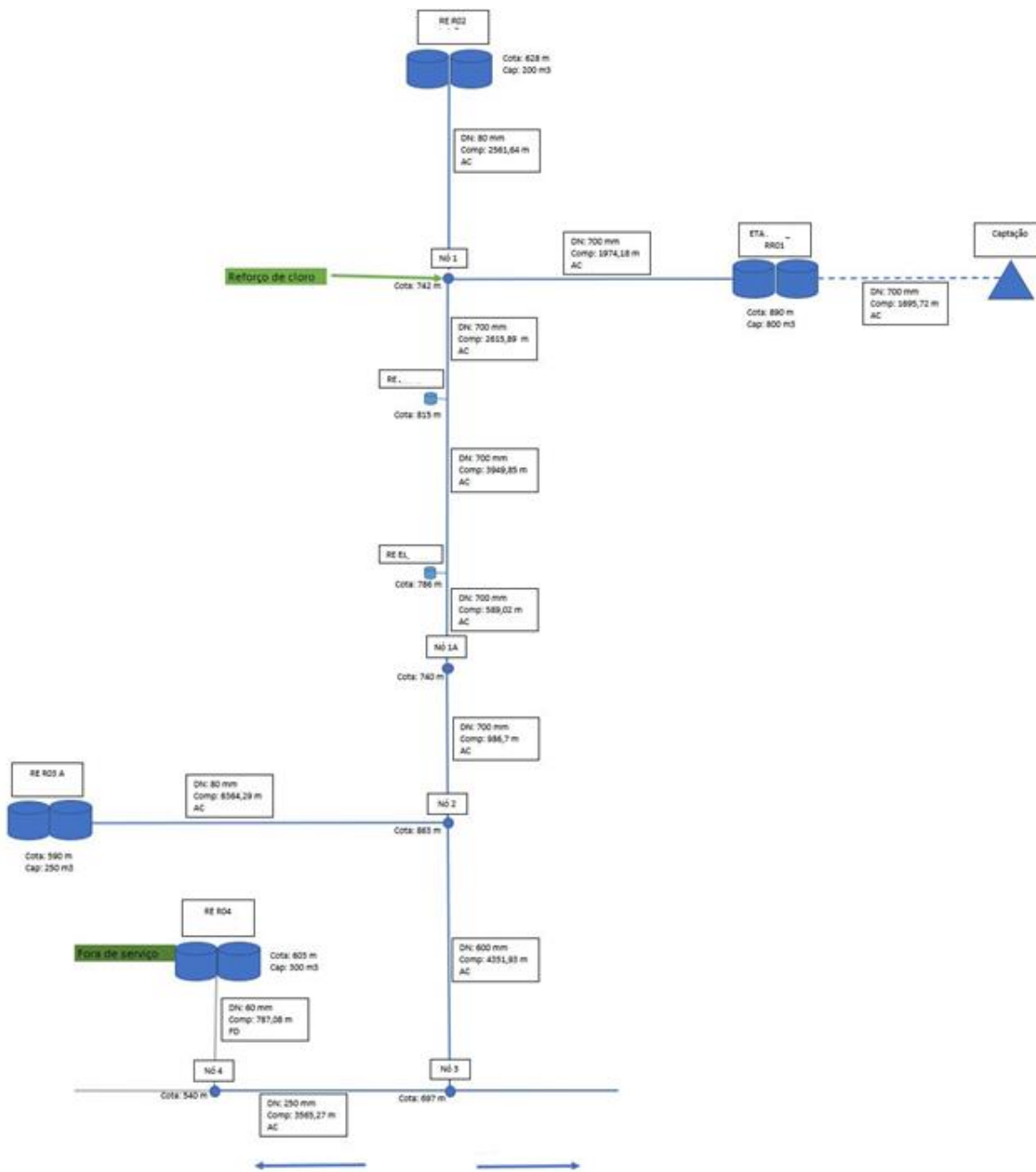


Figura 32 - Esquema da rede.

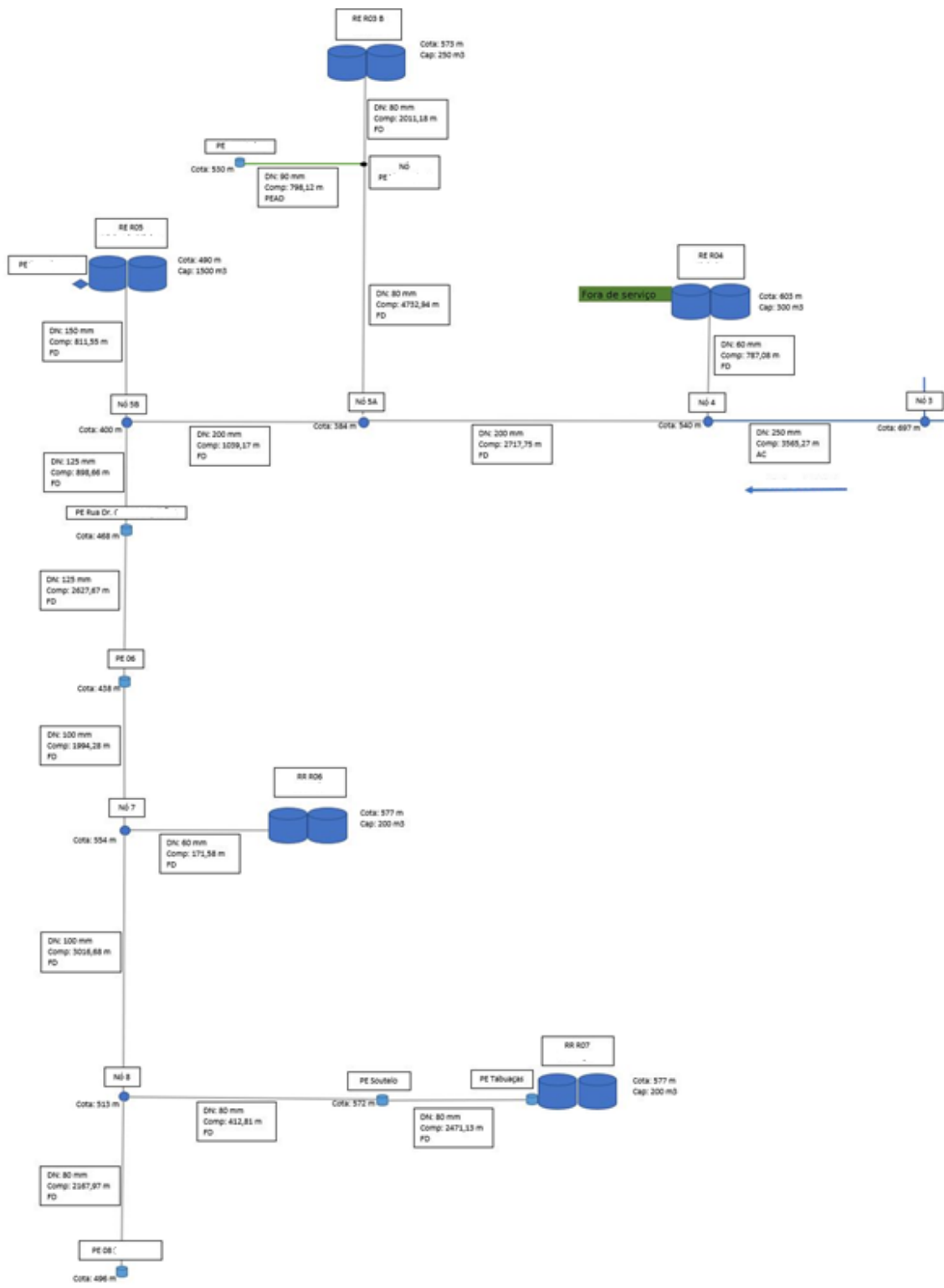


Figura 33 - Esquema da rede (continuação).

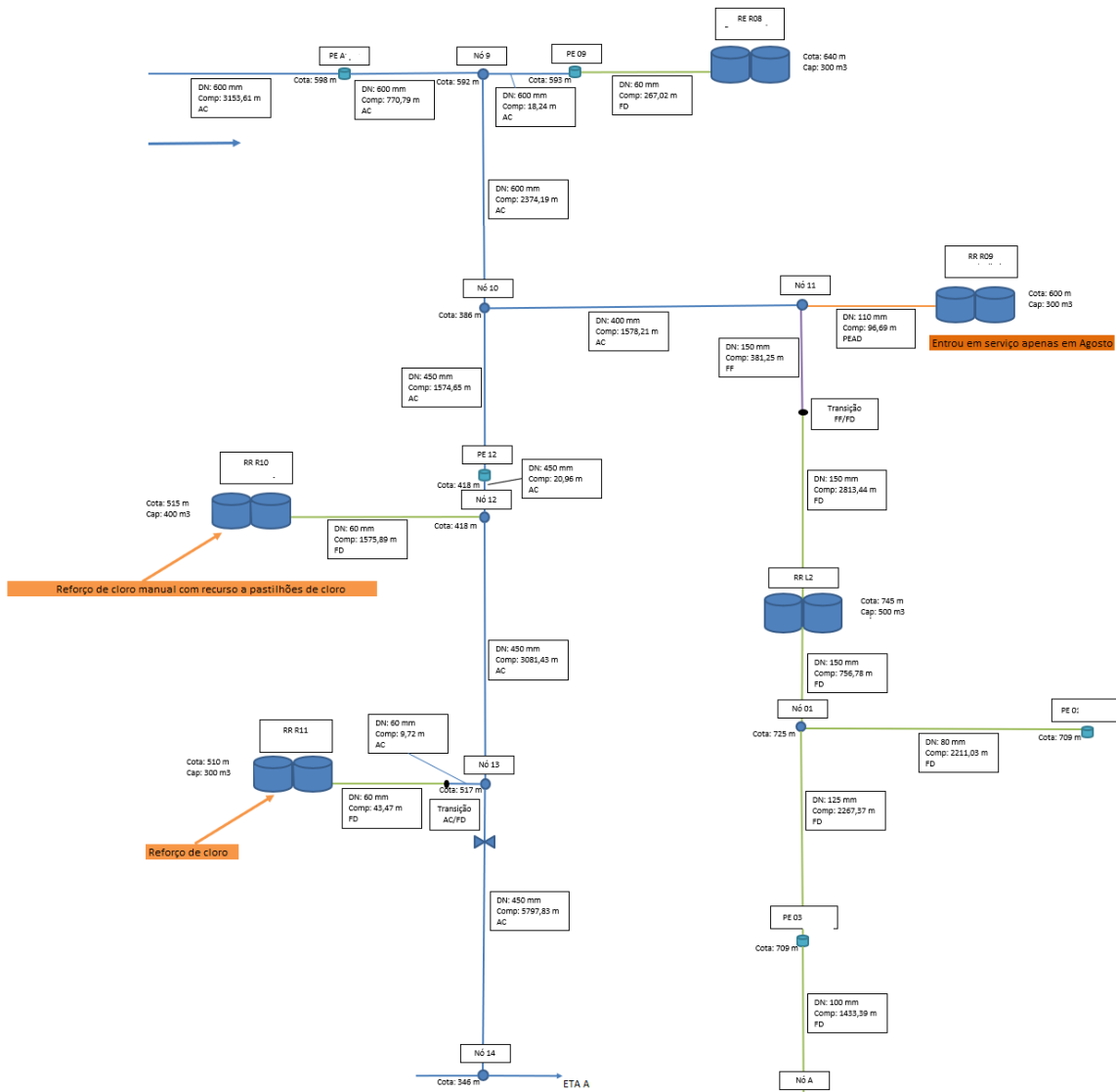


Figura 34 - Esquema da rede (continuação).

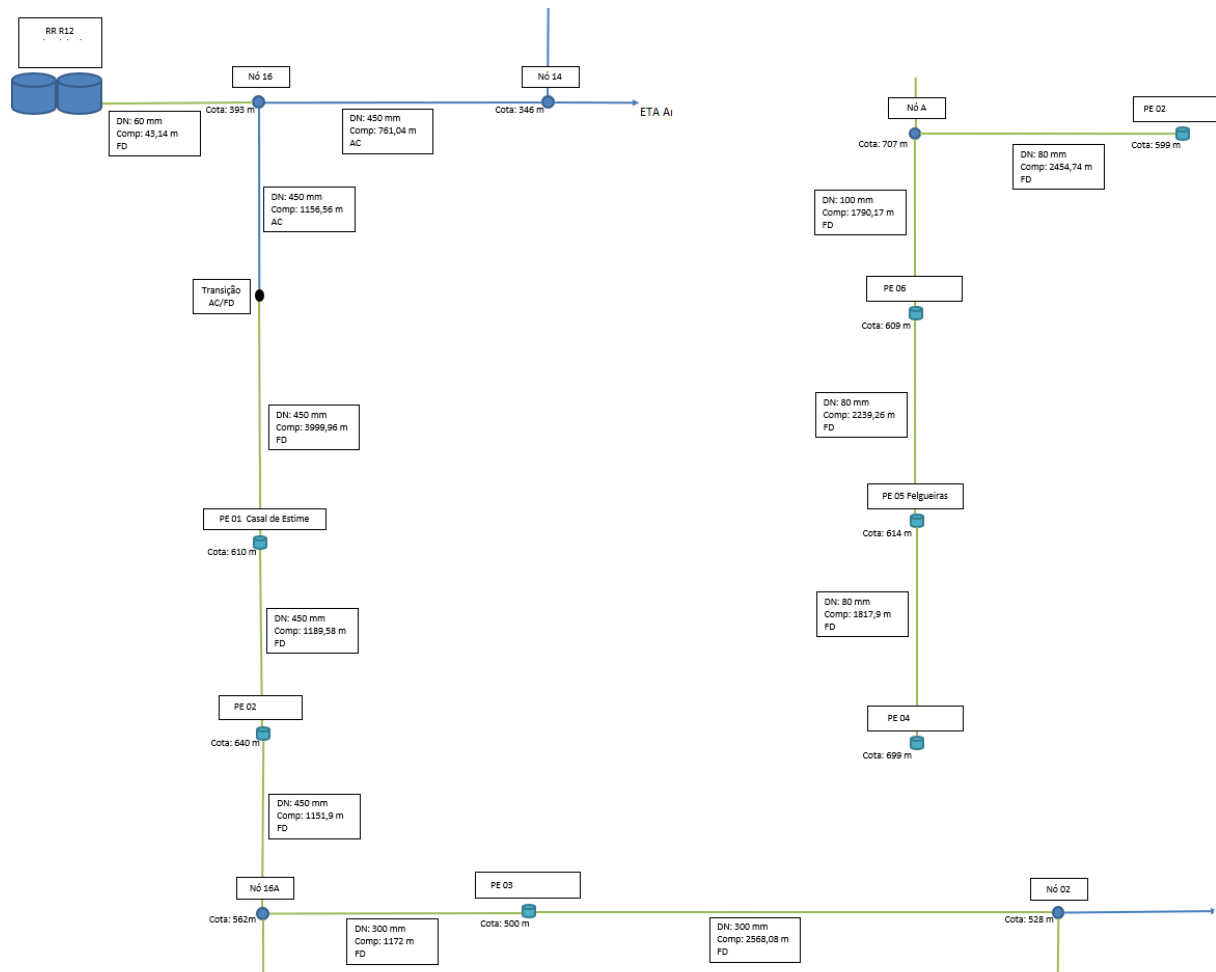


Figura 35 - Esquema da rede (continuação).

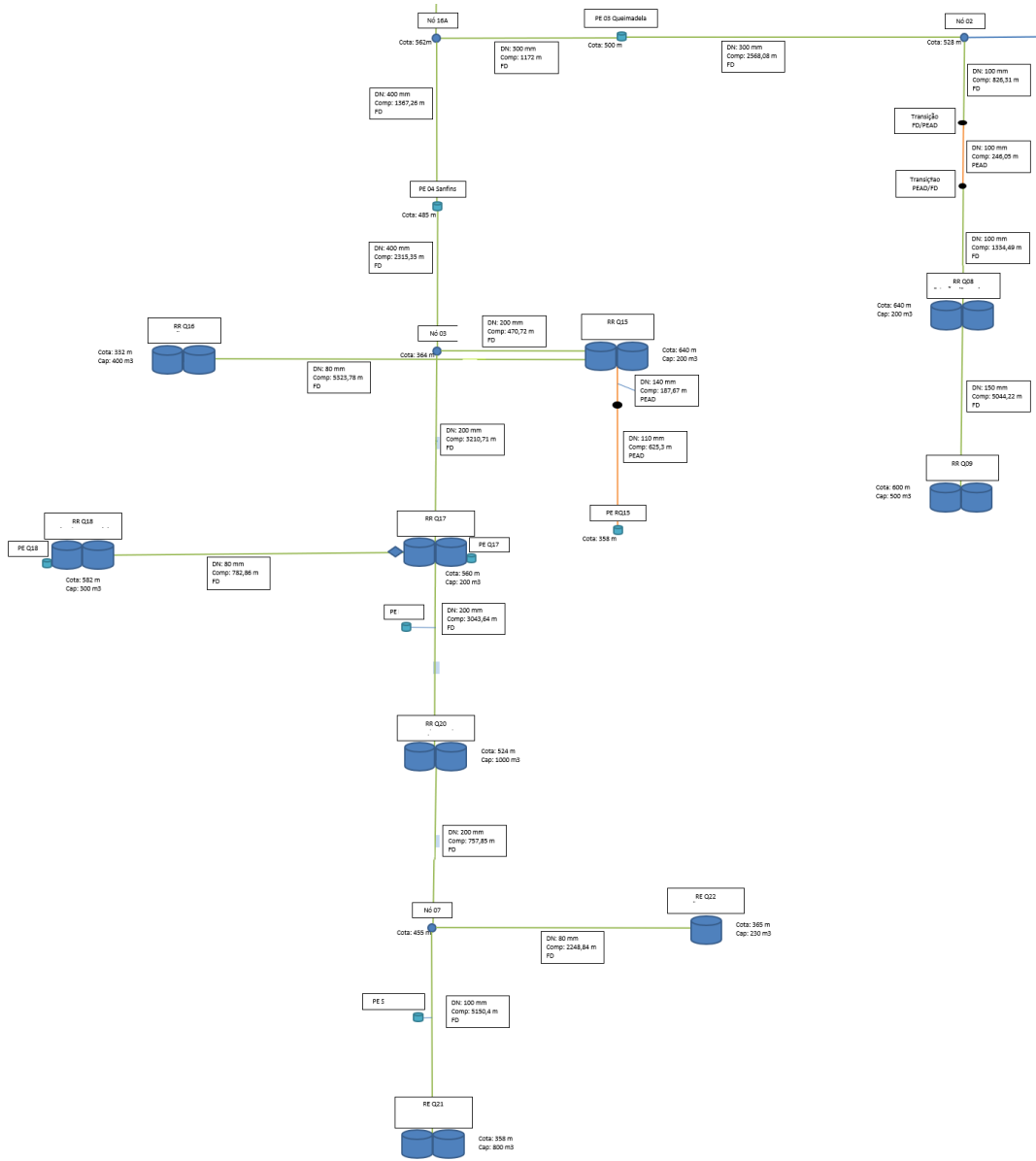


Figura 36 - Esquema da rede (continuação).

## ANEXO III – DADOS DOS CONSUMOS NA REDE INSERIDOS NO EPANET

Tabela 11 - Dados de consumos na rede inseridos no EPANET

Medidor	Consumo (m <sup>3</sup> )		Caudal	
	Jul	Ago	m <sup>3</sup> /mês	m <sup>3</sup> /h
RR R05	26747	32808	29777,50	41,36
RR R01 (Reservatório Água Tratada)	3060	3286	3173,00	4,41
Nó PE EV	1773	1757	1765,00	2,45
Nó PE S	708	811	759,50	1,05
Nó PE T	7088	7322	7205,00	10,01
EE R05 - S	406	2412	1409,00	1,96
RR R03B	6999	7384	7191,50	9,99
RR R06	1601	2026	1813,50	2,52
RR R02	7677	10280	8978,50	12,47
RR R03A	3754	4582	4168,00	5,79
RR R10	2188	2899	2543,50	3,53
RR R11	4651	5781	5216,00	7,24
RR R08	5631	5802	5716,50	7,94
Nó PE A	4213	4331	4272,00	5,93
PE RDCM	559	637	598,00	0,83
RR E	146	207	176,50	0,25
Nó PE08	2945	223	1584,00	2,20
RR R12	0	0	0,00	0,00
PE R07	193	223	208,00	0,29
RR Q 08	4150	5319	4734,50	6,58
RR Q 09	6110	7958	7034,00	9,77
RR Q 22	4252	5066	4659,00	6,47
RR Q 15	1951	1855	1903,00	2,64
RR Q 16	3634	5975	4804,50	6,67
RR Q 17	391	504	447,50	0,62
RR Q 18	1650	1473	1561,50	2,17
RR Q 21	5158	5600	5379,00	7,47
RR Q 20	15095	17077	16086,00	22,34
Nó de P	26	31	28,50	0,04
Nó de SN	252	372	312,00	0,43
RR Q 15	258	436	347,00	0,48
Nó PE 03	459	1012	735,50	1,02
Nó PE 05	212	293	252,50	0,35
Nó PE 06	69	118	93,50	0,13
PE01 - PE B	31	77	54,00	0,08
PE 06	463	660	561,50	0,78
RR L2	1454	3150	2302,00	3,20

**ANEXO IV – GRÁFICOS DE INTERSEÇÃO PARA DETERMINAÇÃO DE  $K_B$  EXPERIMENTALMENTE, PARA AS AMOSTRAS 2 E 3**

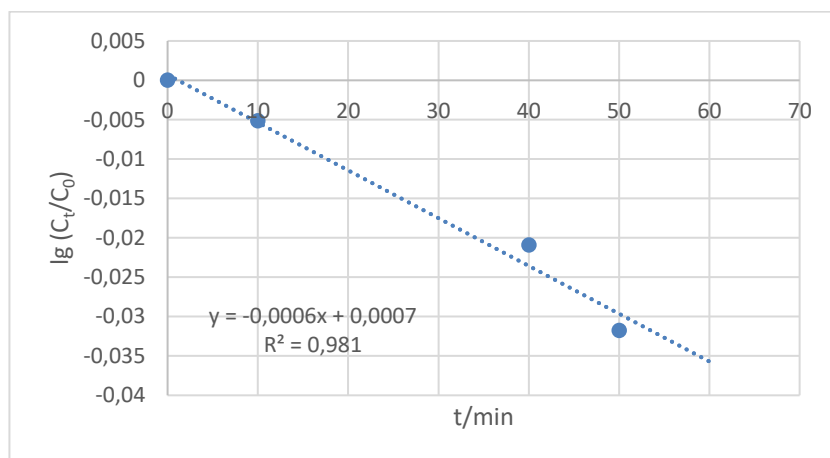


Figura 37 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 2.

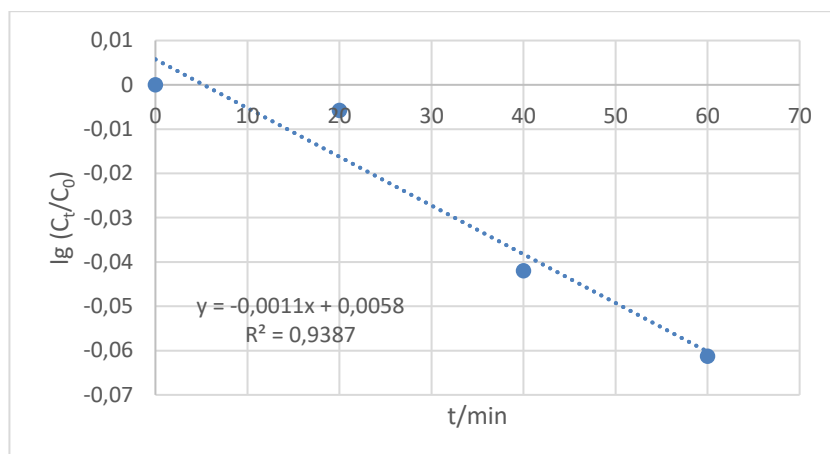


Figura 38 - Representação gráfica dos dados experimentais da amostra 3.

## ANEXO V – CONSUMOS DA REDE NOS RESERVATÓRIOS E PONTOS DE ENTREGA

Tabela 12 - Consumos nos reservatórios da rede no ano 2021

Reservatório	Consumo (m <sup>3</sup> )								
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
RR R05	20600	16421	19446	23300	23093	25185	26747	32808	28372
RR R01	3287	2837	2720	3057	2160	2497	3060	3286	2899
RR R03B	6407	4101	4668	5385	4993	4984	6999	7384	5739
RR R06	1593	1388	1251	1475	1223	1561	1601	2026	1610
RR R02	7906	6262	7115	8959	7402	7645	7677	10280	9329
RR R03A	2309	1585	1642	370	2069	3392	3754	4582	3975
RR R10	1524	1261	1257	1648	1318	1712	2188	2899	2790
RR R11	3325	2778	2996	3351	3241	3837	4651	5781	3592
RR R09	0	0	0	0	0	0	0	2369	3584
RR R08	5673	4768	5281	5800	5210	5529	5631	5802	5263
RR E	69	99	91	127	113	126	146	207	124
RR R12	0	0	0	0	0	0	0	0	0
PE R07	949	646	603	440	143	172	193	223	180
RR Q 08	5134	3872	3252	4233	3756	4375	4150	5319	4206
RR Q 09	5357	4519	4928	5942	4412	5758	6110	7958	5025
RR Q 22	3639	2778	2924	3687	3188	4208	4252	5066	3586
RR Q 15	1858	769	1558	1817	1476	1850	1951	1855	1669
RR Q 16	2465	1938	1926	2767	3023	3343	3634	5975	2821
RR Q 17	734	265	326	425	406	460	391	504	297
RR Q 18	1221	1065	1067	1243	1101	1333	1650	1473	1079
RR Q 21	5129	4049	4040	4859	3920	4553	5158	5600	4609
RR Q 20	14154	10982	11280	13264	12029	14195	15095	17077	13320
RR Q 15	182	142	168	192	178	205	258	436	182
RR L2	1921	1411	1425	1582	1277	1118	1454	3150	1397



Tabela 13 - Dados dos consumos nos pontos de entrega da rede no ano 2021

Ponto de Entrega	Consumo (m <sup>3</sup> )								
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
<b>Nó PE EV</b>	1937	1753	1893	2108	2017	2134	1773	1757	1753
<b>Nó PE S</b>	406	354	376	447	558	594	708	811	772
<b>Nó PE T</b>	4887	3907	3841	4810	4279	6222	7088	7322	5191
<b>Nó PE A</b>	1656	3	5	0	0	1695	4213	4331	3961
<b>PE RDCM</b>	234	213	336	333	221	460	559	637	287
<b>Nó PE T</b>	1336	1163	1256	1492	1354	908	1496	1483	1017
<b>Nó PE08</b>	2374	1326	997	979	988	1829	2945	223	2726
<b>PE R07</b>	949	646	603	440	143	172	193	223	180
<b>Nó PE O</b>	2524	1874	2045	2667	2202	3053	3296	3836	2848
<b>Nó de P</b>	17	18	16	23	20	25	26	31	19
<b>Nó de SN</b>	455	444	258	265	161	203	252	372	303
<b>RR Q 15</b>	182	142	168	192	178	205	258	436	182
<b>Nó PE 03</b>	356	253	308	384	348	308	459	1012	502
<b>Nó PE 05</b>	232	131	149	186	183	218	212	293	228
<b>Nó PE 06</b>	52	33	43	37	51	82	69	118	53
<b>PE01 - PE</b>	21	27	20	6	6	12	31	77	20
<b>PE 06</b>	0	0	0	0	47	400	463	660	387
<b>RR L2</b>	1921	1411	1425	1582	1277	1118	1454	3150	1397

## ANEXO VI – RESULTADOS DE TRH OBTIDOS

Tabela 14 - Resultados de TRH obtidos pelo modelo

Troço	TRH (d)								
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set
<b>ETA - Nó 1</b>	0,260	0,308	0,318	0,264	0,295	0,244	0,222	0,185	0,213
<b>Nó 1 - Nó 2</b>	1,438	1,708	1,769	1,482	1,636	1,344	1,210	1,016	1,175
<b>Nó 2 - Nó 3</b>	1,914	2,272	2,353	1,962	2,179	1,793	1,613	1,356	1,569
<b>Nó 3 - Nó 9</b>	2,795	3,277	3,434	2,850	3,229	2,689	2,446	2,013	2,390
<b>Nó 9 - Nó 10</b>	3,419	3,996	4,219	3,486	3,985	3,303	3,029	2,461	2,961
<b>Nó 10 - Nó 12</b>	3,669	4,283	4,532	3,738	4,284	3,544	3,259	2,652	3,212
<b>Nó 12 - Nó 13</b>	4,177	4,867	5,169	4,255	4,893	4,034	3,733	3,051	3,746
<b>Nó 13 - Nó 16</b>	5,392	6,278	6,720	5,502	6,383	5,232	4,913	4,051	5,054
<b>Nó 16 - Nó 16A</b>	6,782	7,891	8,493	6,926	8,086	6,602	6,263	5,195	6,549
<b>Nó 16A - Nó 03</b>	7,673	8,943	9,625	7,856	9,146	7,470	7,100	5,948	7,494
<b>Nó 03 - RR Q17</b>	7,867	9,178	9,878	8,065	9,384	7,665	7,287	6,116	7,704

## ANEXO VII – GRÁFICOS DE DISPERSÃO LG ( $C/C_0$ ) EM FUNÇÃO DO TEMPO

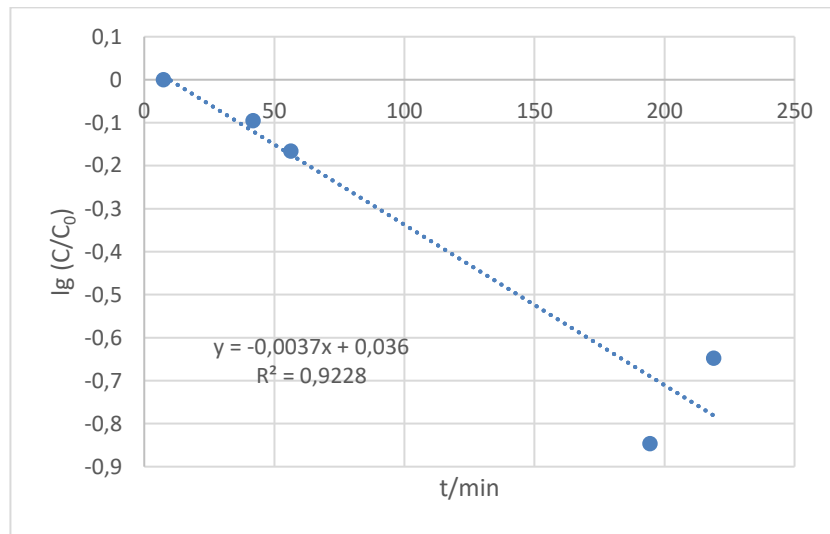


Figura 39 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de fevereiro.

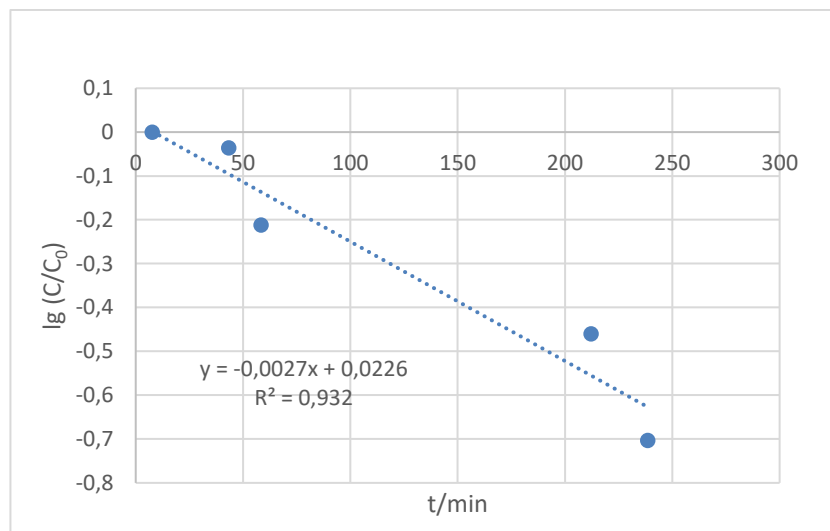


Figura 40 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de março.

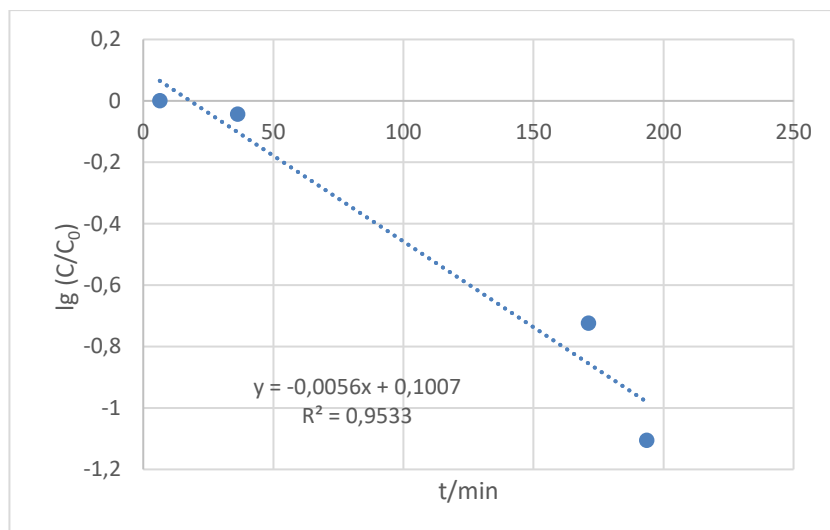


Figura 41 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de abril.

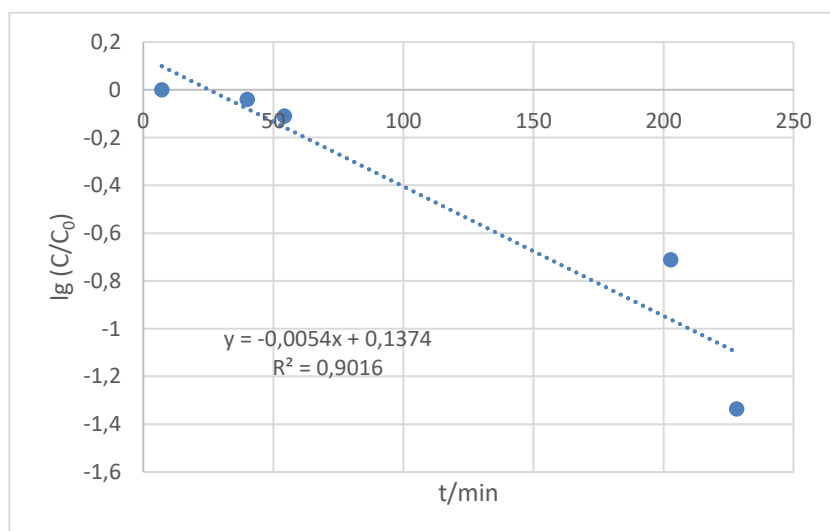


Figura 42 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de maio.

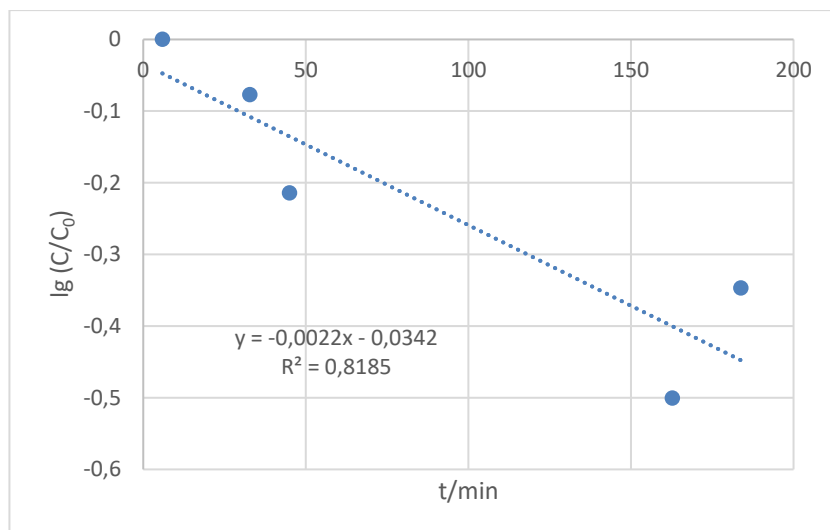


Figura 43 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de junho.

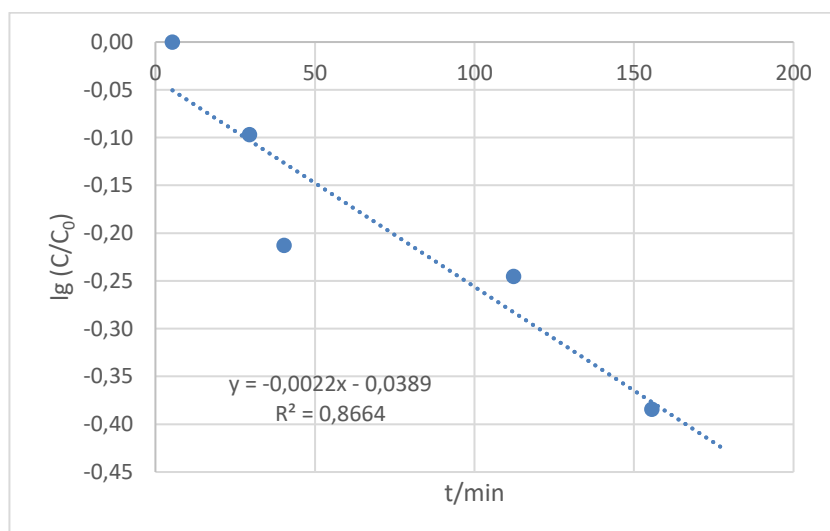


Figura 44 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de julho.

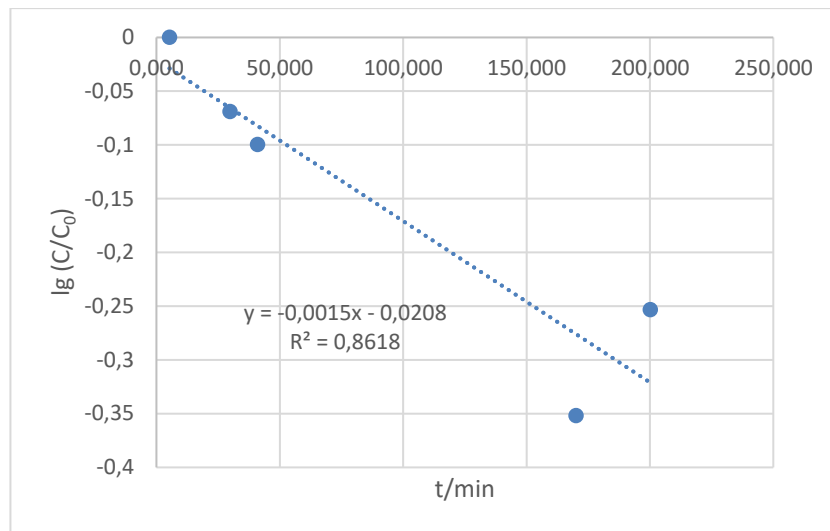


Figura 45 - Gráfico  $\lg(C/C_0)$  em função do tempo para o mês de setembro.

## ANEXO VIII – GRÁFICOS DE DISPERSÃO DE CLORO MEDIDO E ESTIMADO PELO MODELO

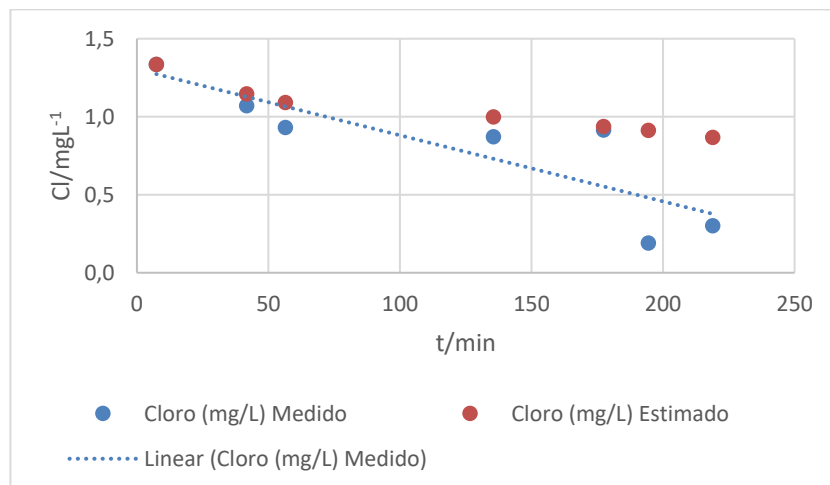


Figura 46 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de fevereiro.

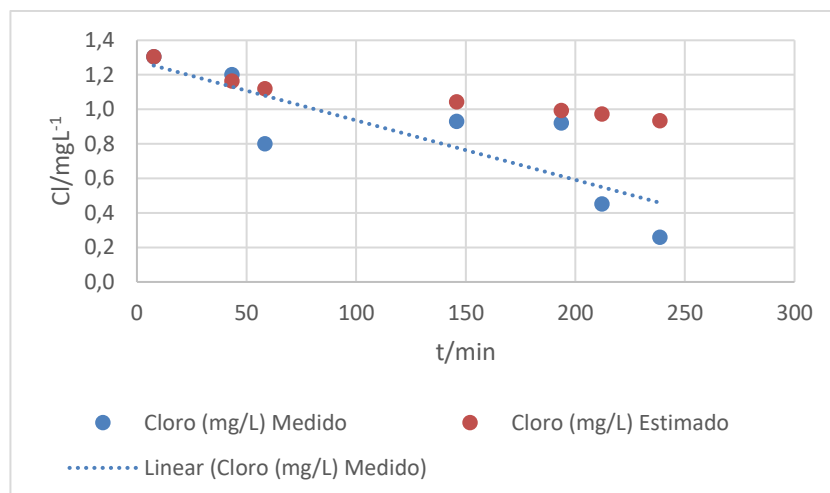


Figura 47 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de março.

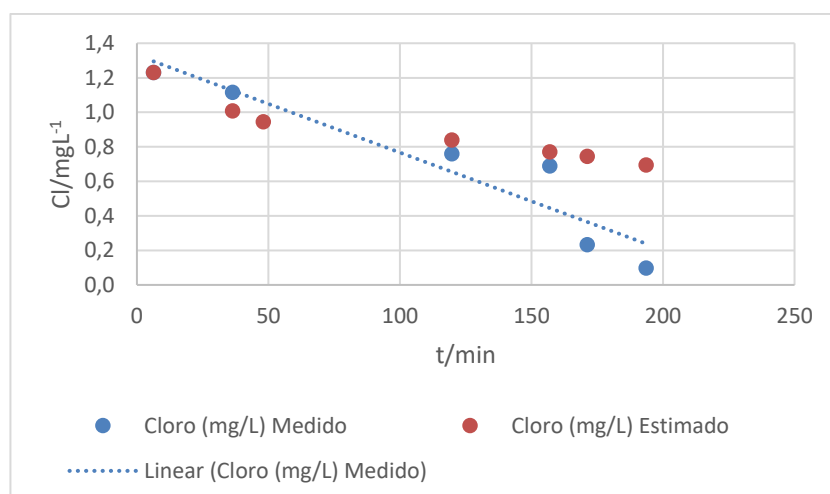


Figura 48 - Gráfico de valores de cloro medidos e estimados para o mês de abril.

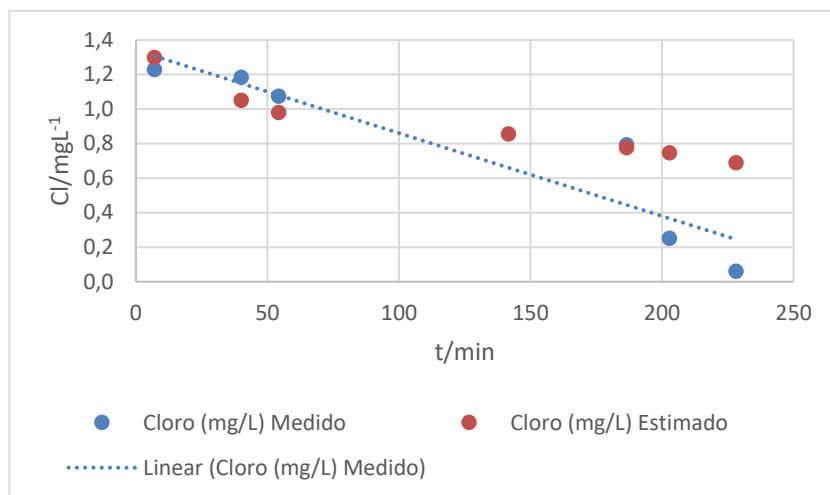


Figura 49 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de maio.

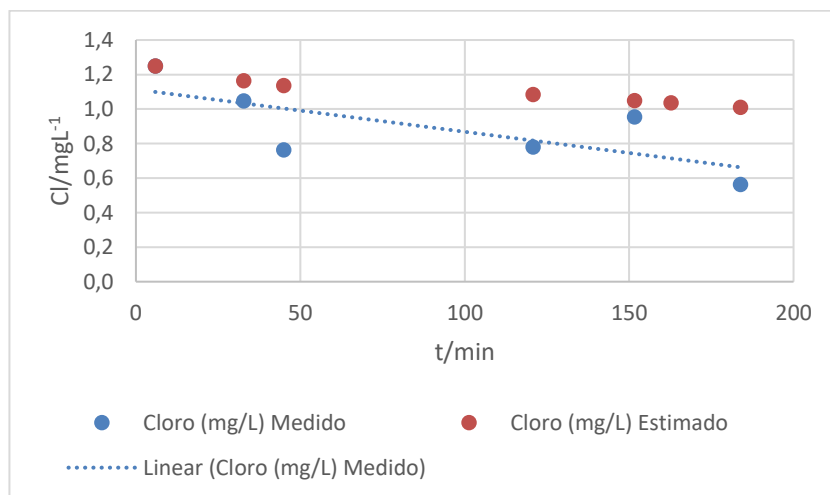


Figura 50 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de junho.

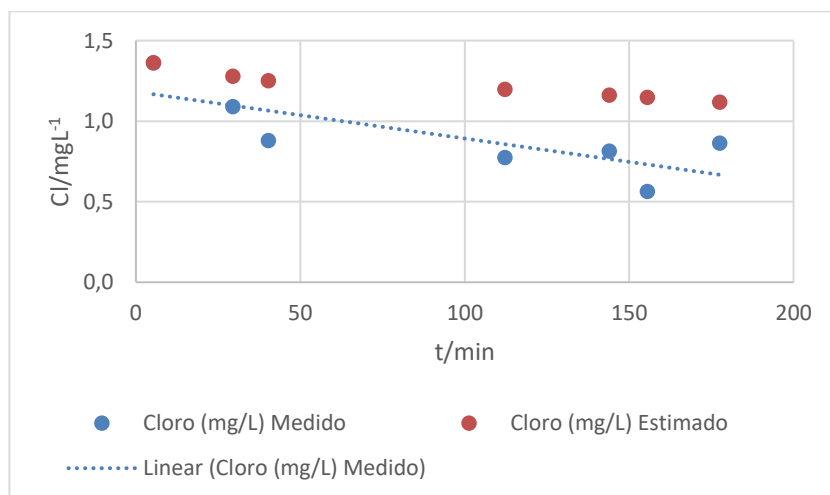


Figura 51 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de julho.



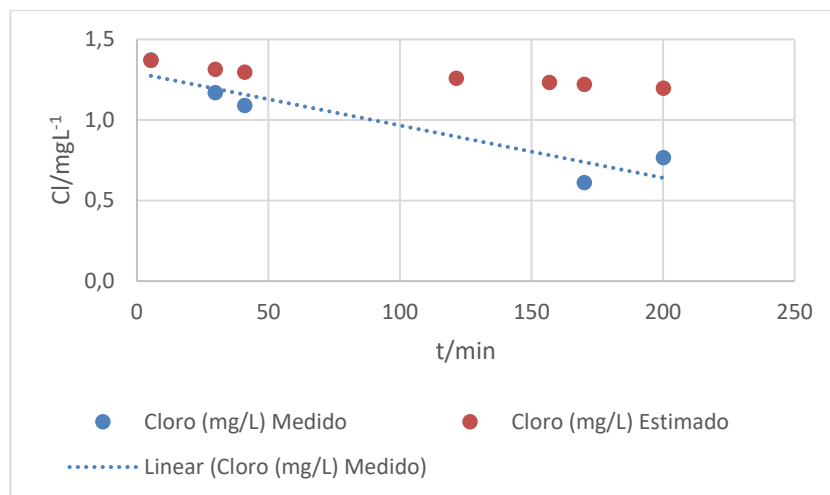


Figura 52 - Gráfico dos valores de cloro medidos e estimados para o mês de setembro.

## ANEXO IX – VISUALIZAÇÃO DE VARIÁVEIS IMPORTANTES

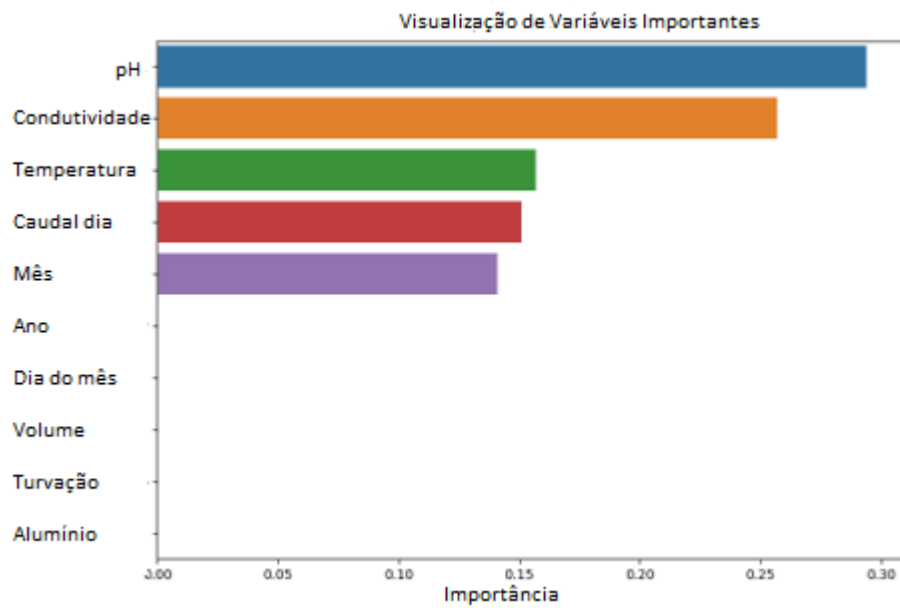


Figura 53 - Visualização das variáveis importantes para o PE A.

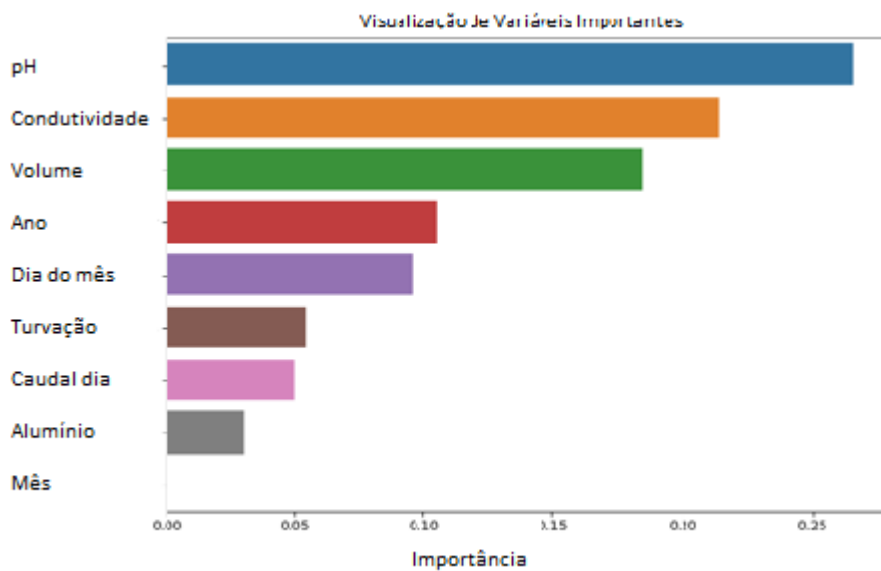


Figura 54 - Visualização das variáveis importantes para o PE EV.

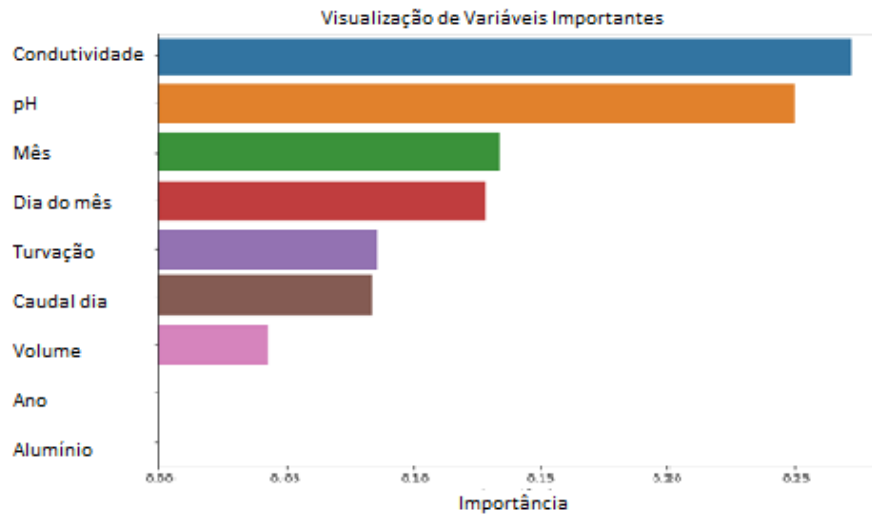


Figura 55 - Visualização das variáveis importantes para o PE S.

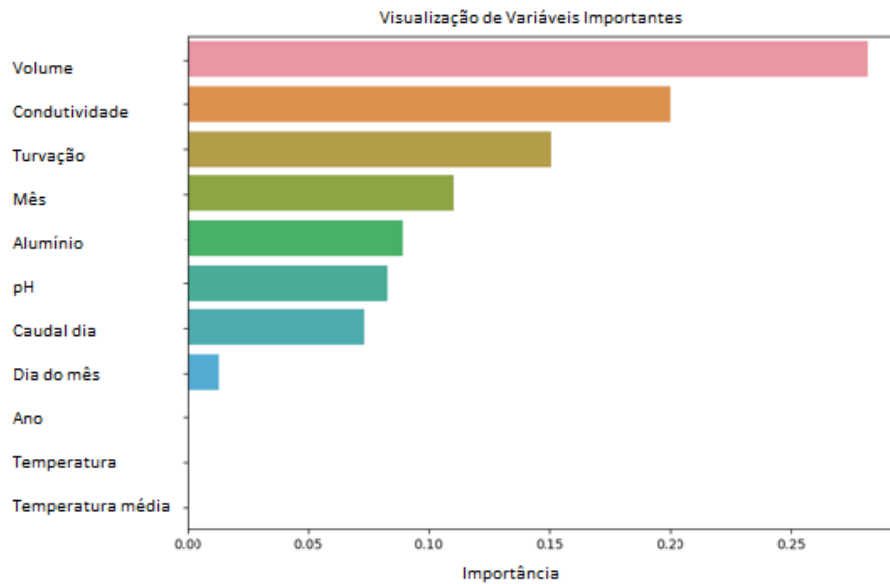


Figura 56 - Visualização das variáveis importantes para o PE 08.



Figura 57 - Visualização das variáveis importantes para o RR R02.

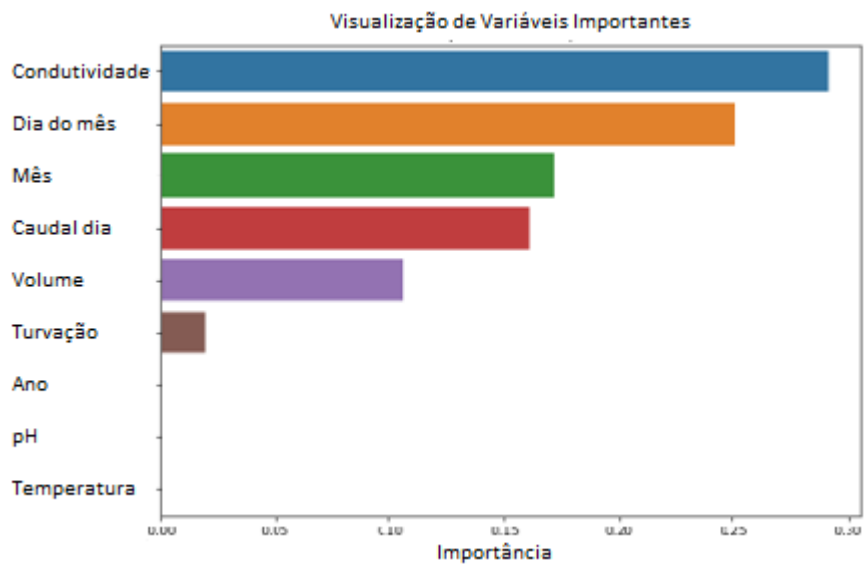


Figura 58 - Visualização das variáveis importantes para o RR R03B.



Figura 59 - Visualização das variáveis importantes para o RR R05.

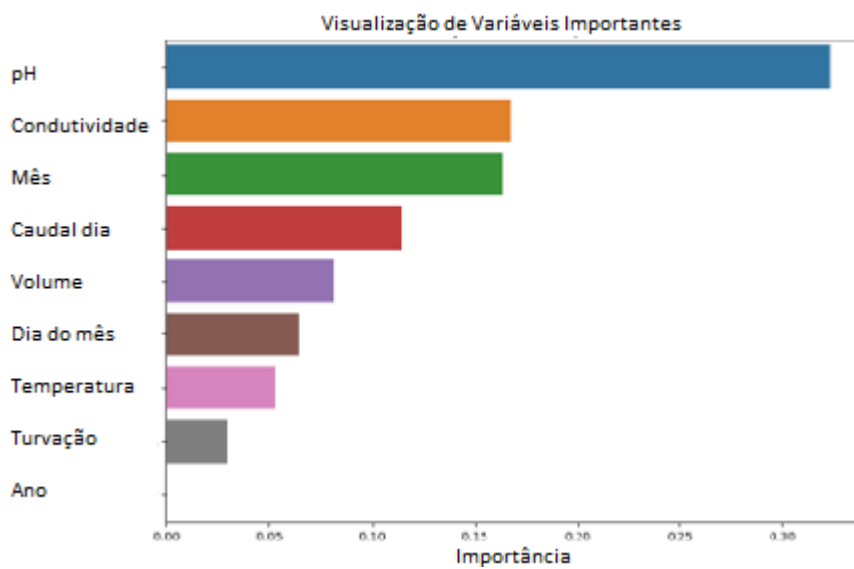


Figura 60 - Visualização das variáveis importantes para o RR R06.

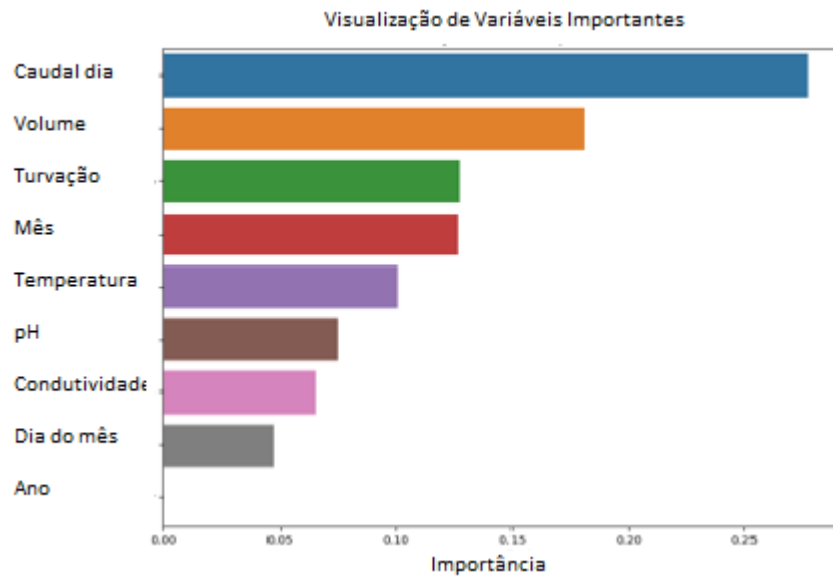


Figura 61 - Visualização das variáveis importantes para o RR R07.

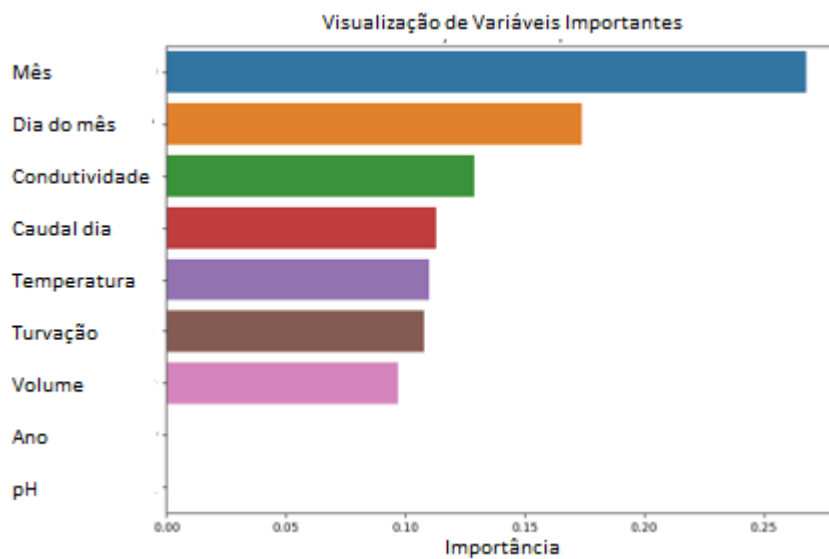


Figura 62 - Visualização das variáveis importantes para o RR R08.

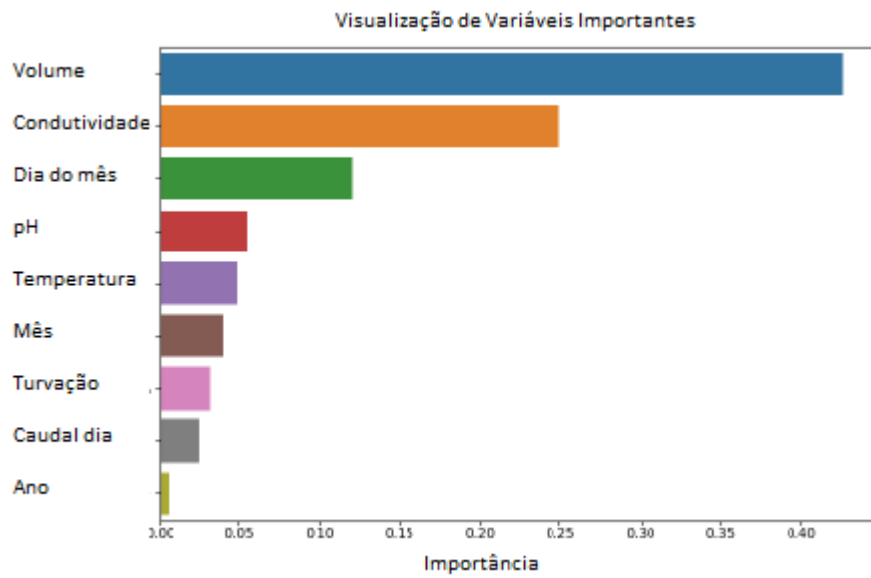


Figura 63 - Visualização das variáveis importantes para o RR R09.

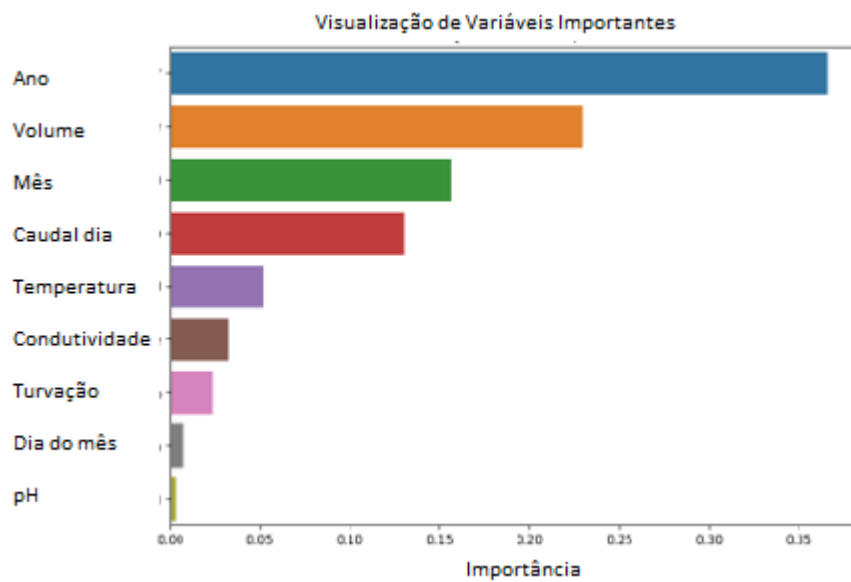


Figura 64 - Visualização das variáveis importantes para o RR R11.