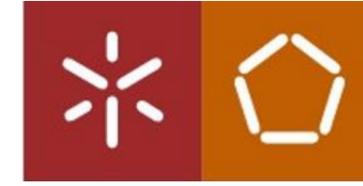




Determinação das velocidades de escoamento e do decaimento de cloro ao longo do Sistema Adutor (ETA X – extremo de rede)

Fátima Isabel Araújo Vilas Boas

UMinho | 2021



Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Fátima Isabel Araújo Vilas Boas

Determinação das velocidades de escoamento e do decaimento ao longo do Sistema Adutor (ETA X – extremo de rede)

dezembro 2021



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Fátima Isabel Araújo Vilas Boas

**Determinação das velocidades de escoamento e
do decaimento de cloro ao longo do Sistema
Adutor (ETA X – extremo de rede)**

Dissertação de Mestrado

Mestrado Integrado em Engenharia Biológica

Ramo Tecnologia Ambiental

Trabalho realizado sob a orientação da

Professora Maria Olívia Baptista Oliveira Pereira

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
CC BY-NC

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

AGRADECIMENTOS

Terminada a última etapa da minha formação acadêmica surge a necessidade de agradecer a todos aqueles que contribuíram neste percurso e me auxiliaram na elaboração da presente dissertação. Desta forma, agradeço:

À professora Olívia Pereira por ter aceitado ser minha orientadora e por todas as horas despendidas no esclarecimento das minhas dúvidas, pelo apoio e pelo conhecimento que me transmitiu.

Ao meu supervisor da empresa Águas do Norte, S.A., por todo o apoio, simpatia e disponibilidade. Agradeço também todas as horas despendidas na elaboração do meu trabalho bem como à flexibilidade em fornecer informações quando necessário.

A todos os funcionários do laboratório da empresa Águas do Norte, S.A. por colaborarem nas experiências de decaimento de cloro.

À Universidade do Minho pelos 5 anos de aprendizagem contínua e à empresa Águas do Norte, S.A. por me possibilitarem um estágio que me enriqueceu não só a nível profissional, mas também pessoal.

A todos os meus amigos pelos momentos de descontração e de entreajuda.

À minha família, em especial à minha mãe, ao meu pai, à minha irmã, ao meu irmão e ao meu namorado.

Por fim, quero agradecer à Suki, a minha eterna companheira que me proporcionou muitos momentos de descontração.

A todos, muito obrigada!

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico 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.

DETERMINAÇÃO DAS VELOCIDADES DE ESCOAMENTO E DO DECAIMENTO DE CLORO AO LONGO DO SISTEMA ADUTOR (ETA X – EXTREMO DA REDE)

RESUMO

A crescente preocupação com a qualidade da água distribuída aos consumidores tornou crucial o estudo das velocidades de escoamento da água ao longo do sistema adutor da Estação de Tratamento de Águas (ETA), bem como o estudo do decaimento de cloro no mesmo sistema.

A velocidade de escoamento ao longo do sistema adutor foi determinada de modo para possibilitar a criação de um mapa, por parte dos profissionais do Sistemas de Informação Geográfica, que pode ser consultado através do *Google Earth*, onde cada reservatório contém um ponto com uma cor característica do período de tempo que a água demora a chegara este após sair da ETA X. Para tal, foi necessário recolher informação exaustiva acerca do sistema adutor bem como os volumes de água consumidos por todos os reservatórios, tanto para época alta como para época baixa de consumo. Obtiveram-se valores de velocidade média de escoamento entre 0,0003 m/s e 1,43 m/s e, e entre 0,0003 m/s e 2,32 m/s para época baixa e época alta, respetivamente. Relativamente aos tempos de residência hidráulicos da água obtiveram-se gamas entre 0,001 h e 331,34 h e entre 0,001 h e 344,45 h para época baixa e época alta, respetivamente.

O estudo do decaimento de cloro no seio líquido foi efetuado laboratorialmente usando amostras de água ultrapura cloradas com concentrações iniciais de cloro de 0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L e 2 mg/L (preparadas pelo laboratório da empresa) que foram mantidas a temperatura ambiente e feitas duas leituras de concentração de cloro por dia. Os valores de decaimento de cloro ao longo do tempo foram ajustados a cinco modelos cinéticos de decaimento. Na primeira experiência foi o Modelo de 1.^a ordem que mais se ajustou à amostra 1, obtendo-se uma constante cinética de decaimento de 0,007 h⁻¹. No que diz respeito às amostras 2,3 e 4 foi o Modelo de ordem n que mais se adequou obtendo-se constantes cinéticas de decaimento de 0,005 h⁻¹ para a amostra 2 e 0,008 h⁻¹ para as amostras 3 e 4. Relativamente à segunda experiência, foi o Modelo de ordem n que apresentou melhor ajuste para todas as amostras obtendo-se valores de constante cinética de decaimento de 0,0005 h⁻¹, 0,0004 h⁻¹, 0,0003 h⁻¹ e 0,011 h⁻¹ para as amostras A, B, C e D, respetivamente.

O decaimento de cloro no seio da tubagem foi feito com base em modelos teóricos tendo-se obtido uma constante de decaimento de cloro no seio da tubagem de 0,002 h⁻¹ para tubagens de ferro dúctil revestido a cimento com 20 anos de uso.

Palavras-chave: Decaimento de cloro, ETA, sistema adutor, velocidade de escoamento.

DETERMINATION OF FLOW VELOCITIES AND CHLORINE DECAY ALONG THE WATER DISTRIBUTION SYSTEM (WTP X – END OF THE NET)

ABSTRACT

The growing concern about the quality of the water distributed to consumers made it necessary to study the water flow velocities along the supply system of the Water Treatment Plant (WTP), as well as the chlorine decay.

The flow velocity along the supply system was determined to enable the creation of a map, by Geographic Information Systems professionals, that can be consulted through Google Earth, where each reservoir contains a dot with a characteristic colour of the period that the water takes to reach this one after leaving the ETA X. For this, it was necessary to collect exhaustive information about the supply system as well as the volumes of water consumed by all the reservoirs, both for high and low season consumption. We obtained average flow velocity values between 0.0003 m/s and 1.43 m/s, and between 0.0003 m/s and 2.32 m/s for low season and high season, respectively. Regarding the hydraulic residence times of water, we obtained ranges between 0.001 h and 331.34 h and between 0.001 h and 344.45 h for low season and high season, respectively.

The study of chlorine decay in the liquid sinus was carried out in the laboratory using ultrapure chlorinated water samples with initial chlorine concentrations of 0.5 mg/L, 1 mg/L, 1.5 mg/L and 2 mg/L (prepared by the company's laboratory) which were kept at room temperature and taken two chlorine concentration readings per day. The chlorine decay values over time were fitted to five decay kinetic models. In the first experiment it was the 1st order model that best fitted sample 1, obtaining a decay kinetic constant of 0.007 h⁻¹. As for samples 2, 3 and 4, the nth order model was the best fit, with decay kinetics constants of 0.005 h⁻¹ for sample 2 and 0.008 h⁻¹ for samples 3 and 4. For the second experiment, the nth order model was the best fit for all samples, obtaining values of kinetic decay constants of 0.0005 h⁻¹, 0.0004 h⁻¹, 0.0003 h⁻¹ and 0.011 h⁻¹ for samples A, B, C and D, respectively.

The chlorine decay within the pipe was done based on theoretical models and a chlorine decay constant within the pipe of 0.002 h⁻¹ was obtained for cement-lined ductile iron pipes with 20 years of use.

Keywords: Chlorine decay, feeder system, flow velocity, WTP.

ÍNDICE

Direitos de Autor e condições de utilização do trabalho por terceiros	ii
Agradecimentos.....	iii
Declaração de integridade	iv
Resumo.....	v
Abstract.....	vi
Índice.....	vii
Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	x
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Estrutura da dissertação	2
2 Sistemas de Abastecimento de água	4
2.1 Historial e caracterização da empresa Águas do Norte, S.A.....	4
2.2 Etapas de tratamento da ETA X.....	6
2.3 Qualidade da água em Sistemas de abastecimento	11
2.4 Legislação aplicada a água de consumo.....	12
2.5 Qualidade da água nas Águas do Norte, S.A.	14
2.6 Fatores que afetam a qualidade da água	14
3 Caracterização do escoamento da ETA X.....	15
3.1 Velocidade média de escoamento	15
3.2 Modelação da velocidade média de escoamento	15
3.3 Perdas de carga.....	20
3.3.1 Perdas de carga contínuas.....	20
3.3.2 Modelação da velocidade média de escoamento considerando as perdas de carga contínuas.....	21
3.3.3 Perdas de carga localizadas	23
3.4 Tempo de residência hidráulico da água.....	24
4 Decaimento de cloro	27
4.1 Decaimento de cloro no seio líquido	28
4.1.1 Determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio líquido	29

4.1.2	Discussão de Resultados	31
4.2	Decaimento de cloro no seio da tubagem	37
4.2.1	Determinação da constante cinética de decaimento de cloro no seio da tubagem	38
5	Conclusões e Perspetivas Futuras	39
	Referências	41
	Anexos	44
	Anexo I. Fluxograma do Sistema Adutor da ETA X	45
	Anexo II. Cálculo do diâmetro interno das condutas	48
	Anexo III. Cálculo do caudal de troços com Estação Elevatória	49
	Anexo IV. Cálculo do caudal de troços sem Estação Elevatória.....	50
	Anexo V. Cálculo da área da secção transversal da conduta	50
	Anexo VI. Cálculo da velocidade média de escoamento	51
	Anexo VII. Cálculo da perda de carga unitária.....	51
	Anexo VIII. Cálculo da Velocidade média de escoamento considerando as perdas de carga.....	52
	Anexo IX. Cálculo do regime de escoamento	52
	Anexo X. Cálculo do Tempo de residência hidráulico da água	52
	Anexo XI. Valores de concentração de cloro nas duas experiências laboratoriais	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Logótipo empresa Águas do Norte, S.A.....	4
Figura 2. Etapas de tratamento da ETA X.	5
Figura 3. Grupos eletrobomba responsáveis pela captação de água.....	6
Figura 4. Torre de contacto com o ozono.	7
Figura 5. Adição de leite de cal.	8
Figura 6. Tanque de contacto com dióxido de carbono.	8
Figura 7. Câmara de mistura rápida.	8
Figura 8. Tanque repartidor de caudais.....	9
Figura 9. Decantadores.	9
Figura 10. Filtro de areia.	10
Figura 11. Cisterna de água de lavagem de filtros.	10
Figura 12. Evolução do indicador de água segura desde 1993 até 2020	11
Figura 13. Excerto da informação acerca do troço que se inicia na EE da ETA X (EVI) e termina no reservatório 2 (RAD) que pode ser consultada no Cadastro de Abastecimento de Água da AdNorte....	16
Figura 14. Excerto da rede de distribuição.	17
Figura 15. Fatores que afetam o decaimento de cloro.	27
Figura 16. Evolução da concentração de cloro ao longo do tempo na primeira experiência.	31
Figura 17. Evolução da concentração de cloro ao longo do tempo na segunda experiência.	33
Figura 18. Primeiro excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.....	45
Figura 19. Segundo excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.....	46
Figura 20. Terceiro excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.	47
Figura 21. Catálogo da empresa Alfatubo para condutas de PEAD.....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores paramétricos dos parâmetros indicadores para água destinada ao consumo humano segundo o Decreto-Lei n.º 306/207, de 27 de agosto	12
Tabela 2. Valores paramétricos dos parâmetros microbiológicos e químicos para água destinada ao consumo humano segundo o Decreto-Lei n.º 306/207 de 27 de agosto	13
Tabela 3. Características do escoamento na rede de distribuição	18
Tabela 4. Características de escoamento considerando perdas de carga contínuas.....	22
Tabela 5. Tempos de residência hidráulicos da água.....	25
Tabela 5. Tempos de residência hidráulicos da água (Continuação).....	26
Tabela 6. Modelos cinéticos que descrevem o decaimento de cloro.....	29
Tabela 7. Condições experimentais das duas experiências realizadas	30
Tabela 8. Ajuste dos modelos cinéticos de decaimento de cloro à primeira experiência.....	35
Tabela 9. Valores dos parâmetros ajustáveis correspondentes aos modelos cinéticos que mais se ajustam ao decaimento na primeira experiência	35
Tabela 10. Ajuste dos modelos cinéticos de decaimento de cloro à segunda experiência laboratorial .	36
Tabela 11. Valores dos parâmetros ajustáveis correspondentes aos modelos cinéticos que mais se ajustam ao decaimento na segunda experiência.....	37
Tabela 12. Valores de concentração de cloro ao longo do tempo na primeira experiência	53
Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência	54
Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação).....	55
Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação).....	56
Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação).....	57

1 INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial tanto para a vida humana, como para o equilíbrio dos ecossistemas. Por esta razão, a gestão racional e otimizada dos recursos hídricos é, hoje em dia e cada vez mais, de crucial importância.

Os sistemas de abastecimento de água têm como propósito o fornecimento de água potável à população de forma a satisfazer as suas necessidades de consumo. Desta forma, o tratamento da mesma é essencial para que seja consumida de forma segura.

A preocupação com a garantia de qualidade de água fornecida tem sido crescente, levando à necessidade de criação de modelos de simulação que permitam fazer a previsão do local onde a água se encontra ao longo da rede de distribuição possibilitando, por conseguinte, a aplicação de medidas preventivas ou corretivas para controlo da qualidade de água.

O conhecimento da velocidade de escoamento da água é de extrema importância já que torna mais fácil e eficaz a intervenção no caso de ocorrência de alguma perturbação na distribuição da água, uma vez que é possível prever a localização da água ao longo do sistema adutor.

De forma a assegurar que a qualidade da água se mantém ao longo das condutas e nos reservatórios, a Entidade Reguladora de Serviços de Água e Resíduos (ERSAR) afirma que é essencial que se garanta um teor de desinfetante residual ao longo da rede de distribuição o que se relaciona diretamente com a escolha do processo de desinfecção [1].

A desinfecção por compostos de cloro é um dos processos mais usados por apresentar várias vantagens, dentro delas, a facilidade de doseamento, medição e controlo [2]. Este método também se apresenta como uma boa escolha por permitir que exista uma quantidade residual do desinfetante ao longo do tempo, possibilitando o controlo da atividade microbiana presente na água na sua distribuição e, conseqüentemente, garantir a qualidade microbiológica da água ao longo do seu percurso [3].

No entanto, sabe-se que ao longo do percurso de distribuição da água destinada ao consumo humano, o teor residual em cloro vai diminuindo ao longo do seu transporte até à torneira do cliente [4]. Desta forma, torna-se imprescindível o recurso a um modelo de previsão de decaimento de cloro que permitirá antecipar a necessidade de se proceder a uma recloração.

1.1 OBJETIVOS

Esta dissertação teve como objetivo a determinação das velocidades de escoamento ao longo do sistema adutor de forma a tornar possível a criação de um modelo que permitisse prever o local onde a água se encontra após a saída da ETA X e, posteriormente, a criação um mapa no formato *Google Earth* que possibilitasse uma análise visual do tempo a que a água demora a chegar a cada ponto do sistema adutor. Desta forma, foi necessário recolher e organizar informação acerca de toda a rede de abastecimento de água (diâmetro/comprimento de condutas, altura/diâmetro de reservatórios, caudal, pontos de entrega, etc.) do sistema adutor (ETA X– extremo de rede) e, ainda, informação sobre a variação dos volumes de água consumidos pela população, influenciados pela temperatura ambiente.

Outro objetivo desta dissertação foi o estudo do decaimento de cloro desde a ETA X até ao seu destino final e, para tal, realizaram-se duas experiências laboratoriais em que foi medida a concentração de cloro ao longo do tempo. Foram estudadas amostras de diferentes concentrações iniciais de cloro para perceber a influência da concentração inicial no decaimento de cloro.

Apesar de existirem diversos programas de modelação hidráulica, optou-se pela construção de uma folha de cálculo que contemplou todos os dados necessários para efetuar a previsão desejada do local onde a água se encontra em dois cenários de acordo com o consumo da população - época alta e época baixa. Esta decisão baseou-se no facto de que se pretende que este modelo se apresente como uma ferramenta de auxílio para a análise rápida e eficaz de eventuais problemas que possam decorrer na distribuição de água e, também, que seja de fácil compreensão e manuseamento para que qualquer profissional esteja apto a fazer qualquer alteração ou correção de acordo com o cenário do momento.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se organizada em 5 capítulos.

No capítulo 1 faz-se uma breve introdução à importância da água, realçando-se a importância da existência de um modelo de simulação da velocidade de escoamento da mesma que permita prever onde esta se encontra ao longo da rede de distribuição, bem como de um modelo de decaimento de cloro que permita prever o seu decaimento ao longo da mesma rede de distribuição. Neste capítulo, foram ainda incluídos os objetivos da presente dissertação.

No capítulo 2 é feita uma breve apresentação da Empresa Águas do Norte, S.A., incluindo-se a descrição das etapas de tratamento da água do subsistema estudado, acompanhada da descrição do sistema adutor. Este capítulo inclui ainda a temática da qualidade da água em sistemas de abastecimento, bem como a legislação aplicada e, ainda, a política utilizada pela empresa Águas do

Norte, S.A. para garantir a qualidade da água que fornece. São também apresentados os fatores que afetam a qualidade da água e quais os que serão abordados em maior detalhe na presente dissertação.

O capítulo 3 caracteriza o escoamento do sistema adutor da ETA estudada. É apresentada a importância de conhecer a velocidade de escoamento bem como o tempo médio de percurso da água. Neste capítulo faz-se também referência às perdas de carga no sistema, contínuas e localizadas, assim como a fórmula que permite determiná-las. É ainda incluída a modelação da velocidade de escoamento e do tempo médio de percurso da água estando também presente a modelação da velocidade considerando as perdas de carga contínuas. As modelações de cada parâmetro anteriormente mencionado são acompanhadas por uma análise das condições de escoamento presentes no subsistema estudado.

O capítulo 4 é dedicado ao decaimento de cloro, tanto no seio líquido como no seio da tubagem, sendo apresentadas fórmulas que permitem o cálculo de cada um. É ainda descrito o método utilizado para calcular o decaimento de cloro no seio líquido assim como é feita uma análise dos resultados obtidos. Para o decaimento de cloro no seio da tubagem apresenta-se a pesquisa bibliográfica realizada.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da presente dissertação, bem como as perspetivas futuras.

2 SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

2.1 HISTORIAL E CARACTERIZAÇÃO DA EMPRESA ÁGUAS DO NORTE, S.A.

A empresa Águas do Norte, S.A. (AdNorte), cujo logótipo se apresenta na Figura 1, surgiu da agregação das empresas Águas do Douro e Paiva, 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, segundo o Decreto-Lei n.º 93/2015 de 29 de maio. O Estado Português, como consequência da agregação das várias empresas, conferiu-lhes, em título exclusivo, a concessão da exploração e da gestão do sistema multimunicipal de abastecimento de água e de saneamento do Norte de Portugal pelo prazo de trinta anos [5].

Mais tarde, ocorreu a cisão por parte das empresas Águas do Douro e Paiva, S.A. e SIMDOURO – Saneamento do Grande Porto, S.A. do sistema multimunicipal de abastecimento de água e saneamento do Norte de Portugal dando origem ao sistema multimunicipal de abastecimento de água do sul do Grande Porto e ao sistema multimunicipal de saneamento do Grande Porto, a 1 de fevereiro de 2017, segundo o Decreto-Lei n.º 16/2017 [5].



Figura 1. Logótipo empresa Águas do Norte, S.A. [5].

Atualmente, a Águas do Norte, S.A. é a entidade distribuidora em “alta” (prestado aos municípios) de um sistema multimunicipal que inclui sessenta e três municípios sendo responsável pela captação, tratamento e abastecimento de água para consumo público, assim como pela recolha, tratamento e rejeição de efluentes domésticos, urbanos e industriais e de efluentes provenientes de fossas sépticas. Dentro dos sessenta e três municípios, em cinquenta e dois deles são efetuados serviços de abastecimento e saneamento, em dois apenas serviços de abastecimento e em nove apenas serviços de saneamento [6].

Esta entidade, também é responsável pela exploração e gestão do sistema de águas da região do Noroeste que resulta de uma parceria entre o Estado e oito municípios que concretiza um processo de verticalização que reuniu, numa única entidade distribuidora, os serviços de abastecimento de água e de saneamento de águas residuais em “alta” e em “baixa” (prestados aos utilizadores finais – os municípios) [5,6].

A empresa Águas do Norte inclui dez centros de exploração, do qual se destaca o Centro de Exploração X, ao qual pertence o subsistema X que irá ser apresentado e analisado com mais detalhe na presente dissertação.

O subsistema estudado é composto por uma ETA e um sistema adutor constituído por trinta e duas estações elevatórias, oitenta e quatro reservatórios e, aproximadamente, trezentos e oitenta e cinco quilómetros de conduta.

A ETA, que iniciou a sua atividade em 1999, capta e trata água proveniente do rio X destinada ao abastecimento em “baixa” dos oito municípios.

Ainda que o foco desta dissertação seja o sistema adutor do presente subsistema, julgou-se importante conhecer também as etapas de tratamento da água desde a sua captação até à sua distribuição.

De forma a garantir que a água distribuída aos clientes respeita os parâmetros legislados, é necessário que a água captada do rio X seja sujeita a várias etapas de tratamento descritas na Figura 2 [7].

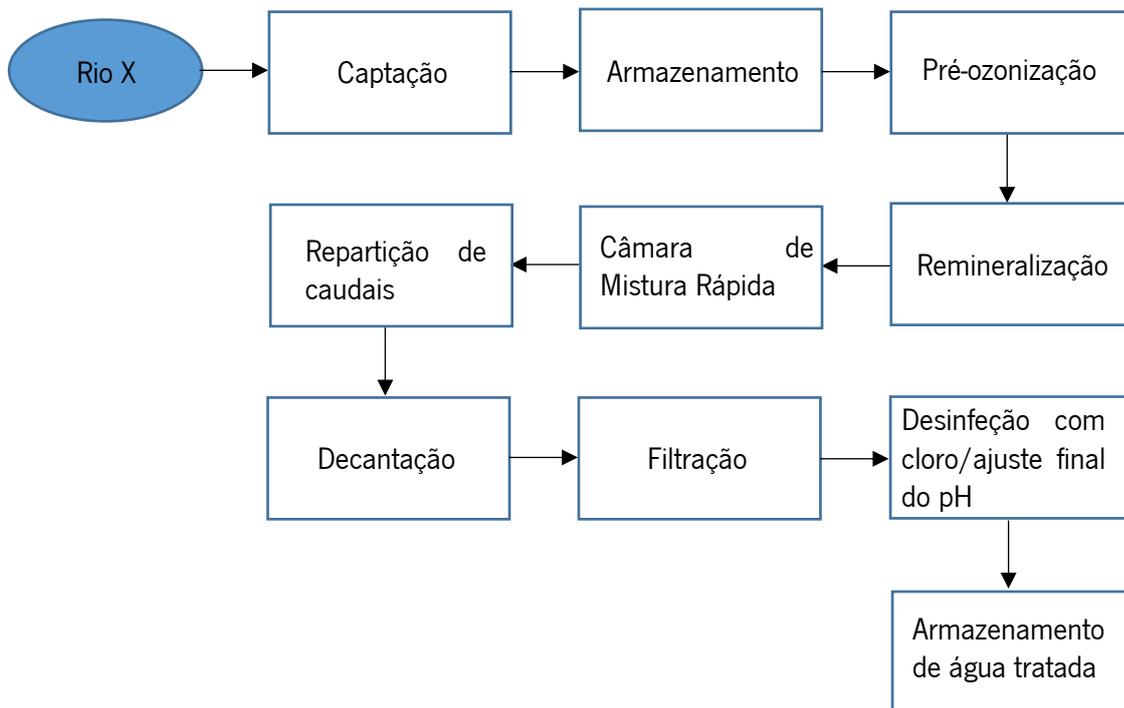


Figura 2. Etapas de tratamento da ETA X.

2.2 ETAPAS DE TRATAMENTO DA ETA X

A captação de água do rio X é feita superficialmente numa albufeira através de quatro grupos eletrobomba, denominadas por Estação Elevatória 1 (EE01), representadas na Figura 3, que captam a água bruta (AB) e a endereçam para dois reservatórios de água bruta (RAB) existentes, onde esta fica armazenada. Cada Estação Elevatória tem a capacidade unitária de captação de $0,95 \text{ m}^3/\text{s}$, podendo funcionar isoladamente ou em simultâneo de acordo com as necessidades exigidas [8].



Figura 3. Grupos eletrobomba responsáveis pela captação de água.

O armazenamento de água bruta é feito pelos RAB que possuem uma capacidade total de $175\ 000 \text{ m}^3$. Este volume é equivalente a vinte e quatro horas de reserva, permitindo garantir o abastecimento da população em períodos problemáticos causados por poluição, avarias ou eventuais problemas que possam surgir [7].

Em cada RAB existe um septo central que tem como intuito obrigar a água a circular, de forma que possa haver equilíbrio entre água que entra no reservatório e a água que já se encontra há mais tempo armazenada, fazendo com que esta última seja a primeira a sair [8].

A cada RAB estão associadas quatro grupos eletrobomba, denominadas de Estação Elevatória 2 (EE02), ligadas a dois variadores de frequência distintas que tem por objetivo fazer a ligação entre os RAB e as linhas de tratamento da ETA X [8].

Antes de prosseguir para a primeira etapa de tratamento, a Pré-ozonização, a água pode ser dividida por duas linhas de tratamento (LT1/LT2), que funcionam de igual forma, ou apenas ser encaminhada para uma, dependendo das necessidades de abastecimento. Por norma, na época baixa, correspondente aos meses de outubro a junho, apenas funciona uma linha de tratamento, entrando a segunda linha em funcionamento na época alta, correspondente aos meses de julho a setembro, uma vez que existe necessidade de tratar um maior volume de água, devido ao aumento de consumo resultante de temperaturas mais elevadas. Contudo, estes períodos podem sofrer ligeiras alterações de acordo com o

clima de cada ano. A entrada da água em cada LT é controlada por electroválvulas que se encontram nas torres de Pré-ozonização, sendo também o caudal controlado por dois medidores de caudal, um em cada LT. Desta forma, se a água percorrer apenas uma linha de tratamento (por exemplo, LT1), o seu percurso será: Torre Pré-ozonização 1, seguida de Tanque de remineralização 1 e, por fim, Câmara de mistura rápida 1, seguindo depois a água para o Tanque repartidor de caudais e, posteriormente, para as restantes etapas de tratamento [8].

A ozonização como pré-tratamento assume-se como uma opção viável uma vez que permite uma desinfeção preliminar e é uma técnica recorrente na descontaminação de água para consumo humano. Simultaneamente, o ozono, por ser um forte oxidante, reage com compostos orgânicos, micro poluentes e metais presentes na água bruta promovendo a remoção de matéria orgânica, turbidez e características organoléticas, nomeadamente a cor, cheiro e sabor [9,10].

Através de difusores porosos presentes no fundo das torres de Pré-ozonização (Figura 4), ocorre a injeção de ozono promovendo, assim, a primeira etapa de tratamento da água bruta [8].

Finalizada a primeira etapa, a água segue para um compartimento onde sofre remineralização.



Figura 4. Torre de contacto com o ozono.

A etapa de remineralização tem por objetivo a correção da agressividade e do pH da água de forma a torná-la menos agressiva para as condutas, elevando a sua alcalinidade e dureza. A remineralização é feita através da adição leite de cal (Figura 5) e de dióxido de carbono (Figura 6) de forma a restituir o equilíbrio mineral calco-carbónico [12,13].

É na Câmara de mistura rápida, apresentada na Figura 7, que ocorre o processo de coagulação. Nesta etapa, adiciona-se de um coagulante para eliminar a carga electrostática negativa das partículas coloidais, neutralizando-as, diminuindo assim a repulsão entre as mesmas. Através de agitação rápida, é promovida a dispersão do coagulante e o choque entre essas partículas, promovendo a destabilização dos coloides em suspensão [13]. O coagulante utilizado atualmente é o PAX XL 315.



Figura 5. Adição de leite de cal.



Figura 6. Tanque de contacto com dióxido de carbono.

Na Câmara de mistura rápida, ocorre ainda a adição de carvão ativado em pó que, por adsorção, permite a fixação à sua superfície de moléculas orgânicas, especialmente, micro poluentes, metais, bem como sabores e odores inconvenientes. A adição de carvão ativado é feita somente quando a qualidade da água o exige. A água que sai desta etapa segue para o tanque repartidor de caudais.

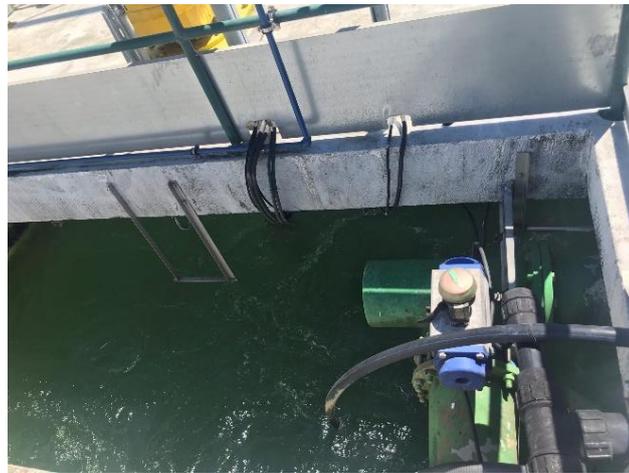


Figura 7. Câmara de mistura rápida.

No canal de repartição de caudais (Figura 8), ocorre a junção da água de ambas as linhas de tratamento. Nesta etapa, ocorre a floculação através da adição do polieletrólito Tefloc 25 PWG.

O processo de floculação tem por objetivo a agregação das partículas neutralizadas com a adição do coagulante promovendo a formação de flocos, que gradualmente aumentam de peso e tamanho e acabam por sedimentar, sendo posteriormente, removidos por decantação ou filtração [13].

Terminada esta etapa a água segue para os decantadores. A água proveniente das Câmaras de mistura rápida entra no fundo dos quatro decantadores existentes.



Figura 8. Tanque repartidor de caudais.

Os decantadores (Figura 9) são constituídos por lamelas orientadas na diagonal para facilitar a decantação das partículas sólidas. A velocidade da água é estabelecida de forma que não seja rápida o suficiente impedindo a sedimentação das partículas e não seja lenta o suficiente para causar a colmatação das lamelas.

Na parte superior dos decantadores, existem caleiras que permitem a recolha uniforme da água após a sedimentação.

As lamas em excesso existentes em cada decantador são descarregadas para um local próprio no exterior, sendo essa descarga controlada por quatro válvulas existentes em cada decantador.



Figura 9. Decantadores.

Após a decantação, a água segue para os seis filtros de areia existentes (Figura 10) para remoção de partículas que não foram removidas anteriormente.

A água entra pela parte superior do filtro e é obrigada a atravessar uma camada filtrante de areia calibrada. É de extrema importância que a areia presente nos filtros seja calibrada de forma a evitar a

formação de canais de filtração preferenciais ou entupimentos, o que levaria à diminuição da eficiência desta etapa.

No caso de ocorrência de colmatação da camada filtrante, o nível da água nos filtros sobe e é acionada automaticamente uma lavagem. A água de lavagem dos filtros é posteriormente recirculada para as Câmaras de mistura rápida ficando, primeiramente, armazenadas em cisternas de água (Figura 11).



Figura 10. Filtro de areia.



Figura 11. Cisterna de água de lavagem de filtros.

Após a filtração, a água é encaminhada para os dois Tanques de contacto com o cloro.

A desinfecção por cloro tem como intuito a eliminação ou inativação de microrganismos patogénicos que possam ainda encontrar-se na água. Como existe uma parte do cloro que não reage e fica sob forma de “cloro residual livre”, agindo como controlo microbiológico, este processo mostra-se vantajoso uma vez que permite prevenir a eventual degradação da qualidade da água ao longo da distribuição [3,14,15].

A desinfecção final da água é feita através da injeção de uma solução de cloro gasoso no início de cada tanque de contacto com cloro. O doseamento de cloro é efetuado por dois de três clorómetros disponíveis [8]. O ajuste final do pH é realizado à saída de cada tanque de contacto com cloro através da injeção de água de cal.

Finalizada esta etapa, a água tratada segue para os Reservatórios de Água Tratada (RAT) que possuem uma capacidade total de 20 000 m³. Dos RAT, a água é posteriormente enviada, através de uma Estação Elevatória (EE1), para o Reservatório (RE) 2 onde, depois, é distribuída através do sistema adutor.

2.3 QUALIDADE DA ÁGUA EM SISTEMAS DE ABASTECIMENTO

Sendo a água um bem essencial, torna-se indispensável a sua presença no nosso dia a dia. Contudo, com as crescentes preocupações ambientais que temos vindo a acompanhar e com o crescente aumento da população, existe uma progressiva preocupação com a disponibilidade de água potável.

Segundo o Despacho n.º 2064/2021 considera-se “água potável toda a água no seu estado original, ou após tratamento, destinada a ser bebida, a cozinhar, à preparação de alimentos, à higiene pessoal ou a outros fins domésticos independentemente da sua origem e de ser fornecida a partir de uma rede de distribuição, de um camião ou navio-cisterna, em garrafas ou outros recipientes, com ou sem fins comerciais” [16].

As entidades responsáveis pelo abastecimento de água têm-se empenhado em realizar uma gestão racional e otimizada da água de forma a que possam prestar serviços de abastecimento de água com a maior qualidade e o menor desperdício da mesma.

Segundo a ERSAR, em 2020 constatou-se, em Portugal, um indicador de água segura de 99 % garantindo, assim, a segurança no consumo de água da torneira por parte da população. Este indicador de segurança é determinado pelo produto da percentagem de cumprimento da frequência de amostragem pela percentagem dos valores paramétricos fixados na legislação [17].

A teoria de que a qualidade de água abastecida tem vindo a melhorar ao longo dos anos pode ser corroborada pela Figura 12, em que se observam valores do indicador de água segura na ordem dos 50 %, para o ano de 1993, tendo estes valores sido, ano após ano, superados [17].

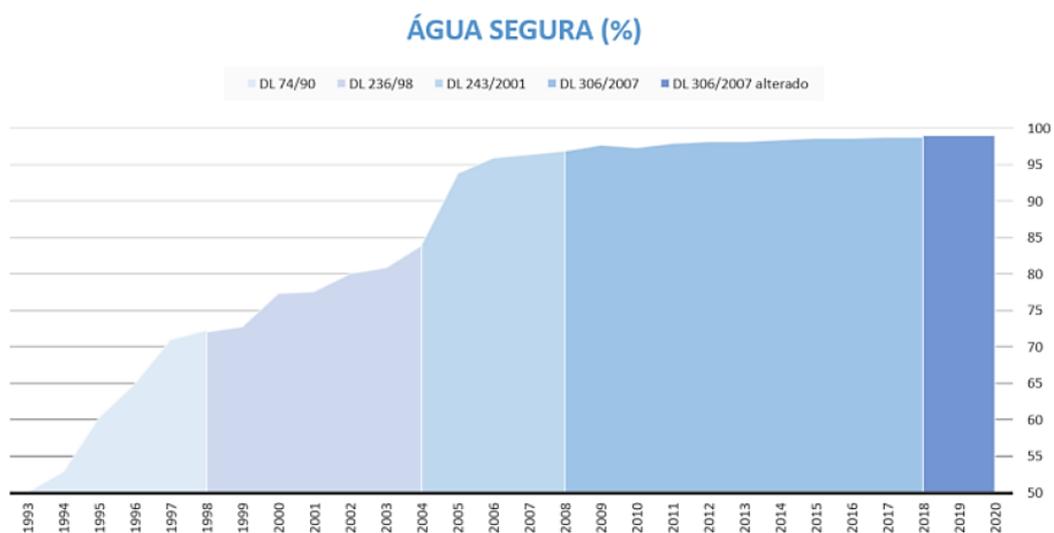


Figura 12. Evolução do indicador de água segura desde 1993 até 2020 [17].

2.4 LEGISLAÇÃO APLICADA A ÁGUA DE CONSUMO

De forma a garantir que a água consumida não representa perigo para a saúde pública, é necessário que esta obedeça a valores paramétricos que se encontram legislados no Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de agosto, presentes na Tabela 1.

Tabela 1. Valores paramétricos dos parâmetros indicadores para água destinada ao consumo humano segundo o Decreto-Lei n.º 306/207, de 27 de agosto [18]

Parâmetro indicador	Valor paramétrico	Unidades
Alumínio	200	µg/L
Amónio	0,50	mg/L
Cálcio	-	mg/L
Cloretos	250	mg/L
<i>Clostridium perfringens</i> (incluindo esporos)	0	N/100 mL
Cor	20	mg/L
Condutividade	2500	µS/cm a 20 °C
Dureza Total	-	mg/L
pH	≥ 6,5 e ≤ 9	unidades de pH
Ferro	200	µg/L
Magnésio	-	mg/L
Manganês	50	mg/L
Microcistinas – LR total	1	µg/L
Cheiro, a 25 °C	3	Fator de diluição
Oxidabilidade	5	mg/L
Sulfatos	250	mg/L
Sódio	200	mg/L
Sabor, a 25 °C	3	Fator de diluição
Número de colónias	Sem alteração normal	N/mL a 22 °C
Número de colónias	Sem alteração normal	N/mL a 37 °C
Bactérias coliformes	0	N/100 mL
Carbono orgânico total (COT)	Sem alteração normal	mg/L
Turvação	4	UNT
α-total	0,5	Bq/L
β-total	1	Bq/L
Tritio	100	Bq/L
Dose indicativa total	0,10	mSv/ano
Desinfetante residual	-	µg/L

Apesar dos valores paramétricos de cálcio, dureza total, magnésio e desinfetante residual não se encontrarem estipulados na Tabela 1, o Decreto-Lei anteriormente mencionado, afirma que não é desejável que a concentração de cálcio e magnésio seja superior a 100 mg/L Ca e a 50 mg/L Mg, respetivamente. O mesmo Decreto-Lei declara, ainda, que é desejável que a dureza total em carbonato de cálcio esteja compreendida entre 150 mg/L e 500 mg/L CaCO₃ [18].

No Decreto-Lei n.º 306/2007 de 27 de agosto, encontram-se ainda, fixados os valores paramétricos dos parâmetros microbiológicos e químicos para água destinada a consumo humano fornecida por redes de distribuição, por fontanários não ligados à rede de distribuição, por pontos de entrega, por camiões ou por navios-cisterna, por reservatórios não ligados à rede de distribuição ou utilizada numa empresa da indústria alimentar. Esses valores podem ser encontrados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores paramétricos dos parâmetros microbiológicos e químicos para água destinada ao consumo humano segundo o Decreto-Lei n.º 306/207 de 27 de agosto [18]

Parâmetro	Valor Paramétrico	Unidades
Parâmetro Microbiológico		
<i>Escherichia coli (E.coli)</i>	0	Número/100 mL
<i>Enterococos</i>	0	Número/100 mL
Parâmetro Químico		
Acrilamida	0,10	µg/L
Antimónio	5,0	µg/L
Arsénio	10	µg/L
Benzeno	1,0	µg/L
Benzeno(a)pireno	0,010	µg/L
Boro	1,0	µg/L
Bromatos	10	µg/L
Cádmio	5,0	µg/L
Crómio	50	µg/L
Cobre	2,0	µg/L
Cianetos	50	µg/L
1,2 dicloetano	3,0	µg/L
Epicloridrina	0,10	µg/L
Fluoretos	1,5	µg/L
Chumbo	10	µg/L
Mercúrio	1	µg/L
Níquel	20	µg/L
Nitratos	50	µg/L
Nitritos	0,5	µg/L
Pesticida individual	0,10	µg/L
Pesticida total	0,50	µg/L
Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP)	0,10	µg/L
Selénio	10	µg/L
Tetracloroeteno e tricloroeteno	10	µg/L
Trihalometanos – total (THM)	100	µg/L
Cloreto de vinilo	0,5	µg/L

2.5 QUALIDADE DA ÁGUA NAS ÁGUAS DO NORTE, S.A.

A empresa Águas do Norte, S.A. preocupa-se em garantir a qualidade da água até que esta chegue ao consumidor. Deste modo, com vista a avaliar a conformidade da mesma com os parâmetros legislados, esta empresa implementou um Programa de Controlo de Qualidade da água (PCQA) que se rege pelos requisitos impostos no Decreto-Lei n.º 306/2007, de 27 de agosto, que regulamenta os valores de qualidade da água para consumo humano.

Todos os anos, é necessário efetuar análises representativas que comprovem a conformidade da água com os parâmetros legislados. Estas análises são feitas a amostras recolhidas nos pontos de entrega a outras entidades distribuidoras e na torneira do consumidor. As amostras de água são avaliadas em laboratórios previamente aprovados pela ERSAR e, se se comprovar a conformidade com os requisitos legais, o PCQA é aprovado [19].

2.6 FATORES QUE AFETAM A QUALIDADE DA ÁGUA

Apesar da água ser submetida a tratamento após a sua captação, existem fatores que influenciam a qualidade da água ao longo da rede de distribuição, podendo destacar-se [20]:

- A distância da ETA ao reservatório ou ponto de entrega de destino, uma vez que quanto maior o intervalo de tempo entre o tratamento e consumo de água, maior se torna a incerteza de cumprimento de todos os parâmetros legislados;
- O material da tubagem, já que pode influenciar na perda de carga, tendo em conta a sua rugosidade, ou reagir com a água;
- As condições hidrodinâmicas, nomeadamente a velocidade de escoamento e o caudal;
- O tempo de residência, quer nas tubagens quer no reservatório, levando novamente, à incerteza de cumprimentos dos parâmetros estipulados caso a água fique imóvel durante um longo período de tempo;
- O teor em cloro residual, uma vez que quanto mais longe do ponto de cloração, menor é o teor residual em desinfetante, tornando ineficaz a ação contra a proliferação de atividade microbiana;
- Estação do ano/temperatura, já que estes dois parâmetros influenciam o consumo e o decaimento em cloro.

Na presente dissertação, o estudo irá focar-se na velocidade de escoamento e no decaimento de cloro até este atingir um teor residual uma vez que são os fatores que têm maior relevância na análise do comportamento da água ao longo do sistema adutor do subsistema X.

3 CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO DA ETA X

3.1 VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO

Num sistema de distribuição de água assume-se, por norma, que o escoamento é uniforme e invariável ao longo do tempo e espaço, isto é, permanente. Tal, deve-se ao facto das variações das características do escoamento ocorrerem de forma lenta e contínua, não levando a introdução de erros significativos quando esta suposição é feita [21].

Perante escoamentos permanentes, é aplicada a equação seguinte que permite determinar a velocidade média de escoamento:

$$u = \frac{q}{A} \quad \text{Equação 1}$$

Em que: u corresponde à velocidade de escoamento (m/s); q corresponde ao caudal (m³/s) e A diz respeito à área da secção transversal da conduta (m²).

A área da secção transversal da conduta, de geometria circular, é calculada através da Equação 2.

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

A – área da secção transversal (m²);

d – Diâmetro da tubagem (m).

3.2 MODELAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO

O primeiro passo para a construção do modelo compreendeu a recolha dos valores de diâmetro comprimento, material e pressão nominal, quando necessário, das tubagens de todo o sistema adutor. Para tal, recorreu-se a uma plataforma denominada “Cadastro de Abastecimento de Água” da empresa Águas do Norte (Figura 13). A rede de abastecimento é essencialmente constituída por condutas de ferro fundido dúctil (FFD), porém existem também condutas de aço (AC), polietileno de alta densidade (PEAD) e policloreto de vinilo (PVC). Os valores de diâmetro consultados no “Cadastro” para as condutas de PEAD e PVC indicam o diâmetro externo pelo que houve a necessidade de determinar o diâmetro interno. Para tal, foi consultado o catálogo das empresas Alfatubo e Sival, produtoras de tubos de PEAD e PVC respetivamente, e foi consultado o valor da espessura de cada tudo de acordo com a respetiva pressão nominal que, posteriormente, foi retirado ao valor do diâmetro externo, consultado na plataforma da empresa, obtendo-se assim o valor de diâmetro interno. Após a recolha de toda a informação, construiu-se um fluxograma, numa folha de cálculo, onde está desenhado todo o sistema adutor e foram compilados todos os dados.

Adutor / IPID: 7977633

Comprimento (m)	1534.02
Comprimento real (m)	0
Declive (%)	0
Designação de adutor	CE EVI-RAD
Diâmetro / Dimensão maior (mm)	1400
Diâmetro nominal	0
Dimensão da secção (mm)	1400
Dimensão menor (mm)	0
Estado operacional	Aberta

Figura 13. Excerto da informação acerca do troço que se inicia na EE da ETA X (EVI) e termina no reservatório 2 (RAD) que pode ser consultada no Cadastro de Abastecimento de Água da AdNorte.

Este documento contém, para além dos dados anteriormente mencionados (diâmetro, comprimento, material das condutas, etc.), o número de células de cada reservatório, os pontos de entrega e o caudal das bombas elevatórias recolhidos por consulta do sinótico do sistema de telegestão deste Sistema Adutor e, também, os medidores de caudal existentes em cada reservatório. Excertos deste fluxograma podem ser consultados no Anexo I.

Para além do conhecimento das características do sistema adutor, foram também consultados os volumes de água consumidos pela população uma vez que este fator influencia os dois parâmetros que se encontram em análise. Através dos dados de faturação, foi possível obter o volume de água consumido mensalmente. Foram estabelecidos dois cenários de consumo devido à diferença de valores de consumos que se observa ao longo do ano - um correspondente à época alta, de julho a setembro, e outro correspondente à época baixa, onde se incluiu os restantes meses. Para se conhecer o consumo mensal em ambos os cenários fez-se uma média dos volumes consumidos nos meses correspondentes às respetivas épocas e, para se ter uma ideia do consumo diário, dividiu-se o consumo mensal pelo número de dias presentes no calendário de faturação.

Para o cálculo da velocidade de escoamento, foi necessário saber primeiro o caudal total que percorre cada conduta. Para tal, consideraram-se dois cenários: troços com estações elevatórias e troços sem estações elevatórias. Nos troços com estações elevatórias, foi considerado o caudal das bombas elevatórias, uma vez que esse caudal é regulado de acordo com as necessidades de consumo no momento. Desta forma, consultou-se o período de tempo em que as bombas trabalhavam durante o dia e qual o seu caudal e, após a multiplicação do caudal elevado pela bomba pelas horas em que a bomba se encontrava a trabalhar obteve-se o caudal total elevado num dia. A partir deste valor, fez-se uma divisão pelas vinte e quatro horas que completam um dia obtendo-se o caudal médio horário.

Nos troços sem estações elevatórias, fez-se a soma dos consumos dos reservatórios ou pontos de entrega que se encontram a jusante. Para o cálculo dos consumos, foi consultado o valor mensal faturado

em cada um dos casos e, posteriormente, foi feita a divisão pelos dias correspondentes ao calendário de faturação. Para obter o caudal médio horário foi feita a divisão do consumo diário por vinte e quatro horas.

Exemplificando, pela análise da Figura 14, é possível verificar que existem dois troços com estações elevatórias (a estação elevatória encontra-se representada pelo triângulo vermelho), um troço que se inicia no reservatório 2, tendo como destino o reservatório 47, e outro que se inicia no reservatório 14 e termina no reservatório 13. Em ambos os troços, o caudal que se considera que escoar na conduta é o caudal da bomba elevatória. No troço que se inicia no reservatório de 47 até NHS é considerado o caudal necessário para abastecer o reservatório que se encontra a jusante, isto é, é considerado o consumo do reservatório 42, o consumo do reservatório 14 e, ainda, o caudal da Elevatória 14. Os troços encontram-se numerados de forma alfabética.

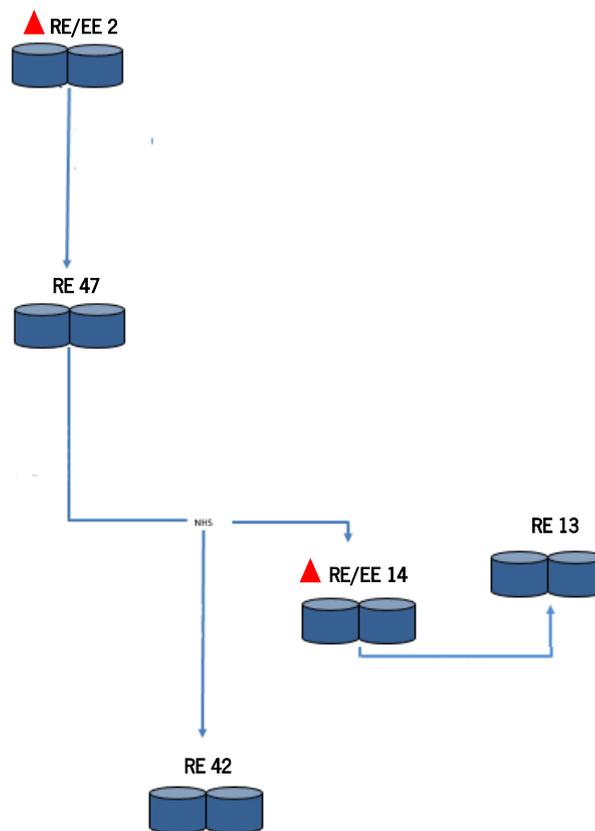


Figura 14. Excerto da rede de distribuição.

Em todos os troços foi considerado que não existiam perdas de água ao longo da conduta nem formação de depósitos, isto é, as condições de escoamento mantêm-se inalteradas ao longo do escoamento.

Conhecido o caudal e as dimensões de cada conduta foi possível aplicar a Equação 1 e a Equação 2 e determinar a velocidade média de escoamento ao longo de todas as condutas do sistema adutor.

Decidiu-se também estudar o regime de escoamento da água de forma a perceber o seu comportamento ao longo do escoamento através do número de *Reynolds* (*Re*) descrito na Equação 3. Para época baixa, considerou-se a temperatura da água a 15 °C e, para época alta, considerou-se 20 °C para a temperatura da mesma. Desta forma, classificou-se como regime laminar quando $Re \leq 2100$, regime de transição quando $2100 < Re < 4000$ e regime turbulento quando $Re \geq 4000$ [22].

$$Re = \frac{u \cdot d \cdot \rho}{\mu} \quad \text{Equação 3}$$

Onde: *u* corresponde à velocidade média de escoamento (m/s), *d* corresponde ao diâmetro da conduta (m), ρ diz respeito à densidade da água (kg/m³) e μ à viscosidade da água (Pa·s).

De uma forma sintética, as características de escoamento do subsistema X podem ser consultadas na Tabela 3.

Tabela 3. Características do escoamento na rede de distribuição

	Época Baixa	Época Alta
Duração	outubro 2020 a junho 2021	julho 2021 a setembro 2021
Gama de caudais médios / (m ³ /h)	0,08 a 3437	0,07 a 3989
Gama de caudais predominantes / (m ³ /h)	0 a 80 (61,93 % dos troços)	0 a 80 (55,33 % dos troços)
Gama de caudais em minoria / (m ³ /h)	80 a 460 (27,41 % dos troços) 460 a 980 (4,06 % dos troços) 1240 a 3437 (6,60 % dos troços)	80 a 460 (27,92 % dos troços) 460 a 840 (8,12 % dos troços) 1000 a 3989 (8,63 % dos troços)
Gama de velocidades médias / (m/s)	0,0003 a 1,43	0,0003 a 2,32
Gama de velocidades predominantes / (m/s)	0 a 0,20 (46,70 % dos troços) 0,20 a 0,40 (29,95 % dos troços) 0,40 a 0,60 (12,18 % dos troços) 0,60 a 0,80 (9,64 % dos troços)	0 a 0,20 (39,09 % dos troços) 0,20 a 0,40 (30,47 % dos troços) 0,40 a 0,60 (11,68 % dos troços) 0,60 a 0,80 (8,63 % dos troços)
Gama de velocidades em minoria / (m/s)	0,80 a 1,43 (1,52 % dos troços)	0,80 a 2,32 (10,15 % dos troços)
Regime de escoamento	Laminar (4,06 % dos troços) Transição (1,52 % dos troços) Turbulento (94,42 % dos troços)	Laminar (1,52 % dos troços) Transição (4,06 % dos troços) Turbulento (94,42 % dos troços)
Gama de diâmetro / mm	80 a 1400	
Diâmetros predominantes / mm	100 (7,61 % dos troços) 150 (10,60 % dos troços) 200 (20,30 % dos troços) 250 (11,17 % dos troços) 300 (5,58 % dos troços)	350 (5,58 % dos troços) 400 (9,14 % dos troços) 600 (8,12 % dos troços) 700 (8,12 % dos troços) 1000 (5,08 % dos troços)
Diâmetros em minoria / mm	80 (0,51 % dos troços) 98 (0,51 % dos troços) 108 (1,02 % dos troços) 125 (0,51 % dos troços) 128 (0,51 % dos troços) 196 (0,51 % dos troços)	232 (0,51 % dos troços) 236 (0,51 % dos troços) 500 (2,03 % dos troços) 1200 (0,51 % dos troços) 1400 (1,52 % dos troços)

Observando a Tabela 3 é possível verificar as diferenças entre época baixa e época alta. Tendo em conta que a época alta corresponde aos meses de temperaturas mais elevadas, é de esperar um maior consumo de água por parte da população. Este facto, reflete-se na diferença de caudal máximo que se verifica entre as duas épocas, sendo o caudal da época alta consideravelmente superior. Consequentemente, quanto maior o caudal da água consumido, maior é a velocidade a que a água escoar nas condutas de forma a satisfazer as necessidades de consumo, obrigando a que se verifica também diferença na velocidade máxima atingida nas duas épocas estudadas. Verifica-se ainda que, nas duas épocas estudadas, a maioria dos caudais médios de escoamento se situam nas gamas entre 0 e 80 m³/h, obtendo-se aproximadamente 62 % e 56 % dos troços para época baixa e época alta, respetivamente. Para ambas as épocas, aproximadamente 28 % dos troços encontra-se na gama entre 80 m³/h e 460 m³/h. Existe uma minoria de número de troços que se situam nas gamas mais altas de caudal sendo que a época baixa apresenta aproximadamente 11 % dos troços entre 460 m³/h e 3437 m³/h. Por sua vez, no caso da época alta, aproximadamente 17 % dos troços situa-se nas gamas mais altas de caudal que se situam entre 460 m³/h e 3989 m³/h.

É possível constatar que, para ambas as épocas, a velocidade média de escoamento predominante em todos os troços é entre 0 m/s e 0,20 m/s, seguida da gama entre 0,20 m/s e 0,40 m/s. Contudo, existe uma exceção em que a velocidade média de escoamento atinge os 46,90 m/s e 43,79 m/s para época baixa e época alta, respetivamente. Tal deve-se ao facto de que o troço em questão, que inicia na EE 8 e termina no RE 8, apresentar um diâmetro reduzido (100 mm) e um caudal elevado (1326,04 m³/h para época baixa e 1238,20 m³/h para época alta).

Em ambas as épocas predomina o regime turbulento que indica uma velocidade de escoamento elevada, o que vai de encontro ao esperado uma vez numa rede de distribuição de uma entidade distribuidora de água, a mesma circula a velocidades elevadas. Por sua vez, existem troços em que se verifica um regime laminar, 8 troços para época baixa e 3 troços para época alta, indicando que a velocidade de escoamento é baixa. Verificam-se 3 troços e 8 troços ainda em regime de transição para época baixa e época alta, respetivamente. Os troços que se encontram nos regimes laminar e de transição são os mesmos para ambas as épocas oscilando apenas entre os regimes de acordo com a velocidade de escoamento. Estes correspondem a reservatórios e a nós em que o consumo de água é muito reduzido levando, portanto, a uma velocidade de escoamento reduzida.

Os cálculos da velocidade de escoamento bem como das variáveis necessárias ao seu cálculo podem ser consultados desde o Anexo II ao Anexo VI.

3.3 PERDAS DE CARGA

Em condutas sob pressão existem condições para que ocorram perdas de energia ao longo do escoamento. Estas perdas são influenciadas por diversos fatores, entre eles: viscosidade do líquido, rugosidade das condutas e comportamento dos troços da rede, como por exemplo, mudança de direção, alargamento ou estreitamento de conduta. As perdas de carga dividem-se em dois grupos distintos: perdas localizadas (ΔH_l) e perdas contínuas (ΔH_c), traduzindo a sua soma, o total das perdas de carga [23].

$$\Delta H = \Delta H_c + \Delta H_l \quad \text{Equação 4}$$

Onde, as unidades das variáveis são: ΔH (m), ΔH_c (m) e ΔH_l (m).

3.3.1 PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS

As perdas de carga contínuas resultam de fenómenos de atrito entre as paredes da conduta e o conteúdo que nela percorre, ao longo de todo o seu comprimento. No programa de modelação hidráulica EPANET, utilizado por entidades distribuidoras de abastecimento de água, são disponibilizadas três fórmulas para o cálculo da perda de carga: *Hazen-Williams*, *Darcy-Weisbach* e *Chezy-Manning*. Apesar de, na presente dissertação, não se recorrer a este programa para efetuar a modelação, decidiu-se considerar uma das três fórmulas estabelecidas pelo mesmo. Optou-se pela fórmula de *Hazen-Williams* uma vez que é a mais utilizada neste âmbito em trabalhos semelhantes [23,24,25,26,27,28].

Desta forma, as perdas de carga contínuas podem ser calculada do seguinte modo [30]:

$$\Delta H_c = 10,65 \cdot \frac{q^{1,852}}{C^{1,852}} \cdot \frac{L}{d^{4,871}} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

q – Caudal (m³/s);

C – Coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* (adimensional);

d – Diâmetro da tubagem (m);

L – Comprimento da tubagem (m).

Para ferro fundido, segundo o programa de modelação hidráulica EPANET, o coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* pode variar entre 130 e 140 [24].

3.3.2 MODELAÇÃO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO CONSIDERANDO AS PERDAS DE CARGA CONTÍNUAS

A empresa AdNorte, por norma, não considera as perdas de carga nos seus projetos de modelação hidráulica, exemplo disso, é o projeto de Avaliação Técnico-Económica de Oportunidades de Otimização do Funcionamento Hidráulico do Subsistema X desenvolvido em conjunto com a empresa Fisaqua, realizado aquando da escrita da presente dissertação. Contudo, como forma de sustentar a escolha feita, foram calculadas as perdas de carga ao longo do sistema. Calculou-se, primeiro, a perda de carga unitária com recurso à Equação 6 [31].

$$J = \frac{\Delta H_c}{L} \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

J – Perda de carga unitária (m/m);

ΔH_c – Perda de carga contínua (m);

L – Comprimento da tubagem (m).

De seguida, calculou-se a velocidade média de escoamento considerando as perdas de carga recorrendo à Equação 7 [31].

$$u = 0,355 \cdot C \cdot d^{0,63} \cdot J^{0,54} \quad \text{Equação 7}$$

Onde: C diz respeito ao coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams* (adimensional); d ao diâmetro da tubagem (m) e J à perda de carga unitária (m/m).

Na Tabela 4 encontram-se descritas as características de escoamento considerando as perdas de carga contínuas no cálculo da velocidade média de escoamento.

Tabela 4. Características de escoamento considerando perdas de carga contínuas

Perdas de carga contínuas	Época Baixa		Época Alta	
	Não consideradas	Consideradas	Não consideradas	Consideradas
Gama de velocidades médias / (m/s)	0,0003 a 1,43	0,0003 a 1,43	0,0003 a 2,32	0,0003 a 2,32
Gama de velocidades predominantes / (m/s)	0 a 0,20 (92 troços) 0,20 a 0,40 (59 troços) 0,40 a 0,60 (24 troços) 0,60 a 0,80 (19 troços)	0 a 0,20 (91 troços) 0,20 a 0,40 (59 troços) 0,40 a 0,60 (22 troços) 0,60 a 0,80 (20 troços)	0 a 0,20 (77 troços) 0,20 a 0,40 (60 troços) 0,40 a 0,60 (23 troços) 0,60 a 0,80 (17 troços)	0 a 0,20 (77 troços) 0,20 a 0,40 (60 troços) 0,40 a 0,60 (21 troços) 0,60 a 0,80 (17 troços)
Gama de velocidades em minoria / (m/s)	0,80 a 1,00 (1 troço) 1 a 1,20 (1 troço) 1,40 a 1,43 (1 troço)	0,80 a 1,00 (3 troços) 1 a 1,20 (1 troço) 1,40 a 1,43 (1 troço)	0,80 a 1,00 (9 troços) 1 a 1,20 (4 troços) 1,20 a 1,40 (5 troços) 1,40 a 1,60 (1 troço) 2,20 a 2,32 (1 troço)	0,80 a 1,00 (11 troços) 1 a 1,20 (4 troços) 1,20 a 1,40 (5 troços) 1,40 a 1,60 (1 troço) 2,20 a 2,32 (1 troço)
Regime de escoamento	Laminar (8 troços) Transição (3 troços) Turbulento (186 troços)	Laminar (4 troços) Transição (7 troços) Turbulento (186 troços)	Laminar (3 troços) Transição (8 troços) Turbulento (186 troços)	Laminar (4 troços) Transição (7 troços) Turbulento (186 troços)

Pela comparação dos valores de velocidade de escoamento considerando as perdas de carga e os valores de velocidade de escoamento, não considerando as perdas de carga presentes na Tabela 4, foi possível verificar que, para a maioria dos troços, a diferença entre o número de troços que se encontra em cada gama de velocidades (predominante e em minoria) não foi significativa. Pode ainda reparar-se que a gama geral de velocidades é igual para ambas as épocas considerando ou não as perdas de carga contínuas. Relativamente à época baixa, considerar ou não a perda de carga tem impacto no número de troços em regime laminar ou de transição. Tal pode dever-se ao facto de a velocidade aumentar ligeiramente quando as perdas de carga são consideradas, como se pode constatar observando a tabela: onde existe mais um troço na gama de velocidade entre 0,60 m/s e 0,80 m/s e mais dois troços na gama entre 0,80 m/s e 1 m/s, fazendo com que o regime de escoamento passe de laminar para transição.

Com efeito, optou-se por não considerar as perdas de carga contínuas ao longo do sistema uma vez que estas não têm um impacto considerável nos valores de velocidade de escoamento.

Os cálculos de velocidade de escoamento não considerando as perdas de carga e considerando as perdas de carga encontram-se no Anexo VI e Anexo VIII.

3.3.3 PERDAS DE CARGA LOCALIZADAS

As perdas de carga localizadas acontecem devido à presença de particularidades nas condutas que alteram o escoamento uniforme, como por exemplo: desvios bruscos de direção, alargamento ou estreitamento da conduta, entradas e saídas de reservatórios e também presença de equipamentos como válvulas e ventosas. Estas perdas podem ser calculadas do seguinte modo, também segundo o EPANET [24]:

$$\Delta H_l = K \cdot \frac{u^2}{2 \cdot g} = \frac{8 \cdot K}{g \cdot \pi^2 \cdot d^4} \cdot q^2 \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

K – Coeficiente de perda de carga localizada (depende do número de *Reynolds* (Re) e da geometria da particularidade da conduta);

u – Velocidade média de escoamento (m/s);

g – Aceleração da gravidade (m/s²);

q – Caudal (m³/s);

d – Diâmetro da tubagem (m).

Em sistemas de abastecimento, geralmente, as dimensões das tubagens são consideráveis e as velocidades de escoamento não ultrapassam valores de 2 m/s, o que leva a que as perdas de carga

localizadas não sejam, normalmente, consideradas. Contudo, o valor destas perdas pode ser considerado no caso de singularidades, como por exemplo, a presença de troços curtos de conduta com bombas elevatórias, presença de válvulas parcialmente fechadas ou outros equipamentos que afetem de forma significativa a natureza do escoamento, ficando a sua consideração ao critério do responsável por analisar o comportamento da água e fazer a modelação do sistema [29].

As perdas de carga localizadas também não foram consideradas por decisão da empresa uma vez que exigiam um estudo ainda mais exaustivo das condições de escoamento, sendo necessário conhecer e avaliar cada particularidade da rede de distribuição que pudesse levar à alteração do escoamento.

3.4 TEMPO DE RESIDÊNCIA HIDRÁULICO DA ÁGUA

Prever o tempo que a água demora a percorrer uma determinada distância é importante numa entidade distribuidora de água já que permite à mesma tomar medidas preventivas no caso de alguma ocorrência. Deste modo, como forma de prever o local onde a água se encontra após sair da ETA X ou de algum ponto da rede de distribuição, pode recorrer-se à Equação 9.

$$t = \frac{c}{u} \quad \text{Equação 9}$$

Em que: t corresponde ao tempo de residência hidráulico que água demora a chegar ao destino (h); c corresponde à distância percorrida pela água (m) e u corresponde à velocidade média de escoamento da água (m/s).

Ter conhecimento do lugar onde a água se encontra na rede de distribuição é uma mais-valia para a entidade distribuidora, como já referido anteriormente. Desta forma, após a modelação da velocidade de escoamento é possível modelar o tempo de residência hidráulico, isto é, o tempo que a água demora a percorrer um determinado troço, desde a saída da ETA X até qualquer ponto da rede de distribuição, assim como o tempo que a água demora a percorrer entre dois pontos da rede distribuição. Para tal a determinação dos tempos de residência hidráulica, aplicou-se a Equação 9.

Na folha de cálculo mencionada anteriormente foi colocado, para além de todos os dados do sistema adutor, a velocidade média de escoamento e o tempo de residência hidráulico da água para cada troço. Optou-se por utilizar este formato uma vez que permite a fácil visualização no caso de alteração da velocidade de escoamento ou do tempo de residência hidráulico da água, na ocorrência de alteração de volumes de água consumidos, caudais das estações elevatórias ou mesmo mudança das condutas. Outra das vantagens deste formato reside no facto de a alteração de qualquer parâmetro ser fácil e prática para o profissional que beneficiará desta ferramenta, podendo ver de imediato as alterações que provoca tanto na velocidade como no tempo. Contudo, para facilitar ainda mais o recurso a esta ferramenta e

para a tornar visualmente mais simples de interpretar, decidiu-se fazer uma recolha dos tempos de residência hidráulica da água desde a ETA X até cada reservatório do sistema adutor em gamas de 2 em 2 horas tanto para época baixa como para época alta.

O objetivo passou por agrupar os reservatórios em que a água chegava em períodos semelhantes para se ter uma noção geral dos tempos de residência hidráulicos ao longo do sistema adutor e facilitar a construção de um mapa de todo o sistema contemplando os tempos médios de percurso da água. Com o auxílio dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) foi possível construir um documento que pode ser consultado através do *Google Earth* onde se encontra desenhado todo o sistema adutor e onde foi colocado em cada reservatório um ponto com uma cor característica da sua gama de tempos de residência hidráulico da água. Desta forma, todos os reservatórios que se encontram na gama, por exemplo, de 4 a 6 horas possuem um ponto com a mesma cor. Na Tabela 5 encontram-se os dados dos tempos de residência hidráulicos da água a cada reservatório que foram entregues aos SIG para possibilitar a construção do mapa. Os reservatórios encontram-se numerados de 1 a 84, por ordem alfabética, devido à impossibilidade de se revelar o seu nome.

Tabela 5. Tempos de residência hidráulicos da água

Duração média / h	Época Baixa	Época Alta
0 – 2	2	2
2 – 4	-	28
4 – 6	20, 28	20, 24, 27, 47, 50
6 – 8	27, 47, 50	12,16, 38, 39, 53, 54
8 – 10	12, 18, 24, 39, 78, 54	18, 35, 62, 78, 79
10 – 12	35, 38, 45, 53	7, 8, 31, 45
12 – 14	8, 31, 34, 48, 68	1, 14, 34, 48, 68
14 – 16	16, 52	52, 58, 70, 75
16 – 18	14, 66	11, 13, 42, 66
18 – 20	1, 11, 33, 62, 70, 75	3, 33, 56, 77, 81
20 – 22	58, 73	15, 73
22 – 24	10, 13, 15, 42, 56, 77	4, 6, 10, 26, 32, 61, 69
24 – 26	4, 33, 81	23, 25, 40
26 – 28	6, 7, 23, 25, 32, 79	36, 41, 59, 82
28 – 30	30, 40, 41, 59, 61, 69, 82	5, 30, 46, 74
30 – 32	36, 46, 74,	37
32 – 34	5, 37	22, 44
34 – 36	44	-
36 – 38	22	17, 19, 29
38 – 40	29	67, 84
40 – 42	19	-
42 – 44	17, 67, 84	55
46 – 48	26	57, 76, 80
48 – 50	55	-

Tabela 5. Tempos de residência hidráulicos da água (Continuação)

Duração média / h	Época Baixa	Época Alta
50 – 52	76	63
52 – 54	80	-
54 – 56	57	9, 60
56 – 58	-	43
62 – 64	60	64
64 – 66	9	-
66 – 68	71	-
68 – 70	63	71, 72
70 – 72	-	51
72 – 74	64	-
74 – 76	43	-
78 – 80	-	21
80 – 82	72	-
82 – 84	-	65
92 – 94	65	-
94 – 96	21	-
96 – 98	-	83
134 – 136	83	49
138 – 140	51	-
164 – 166	49	-

Observando a Tabela 5 é possível perceber que, para ambas as épocas, as gamas em que se situam mais reservatórios com o tempo de residência hidráulico em comum são: 12 h – 14 h, 18 h – 20 h, 22 h – 24 h.

Os reservatórios em que existe pouco consumo ou que se situam longe da ETA X apresentam um intervalo maior de tempo de residência hidráulico da água. No entanto, sabe-se que a água vai perdendo qualidade ao longo do tempo sendo necessária a existência de recloragens ao longo da rede de distribuição. A AdNorte possui cinco recloragens principais que permitem o controlo microbiológico da água permitindo assim garantir a segurança no consumo da mesma.

Geralmente, a água é mais rápida a chegar aos reservatórios em época alta, uma vez que um maior consumo exige uma maior velocidade de reposição da água nos reservatórios. No entanto pode haver exceções, como é o caso do reservatório 71, em que a água é mais rápida a chegar ao reservatório em época baixa do que em época alta. Tal deve-se ao facto, de que, nos meses estudados para época alta o consumo ser menor que em época baixa.

Por vezes observa-se também uma diferença considerável entre as gamas a que um reservatório se encontra em época baixa e em época alta. Esta situação reside no facto da rede de distribuição ser bastante ramificada, por isso, uma alteração que ocorra num reservatório ou em vários a jusante, irá provocar alteração nos tempos de residência hidráulico da água nos reservatórios a montante.

O cálculo relativamente ao tempo de residência hidráulico da água pode ser consultado no Anexo X.

4 DECAIMENTO DE CLORO

A desinfecção por compostos de cloro é um dos processos mais usados para controlar a carga e atividade microbiana presente na água em todas as unidades que constituem o seu tratamento, assim como a sua distribuição, e assim garantir a qualidade microbiológica da água ao longo do seu percurso, como mencionado anteriormente [3].

Quando adicionado à água, o cloro, devido ao seu potencial reativo, diminui a sua concentração ao longo da rede de distribuição devido a reações em que é consumido. Esta diminuição de concentração é também denominada por decaimento de cloro. Os fatores de decaimento (K) dividem-se, portanto, em duas vertentes: uma derivada da reação do cloro com os compostos existentes na água, denominada por decaimento no seio líquido (k_b) e a outra resultante do decaimento por reação do cloro com a parede da tubagem que inclui as reações com o material da tubagem e com biofilmes (k_w). Desta forma, o decaimento de cloro é representado pela soma das duas vertentes como indicado na Equação 10 [32].

$$K = k_b + k_w \quad \text{Equação 10}$$

Onde, as unidades das variáveis são: K (h^{-1}), k_b (h^{-1}) e k_w (h^{-1}).

Na Figura 15 encontram-se representadas as duas vertentes que afetam o decaimento de cloro, quer por reação no seio da água, derivada da presença de matéria orgânica e inorgânica, quer por reação com o material da tubagem, afetado também pela idade da tubagem, e com a presença de biofilme na parede da mesma.

Os biofilmes são constituídos por microrganismos que se fixam às paredes das condutas, devido à sua grande capacidade de adesão, e se vão multiplicando, resultando numa camada biológica que consome o cloro quando entra em contacto com o mesmo, podendo, noutros casos, também desprenderem-se da parede e serem arrastado pela água, contaminando-a [33].

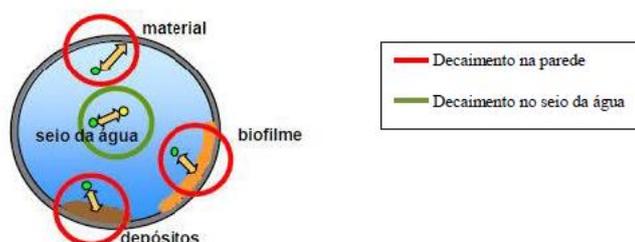


Figura 15. Fatores que afetam o decaimento de cloro [28].

Existem outros fatores que podem contribuir para o decaimento de cloro, destacando-se: a concentração de cloro inicial adicionada, a temperatura, as condições hidráulicas de escoamento, assim como o tempo de residência da água, quer nas tubagens, quer nos reservatórios [33,34,35,36,37].

A evolução da concentração de cloro ao longo do tempo apresenta duas fases, uma em que ocorre um decaimento rápido de cloro, e que tem curta duração e outra que apresenta um decaimento lento ao longo do tempo [33].

Aquando da desinfecção, deve-se garantir uma dose capaz de garantir um teor residual de cloro após este reagir, já que segundo a ERSAR, para que a desinfecção de água seja feita de forma eficiente, deve garantir-se esse teor de desinfetante residual ao longo da sua conduta para controlar a atividade microbiana na água [1].

4.1 DECAIMENTO DE CLORO NO SEIO LÍQUIDO

O decaimento de cloro no seio do líquido resulta, como já mencionado anteriormente, da reação do cloro com a matéria orgânica e inorgânica presente na água, nomeadamente, matéria orgânica natural, manganês, amónia, ferro, etc. [33].

Existem vários modelos para descrever a cinética do decaimento de cloro ao longo do tempo, contudo, o mais frequentemente usado é o modelo de primeira ordem que sugere a redução exponencial do cloro ao longo do tempo [32].

$$\frac{dC}{dt} = -k \cdot C \quad \text{Equação 11}$$

Simplificando:

$$C = C_0 \cdot e^{-k \cdot t} \quad \text{Equação 12}$$

Em que: C diz respeito à concentração de cloro em cada instante de tempo (mg/L); C_0 à concentração inicial de cloro (mg/L); k à constante de decaimento de primeira ordem (h^{-1}) e t ao tempo (h).

No entanto, devido à simplicidade deste modelo, este nem descreve de forma adequada as situações reais que ocorrem na rede de distribuição, havendo necessidade, por vezes, de aplicação de outros modelos mais complexos, como os reunidos na Tabela 6.

O Modelo de 1.^a ordem indica que a velocidade de reação é proporcional à concentração de cloro, isto é, a concentração de cloro decai exponencialmente ao longo do tempo segundo uma constante k . O Modelo de ordem n tem os mesmos pressupostos do modelo anterior, no entanto acrescenta um parâmetro ajustável, a ordem de reação n , que influencia velocidade de reação de forma proporcional. Por sua vez, o Modelo de primeira ordem limitada assume uma fração da concentração inicial que não reage (C^*) e apenas o restante ($C_0 - C^*$) decai exponencialmente de acordo com uma lei de primeira

ordem. O Modelo de primeira ordem paralela assume dois componentes na reação, cada um decaindo de acordo com uma lei de primeira ordem: uma fração inicial (x) que decai exponencialmente a uma constante k_1 , normalmente de forma mais rápida, e o restante ($1-x$) que decai exponencialmente a uma taxa k_2 , normalmente mais lenta. Por fim, no Modelo de pseudo 2.^a ordem, a velocidade da reação é inversamente proporcional à constante k .

Tabela 6. Modelos cinéticos que descrevem o decaimento de cloro [32]

Modelo	Forma integrada ($C =$)	Parâmetros ajustáveis
1. ^a ordem	$C_0 \cdot e^{-k \cdot t}$	k
Ordem n	$\left(k \cdot t \cdot (n - 1) + \left(\frac{1}{C_0} \right)^{n-1} \right)^{\frac{1}{n-1}}$	k, n
Primeira ordem limitada	$C^* + (C_0 - C^*) \cdot e^{-k \cdot t}$	k, C^*
Primeira ordem paralela	$C_0 \cdot x \cdot e^{-k_1 \cdot t} + C_0 \cdot (1 - x) \cdot e^{-k_2 \cdot t}$	k_1, k_2, x
Pseudo 2. ^a ordem	$\frac{C_0}{1 + C_0 \cdot k \cdot t}$	k

Onde,

k – Constante cinética de decaimento de primeira ordem (h^{-1});

n – Ordem da reação;

C^* – Fração de cloro residual que não reage (mg/L);

k_1 – Constante de decaimento das reações rápidas (h^{-1});

k_2 – Constante de decaimento das reações lentas (h^{-1});

x – Componente de cloro residual.

4.1.1 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE CINÉTICA DE DECAIMENTO DE CLORO NO SEIO LÍQUIDO

A modelação da constante cinética de decaimento de cloro no seio líquido foi feita com recurso a um teste laboratorial denominado “teste de garrafa” – método analítico de análise química de DPD (Diethyl-p-fenilnediamina) líquido [32]. Este teste consistiu no armazenamento de amostras de concentrações diferentes num volume total de 1 L. As amostras foram previamente preparadas pelo laboratório da empresa, onde foram cloradas amostras de água ultrapura, através da injeção de cloro gasoso, para análise do decaimento. As amostras permaneceram fechadas em frascos para evitar reações da água com o ar envolvente. O intuito de estudar esta gama de concentrações de cloro foi tentar obter informação que permitisse perceber o efeito da concentração inicial de cloro no decaimento do mesmo.

Para obtenção de dados robustos, foram efetuadas duas experiências independentes. As condições das experiências encontram-se detalhadas na Tabela 7.

Tabela 7. Condições experimentais das duas experiências realizadas

Experiência	Concentração inicial de cada amostra	Número de frascos de cada amostra	Material dos frascos	Condições de armazenamento
1	0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L, 2 mg/L	1 Total: 4 amostras	Plástico opaco	Há temperatura ambiente e em cima da bancada onde se realizaram as leituras
2	0,5 mg/L, 1 mg/L, 1,5 mg/L, 2 mg/L	2 Total: 8 amostras	Vidro	Há temperatura ambiente e dentro de armário escuro

Apesar de este género de experiências laboratoriais ser conduzido, normalmente, em garrafas de vidro, na primeira experiência, as amostras de cloro foram colocadas em recipientes de plástico opacos já que este era o material disponível na altura.

Em ambas as experiências, para observar o decaimento de cloro ao longo do tempo, seguiram-se os passos descritos de seguida, enunciados no procedimento HPT 210 para medição do cloro livre [38]:

1. Colocou-se o termómetro em contacto com uma das amostras para perceber qual a temperatura a que se encontravam. Optou-se por fazer este procedimento apenas para uma das amostras já que todas estavam armazenadas nas mesmas condições.
2. Fez-se o zero antes da leitura de cada amostra, através de um frasco preenchido com 10 mL de amostra, que foi inserido no colorímetro UV *HACH*.
3. Num frasco, colocou-se três gotas de cada um dos reagentes A e B e agitou-se. Ambos os reagentes foram também agitados antes de serem utilizados. Após a adição dos reagentes, inseriu-se 10 mL de amostra pretendida e esperou-se um minuto. Desenvolveu-se um tom rosa indicativo da presença de cloro nas amostras.
4. Após o período de espera, a amostra foi cuidadosamente limpa e inserida no colorímetro, que apresentava a concentração de cloro em mg/L Cl₂.

Este procedimento foi efetuado duas vezes ao dia, no início da manhã e ao final da tarde, até que as amostras evidenciassem uma quantidade estável de cloro sem decaimento.

Na primeira experiência, foi apenas feita uma leitura para cada amostra nas primeiras 91 horas tanto de manhã como de tarde e, posteriormente foram feitas duas leituras tanto de manhã como de tarde para cada amostra até ao final da experiência já que este procedimento é o mais correto em termos laboratoriais e permite obter resultados mais rigorosos. Na segunda experiência foram efetuadas duas leituras no período da manhã e duas leituras no período da tarde para cada amostra, tendo-se feito a média entre as duas leituras da mesma amostra e, posteriormente, a média entre os valores obtidos nas amostras da mesma concentração inicial.

As experiências tiveram durações diferentes uma vez que o objetivo era observar o decaimento da concentração de cloro até que este se tornasse estável e/ou próximo de 0,02 mg/L que é o limite de leitura do colorímetro usado. Assim sendo, a primeira experiência teve uma duração de aproximadamente 270 horas e a segunda de aproximadamente 504 horas, já que o decaimento de cloro se comportou de forma diferente.

4.1.2 DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Primeiramente, o pretendido foi observar a influência da concentração de cloro inicial no decaimento de cloro. Como a cloragem de amostras é um método exigente e de fácil imprecisão, optou-se por fazer uma primeira leitura assim que as amostras foram entregues pelo laboratório e foi essa a concentração inicial que se decidiu considerar. Desta forma, as concentrações iniciais das amostras passaram a ser os valores lidos e não os valores das concentrações laboratorialmente preparadas. Na Figura 16 apresentam-se os perfis de concentração de cloro ao longo do tempo para a primeira experiência realizada.

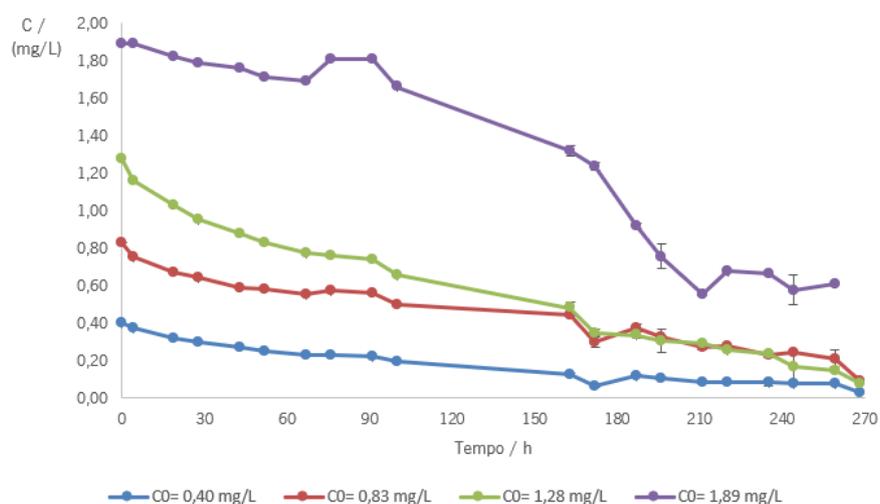


Figura 16. Evolução da concentração de cloro ao longo do tempo na primeira experiência.

Analisando a evolução da concentração de cloro ao longo do tempo na primeira experiência realizada, verifica-se que as amostras de concentração inicial 0,40 mg/L e 1,89 mg/L não apresentaram um período de decaimento considerável (até aproximadamente 100 h de ensaio) seguido de um período de decaimento lento. Verificou-se que após aproximadamente 187 horas de experiência, a amostra de concentração inicial 0,40 mg/L começa a estabilizar. As amostras de concentração inicial 0,83 mg/L e 1,28 mg/L apresentam um ligeiro decaimento a tender para a estabilização no mesmo período. Em oposição, a amostra de 1,89 mg/L demonstrou um decaimento significativo entre as 172 e as 211 horas de experiência.

Pela análise da evolução do cloro ao longo do tempo, é possível observar alguns pontos em que o valor de concentração de cloro é superior ao medido anteriormente podendo tal dever-se a erros de medição do colorímetro ou erros no doseamento da quantidade de amostra ou reagente. Estes erros são mais frequentes na amostra de 1,89 mg/L.

É possível verificar que as medições de concentração de cloro na amostra de 1,89 mg/L terminaram antes das restantes, de por vezes haver erro no doseamento da amostra levando a que esta fosse descartada.

Seria de esperar um decaimento inicial mais acentuado em todas as amostras, contudo o que não se verificou para as amostras de menor e maior concentração de cloro, em que, respetivamente, o decaimento de cloro foi ligeiro ou não existiu. Contudo, para as primeiras três concentrações iniciais de cloro (0,40 mg/L, 0,83 mg/L e 1,28 mg/L) é possível observar que quanto maior a concentração inicial de cloro, maior é o decaimento observado nas primeiras horas.

Verifica-se a inexistência de medição entre as 100 e as 163 h de experiência, correspondendo este período ao fim de semana.

Através dos resultados obtidos na experiência, pode-se concluir que para as amostras de concentração inicial 0,40 mg/L, 0,83 mg/L e 1,28 mg/L se verificou uma ligeira influência da concentração inicial na primeira fase de decaimento.

Na segunda experiência (Figura 17), considerando que haviam duas amostras de mesma concentração inicial, foi feita a média das duas leituras para cada amostra e, posteriormente, a média entre as médias obtidas para cada amostra dando origem a valores médios de concentração de cloro representadas graficamente pelas concentrações iniciais de 0,49 mg/L, 0,98 mg/L, 1,42 mg/L e 1,99 mg/L. Para facilitar a análise da evolução da concentração de cloro ao longo do tempo, decidiu-se nomear as curvas de valores médios de amostras A, B, C e D, correspondendo a amostra à menor concentração de cloro e a amostra D à maior.

Foi possível observar que o decaimento se mantém praticamente estável nas primeiras 300 horas de experiência, exceto na amostra de 1,99 mg/L em que se observa um decaimento inicial (até às 63 h) ligeiro. Após as 300 h de experiência, verifica-se um ligeiro decaimento nas amostras de concentração 0,49 mg/L e 1,99 mg/L, sendo mais acentuado na amostra de 1,99 mg/L, enquanto as restantes amostras apresentam um comportamento praticamente estabilizado. Verifica-se também que nem todas as medições terminam ao mesmo tempo, e tal deve-se ao facto de haver necessidade de fazer mais que duas medições em alguns casos. Neste ensaio, não se verifica a existência de duas fases de decaimento: a rápida e, seguidamente, a lenta.

É possível observar oscilações nos valores de concentração de cloro, não se encontrando a concentração a descer progressivamente, como seria de esperar, e tal pode dever-se a erros de manuseamento do equipamento por parte do operador, doseamento de reagentes ou erros de medição do colorímetro como já referido anteriormente. Podem ainda observar-se intervalos, correspondentes ao período de fim de semana, em que não ocorrem medições em nenhuma das amostras.

Conclui-se que esta experiência demonstra que a concentração inicial de cloro não influenciou o seu decaimento já que todas as amostras apresentam comportamento semelhante.

No que diz respeito à influência da concentração inicial de cloro no seu decaimento, ambas experiências não vão de encontro ao que se defende na literatura, isto é, que a concentração inicial afeta o decaimento de cloro observando-se, para valores mais altos de concentração inicial, um menor decaimento [34].

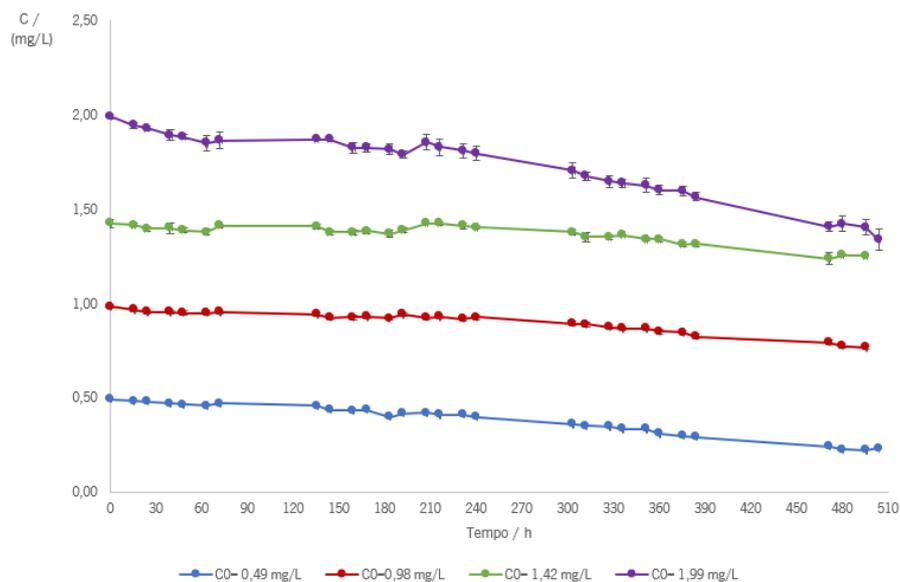


Figura 17. Evolução da concentração de cloro ao longo do tempo na segunda experiência.

Um dos objetivos desta experiência, era perceber a influência da temperatura no decaimento de cloro. Porém, devido a indisponibilidade de manter as amostras em ambientes com temperatura controlada, tal não foi possível. Decidiu-se, contudo, medir a temperatura das amostras sempre que se fez uma leitura, para ter uma noção da temperatura em que as amostras se encontravam ao longo da duração das experiências e, talvez, relacionar com a rapidez de decaimento se possível. Na primeira experiência as temperaturas variaram entre 20,8 °C e 26,4 °C e, na segunda, as temperaturas variaram entre 20,7 °C e 25,7 °C. Tendo em conta que o decaimento se comportou de forma diferente nas duas experiências, não é possível concluir que a temperatura teve uma influência significativa uma vez que as gamas de temperatura foram próximas em ambas as experiências.

Observando as diferenças entre as duas experiências, percebe-se que a única diferença significativa entre ambos foi o material em que as amostras foram armazenadas. Desta forma, pode-se concluir que o material teve influência no decaimento de cloro, provavelmente por reações do cloro com o material envolvente. Para resultados mais precisos, as amostras deveriam ter sido armazenadas no mesmo material em ambas as experiências.

De forma a calcular os parâmetros ajustáveis de cada modelo presentes na Tabela 6, recorreu-se à ferramenta *Solver* do *Microsoft Excel* que, através da minimização da soma dos resíduos, isto é, através da minimização da diferença entre os valores de concentração obtidos experimentalmente e os valores previstos por cada modelo elevada ao quadrado tornou possível o cálculo dos parâmetros com o melhor ajuste possível.

Como forma de perceber qual o modelo que mais se ajustava ao decaimento observado, recorreu-se à Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) e ao coeficiente de determinação (R^2). No que diz respeito ao primeiro ensaio, a amostra 1, corresponde à amostra de menor concentração de cloro (0,4 mg/L), seguindo-se o mesmo raciocínio até à amostra 4 que corresponde à amostra de maior concentração (1,89 mg/L). A mesma lógica é aplicada à segunda experiência. Os valores de REQM e R^2 para cada modelo encontram-se na Tabela 8.

A escolha do modelo cinético que mais se ajusta ao decaimento observado está relacionada com um menor valor de REQM, já que este traduz a raiz quadrada da soma da diferença entre os valores observados e os valores previstos pelo modelo de decaimento ao quadrado e, um maior valor de R^2 que, quanto mais próximo de 1, significa que mais ajustado é o modelo cinético aos dados observados [38]. Pela análise da Tabela 8, é possível verificar que para a amostra 1, o modelo cinético que mais se adequa ao decaimento observado é o Modelo de 1.^a ordem, já que apresenta o menor valor de REQM e o maior valor de R^2 .

Tabela 8. Ajuste dos modelos cinéticos de decaimento de cloro à primeira experiência

1. ^a experiência	Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4	
	REQM / (mg/L)	R ²						
Modelo 1. ^a ordem	0,020	0,998	0,062	0,927	0,085	0,946	0,298	0,777
Modelo ordem n	0,024	0,957	0,056	0,940	0,060	0,973	0,232	0,865
Modelo ordem paralela	0,023	0,955	0,059	0,933	0,073	0,961	0,322	0,740
Modelo ordem limitada	0,080	0,457	0,086	0,859	0,086	0,944	0,335	0,718
Modelo Pseudo 2. ^a ordem	0,032	0,914	0,077	0,886	0,123	0,887	0,364	0,668

Os modelos de ordem n e de ordem paralela também apresentam um bom ajuste para esta amostra. O Modelo ordem n foi o que mais se adequou às amostras 2,3 e 4. No caso da amostra 3, o Modelo de ordem paralela também apresenta um bom ajuste.

Contudo, observando o R² das amostras 2 e 4, é possível constatar que o R² é menor que 0,95, o que implica que este modelo cinético, apesar de mais adequados do que os restantes, não descreve com precisão o decaimento observado [38].

Apurados os modelos que mais de adequam ao decaimento observado, foi possível obter os valores dos parâmetros ajustáveis apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Valores dos parâmetros ajustáveis correspondentes aos modelos cinéticos que mais se ajustam ao decaimento na primeira experiência

1. ^a experiência	Modelo 1. ^a ordem	Modelo ordem n	
	<i>k</i> / h ⁻¹	<i>k</i> / h ⁻¹	<i>n</i>
Amostra 1	0,007	-	-
Amostra 2	-	0,005	0,614
Amostra 3	-	0,008	0,592
Amostra 4	-	0,008	-0,750

Pela observação dos valores de parâmetros ajustáveis obtidos é possível verificar que todos os modelos apresentam constantes de decaimento próximas, apresentando também a ordem de reação menor que 1, nos casos das amostras 2 e 3 e negativa no caso da amostra 4.

É possível verificar que as amostras 2 e 3 possuem ordens de reação praticamente semelhantes, algo corroborado pelas curvas que exibem graficamente onde apresentam o mesmo comportamento. Em relação à amostra 4 não é possível fazer conclusões precisas uma vez que o modelo não descreve com precisão o decaimento.

Na Tabela 10, encontram-se os valores de REQM e R^2 para cada amostra correspondentes à segunda experiência.

Tabela 10. Ajuste dos modelos cinéticos de decaimento de cloro à segunda experiência laboratorial

2. ^a experiência	Amostra A		Amostra B		Amostra C		Amostra D	
	REQM / (mg/L)	R^2						
Modelo de 1. ^a ordem	0,027	0,903	0,022	0,889	0,040	0,666	0,057	0,902
Modelo ordem n	0,019	0,951	0,020	0,905	0,038	0,677	0,048	0,925
Modelo ordem paralela	0,027	0,903	0,022	0,889	0,040	0,666	0,057	0,902
Modelo ordem limitada	0,027	0,903	0,022	0,889	0,040	0,666	0,051	0,902
Modelo Pseudo 2. ^a ordem	0,033	0,852	0,023	0,873	0,041	0,656	0,063	0,878

Observando a Tabela 10, é possível verificar que para todas as amostras o modelo que mais se ajusta é o Modelo ordem n, por apresentar menor REQM e maior R^2 . No entanto, tal como se verificou na primeira experiência, existem amostras com R^2 inferior a 0,95 como é o caso das amostras, B, C e D, destacando-se a amostra C, o que torna possível concluir os modelos não descrevem com precisão o decaimento observado, sendo possível apenas, obter conclusões fidedignas para a amostra A.

Conhecidos os modelos que mais se ajustam ao decaimento observado, foi possível construir a Tabela 11 onde se encontram descritos os valores dos parâmetros ajustados para cada amostra.

Através da análise da Tabela 11, é possível constatar que todas as reações são de ordem 0, o que indica que a velocidade da reação é constante e independente da concentração inicial de cloro, o que corrobora as conclusões feitas à análise da Figura 17.

Tabela 11. Valores dos parâmetros ajustáveis correspondentes aos modelos cinéticos que mais se ajustam ao decaimento na segunda experiência

2. ^a experiência	Modelo ordem n	
	k / h^{-1}	n
Amostra A	0,0005	0
Amostra B	0,0004	0
Amostra C	0,0003	0
Amostra D	0,0011	0

É possível observar que o k da amostras D é superior aos restantes, indicando que esta amostra tem um decaimento mais rápido, como concluído anteriormente pela observação da evolução do decaimento de cloro ao longo do tempo na segunda experiência.

Os valores de concentração de cloro obtidos nas duas experiências podem ser consultados no Anexo XI.

Considerando que os resultados não foram satisfatórios relativamente a todas as amostras, recomenda-se, mais uma vez, a repetição da experiência laboratorial no que diz respeito ao decaimento de cloro no seio líquido. Estas experiências foram, portanto, consideradas preliminares no estudo do decaimento de cloro no seio líquido. Sugere-se um maior número de experiências laboratoriais, com mais amostras para cada concentração inicial estudada (no mínimo 3), com amostras contendo água tratada pela ETA X e retirada antes do processo de cloração, sendo feita a cloração laboratorialmente para aproximar as condições laboratoriais o mais possível à realidade e, ainda, com temperatura controlada para simular épocas de temperatura baixa ou elevada.

4.2 DECAIMENTO DE CLORO NO SEIO DA TUBAGEM

O decaimento de cloro no seio da tubagem deve-se às reações do cloro com a parede da tubagem ou com materiais que se depositem nesta. Estas reações são diretamente influenciadas pelo material e idade da tubagem, diâmetro e presença de biofilme, como já referido anteriormente.

A forma mais prática de determinar o decaimento de cloro no seio da tubagem faz-se recorrendo à Equação 10, isto é, pela subtração do decaimento de cloro no seio do líquido ao decaimento de cloro total, que seria determinado com o auxílio de um programa de modelação hidráulica. Contudo, devido à simplicidade da fórmula, esta pode não ser precisa o suficiente e, por isso, não se adequar ao decaimento observado na realidade.

Sendo assim, a modelação do decaimento de cloro no seio da tubagem pode ser determinada pelo seguinte modelo que considera a lei de cinética de 1.^a ordem [4].

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

Equação 13

Onde: r traduz a velocidade da reação (mg/h); k_w a constante de decaimento no seio da tubagem (m/h); k_f o coeficiente de transferência de massa entre o seio líquido e a parede (m/h); e R o raio da tubagem (m).

A forma mais adequada de determinar a constante cinética de decaimento no seio da tubagem seria através de um teste laboratorial em que se recriavam as condições reais do sistema de abastecimento, isto é, deveria ser analisado a evolução do decaimento de cloro aquando a água se encontrava em contacto com tubagem nas mesmas condições que se encontram na rede de distribuição em termos de material, idade, diâmetro, etc, de forma a ter resultados mais precisos possíveis. Alguns autores defendem também a determinação da constante fazendo uso da Equação 13.

4.2.1 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE CINÉTICA DE DECAIMENTO DE CLORO NO SEIO DA TUBAGEM

Na presente dissertação, optou-se por realizar uma pesquisa bibliográfica de forma a encontrar o valor da constante cinética de decaimento no seio da tubagem para condutas de ferro fundido dúctil já usadas, devido a dificuldade de se efetuar este teste em contexto laboratorial.

Na inexistência de estudos sobre condutas de ferro fundido dúctil com 22 anos de uso e com diâmetros entre os 80 e 1400 mm, decidiu-se considerar um estudo laboratorial realizado por *Kahil* (2016) onde se obteve o valor de 0,002 h⁻¹ segundo uma cinética de primeira ordem, para condutas de ferro dúctil revestido com cimento, com diâmetros entre 100 e 300 mm, com 20 anos de uso [39]. Apesar de na ETA X as condutas serem compostas por ferro fundido dúctil, assume-se que a sua reatividade será igual à do ferro dúctil revestido com cimento, já que as condutas de ferro fundido dúctil existentes na ETA X também possuem revestimento interior de cimento. E, ainda, assume-se que a água possui as mesmas características que a água presente no estudo mencionado. Desta forma este valor foi considerado adequado, apesar de não cobrir todas as gamas de diâmetro presentes no sistema adutor da ETA X.

5 CONCLUSÕES E PERSPETIVAS FUTURAS

Na presente dissertação efetuou-se o estudo das velocidades de escoamento do sistema adutor da ETA X, assim como o estudo do decaimento de cloro.

Uma vez recolhida toda a informação necessária acerca do sistema adutor e dos consumos da população, foi possível calcular a velocidade de escoamento tanto para época alta como para época baixa e, conseqüentemente, calcular o período de circulação da água desde a ETA X até ao seu destino final numa folha de cálculo. Através dos dados dos períodos de circulação da água foi construído pelos profissionais do Sistemas de Informação Geográfica, um mapa, que pode ser consultado através do *Google Earth*, onde cada reservatório contém um ponto com uma cor característica do período de tempo a que a água demora a chegar após sair da ETA X.

Para a época baixa, obtiveram-se valores de velocidade média de escoamento variáveis entre 0,0003 m/s e 1,43 m/s (à exceção do troço de Estação Elevatória 8 até ao Reservatório 8 em que se obteve o valor de 46,90 m/s por apresentar um diâmetro reduzido e um grande volume de caudal que nele atravessa). Em relação aos tempos de residência hidráulicos da água, estes variaram entre 0,001 h e 331,34 h.

Para época alta, foram obtidos valores de velocidade média de escoamento que variaram entre 0,0003 m/s e 2,32 m/s (à exceção do troço de Estação Elevatória 8 até ao Reservatório de 8 em que se obteve o valor de 43,79 m/s). No que diz respeito aos tempos de residência hidráulicos da água, estes variaram entre 0,001 h e 344,45 h.

Prevê-se que esta ferramenta auxilie a resolução de eventuais problemas que possam surgir ou a tomada de decisões. Esta ferramenta foi produzida para que seja acessível a qualquer profissional que a manuseie, permitindo que seja fácil a sua alteração adequando-se ao cenário presente.

No que diz respeito ao estudo do decaimento de cloro no seio líquido, foram efetuadas duas experiências laboratoriais à temperatura ambiente e feitas leituras duas vezes por dia, uma de manhã e outra de tarde. As experiências não foram conclusivas em relação à influência da concentração inicial no decaimento de cloro e não foi possível estudar a influência da temperatura no decaimento de cloro uma vez que as experiências não foram realizadas a uma temperatura controlada. As duas experiências tiveram durações diferentes uma vez que o objetivo era observar o decaimento até que ele se mantivesse estável. Na primeira experiência, o modelo que mais se adequou na primeira amostra foi o Modelo 1.^a ordem, obtendo-se uma constante de decaimento de cloro no seio líquido de 0,007 h⁻¹, e na segunda, terceira e quarta Modelo ordem n foi o que apresentou melhor ajuste tendo-se obtido constantes de

decaimento no seio líquido de $0,005 \text{ h}^{-1}$ para a segunda amostra e $0,008 \text{ h}^{-1}$ para a terceira e quarta amostra. Na segunda experiência o Modelo ordem n foi o modelo com melhor ajuste para todas as amostras, obtendo-se valores de constante de decaimento de cloro de $0,0005 \text{ h}^{-1}$, $0,0004 \text{ h}^{-1}$, $0,0003 \text{ h}^{-1}$ e $0,0011 \text{ h}^{-1}$ para a primeira, segunda, terceira e quarta amostra, respetivamente . Contudo, devido à existência de ajuste com R^2 menor que 0,95 em algumas amostras não foi possível obter conclusões credíveis acerca do estudo do decaimento.

Para o estudo do decaimento de cloro no seio da tubagem foi feita uma pesquisa bibliográfica obtendo-se o valor de $0,002 \text{ h}^{-1}$ para condutas de ferro fundido revestido com cimento com 20 anos de uso. Considerou-se este valor adequado já que as condutas de ferro fundido dúctil existentes da ETA X também são revestidas com cimento.

Como perspectivas para trabalhos futuros, sugere-se novas experiências de decaimento de cloro no seio líquido com várias amostras (no mínimo 3) para cada concentração inicial, temperaturas controladas para que seja possível simular as temperaturas de época baixa e época alta, em recipientes não reativos de forma a assegurar o rigor dos resultados obtidos e amostras contendo água tratada antes da cloração (que serão posteriormente cloradas em laboratório) para assemelhar o mais possível o cenário laboratorial à realidade. Sugere-se ainda, um estudo do decaimento de cloro no seio da tubagem em meio laboratorial em que são recriadas, dentro do possível, as condições reais (idade e material das condutas, características da água, etc.), ou recorrer a um programa de modelação hidráulica. Caso se queira aprofundar a modelação da qualidade da água existente ao longo da rede de distribuição. sugere-se a aplicação de um programa de modelação hidráulica como o EPANET, ou outro que se considere adequado.

REFERÊNCIAS

- [1] IRAR, «Recomendação IRAR n.º 05/2007 - Desinfecção da Água Destinada ao Consumo Humano», 2007.
- [2] Brown D., Bridgeman J., e West J. R., «Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems», *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*, vol. 10, n. 1, pp. 79–99, 2011, doi: 10.1007/s11157-011-9229-8.
- [3] Vasconcelos J. J. e Boulous P. F., «Characterization and Modeling of Chlorine Decay in Distribution Systems», em *American Water Works Association*, 2015, pp. 15–16.
- [4] Monteiro L., Carneiro J., e Covas D. I. C., «Modelling chlorine wall decay in a full-scale water supply system», *Urban Water J.*, vol. 17, n. 8, pp. 754–762, 2020, doi: 10.1080/1573062X.2020.1804595.
- [5] Águas do Norte, «Página Inicial». [Em linha]. Disponível em: <https://www.adnorte.pt/>.
- [6] «Águas do Norte, SA».
- [7] Pereira O. P., «A Estação de Tratamento de Água de Areias de Vilar», [Online]. Disponível em: <https://www.aprh.pt/congressoagua98/files/com/119.pdf>.
- [8] Gomes A. M. C. F., «Análise da evolução da qualidade da água do rio Cávado na última década e respetivos impactes na operação da ETA de Areias de Vilar», 2016.
- [9] Rakness K. L., «Ozone in Drinking Water Treatment: Process Design, Operation and Optimization», em *American Water Works Association*, 2015, pp. 14–17.
- [10] Arvanitoyannis I. S., «Waste Management for the Food Industries», em *Elsevier Inc.*, 2015, pp. 482–483.
- [11] Air Liquid Portugal, «Remineralizacao da água e neutralização», [Online]. Disponível em: <https://industrial.airliquide.pt/remineralizacao-neutralizacao-tratamento-agua-potavel-co2>.
- [12] Águas do Algarve, «Processo de Tratamento», [Online]. Disponível em: <https://www.aguasdoalgarve.pt/content/eta-de-tavira-0>.
- [13] Bratby J., «Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment - Second Edition», em *Coagulation and Flocculation in Water and Wastewater Treatment*, 2006, pp. 5–7.
- [14] Hariganesh S., Vadivel S., Maruthamani D., e Rangabhashiyam S., «Disinfection by-products in drinking water: detection and treatment methods», em *Disinfection By-products in Drinking Water*, LTD, 2020, pp. 279–304.
- [15] EPAL - Grupo Águas de Portugal, «Ficha informativa - Cloro», 2007, [Online]. Disponível em:

- <https://www.epal.pt/EPAL/docs/default-source/agua/ficha-cloro.pdf?sfvrsn=2>.
- [16] Diário da República, «Saúde e Ambiente e Ação Climática», 2021.
- [17] ERSAR, *Relatório Anual dos Serviços de Águas e Resíduos em Portugal*, vol. 2. 2021.
- [18] Diário da República, «Decreto-Lei n.º 306/2007», 2007.
- [19] Águas de Portugal, «Projetos em Portugal», [Online]. Disponível em: <http://www.adpinternacional.com/pt//?id=61&img=78&bl=11>.
- [20] Branco Beleza J. M. de B., «Simulação das Concentrações de Cloro Residual e Tri-Halometanos em Redes de Distribuição de água para Consumo Humano», 2005.
- [21] Chouco L. S. F., «Simulação Hidráulica do Sistema Adutor ao Reservatório de Rebolim», 2012.
- [22] Gerhart P. M., Gerhart A. L., e Hochstein J. I., «Munson, Young and Okiishi's Fundamentals of Fluid Mechanics». p. 310, [Online]. Disponível em: https://books.google.be/books?id=UBqRCgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=fundamentals+of+fluid+mechanics+munson,+okishii&hl=pt-PT&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false.
- [23] Swamee P. K. e Sharma A. K., «Design of Water Supply Pipe Networks», em *John Wiley & Sons, Inc*, 2015, p. 12.
- [24] Rossman L. A., Tryby M., e Janke R., «EPANET 2 . 2 User Manual».
- [25] Vieira L. V. A., «Aplicação do modelo de simulação EPANET 2.0 ao estudo das pressões e cloro residual do sistema de abastecimento de água de Angra do Heroísmo», p. 86, 2013, [Online]. Disponível em: <http://repositorio.uac.pt/handle/10400.3/2799>.
- [26] Olaia A., «Gestão de Sistemas de Abastecimento de Água através de Modelação Hidráulica», p. 120, 2012, [Online]. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/8228/1/Olaia_2012.pdf.
- [27] Gameiro P. C. R., «Calibração Hidráulica de Modelos de Sistemas de Distribuição de Água», 2014.
- [28] Neves L. I. P., «Estudo do decaimento do cloro em sistemas de abastecimento de água – Caso de Estudo Águas da Azambuja», 2016.
- [29] Mariano J. C., «Adutoras Puras e Mistas – Análise Técnico-económica», 2014.
- [30] American Water Works Association, «Computer Modeling of Water Distribution Systems», em *American Water Works Association*, 2015, p. 24.
- [31] Twort A. C., Ratnayaka D. D., e Brandt M. J., «Water Supply - 5th Edition», em *IWA Publishing*, 2015, p. 471.
- [32] Powell J. C., West J. R., Hallam N. B., Forster C. F., e Simms J., «Performance of Various Kinetic Models for Chlorine Decay», *J. Water Resour. Plan. Manag.*, vol. 127, n. 5, pp. 349–351, 2001,

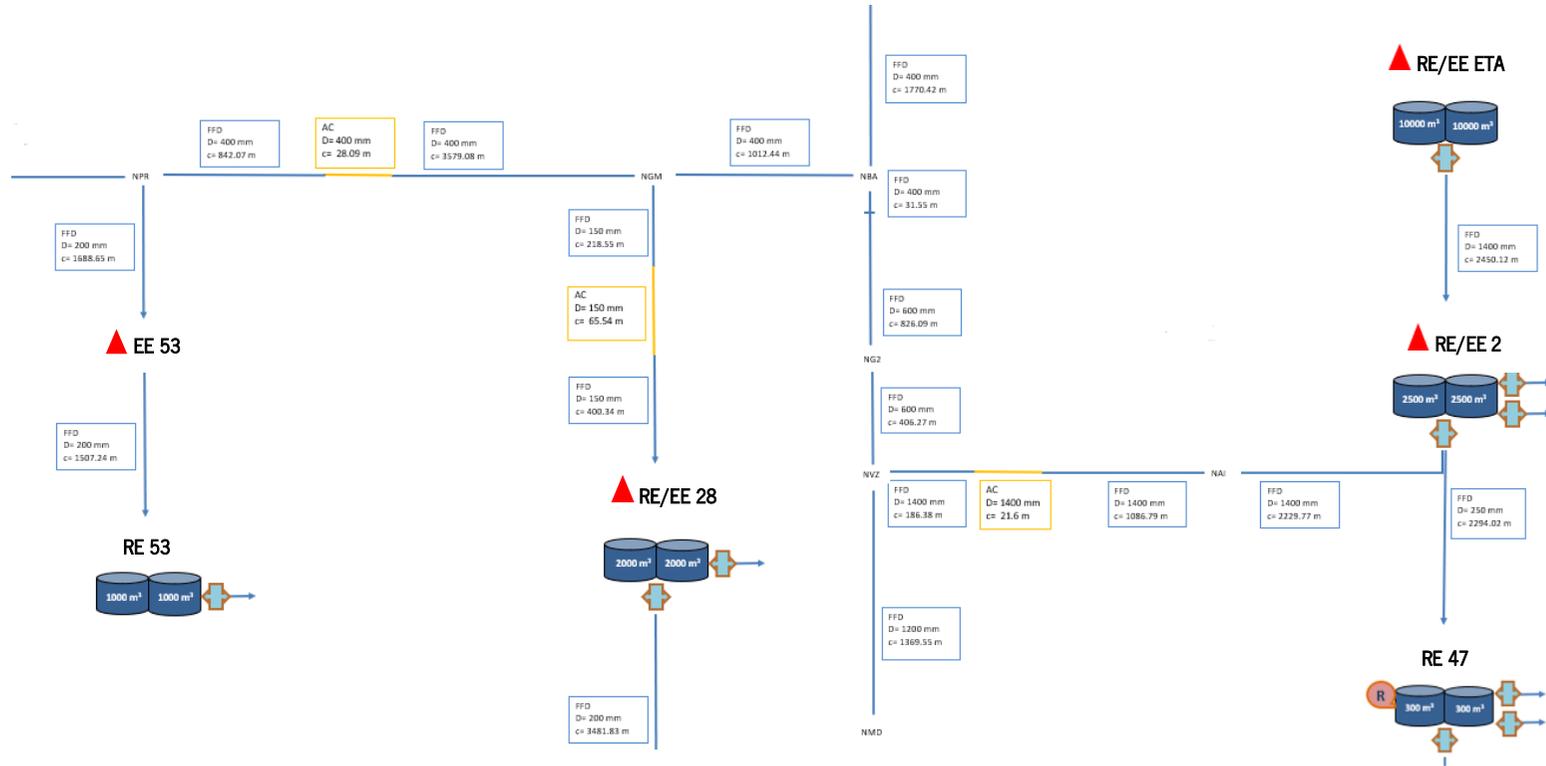
doi: 10.1061/(asce)0733-9496(2001)127:5(349).

- [33] dos Santos L. E. A., «Modelação do decaimento do cloro residual numa água superficial», 2018.
- [34] Vieira P., Coelho S. T., e Loureiro D., «Accounting for the influence of initial chlorine concentration, TOC, iron and temperature when modelling chlorine decay in water supply», *J. Water Supply Res. Technol. - AQUA*, vol. 53, n. 7, pp. 453–467, 2004, doi: 10.2166/aqua.2004.0036.
- [35] Clark R. M., «Chlorine fate and transport in drinking water distribution systems: Results from experimental and modeling studies», *Front. Earth Sci.*, vol. 5, n. 4, pp. 334–340, 2011, doi: 10.1007/s11707-011-0194-x.
- [36] Stoianov I. e Aisopou A., «Chlorine decay under steady and unsteady-state hydraulic conditions», *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1592–1601, 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.02.176.
- [37] Monteiro L., Viegas R. M. C., Covas D. I. C., e Menaia J., «Modelling chlorine residual decay as influenced by temperature», *Water Environ. J.*, vol. 29, n. 3, pp. 331–337, 2015, doi: 10.1111/wej.12122.
- [38] Cristina S. e Rodrigues A., «Modelo de Regressão Linear e suas Aplicações», n. 3, 2012.
- [39] Kahil M. A., «Application of First Order Kinetics for Modeling Chlorine Decay in Water Networks», *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 7, n. 11, pp. 5–11, 2016.

ANEXOS

ANEXO I. FLUXOGRAMA DO SISTEMA ADUTOR DA ETA X

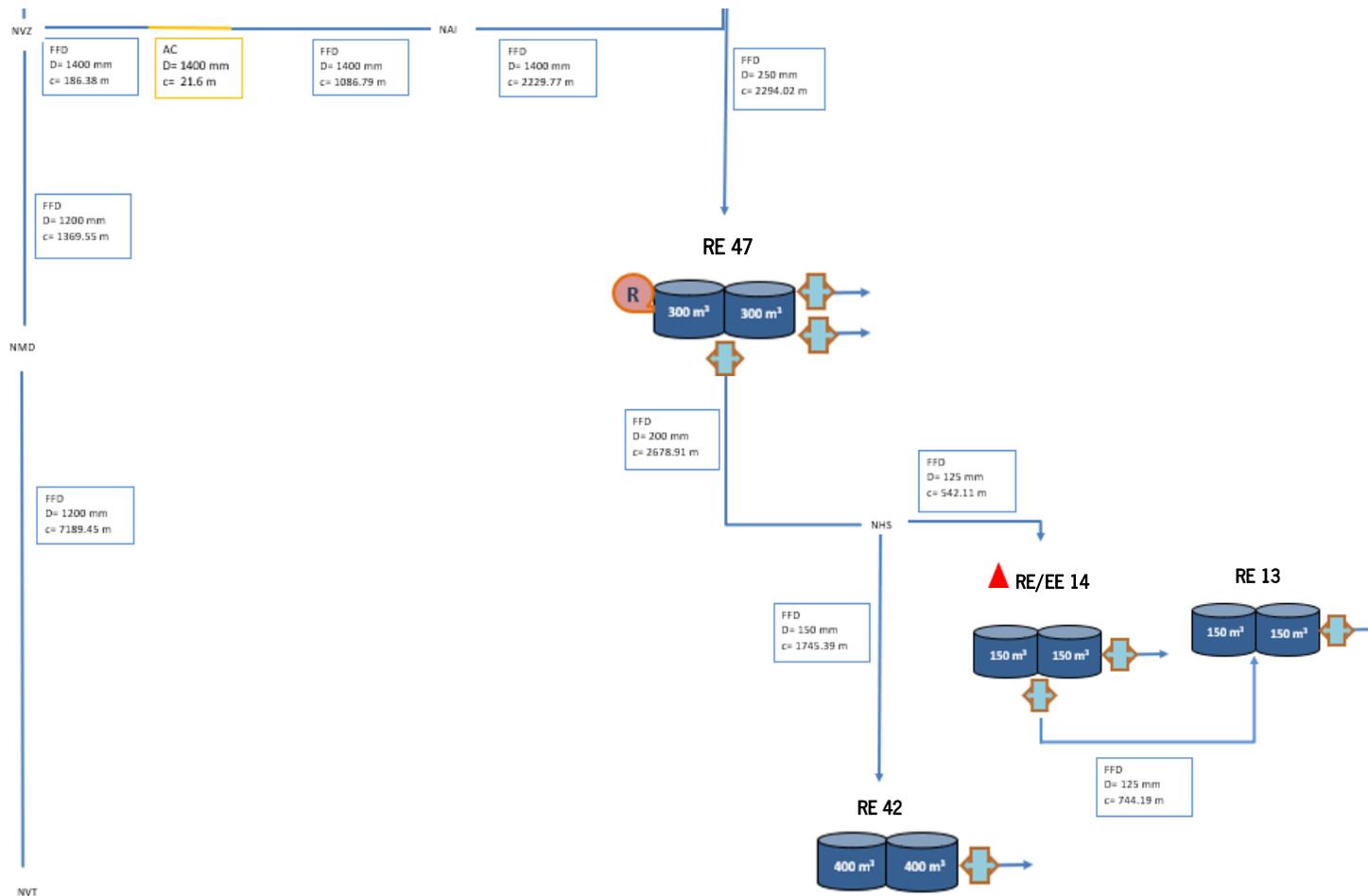
Considerando a elevada dimensão do documento serão apenas apresentados três excertos do documento de forma a elucidar a forma como foi construído.



Legenda:

- Ferro fundido dúctil (FFD); — Aço (AC); ▲ Estação Elevatória (EE); 🗄 Reservatório (RE); 🟡 Pequena recloração com Hipoclorito de Sódio; 🟠 Grande recloração com Hipoclorito de Sódio; 📏 Medidor de caudal

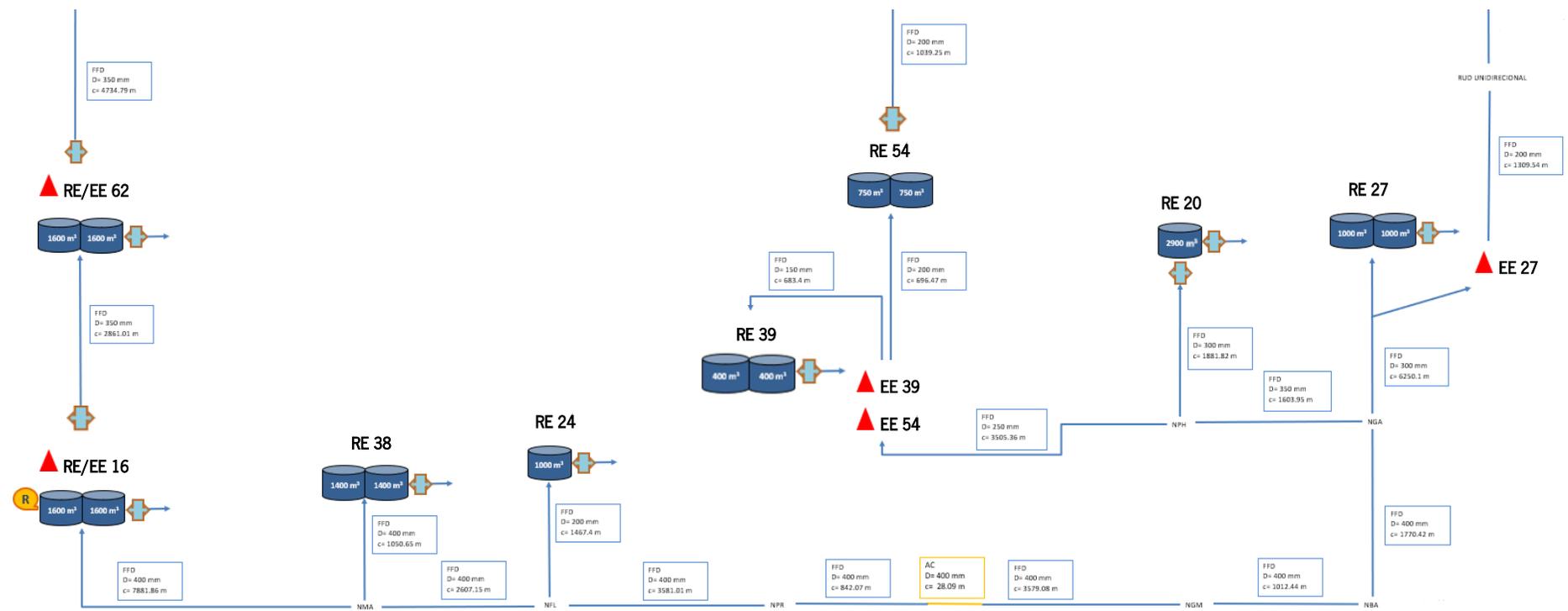
Figura 18. Primeiro excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.



Legenda:

— Ferro fundido dúctil (FFD); — Aço (AC); ▲ Estação Elevatória (EE); Reservoirio (RE); R Pequena rechloragem com Hipoclorito de Sódio; Medidor de caudal

Figura 19. Segundo excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.



Legenda:

— Ferro fundido dúctil (FFD); — Aço (AC); ▲ Estação Elevatória (EE); Reservatório (RE); R Grande rechloragem com Hipoclorito de Sódio; Medidor de caudal

Figura 20. Terceiro excerto do fluxograma do sistema adutor da ETA X.

ANEXO II. CÁLCULO DO DIÂMETRO INTERNO DAS CONDUTAS

Tendo como referência o troço que se inicia no Nó 35 e termina no EE 35 sabe-se, sob consulta do “Cadastro de Abastecimento de Água”, que esta conduta tem 250 mm de diâmetro externo, é feita de Polietileno de Alta Densidade e tem uma pressão nominal de 10 bar. Desta forma, como mencionado no capítulo 3.2, houve a necessidade de se consultar o catálogo de produtos da empresa Alfatubo (Figura 21) a fim de conhecer a espessura da conduta e, posteriormente, determinar o diâmetro interno. Sendo assim, consultando o site da Alfatubo, é possível encontrar uma lista de tubos de PEAD produzidos para uma pressão nominal de 10 bar. Com a informação de que o diâmetro da conduta é de 250 mm, consegue-se ter conhecimento da espessura da conduta (14,8 mm) – assinalado no retângulo a vermelho.

Assim sendo, o diâmetro interno (d_i) da conduta anteriormente mencionada pode ser calculado da seguinte forma:

$$d_i = 250 - 14,8 = 235,2 \text{ mm}$$

alfatubo Certificados 3.1

EMPRESA LABORATÓRIO PRODUTOS DOWNLOADS NOTÍCIAS LINKS CONTACTOS OK

ÁGUA > TUBO PE100 ALFAHIDRO > Tubo PEAD PE100 SDR17 PN10

Mostrar 50 registros Procurar:

REFERENCIA	DIMENSÕES (Øxe)(mm)	PALETE(m)	PALETE(un)	VARA(m)	ROLO(m)
PAAD100320200	32x2,0				
PAAD100400240	40x2,4				
PAAD100500300	50x3,0				
PAAD100630380	63x3,8				
PAAD100630386	63x3,8				
PAAD100750450	75x4,5				
PAAD100750455	75x4,5				
PAAD100750456	75x4,5				
PAAD100900540	90x5,4				
PAAD100900545	90x5,4				
PAAD100900546	90x5,4				
PAAD1011006612	110x6,6				
PAAD101100665	110x6,6				
PAAD1012507412	125x7,4				
PAAD1014008312	140x8,3				
PAAD1016009512	160x9,5				
PAAD1018010712	180x10,7				
PAAD1020011912	200x11,9				
PAAD1022513412	225x13,4				
PAAD1025014812	250x14,8				
PAAD1028016612	280x16,6				
PAAD1031518712	315x18,7				
PAAD1035521112	355x21,1				
PAAD1040023712	400x23,7				
PAAD1045026712	450x26,7				
PAAD1050030712	500x29,7				

ÁREAS DE APLICAÇÃO

- ÁGUA
- SANEAMENTO
- GÁS NATURAL
- ÁGUA INDUSTRIAL
- TRANSPORTE SÓLIDOS
- REGA INDUSTRIAL
- VENTILAÇÃO
- PROTECÇÃO CABOS E TELEMETRIA
- ÁGUA QUENTE E FRIA
- PAVIMENTO RADIANTE
- AQUECIMENTO CENTRAL
- GEO TermIA
- ENERGIA SOLAR
- APLICAÇÕES MARÍTIMAS

Figura 21. Catálogo da empresa Alfatubo para condutas de PEAD.

Este procedimento foi apenas efetuado para as condutas de PEAD e PVC, como já mencionado anteriormente, já que a informação existente é apenas do diâmetro externo.

ANEXO III. CÁLCULO DO CAUDAL DE TROÇOS COM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

No cálculo do caudal de troços com Estação Elevatória foram considerados dois troços para uma explicação mais sustentada.

O primeiro troço considerado foi o que se inicia na ETA X e termina no reservatório 2 (presente na Figura 14) já que o seu cálculo constitui uma exceção. Para esse troço, calculou-se uma média dos consumos elevados em cada dia, por exemplo:

No dia 21 de julho de 2021, os RAB continham 229 390 067 m³ de água tratada. No dia 22 de julho de 2021, os RAB continham 229 486 339 m³ de água tratada. Como forma de saber qual o volume (*V*) de água elevada no dia 22 fez-se o seguinte cálculo:

$$V = 229\,486\,339 - 229\,390\,067 = 96\,272\text{ m}^3$$

Como forma de saber qual o caudal horário (*q_h*) bastou dividir o caudal médio elevado num dia pelas vinte e quatro horas:

$$q_h = \frac{96\,272}{24} = 4\,011,33\text{ m}^3/\text{h}$$

Fez-se o mesmo cálculo para todos os dias do ano, obtendo-se posteriormente uma média para os meses correspondentes à época alta e à época baixa. Desta forma, para época alta, fez-se uma média dos valores obtidos de julho a setembro de 2021 e obteve-se o valor médio horário de 3988,27 m³. E para época baixa fez-se uma média dos valores obtidos de outubro 2020 a junho 2021, obtendo-se um caudal médio horário de 3417,50 m³.

O segundo troço considerado foi o que se inicia no reservatório 2 e termina no reservatório 47. Neste troço, encontra-se a Estação Elevatória 2 que trabalha em média, em época alta, cinco horas por dia a um caudal de 120 m³/h. Estes valores foram obtidos consultando o sinótico de telegestão da ETA X para os meses correspondentes à época alta.

Assim sendo, para obter um caudal médio horário procedeu-se da seguinte forma, calculando primeiramente o caudal médio diário (*q_d*):

$$q_d = 120 \times 5 = 600\text{ m}^3/\text{d}$$

$$q_h = \frac{600}{24} = 25\text{ m}^3/\text{h}$$

O cálculo anterior foi efetuado de igual forma para a época baixa e representa o cálculo que é feito em todos os troços com Estação Elevatória.

ANEXO IV. CÁLCULO DO CAUDAL DE TROÇOS SEM ESTAÇÃO ELEVATÓRIA

Para o cálculo do caudal de troços sem Estação Elevatória, foi considerado o troço do reservatório 47 até NHS, presente também na Figura 14. Neste cálculo, foi necessário considerar o consumo do reservatório 42, o consumo do reservatório 14 e o caudal da estação elevatória 14.

Para o consumo dos reservatórios 42 e 14 foi necessário consultar os dados de faturação. Exemplificando, para o reservatório 42 foi faturado um caudal médio mensal de 4698 m³ para época alta. Para obter o caudal médio horário, foi necessário calcular primeiro o caudal médio diário da seguinte forma:

$$q_d = \frac{4698}{33} = 142,36 \text{ m}^3/\text{d}$$

Os 33 dias são uma base mensal considerada de acordo com os intervalos de faturação.

Para obter o caudal médio horário fez-se o seguinte cálculo:

$$q_h = \frac{142,36}{24} = 5,93 \text{ m}^3/\text{h}$$

Considerando o consumo do reservatório 14, calculado de igual forma, como sendo 2,42 m³/h e o caudal da Estação Elevatória 14, explicado no anexo anterior, como sendo 3,20 m³/h, é possível obter o caudal médio total (q_t) do troço do reservatório 2 até ao 47:

$$q_t = 5,93 + 2,42 + 3,20 = 11,55 \text{ m}^3/\text{h}$$

ANEXO V. CÁLCULO DA ÁREA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DA CONDUTA

Para o cálculo da área da secção transversal de cada conduta recorreu-se à Equação 2. Desta forma, considerando novamente o troço que vai desde ao reservatório 2 até ao reservatório 47 sabe-se, consultado o fluxograma do sistema adutor da ETA X, que este tem um diâmetro de 250 mm. Sendo assim, o cálculo da área da secção transversal procede-se do seguinte modo:

$$A = \frac{\pi}{4} \times 0,25^2 = 0,05 \text{ m}^2$$

Este cálculo foi efetuado para todos os troços do sistema adutor.

ANEXO VI. CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO

Tendo os valores de área e de caudal, o cálculo da velocidade média de escoamento para a água que se encontra no troço que se inicia no reservatório 2 e termina no reservatório 47 realiza-se com recurso à Equação 1:

$$u = \frac{25}{0,05} = 500 \text{ m/h}$$

De forma a converter o caudal em “m/s” recorreu-se à seguinte regra de três simples:

$$u = 500 \frac{\text{m}}{\text{h}} = \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}$$
$$u = \frac{500 \times 1}{3600} = 0,14 \text{ m/s}$$

ANEXO VII. CÁLCULO DA PERDA DE CARGA UNITÁRIA

Rearranjando a Equação 5 e a Equação 6, é possível obter a seguinte equação:

$$J = 10,65 \cdot \frac{q^{1,852}}{C^{1,852} \cdot d^{4,871}}$$

Os valores de caudal e diâmetro já são conhecidos, mas resta determinar o valor do coeficiente de rugosidade de *Hazen-Williams*. Como já referido anteriormente, segundo o EPANET os valores de *C* para ferro fundido variam entre 130 a 140, pelo que se optou por fazer uma média, devido às tubagens já serem usadas, dando o valor de 135.

Foi necessário recorrer a uma regra de três simples para converter o caudal do troço que se inicia no reservatório 2 e termina no reservatório 47 em “m/s”. Sendo assim:

$$q = 25 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = \frac{1}{3600} \frac{\text{h}}{\text{s}}$$
$$q = \frac{25 \times 1}{3600} = 0,007 \text{ m}^3/\text{s}$$

Sendo assim, considerando o troço da ETA X até ao reservatório 2, a perda de carga unitária tem o valor de:

$$J = 10,65 \times \frac{(0,007^{1,852})}{135^{1,852} \times 0,25^{4,871}} = 0,0001 \text{ m/m}$$

ANEXO VIII. CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA DE ESCOAMENTO CONSIDERANDO AS PERDAS DE CARGA

Através da Equação 7 é possível obter a velocidade média de escoamento considerando as perdas de carga. Sendo assim, para o troço considerado anteriormente:

$$u = 0,355 \times 135 \times 0,25^{0,63} \times 0,0001^{0,54} = 0,14 \text{ m/s}$$

ANEXO IX. CÁLCULO DO REGIME DE ESCOAMENTO

De forma a saber o regime de escoamento presente em cada conduta foi cálculo o número de Reynolds com recurso à Equação 3.

Considerando, de novo, o troço que vai desde ao reservatório 2 até ao reservatório 47 sabe-se que este tem um diâmetro de 250 mm. Sabe-se ainda que, para época alta, a velocidade média de escoamento da água neste troço é de 0,14 m/s e, considerando a temperatura da água a 20 °C, é possível consultar os valores de densidade da água que é 998,204 kg/m³ e viscosidade da mesma 1,005 mPa.s. Desta forma o regime de escoamento pode ser calculado do seguinte modo:

$$Re = \frac{0,14 \times 0,25 \times 998,204}{1,005 \times 10^{-3}} \approx 35129$$

ANEXO X. CÁLCULO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA HIDRÁULICO DA ÁGUA

Terminado o cálculo da velocidade, é necessário consultar o Fluxograma do sistema adutor da ETA X, para retirar a distância do troço que se inicia no reservatório 2 e termina no reservatório 47. Sendo a distância 2294,02 m, é possível calcular o tempo de residência hidráulico da água demora a chegar ao reservatório 2, utilizando a Equação 9:

$$t = \frac{2294,02}{500} = 4,59 \text{ h}$$

ANEXO XI. VALORES DE CONCENTRAÇÃO DE CLORO NAS DUAS EXPERIÊNCIAS LABORATORIAIS

O símbolo “-“ representa que a ausência de medição da concentração de cloro.

Na primeira experiência fez-se a média das duas leituras de cada amostra. Por sua vez, na segunda experiência, fez-se a média entre as quatro leituras feitas para as duas amostras da mesma concentração inicial.

O cálculo do erro foi efetuado através do desvio padrão entre as duas leituras de cada amostra.

Tabela 12. Valores de concentração de cloro ao longo do tempo na primeira experiência

t / h	Amostra 1				Amostra 2				Amostra 3				Amostra 4			
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro
0	0,40	-	0,40	0,00	0,83	-	0,83	0,00	1,28	-	1,28	0,00	1,89	-	1,89	0,00
4	0,37	-	0,37	0,00	0,75	-	0,75	0,00	1,16	-	1,16	0,00	1,89	-	1,89	0,00
19	0,32	-	0,32	0,00	0,67	-	0,67	0,00	1,03	-	1,03	0,00	1,82	-	1,82	0,00
28	0,30	-	0,30	0,00	0,64	-	0,64	0,00	0,95	-	0,95	0,00	1,79	-	1,79	0,00
43	0,27	-	0,27	0,00	0,59	-	0,59	0,00	0,88	-	0,88	0,00	1,76	-	1,76	0,00
52	0,25	-	0,25	0,00	0,58	-	0,58	0,00	0,83	-	0,83	0,00	1,71	-	1,71	0,00
67	0,23	-	0,23	0,00	0,55	-	0,55	0,00	0,77	-	0,77	0,00	1,69	-	1,69	0,00
76	0,23	-	0,23	0,00	0,57	-	0,57	0,00	0,76	-	0,76	0,00	1,81	-	1,81	0,00
91	0,22	0,22	0,22	0,00	0,56	0,56	0,56	0,00	0,74	0,74	0,74	0,00	1,81	1,81	1,81	0,00
100	0,20	0,19	0,20	0,01	0,50	0,50	0,50	0,00	0,66	0,65	0,66	0,01	1,66	1,66	1,66	0,00
163	0,13	0,12	0,13	0,01	0,45	0,44	0,45	0,01	0,47	0,49	0,48	0,01	1,30	1,32	1,32	0,03
172	0,07	0,06	0,07	0,01	0,28	0,32	0,30	0,03	0,36	0,33	0,35	0,02	1,25	1,22	1,24	0,02
187	0,12	0,11	0,12	0,01	0,36	0,39	0,38	0,02	0,38	0,29	0,34	0,06	0,93	0,91	0,92	0,01
196	0,11	0,10	0,11	0,01	0,32	0,33	0,33	0,01	0,32	0,29	0,31	0,02	0,71	0,80	0,76	0,06
211	0,09	0,08	0,09	0,01	0,26	0,28	0,27	0,01	0,26	0,32	0,29	0,04	0,56	0,55	0,56	0,01
220	0,09	0,08	0,09	0,01	0,28	0,27	0,28	0,01	0,26	0,25	0,26	0,01	0,67	0,68	0,68	0,01
235	0,07	0,09	0,08	0,01	0,22	0,24	0,23	0,01	0,24	0,23	0,24	0,01	0,67	0,66	0,67	0,01
244	0,08	0,07	0,08	0,01	0,24	0,24	0,24	0,00	0,17	0,16	0,17	0,01	0,52	0,63	0,58	0,08
259	0,08	0,07	0,08	0,01	0,18	0,24	0,21	0,04	0,13	0,16	0,15	0,02	0,61	0,61	0,61	0,00
268	0,03	-	0,03	0,00	0,09	-	0,09	0,00	0,08	0,07	0,08	0,01	-	-	-	-

Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência

t / h	Amostra 1				Amostra 2				Amostra A	
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Média	Erro
0	0,48	0,49	0,485	0,007	0,50	0,49	0,495	0,007	0,490	0,010
15,33	0,48	0,48	0,480	0,000	0,48	0,48	0,480	0,000	0,480	0,000
24	0,47	0,48	0,475	0,007	0,48	0,48	0,480	0,000	0,478	0,007
39,33	0,46	0,48	0,470	0,014	0,47	0,46	0,465	0,007	0,468	0,016
48	0,45	0,46	0,455	0,007	0,47	0,47	0,470	0,000	0,463	0,007
63,33	0,45	0,45	0,450	0,000	0,46	0,47	0,465	0,007	0,458	0,007
72	0,45	0,47	0,460	0,014	0,48	0,47	0,475	0,007	0,468	0,016
135,33	0,45	0,44	0,445	0,007	0,47	0,46	0,465	0,007	0,455	0,010
144	0,43	0,41	0,420	0,014	0,45	0,45	0,450	0,000	0,435	0,015
159,33	0,41	0,42	0,415	0,007	0,43	0,46	0,445	0,021	0,430	0,022
168	0,41	0,41	0,410	0,000	0,46	0,46	0,460	0,000	0,435	0,000
183,33	0,39	0,38	0,385	0,007	0,40	0,42	0,410	0,014	0,398	0,016
192	0,38	0,40	0,390	0,014	0,44	0,44	0,440	0,000	0,415	0,015
207,33	0,38	0,40	0,390	0,014	0,44	0,45	0,445	0,007	0,418	0,017
216	0,38	0,39	0,385	0,007	0,43	0,43	0,430	0,000	0,408	0,007
231,33	0,39	0,40	0,395	0,007	0,42	0,43	0,425	0,007	0,410	0,018
240	0,38	0,37	0,375	0,007	0,42	0,42	0,420	0,000	0,398	0,026
303,33	0,33	0,33	0,330	0,000	0,39	0,38	0,385	0,007	0,358	0,032
312	0,32	0,34	0,330	0,014	0,37	0,37	0,370	0,000	0,350	0,024
327,33	0,31	0,32	0,315	0,007	0,37	0,38	0,375	0,007	0,345	0,035
336	0,30	0,31	0,305	0,007	0,36	0,36	0,360	0,000	0,333	0,032
351,33	0,30	0,31	0,305	0,007	0,36	0,36	0,360	0,000	0,333	0,032
360	0,29	0,30	0,295	0,007	0,33	0,31	0,320	0,014	0,308	0,017
375,33	0,28	0,28	0,280	0,000	0,32	0,31	0,315	0,007	0,298	0,021
384	0,27	0,27	0,270	0,000	0,32	0,30	0,310	0,014	0,290	0,024
471,33	0,26	0,25	0,255	0,007	0,23	0,22	0,225	0,007	0,240	0,018
480	0,23	0,24	0,235	0,007	0,22	0,21	0,215	0,007	0,225	0,013
488,67	0,23	0,24	0,235	0,007	0,19	-	0,190	0,000	0,213	0,026
497,34	0,23	0,23	0,230	0,000	-	-	-	-	0,230	0,000

Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação)

t / h	Amostra 3				Amostra 4				Amostra B	
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Média	Erro
0	0,98	0,98	0,980	0,000	0,99	0,98	0,985	0,007	0,983	0,007
15,33	0,97	0,96	0,965	0,007	0,95	0,98	0,965	0,021	0,965	0,022
24	0,95	0,95	0,950	0,000	0,95	0,96	0,955	0,007	0,953	0,007
39,33	0,96	0,96	0,960	0,000	0,95	0,94	0,945	0,007	0,953	0,007
48	0,95	0,95	0,950	0,000	0,95	0,94	0,945	0,007	0,948	0,007
63,33	0,95	0,95	0,950	0,000	0,95	0,94	0,945	0,007	0,948	0,007
72	0,94	0,96	0,950	0,014	0,95	0,96	0,955	0,007	0,953	0,016
135,33	0,94	0,95	0,945	0,007	0,93	0,94	0,935	0,007	0,940	0,010
144	0,92	0,93	0,925	0,007	0,91	0,93	0,920	0,014	0,923	0,016
159,33	0,92	0,93	0,925	0,007	0,92	0,93	0,925	0,007	0,925	0,010
168	0,92	0,93	0,925	0,007	0,93	0,93	0,930	0,000	0,928	0,007
183,33	0,92	0,92	0,920	0,000	0,92	0,92	0,920	0,000	0,920	0,000
192	0,95	0,93	0,940	0,014	0,94	0,94	0,940	0,000	0,940	0,014
207,33	0,95	0,93	0,940	0,014	0,90	0,91	0,905	0,007	0,923	0,016
216	0,94	0,93	0,935	0,007	0,93	0,91	0,920	0,014	0,928	0,016
231,33	0,93	0,93	0,930	0,000	0,90	0,91	0,905	0,007	0,918	0,007
240	0,93	0,93	0,930	0,000	0,92	0,92	0,920	0,000	0,925	0,000
303,33	0,90	0,90	0,900	0,000	0,88	0,89	0,885	0,007	0,893	0,007
312	0,89	0,90	0,895	0,007	0,87	0,89	0,880	0,014	0,888	0,016
327,33	0,89	0,88	0,885	0,007	0,85	0,87	0,860	0,014	0,873	0,016
336	0,87	0,87	0,870	0,000	0,86	0,86	0,860	0,000	0,865	0,000
351,33	0,87	0,87	0,870	0,000	0,86	0,86	0,860	0,000	0,865	0,000
360	0,86	0,86	0,860	0,000	0,84	0,84	0,840	0,000	0,850	0,000
375,33	0,85	0,86	0,855	0,007	0,83	0,84	0,835	0,007	0,845	0,010
384	0,85	0,85	0,850	0,000	0,79	0,80	0,795	0,007	0,823	0,007
471,33	0,83	0,81	0,820	0,014	0,77	0,76	0,765	0,007	0,793	0,016
480	0,78	0,78	0,780	0,000	0,77	0,76	0,765	0,007	0,773	0,007
488,67	0,78	0,78	0,780	0,000	0,75	0,75	0,750	0,00	0,765	0,000
497,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação)

t / h	Amostra 5				Amostra 6				Amostra C	
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Média	Erro
0	1,45	1,43	1,440	0,014	1,41	1,40	1,405	0,007	1,423	0,016
15,33	1,42	1,42	1,420	0,000	1,41	1,40	1,405	0,007	1,413	0,007
24	1,40	1,39	1,395	0,007	1,41	1,38	1,395	0,021	1,395	0,022
39,33	1,43	1,38	1,405	0,035	1,41	1,37	1,390	0,028	1,398	0,045
48	1,40	1,38	1,390	0,014	1,39	1,37	1,380	0,014	1,385	0,020
63,33	1,39	1,37	1,380	0,014	1,39	1,36	1,375	0,021	1,378	0,026
72	1,41	1,42	1,415	0,007	1,40	1,41	1,405	0,007	1,410	0,010
135,33	1,41	1,42	1,415	0,007	1,39	1,41	1,400	0,014	1,408	0,016
144	1,39	1,38	1,385	0,007	1,37	1,36	1,365	0,007	1,375	0,010
159,33	1,39	1,36	1,375	0,021	1,37	1,38	1,375	0,007	1,375	0,022
168	1,40	1,38	1,390	0,014	1,38	1,37	1,375	0,007	1,383	0,016
183,33	1,35	1,39	1,370	0,028	1,37	1,36	1,365	0,007	1,368	0,029
192	1,39	1,40	1,395	0,007	1,38	1,37	1,375	0,007	1,385	0,010
207,33	1,42	1,43	1,425	0,007	1,42	1,42	1,420	0,000	1,423	0,007
216	1,43	1,43	1,430	0,000	1,42	1,41	1,415	0,007	1,423	0,007
231,33	1,41	1,42	1,415	0,007	1,42	1,39	1,405	0,021	1,410	0,022
240	1,39	1,41	1,400	0,014	1,41	1,40	1,405	0,007	1,403	0,016
303,33	1,37	1,39	1,380	0,014	1,37	1,37	1,370	0,000	1,375	0,014
312	1,35	1,38	1,365	0,021	1,36	1,32	1,340	0,028	1,353	0,035
327,33	1,35	1,36	1,355	0,007	1,36	1,33	1,345	0,021	1,350	0,022
336	1,36	1,36	1,360	0,000	1,36	1,36	1,360	0,000	1,360	0,000
351,33	1,34	1,35	1,345	0,007	1,33	1,34	1,335	0,007	1,340	0,010
360	1,34	1,35	1,345	0,007	1,32	1,34	1,330	0,014	1,338	0,016
375,33	1,30	1,30	1,30	0,000	1,32	1,32	1,320	0,000	1,310	0,000
384	1,30	-	1,30	-	1,32	1,32	1,320	0,000	1,313	0,000
471,33	1,20	1,22	1,210	0,014	1,25	1,27	1,260	0,014	1,235	0,020
480	-	-	-	-	1,25	1,26	1,255	0,007	1,255	0,007
488,67	-	-	-	-	1,25	-	1,250	-	1,250	-
497,34	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabela 13. Valores de concentração média de cloro ao longo do tempo na segunda experiência (Continuação)

t / h	Amostra 7				Amostra 8				Amostra D	
	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Leitura 1	Leitura 2	Média	Erro	Média	Erro
0	1,98	2,00	1,990	0,014	1,98	2,00	1,990	0,014	1,990	0,020
15,33	1,95	1,93	1,940	0,014	1,96	1,93	1,945	0,021	1,943	0,025
24	1,93	1,91	1,920	0,014	1,93	1,94	1,935	0,007	1,928	0,016
39,33	1,90	1,91	1,905	0,007	1,90	1,85	1,875	0,035	1,890	0,036
48	1,88	1,90	1,890	0,014	1,87	1,87	1,870	0,000	1,880	0,014
63,33	1,87	1,89	1,880	0,014	1,82	1,81	1,815	0,007	1,848	0,016
72	1,90	1,90	1,900	0,000	1,82	1,83	1,825	0,007	1,863	0,007
135,33	1,86	1,87	1,865	0,007	1,87	1,87	1,870	0,000	1,868	0,007
144	1,87	1,87	1,870	0,000	1,86	1,87	1,865	0,007	1,868	0,007
159,33	1,84	1,85	1,845	0,007	1,80	1,80	1,800	0,000	1,823	0,007
168	1,85	1,83	1,840	0,014	1,81	1,80	1,805	0,007	1,823	0,016
183,33	1,79	1,79	1,790	0,000	1,84	1,84	1,840	0,000	1,815	0,000
192	1,78	1,79	1,785	0,007	1,77	1,81	1,790	0,028	1,788	0,029
207,33	1,83	1,81	1,820	0,014	1,88	1,89	1,885	0,007	1,853	0,016
216	1,79	1,79	1,790	0,000	1,86	1,87	1,865	0,007	1,828	0,007
231,33	1,77	1,78	1,775	0,007	1,84	1,84	1,840	0,000	1,808	0,007
240	1,75	1,77	1,760	0,014	1,82	1,83	1,825	0,007	1,793	0,016
303,33	1,67	1,67	1,670	0,000	1,75	1,72	1,735	0,021	1,703	0,021
312	1,66	1,65	1,655	0,007	1,69	1,69	1,690	0,000	1,673	0,007
327,33	1,61	1,63	1,620	0,014	1,67	1,67	1,670	0,000	1,645	0,014
336	1,61	1,62	1,615	0,007	1,66	1,65	1,655	0,007	1,635	0,010
351,33	1,60	1,59	1,595	0,007	1,66	1,65	1,655	0,007	1,625	0,010
360	1,58	1,58	1,580	0,000	1,63	1,61	1,620	0,014	1,600	0,014
375,33	1,57	1,58	1,575	0,007	1,63	1,60	1,615	0,021	1,595	0,022
384	1,55	1,54	1,545	0,007	1,59	1,57	1,580	0,014	1,563	0,016
471,33	1,43	1,42	1,425	0,007	1,39	1,38	1,385	0,007	1,405	0,010
480	1,46	1,45	1,455	0,007	1,39	1,38	1,385	0,007	1,420	0,010
488,67	1,45	1,42	1,435	0,021	1,37	1,37	1,370	0,000	1,403	0,021
497,34	1,40	-	1,400	-	1,31	1,30	1,305	0,007	1,337	0,007