



ANDRÉ FILIPE MARTINS GRAÇA

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

AVALIAÇÃO E TRATAMENTO DO RISCO NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REUTILIZAÇÃO

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE, PERFIL DE ENGENHARIA SANITÁRIA

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

AVALIAÇÃO E TRATAMENTO DO RISCO NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REUTILIZAÇÃO

ANDRÉ FILIPE MARTINS GRAÇA

Licenciado em Ciências de Engenharia do Ambiente

Orientadora: Rita Cardoso Soares Ribeiro Santos,
Investigadora Auxiliar, Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Coorientadores: Leonor Miranda Monteiro do Amaral,
Professora Associada, FCT-NOVA

Júri:

Presidente: Prof.^a Doutora Rita Maurício Rodrigues
Rosa,
Professora Associada, FCT-NOVA

Arguente: Doutor Rui Manuel Carvalho Viegas,
Investigador Auxiliar, LNEC

Vogais: Prof.^a Doutora Leonor Miranda Monteiro do
Amaral,
Professora Associada, FCT-NOVA

MESTRADO EM ENGENHARIA DO AMBIENTE

Universidade NOVA de Lisboa

Setembro, 2022

Avaliação e Tratamento do Risco na Produção de Água para Reutilização

Copyright © André Filipe Martins Graça, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

“Study hard what interests you the most in the most undisciplined, irreverent and original manner possible.” (Richard P. Feynman).

Agradecimentos

Gostaria de expressar o meu agradecimento a algumas pessoas, que foram importantes não só durante a realização deste trabalho, mas também no meu percurso académico.

Primeiramente gostaria de agradecer à Eng^a Rita Ribeiro por ter aceitado ser orientadora desta dissertação, mesmo com uma carga de trabalho elevada. Gostaria de agradecer por ter estado constantemente a exigir mais de mim, fazendo com que melhorasse e expandindo as minhas ferramentas. Para além da sua enorme paciência investida no meu desenvolvimento profissional e pessoal, estou grato pela sua motivação, compreensão e apoio, em que todas as reuniões se revelaram cruciais para aprender alguma coisa nova.

À professora Leonor Amaral, co-orientadora, por estar sempre disponível a ajudar os seus alunos ao longo de todo o curso (e até depois), sem a sua ajuda a realização desta tese não teria sido possível.

Gostaria também de agradecer ao LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil, particularmente ao Núcleo de Engenharia Sanitária do Departamento de Hidráulica e Ambiente, pela oportunidade de realizar esta dissertação, por me deixar utilizar as suas instalações para o fazer e estar próximo de investigadores da área.

À minha *alma mater*, FCT NOVA, onde sempre soube que seria a minha casa, por estes 5 anos incríveis, com os seus altos e baixos, que me fizeram crescer muito enquanto homem. Levarei muitas memórias comigo.

À minha família, especialmente aos meus pais, Carlos e Luísa, por todos os sacrifícios feitos por mim, e à minha avó Aida que partiu recentemente.

Aos amigos que a faculdade me deu e levarei para o resto da minha vida, correndo o risco de me esquecer de alguém não mencionarei nomes. Aos amigos fora da faculdade, que estiveram sempre lá para mim: Adriana, Ana, Carlos, Diogo, Emídio, Jéssica, João, Luís e Miguel. Mais recentemente, à Sara pelo amor, paciência e apoio que me deu, tornando mais fácil de suportar tudo isto.

Por último lugar, gostaria de agradecer a todas as pessoas que não tenham sido mencionadas, mas que contribuíram ao longo destes anos, direta ou indiretamente, para tornar isto possível.

Resumo

A reutilização de água corresponde à utilização de água que provém de água residual e que alcança, após o tratamento necessário, a qualidade apropriada para o uso pretendido, tendo em conta os riscos para a saúde e para o ambiente e a legislação aplicável. A reutilização de água oferece uma origem alternativa de água que está constantemente disponível em zonas urbanas.

A produção de Água para Reutilização (ApR) constitui, assim, um objetivo adicional no tratamento de águas residuais a integrar no funcionamento corrente das ETAR urbanas, sempre que existam condições para a utilização desta origem alternativa de água.

Esta dissertação pretende contribuir para a aplicação de uma metodologia de avaliação e tratamento do risco associado à produção de água para reutilização em ETAR urbanas. Para atingir o objetivo proposto procedeu-se a: a) definição de objetivos e revisão do estado da arte das tecnologias de desinfecção de águas residuais; b) análise da metodologia a aplicar; c) definição de casos teóricos representativos de diferentes situações de produção de ApR; d) aplicação da metodologia nesses casos.

O trabalho desenvolvido justifica-se pela necessidade de aplicar procedimentos claros na avaliação do risco na produção de água residual, tal como definido no Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto.

Palavras-chave: Reutilização de água, avaliação do risco, *Hazard Analysis and Critical and Control Point* (HACCP), *fit-for-purpose*, tratamento multi-barreiras, sistemas para a reutilização

Abstract

Water reuse is the application of water that results from wastewater and achieves, after necessary treatment, the appropriate quality for its intended use, considering risks to human health and the environment as well as its applicable legislation. Water reuse provides an alternative source of water that is constantly available in urban areas.

The production of reuse water is thus an additional goal to be integrated in wastewater treatment in operational urban wastewater treatment plants, whenever conditions exist for the application of this alternative source of water.

This thesis aims to contribute to the application of a methodology for risk assessment and treatment associated with the production of reuse water in urban wastewater treatment plants. To achieve the proposed objective, the following steps were taken: a) definition of objectives and review of the state of the art of wastewater disinfection technologies; b) analysis of the methodology to be applied; c) definition of theoretical cases representative of different situations of reuse water production; d) application of the methodology in such cases.

The developed is justified by the need to apply clear procedures in risk assessment in wastewater production, as defined in *Decreto-Lei n.º 119/2019*, of August 21st.

Keywords: Water reuse, risk assessment, Hazard Analysis and Critical and Control Point (HACCP), fit-for-purpose, multi-barrier treatment, reuse systems

Índice

1.	Introdução	1
1.1.	Enquadramento	1
1.2.	Objetivo da tese	4
1.3.	Estrutura da tese.....	5
2.	Produção de água para reutilização em ETAR urbanas	7
2.1.	Enquadramento da produção de ApR enquanto atividade das ETAR ..	9
2.2.	Usos possíveis da ApR	12
2.3.	Abordagem “ <i>fit-for-purpose</i> ”	13
3.	Tratamento das águas residuais na produção de ApR	17
3.1.	Contaminantes a remover	17
3.1.1.	Contaminantes microbiológicos	17
3.1.2.	Contaminantes químicos.....	20
3.1.3.	Contaminantes de interesse emergente.....	21
3.2.	Tratamento convencional das águas residuais urbanas	22
3.3.	Tratamento adicional envolvido na produção de ApR	23
3.3.1.	Desinfecção.....	24
3.3.2.	Filtração	33
3.3.3.	Tratamento avançado	34
3.4.	Tratamento multi-barreiras	37
4.	Gestão do risco na produção de ApR	39
4.1.	Avaliação do Risco.....	39
4.2.	Tratamento do risco	40
5.	Enquadramento metodológico	43
5.1.	Abordagem seguida.....	43
5.2.	Definição de linhas tipo de tratamento	43
5.3.	Metodologia de avaliação e tratamento do risco na produção de ApR em ETAR urbanas.....	47
6.	Resultados e discussão	51

6.1. Caso 1 – Produção de ApR de classe A	51
6.1.1. Descrição geral	51
6.1.2. Avaliação do risco	52
6.1.3. Tratamento do risco	55
6.2. Caso 2 – Produção de ApR de classe A e de classe B	58
6.2.1. Descrição Geral	58
6.2.2. Avaliação do Risco	58
6.2.3. Tratamento do Risco.....	60
6.3. Caso 3 – Produção de ApR de classe A com eventos de intrusão salina na rede de drenagem	62
6.3.1. Descrição Geral	62
6.3.2. Avaliação do Risco	63
6.3.3. Tratamento do Risco.....	65
6.4. Caso 4 – Produção de ApR para suporte de ecossistemas.....	68
6.4.1. Descrição geral	68
6.4.2. Avaliação do Risco	68
6.4.3. Tratamento do Risco.....	70
7. Conclusões.....	73
8. Referências Bibliográficas	75

Índice de Figuras

<i>Figura 1.1 - Escala do Índice de escassez WEI+</i>	3
<i>Figura 1.2 - WEI+ por Região Hidrográfica</i>	4
<i>Figura 2.1 - Evolução do papel das ETAR</i>	8
<i>Figura 2.2 - Funcionamento das ETAR num contexto de economia circular</i>	9
<i>Figura 3.1 – Etapas de uma linha de tratamento característica de uma ETAR</i>	22
<i>Figura 3.2 - Curva de cloragem ao breakpoint</i>	28
<i>Figura 5.1 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 1</i>	44
<i>Figura 5.2 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 2</i>	45
<i>Figura 5.3 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 3</i>	46
<i>Figura 5.4 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao caso 4</i>	46

Índice de Tabelas

<i>Tabela 2.1 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2.2 - Normas de qualidade de água para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano).....</i>	<i>14</i>
<i>Tabela 2.3 - Normas de qualidade de água para reutilização em uso industrial</i>	<i>15</i>
<i>Tabela 3.1 - Principais patogénicos presentes na água residual e doenças associadas.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabela 3.2 - Comparação de escala logarítmica com escala de percentagem.....</i>	<i>25</i>
<i>Tabela 3.3 - Remoção logarítmica de microrganismos por diferente tipo de tecnologia.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3.4 - Comparação de potenciais redox de diferentes moléculas.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 3.5 - Vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de desinfecção</i>	<i>33</i>
<i>Tabela 3.6 - Alguns processos de oxidação avançada (AOP).....</i>	<i>35</i>
<i>Tabela 3.7 - Tipos de membranas e as suas características</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 5.1 - Classes de classificação de consequências</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.2 - Classes de classificação de probabilidade de incidentes, vertente de qualidade da ApR</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.3 - Classes de classificação de probabilidade de incidentes - vertente de quantidade da ApR ...</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 5.4 - Níveis do risco associado aos diferentes cenários de produção de ApR</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 5.5 - Matriz do risco</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 6.1 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A: classificação de consequências</i>	<i>52</i>
<i>Tabela 6.2 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A: classificação de probabilidade de incidentes.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabela 6.3 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe A</i>	<i>54</i>
<i>Tabela 6.4 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe A</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 6.5 - Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para a produção de ApR classe A.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 6.6 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe A</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 6.7 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe A.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 6.8 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe B: classificação de consequências</i>	<i>58</i>
<i>Tabela 6.9 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe B: classificação de probabilidade de incidentes.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 6.10 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe B.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabela 6.11 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe B</i>	<i>60</i>
<i>Tabela 6.12 - Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para a produção de ApR classe B</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6.13 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe B.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 6.14 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe B</i>	<i>61</i>

<i>Tabela 6.15 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos: classificação de consequências</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 6.16 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos: classificação de probabilidade de incidentes</i>	<i>64</i>
<i>Tabela 6.17 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 6.18 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe A com cloretos</i>	<i>65</i>
<i>Tabela 6.19 - Pontos Críticos de Controle e respectivos limites (alarme e crítico) para produção de ApR classe A com cloretos.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 6.20 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controle para a produção de ApR classe A com cloretos</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.21 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controle para a produção de ApR classe A com cloretos</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 6.22 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe C e B: classificação de consequências .</i>	<i>68</i>
<i>Tabela 6.23 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe C e B: classificação de probabilidade de incidentes.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6.24 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe C e B.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 6.25 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe C e B</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.26 - Pontos Críticos de Controle e respectivos limites (alarme e crítico) para produção de ApR classe C e B</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.27 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controle para a produção de ApR classe C e B.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabela 6.28 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controle para a produção de ApR classe C e B ..</i>	<i>71</i>

Abreviaturas

AOP – Processo de Oxidação Avançada

ApR - Água para Reutilização

CBO₅ - Carência Bioquímica de Oxigénio em cinco dias

CQO - Carência Química de Oxigénio

DL – Decreto-Lei

DNA - Ácido desoxirribonucleico

E.coli – *Escherichia coli*

ETAR - Estação de Tratamento de Águas Residuais

GAC – Carvão Ativado Granular

GEE - Gases de efeito de estufa

HACCP - Hazard Analysis and Critical and Control Points (Análise de Perigos e Controlo de Pontos Críticos)

MBT – Tratamento Multi-Barreiras

MON - Matéria Orgânica Natural

N total – Azoto total

NH₄ – Azoto Amoniacal

NMP – Número Mais Provável

NTU – Unidade Nefelométrica de Turvação

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU - Organização das Nações Unidas

P total – Fósforo total

PAC – Carvão Ativado em Pó

PCC – Ponto Crítico de Controlo

PCQ - Ponto Crítico de Qualidade

PNA - Plano Nacional da Água

ROL - Redução de Ordem Logarítmica

SDT - Sólidos Dissolvidos Totais

SST – Sólidos Suspensos Totais

UE - União Europeia

UFC – Unidades Formadoras de Colónias

UV - Ultra-Violeta

WEI+ - Water Exploitation Index, plus

1. Introdução

1.1. Enquadramento

Assiste-se atualmente a uma maior sensibilização da sociedade relativamente às alterações climáticas, ao aquecimento global, à crise energética e ao crescimento populacional. No entanto, a preocupante extensão de escassez de água por todo o mundo não é suficientemente compreendida e tida em consideração aquando do planeamento de fontes sustentáveis de água a longo prazo (Lazarova et al., 2013).

No último século, houve um significativo aumento na procura de água doce, que continua a aumentar na maior parte do mundo. Este aumento pode ser associado ao crescimento populacional, ao desenvolvimento económico e a mudanças nos padrões de consumo (UNESCO, 2022).

A taxa anual de aumento da procura de água doce é aproximadamente de 1%, sendo expectável que se mantenha durante os próximos 30 anos, motivado principalmente pelo aumento da procura por parte dos setores industrial e energético, como também para usos domésticos e municipais, em função do desenvolvimento industrial e da ampliação de serviços de abastecimento de água e saneamento (UNESCO, 2021). A agricultura é o setor de atividade que mais água utiliza, sendo responsável por cerca de 69% da procura mundial de água, que são principalmente utilizadas em rega, mas também para produção pecuária e aquacultura; nos países em desenvolvimento este valor pode chegar aos 95% (FAO, 2011).

De acordo com o *United Nations Population Fund*, da Organização das Nações Unidas (ONU), a população mundial é, atualmente, cerca de 7,9 mil milhões de pessoas (UNFPA, 2022). Salienta-se o facto de, em 2018, cerca de 2,3 mil milhões de pessoas viverem em países com stress hídrico (UN, 2021).

Na cimeira de 2015 das Nações Unidas, em Nova Iorque, foi definida a Agenda 2030, constituída por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) e 169 metas, com o princípio de abordar as várias dimensões do desenvolvimento sustentável (económico, social e ambiental), promovendo a eficácia da paz, justiça e instituições (UN, 2015). Face à crescente pressão sobre os recursos hídricos foi definido o ODS 6 “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e saneamento para todos”. A ONU publica anualmente um relatório (Relatório dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável) sobre a evolução da aplicação da Agenda 2030. De acordo com o Relatório ODS de 2021, o stress hídrico aumentou 0,2%, de 18,2% para 18,4%, em 3 anos, de

2015 a 2018, ou seja, está a ficar mais grave a situação de escassez de água a nível mundial (UN, 2021).

Perante esta situação, é essencial que se utilizem os recursos hídricos de modo mais eficiente, reduzindo perdas no abastecimento, gerindo a procura e encontrando novas origens de água. Uma das mais promissoras opções para aumentar a disponibilidade de água é a reutilização de água, especialmente em zonas urbanas uma vez que apresentam uma maior concentração da população (Duong & Saphores, 2015).

A reutilização de água corresponde à utilização de água que provém de água residual e que alcança, após o tratamento necessário, a qualidade apropriada para o uso pretendido, tendo em conta os riscos para a saúde e o ambiente e a legislação aplicável (CIS, 2016). A reutilização de água oferece uma origem alternativa de água que está constantemente disponível em zonas urbanas. De facto, tanto em períodos de elevada disponibilidade hídrica, como em períodos de baixa disponibilidade hídrica, a variação na produção de águas residuais não é significativa em sistemas de drenagem separativos (Asano et al., 2007).

No âmbito da Agenda 2030 da ONU, a promoção da reutilização de água é abordada através da definição da meta 6.3, designadamente: “Até 2030, melhorar a qualidade da água reduzindo a poluição, eliminando despejo e minimizando a libertação de produtos químicos e materiais perigosos, reduzindo para metade a proporção de águas residuais não-tratadas e aumentando substancialmente a reciclagem e a reutilização, a nível global” (UN, 2015). O ênfase na reutilização é um elemento-chave para uma gestão mais sustentável da água, dado que a prática atual de reutilizar água está muito abaixo do potencial desta origem alternativa de água.

É importante referir que a escassez de água não é sinónimo de inexistência de água, embora o défice (ou seja, a falta) de água seja um dos seus componentes essenciais (Lazarova et al., 2013). A escassez de água incorpora outros componentes importantes, tais como a deterioração da qualidade de corpos de água naturais, o desequilíbrio entre disponibilidade de água e a sua procura e a competição entre setores e até entre países. A degradação da qualidade da água é geralmente a principal causa de escassez de água e de perda de biodiversidade, mas o seu impacto a uma escala global ainda não foi bem avaliado (UNESCO, 2020). As massas de água doce têm uma capacidade limitada para depurar as crescentes descargas poluentes resultantes da expansão do consumo de água para usos urbanos, industriais e agrícolas. De forma comparável, os efeitos adversos da poluição antropogénica no ambiente marinho estão em crescimento e a criar zonas mortas nos mares e oceanos (Diaz & Rosenberg, 2008).

Em Portugal, a situação de escassez de água está a ser acompanhada no âmbito do estudo de avaliação das disponibilidades hídricas atuais e futuras e aplicação do índice de escassez WEI+ (*Water Exploitation Index, plus*) realizado pela Agência Portuguesa do Ambiente. Os objetivos deste estudo são avaliar as disponibilidades de água superficial e subterrânea na situação atual e em cenários futuros de alterações climáticas, avaliar as necessidades de água dos vários setores, fazer a modelação da alocação e uso da água e efetuar o cálculo do índice de escassez do WEI+ (Oliveira, 2021),

Em dezembro de 2021, foram apresentados resultados iniciais da análise, em consulta pública de 11 de dezembro de 2021 até 30 de junho de 2022 (Oliveira, 2021). Neste documento, é utilizado o índice WEI+, que designa um recurso como sendo renovável se for possível extrair esse recurso da natureza no seu estado original a uma taxa inferior ao seu reabastecimento natural, tal como se indica na equação seguinte:

$$WEI+ = \frac{\text{Uso de água}}{\text{Recursos disponíveis renováveis (RWR)}}$$

Sendo:

Uso de água – Volumes captados, deduzidos dos retornos

RWR – Recursos superficiais e subterrâneos disponíveis, deduzidos dos volumes para fins ecológicos

Este índice serve para determinar indicadores de desempenho que avaliam a capacidade do sistema em satisfazer as necessidades de água. Os valores do índice variam entre 0% e 100%, tal como se indica na Figura 1.1.

WEI+ inferior a 10% - Sem Escassez
WEI+ entre 10% a 20% - Escassez Baixa
WEI+ entre 20% a 30% - Escassez Moderada
WEI+ entre 30% a 50% - Escassez Elevada
WEI+ entre 50% a 70% - Escassez Severa
WEI+ superior 70% - Escassez Extrema

Figura 1.1 - Escala do Índice de escassez WEI+ (Oliveira, 2021)

Os resultados da aplicação do índice WEI+ às regiões hidrográficas de Portugal Continental são apresentados na Figura 1.2.

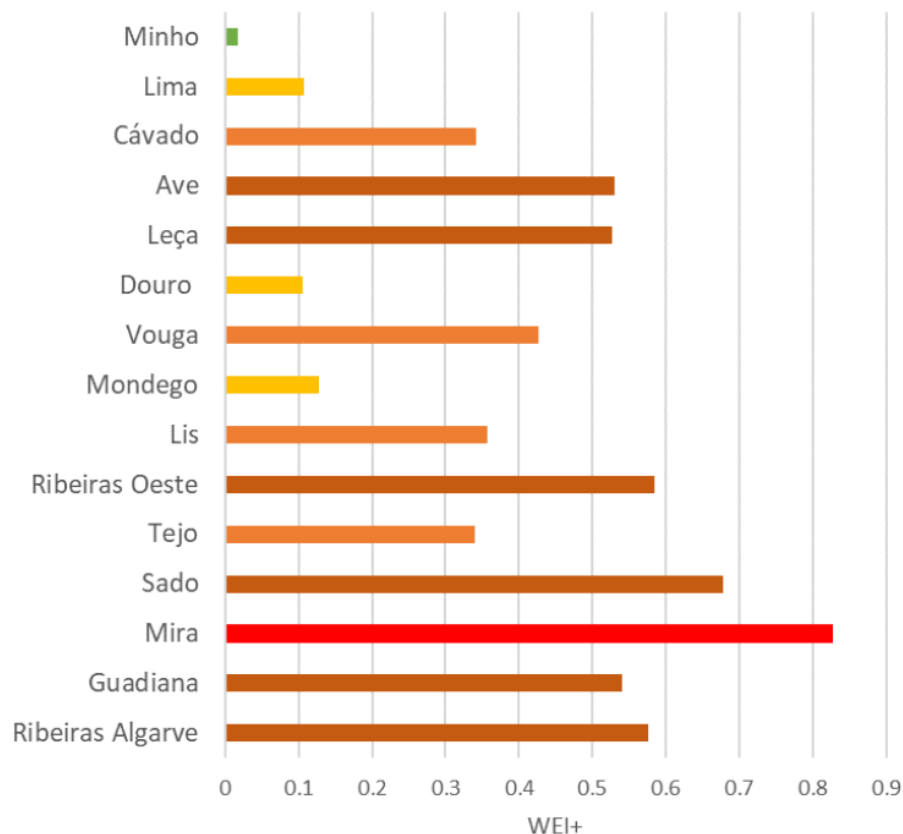


Figura 1.2 - WEI+ por Região Hidrográfica (Oliveira, 2021)

À data da publicação deste estudo (2021), verificou-se que apenas a Bacia Hidrográfica do Minho não se encontrava em situação de escassez, sendo que as restantes 11 apresentavam, na melhor das hipóteses, escassez elevada de água.

Este estudo evidencia a importância de aumentar a eficiência da gestão da água em Portugal onde, nestas circunstâncias, a reutilização da água é uma opção relevante.

1.2. Objetivo da tese

A presente dissertação tem como objetivo principal contribuir para o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação e tratamento do risco associado à produção de água para reutilização em estações de tratamento de águas residuais (ETAR) urbanas. O trabalho desenvolvido tem como enquadramento o Decreto-Lei (DL) n.º 119/2019, de 21 de agosto, designadamente nos aspetos relativos à caracterização da água para reutilização (ApR) e à avaliação do risco, assim como normalização internacional no âmbito da gestão do risco e a boa prática aplicada na identificação de perigos e tratamento do risco.

Este trabalho baseia-se na análise de quatro situações teóricas de produção de ApR. Para todas as situações é pressuposta como condição de base que as etapas de tratamento anteriores ao processo de afinação da qualidade para a produção de ApR são as mesmas e representam uma ETAR urbana convencional. O exercício desenvolvido nesta dissertação tem como objetivo responder aos seguintes objetivos de produção de ApR para usos não potáveis, tendo em considerações diferentes constrangimentos: a) utilização de ApR comum em Portugal; b) aplicação da abordagem *fit-for-purpose*; c) aplicação do conceito multi-barreiras; d) aplicação de sistema de tratamento com baixo consumo energético.

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Enquadrar a atividade de produção de ApR em ETAR urbanas;
- Aprofundar o estudo sobre o tratamento das águas residuais na produção de ApR, focando os contaminantes a remover e os processos de tratamento adicional;
- Aprofundar o estudo sobre a avaliação e o tratamento do risco, com apresentação de boas práticas a utilizar;
- Aplicação da metodologia de avaliação e tratamento do risco aos quatro casos teóricos, com análise e discussão de resultados.

A dissertação é desenvolvida com o intuito de fornecer uma base de trabalho para avaliação e tratamento de risco em projetos de reutilização de água, pois contempla diferentes exemplos de linhas de tratamento associadas a reutilização de água cumprindo os requisitos de qualidade exigidos pelo Decreto-Lei (DL) n.º 119/2019, de 21 de agosto, para diferentes tipos de usos da água associados a condições que têm de ser tidas em conta aquando da realização desses projetos de reutilização.

1.3. Estrutura da tese

O Capítulo 1 pretende enquadrar o tema desta dissertação, bem como descrever o objetivo da dissertação e a sua estrutura.

O Capítulo 2 identifica-se a necessidade da reutilização de água, o seu enquadramento legal em contexto nacional e europeu, as aplicações da reutilização de água e a abordagem *fit-for-purpose*.

No Capítulo 3 apresenta-se a revisão bibliográfica do tratamento de águas residuais com vista à reutilização, designadamente, contaminantes presentes na água residual, tecnologias de tratamento adicional e o tratamento multi-barreiras.

No Capítulo 4 apresenta-se a revisão bibliográfica sobre a avaliação do risco e tratamento do risco (metodologia HACCP).

No Capítulo 5 são definidos e descritos os casos teóricos para análise e como irão ser aplicadas as metodologias de avaliação e tratamento do risco.

O Capítulo 6 apresenta os resultados da aplicação da metodologia de avaliação e tratamento do risco aos quatros casos teóricos, e a sua discussão.

O Capítulo 7 é constituído pelas conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2. Produção de água para reutilização em ETAR urbanas

A maioria das atividades humanas que utilizam água produzem água residual. De acordo com a UNESCO (2021) mais de 80% desta água residual é descarregada no ambiente sem receber qualquer tipo de tratamento, sendo esta situação mais grave nos países com menor desenvolvimento económico.

O principal meio recetor das descargas de águas residuais são os oceanos, também afetados pelas descargas em rios, com consequências negativas para o ambiente aquático. A descarga de águas residuais em massas de água superficial pode afetar a sua qualidade, assim como eventualmente a de aquíferos, limitando a disponibilidade de origens de água doce (UNESCO, 2021).

O tratamento das águas residuais, previamente à descarga no meio recetor, tem por base dois objetivos principais: a proteção da saúde pública e a proteção do ambiente. No primeiro caso, importa remover contaminantes que possam causar doenças através da via hídrica.

As ETAR podem, então, ser definidas como infraestruturas destinadas a reduzir o potencial poluente das águas residuais, de modo que a descarga do efluente tratado no meio recetor não afete a saúde pública e a qualidade da água e consequente equilíbrio dos ecossistemas no meio recetor.

A reutilização de água consiste num objetivo adicional para o tratamento de águas residuais urbanas, aumentando a sua importância à medida que se agrava a escassez de água. Sendo relativamente recente o reconhecimento da reutilização da água como objetivo no tratamento de águas residuais, trata-se de uma prática antiga, realizadas desde há mais de 5000 anos (Salgot et al., 2018). É possível afirmar que a reutilização de água enquanto prática de gestão de água surgiu durante o século XX, após os países desenvolvidos implementarem o tratamento de água residual a uma larga escala e seguindo, também, o aumento da população urbana (Salgot & Folch, 2018).

O desenvolvimento sustentável assume uma relevância crescente no setor da água, contribuindo para a evolução do papel desempenhado pelas ETAR, passando a responder a objetivos como a redução da emissão de gases de efeito de estufa (GEE), a recuperação de nutrientes (e.g. fósforo) e a reutilização de água, para além das tarefas

fundamentais de proteção da saúde pública e de proteção da qualidade da água (Ribeiro & Teixeira, 2018), tal como indica a Figura 2.1.

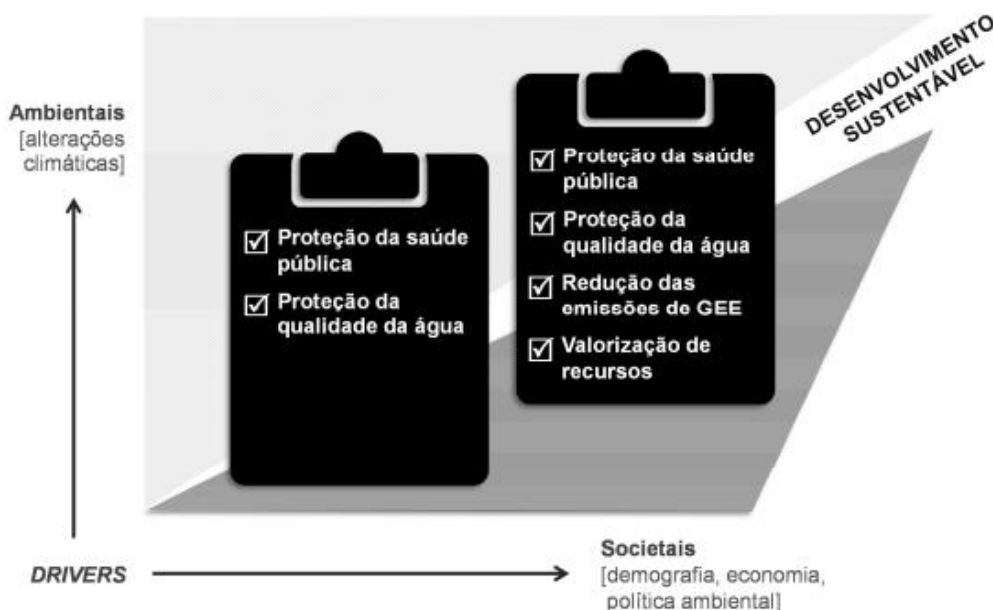


Figura 2.1 - Evolução do papel das ETAR (Ribeiro & Teixeira, 2018)

A produção de Água para Reutilização (ApR) constitui, assim, um objetivo adicional no tratamento de águas residuais a integrar no funcionamento corrente das ETAR urbanas, sempre que existam condições para a utilização desta origem alternativa de água.

O novo Plano de Ação de Economia Circular pretende acelerar a transição para uma economia circular, com políticas que irão definir os futuros produtos sustentáveis e reduzir a produção de resíduos, transformando-os em produtos (EC, 2020). Será possível partindo dos seguintes objetivos (CE, 2011):

- Aumentar a reciclagem;
- Promover a reutilização de materiais ainda com valor;
- Reduzir o consumo de energia e a emissão de GEE na extração e processamento de materiais;
- Assegurar o aprovisionamento de recursos essenciais;
- Limitar os impactos ambientais resultantes da utilização de recursos.

É no contexto de economia circular que as ETAR podem passar a ser consideradas instalações de tratamento e recuperação de água, energia e materiais (Ribeiro & Teixeira, 2018), tal como ilustra a Figura 2.2.

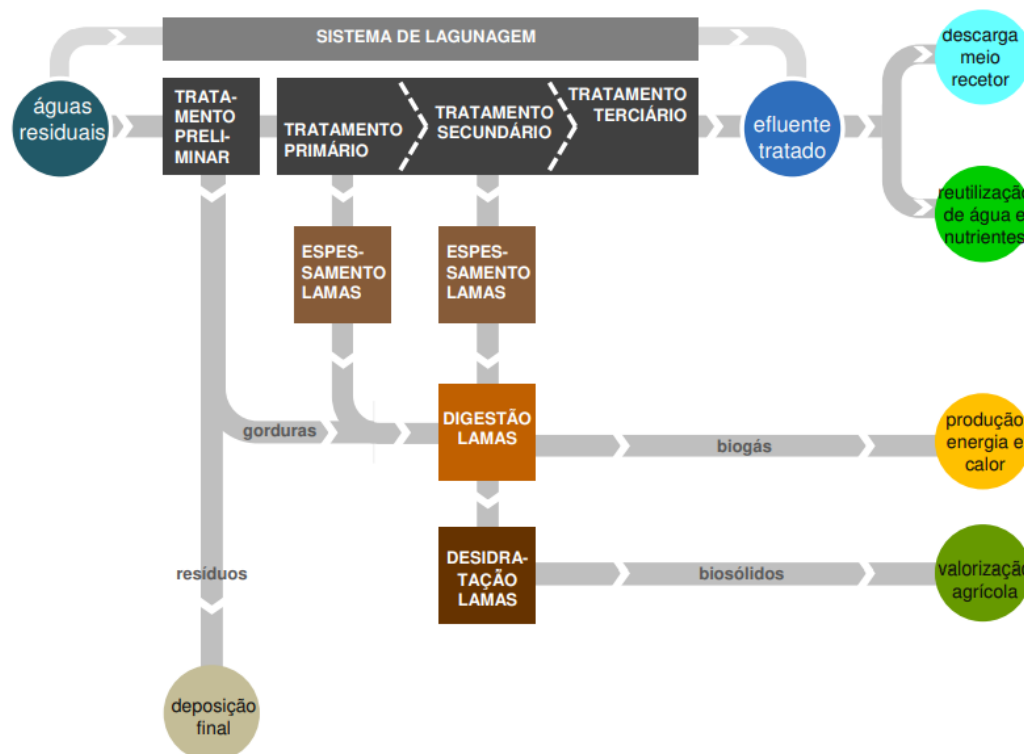


Figura 2.2 - Funcionamento das ETAR num contexto de economia circular (Ribeiro & Teixeira, 2018)

2.1. Enquadramento da produção de ApR enquanto atividade das ETAR

Os regulamentos sobre utilização de águas residuais tratadas são essenciais, pois estabelecem as referências debatidas e aceites para a produção e o uso adequado das mesmas. A reutilização da água é referida em diversos diplomas legais comunitários e nacionais, nomeadamente enquanto objetivo a alcançar através do tratamento das águas residuais e sobre a produção e utilização de água para reutilização.

A Diretiva 91/271/CEE, de 21 de maio, define os requisitos mínimos de qualidade para a descarga de águas residuais tratadas, tendo em conta a sensibilidade do meio recetor para azoto, fósforo e contaminação microbológica e, também, critérios de dimensionamento das ETAR. Esta diretiva promove ainda a reutilização de água (artigo 12º) sendo referido que os Estados Membros da União Europeia (UE) devem reutilizar água sempre que possível. Este incentivo consta do artigo 11.º do Decreto-Lei 152/97, de 19 de junho, o qual transpõe esta Diretiva. No entanto, ambos os documentos referem apenas que a reutilização deve ser efetuada sempre que possível, não

fornecendo indicações adicionais. Regista-se que, embora tivesse existido a intenção de se exercer práticas de reutilização já desde há mais de 30 anos, a ausência de diretrizes claras tem dificultado essa possibilidade a uma larga escala.

A Diretiva 91/271/CEE encontra-se em revisão por haver elementos que não são claros ou que precisam de ser mais aprofundados, para além da necessidade de abordar os desafios sociais e ambientais do presente, onde estão incluídos as Alterações Climáticas e os Contaminantes Emergentes.

Neste sentido, a Comissão Europeia anunciou a ambição de enfrentar as fontes de poluição da água, especialmente em contexto urbano, que não são suficientemente abordadas pela legislação existente. A revisão em curso tem uma direção alinhada com os objetivos definidos pelo *European Green Deal* (2019). De facto, em 2020, à luz do *Circular Economy Action Plan*, um dos pilares do *European Green Deal*, a Comissão Europeia anunciou que iria considerar a revisão da Diretiva 91/271/CEE em conformidade com o seu potencial de contribuir para uma economia circular e mais limpa.

Enquanto este processo decorre a nível europeu, foi publicado, a nível nacional, o Decreto-Lei n.º 16/2021, de 24 de fevereiro, no qual introduz medidas relativas à produção de água para reutilização obtida a partir do tratamento de efluentes, bem como a sua disponibilização. No artigo 1.º deste Decreto, refere-se que passa a ser incluída a produção de ApR nas atividades a desenvolver pelos sistemas multimunicipais.

No que se refere à regulamentação da reutilização de água, já existe legislação nacional aplicável às ETAR urbanas.

O Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, estabelece o regime jurídico de produção de água para reutilização, obtida a partir do tratamento de águas residuais, bem como da sua utilização, por forma a promover a sua correta utilização e evitar os efeitos nocivos para a saúde e para o ambiente.

No Decreto-Lei n.º 119/2019, a reutilização da água é suportada por uma abordagem *fit-for-purpose*, são definidas normas específicas ao uso em causa, bem como a proteção dos potenciais recetores em presença, tendo por base uma avaliação do risco. Este decreto estabelece requisitos de qualidade não só para rega agrícola, como também rega paisagística, usos urbanos (não potáveis) e usos industriais.

A minimização dos riscos será alcançada pela aplicação de barreiras múltiplas ajustadas a cada projeto específico - conceito multibarreiras. Este conceito consiste na imposição de barreiras de segurança ao nível do tratamento das águas e de barreiras

físicas para minimização do contacto dos perigos com os recetores (pessoas e ambiente).

O Decreto-Lei n.º 119/2019 define os requisitos para a qualidade e monitorização da água e as principais tarefas de gestão dos riscos, a fim de garantir a reutilização da água em segurança para a saúde e para o ambiente, bem como o regime de licenciamento associado.

Por último, O Decreto-Lei n.º 119/2019 estabelece os mecanismos que visam garantir a transparência e o acesso à informação como aspetos fundamentais para promover a confiança dos utilizadores e também do público em geral no que diz respeito à segurança da reutilização da água.

O Decreto-Lei n.º 119/2019 estabelece, no artigo 28.º, que nos locais de produção e utilização de água para reutilização deve ser colocada informação e sinalética, nos termos definidos por portaria do membro do Governo responsável pela área do ambiente. A Portaria n.º 266/2019, de 26 de agosto, estabelece a regulamentação prevista no artigo 28.º, procedendo à uniformização do símbolo de identificação de água para reutilização, bem como a informação a disponibilizar ao público e aos trabalhadores que operam nos locais de produção e de utilização de ApR.

A nível europeu, foi publicado o Regulamento (UE) 2020/741, de 25 de maio, relativo à reutilização de água na rega agrícola. Este regulamento estabelece requisitos mínimos para a qualidade da água e respetiva monitorização e disposições sobre a gestão dos riscos para a utilização segura de água para reutilização no contexto da gestão integrada da água e tem por objetivo garantir que a ApR seja segura para rega agrícola, e deste modo assegurar a proteção do ambiente, da saúde humana e animal, promover a economia circular e apoiar a adaptação às alterações climáticas. O Regulamento (UE) 2020/741 é obrigatório em todos os seus elementos e diretamente aplicável em todos os Estados-Membros a partir de junho de 2023. A nível nacional, importa referir que o Decreto-Lei n.º 119/2019 já contempla a maioria das disposições deste regulamento.

Adicionalmente, é de referir a recomendação IRAR n.º 02/2007 (IRAR, 2007), para orientação das entidades gestoras dos sistemas multimunicipais e municipais de saneamento de águas residuais no âmbito da reutilização de água.

Finalmente, refere-se o facto da crescente relevância que a reutilização de água, assumiu nos últimos anos em termos de objetivo ambiental não se traduziu em resultados práticos. Em 2012, a percentagem de reutilização foi cerca de 0,1%, ficando bastante aquém do objetivo de 10% definido no PEAASAR (2007), apesar de até à altura

terem sido investidos cerca de 600 M € em projetos que contemplavam a reutilização de água (APA et al., 2015).

2.2. Usos possíveis da ApR

A **agricultura** é o setor que mais água utiliza, correspondendo a cerca de 70% do consumo mundial de água (OECD, n.d.). Segundo o Plano Nacional da Água (PNA), o consumo de água anual para a agricultura e pecuária atingiu os 74% do total do consumo de água (APA, 2015). A reutilização de água na agricultura, caso seja feita de acordo com a boa prática agronómica, permite que haja reciclagem de nutrientes necessários ao crescimento das culturas, possibilitando uma redução de custos na utilização de fertilizantes (Saliu & Oladoja, 2021).

A **rega paisagística** consiste na rega de espaços verdes como, por exemplo, parques e jardins, sendo estes espaços acessíveis sem restrições, e relvados de campos desportivos, principalmente de golfe, cemitérios, ou faixas de separação rodoviária e áreas similares, sendo estes espaços de acesso restrito. A reutilização de água na rega destes espaços verdes constitui a segunda maior aplicação de ApR em países desenvolvidos, depois da rega agrícola (Asano et al., 2007).

Um sistema de reutilização de águas residuais para rega paisagística é análogo a um sistema de reutilização para rega agrícola, com a diferença de as plantas serem, neste caso, de interesse ornamental. A água de rega deve satisfazer as necessidades hídricas das plantas, proporcionar o seu bom desenvolvimento vegetativo (qualidade agronómica) e a qualidade da água para reutilização deve cumprir os requisitos de proteção da saúde pública (ERSAR, 2010).

A reutilização de água para **usos urbanos não potáveis (além da rega)** compreende um vasto conjunto de aplicações, entre eles: lavagem de veículos e ruas, descarga de autoclismos e urinóis, sistemas de climatização, combate a incêndios, construção civil (Okun, 2000).

As **utilizações recreativas e ambientais** de água consistem na reutilização de água em massas de água naturais e/ou artificiais. Estas utilizações têm como finalidade permitir a alimentação de lagos ou lagoas para a prática de atividades recreativas, conservação das zonas húmidas naturais ou artificiais e ainda preservação e desenvolvimento de habitats (Asano et al., 2007).

A utilização de ApR em **usos industriais** tem várias aplicações, sendo o setor industrial o terceiro setor com maior utilização de água (Asano et al., 2007). A ApR pode

ser utilizada em lavagens, revestimento, arrefecimento, caldeiras, sistemas de extinção de incêndios e construção civil (Asano et al., 2007).

Cada tipo de indústria tem requisitos específicos de qualidade para a água que utiliza. No entanto, alguns requisitos de qualidade da água são gerais, como a necessidade de prevenir fenómenos de corrosão e de incrustação, bem como o desenvolvimento de biofilmes nas tubagens e equipamentos acessórios (ERSAR, 2010).

A ApR pode ser aproveitada para a **recarga de aquíferos** com o objetivo de impedir ou atenuar o rebaixamento do nível freático, de proteger os aquíferos nas zonas costeiras contra a intrusão salina e de armazenar água no solo para utilizações futuras (Asano et al., 2007). Este uso é considerado potável indireto. A limitação deste tipo de aplicação é a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas devido a efeitos toxicológicos dos compostos orgânicos presentes (Asano & Cotruvo, 2004).

Para além de usos potáveis indiretos também pode haver **usos potáveis diretos**, que se referem à introdução de água purificada, originada de água residual após extenso tratamento e monitorização para garantir que os requisitos de qualidade da água são sempre cumpridos, diretamente na rede de abastecimento. Esta água tratada pode ser misturada com água de captação, de modo a melhorar a sua qualidade e reduzir custos de tratamento, ou na rede de distribuição juntamente com água tratada (Leverenz et al., 2011).

2.3. Abordagem “*fit-for-purpose*”

Existem autores que afirmam que o princípio chave para um futuro de gestão de água sustentável seja uma cultura de “água única” (traduzido de “*one water*”), onde cada gota de água é renovável (Novotny et al., 2010).

À medida que a sociedade evolui altera-se o modo de abordar a água de acordo com a evolução das necessidades da sociedade. Eventualmente, numa fase avançada de desenvolvimento surgirá, utopicamente, uma sociedade de “água única” onde a oferta e a procura se encontram num equilíbrio permanente, ou seja, todo o ciclo urbano da água funciona em ciclo fechado, sem perdas ou desperdício de água.

É evidente que este tipo de resolução não é possível de se atingir, mas um sistema de gestão de água sustentável, com pouco desperdício e utilização eficiente dos recursos que permita uma redução significativa captação de água da natureza, fazendo-o apenas quando o ciclo de utilização de água não consiga garantir a sua

renovação, é um objetivo mais facilmente alcançável. Um dos aspetos críticos para se otimizar a utilização da água desde a sua captação na natureza até a sua descarga é promover a reutilização de água, destinando-a a diferentes usos de acordo com a sua qualidade e disponibilidade junto dos locais de reutilização.

A reutilização de água implica normalmente o tratamento da água que provém da utilização anterior (ou seja, da água residual) até um nível de qualidade aceitável para o uso pretendido. Esta afinação da qualidade da água tem por objetivo resultar num menor risco possível no uso. Na secção 2.2. são referidos diferentes tipos de usos para reutilização de água, sendo que cada uma dessas opções possui requisitos específicos de qualidade que definem o tratamento necessário para atingir essa qualidade.

O Decreto-Lei n.º 119/2019 define diferentes classes de qualidade para a ApR consoante a utilização, designadamente: rega (Tabela 2.1), usos urbanos e usos paisagísticos (Tabela 2.2) e usos industriais (Tabela 2.3).

Tabela 2.1 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega (fonte: DL n.º 119/2019)

Classe de qualidade ⁽¹⁾	CBO (mg/L O ₂)	SST (mg/L)	Turvação (NTU)	E. coli (ufc/100 mL)	Ovos de parasitas intestinais (Nº/L) ⁽²⁾	Azoto amoniacal ⁽³⁾ (mg NH ₄ ⁺ /L)	Azoto total ⁽³⁾ (mg N/L)	Fósforo total ⁽³⁾ (mg P/L)
A.....	≤10	≤10	≤5	≤10		10	15	5
B.....	≤25	≤35		≤100				
C.....	≤25	≤35		≤1000	≤1			
D.....	≤25	≤35		≤10000	≤1			
E ⁽⁴⁾	≤40	≤60		≤10000				

Tabela 2.2 - Normas de qualidade de água para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano) (retirado do DL n.º 119/2019)

Parâmetro	Suporte de ecossistemas	Usos recreativos, de enquadramento paisagístico	Lavagem de ruas ⁽⁵⁾	Água de combate a incêndios ⁽¹⁾	Águas de arrefecimento	Autoclismos ⁽¹⁾	Lavagem de veículos ⁽¹⁾ ⁽²⁾
pH.....	Adeterminar caso-a- caso em função do estado ecológico e respec- tivos parâ- metros de suporte.	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,5 a 8,5 ⁽²⁾	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
CBO ₅ (mg/L O ₂).....		≤25	≤25	≤25	≤25	≤25	
Turvação (NTU).....		≤5		≤5		≤5	≤5
Azoto amoniacal (mgNH ₄ /L).		≤5			≤5 ≤1 (na pre- sença de cobre)	≤10	
P _{total} (mg/L).....		≤2 ⁽³⁾					
E. coli (ufc/100 mL)....		≤10		≤10	≤200	≤10	≤10

Tabela 2.3 - Normas de qualidade de água para reutilização em uso industrial (retirado do DL n.º 119/2019)

Classe de qualidade	Turvação (NTU)	<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)
Em circuitos com risco direto de ingestão (incluindo ingestão acidental, e.g., gotículas) e contacto dérmico	≤5	≤10
Em circuitos com risco direto de contacto dérmico		≤1000

A abordagem inicial a sistemas de reutilização de água preconizava a seleção indiscriminada de níveis de tratamento elevados de modo a minimizar os riscos que podem afetar a saúde pública ou o ambiente, sendo indicada uma qualidade geral aplicável a diferentes usos não potáveis. Esta abordagem conservativa aumentava significativamente os custos de tratamento sem resultar em benefícios reais ou até a necessidades reais.

No caso dos usos não potáveis, os diferentes tipos de reutilização utilizam uma água com requisitos de qualidade inferior à água para consumo. Por exemplo, água residual doméstica que sofreu apenas tratamento secundário e desinfecção pode ser apropriada para arrefecimento industrial ou rega de algumas culturas agrícolas, enquanto alternativa à utilização da água para consumo, cuja qualidade é elevada, assim como o seu custo, pelo tratamento ser mais complexo e dependente de muita energia.

O uso de água com qualidade inferior ao necessário para o uso pretendido pode ser prejudicial para a saúde humana e para o ambiente. É necessário tomar as precauções necessárias, quer a nível da qualidade da água, quer a nível do processo de reutilização da água de forma a garantir a segurança dos utilizadores.

O uso combinado de tecnologias com medidas de minimização dos riscos, através da aplicação de modelos de gestão do risco, pode ajudar a definir uma solução mais adequada e a desenvolver projetos economicamente mais viáveis e fiáveis, em termos de risco. Atualmente os processos de tratamento podem ser condicionados a funcionar até um determinado limite de qualidade que seja necessário para determinado tipo de uso, tendo em conta a saúde pública e ambiental. Este tipo de abordagem ao tratamento é conhecido como “*fit for purpose*”, ou seja, “adequar ao fim a que se destina” (DL n.º 119/2019).

3. Tratamento das águas residuais na produção de ApR

As águas residuais provenientes da utilização da água em meio urbano contêm contaminantes que podem afetar utilizações posteriores, a saber: material sólido, matéria orgânica, nutrientes, microrganismos patogénicos, contaminantes de interesse emergente, entre outros. As ETAR são constituídas por diversas etapas de tratamento que, por processos diferentes, conseguem remover uma parte considerável desses contaminantes das águas residuais.

A produção de ApR deve ter em consideração o tipo de utilização que a água irá ter, sendo o ajuste da qualidade feito através de diferentes processos de tratamento e de combinações entre estes processos, ou seja, diferentes esquemas de tratamento.

Seguidamente, são apresentados os contaminantes com maior impacto na reutilização de água proveniente de ETAR urbanas, assim como os processos de tratamento vulgarmente utilizados na melhoria da qualidade da água para reutilização. Por último, é feita referência à utilização de diversas barreiras no tratamento da água para reutilização.

3.1. Contaminantes a remover

O principal objetivo de qualquer projeto de reutilização é salvaguardar a saúde pública e, para isso, existem diversas opções de tratamento para remover contaminantes microbiológicos e compostos químicos. Outros objetivos, como prevenir a degradação do meio ambiente, evitar o descontentamento público e cumprir os requisitos dos utilizadores também devem ser satisfeitos.

Os contaminantes a remover nas ETAR encontram-se dissolvidos ou em suspensão nas águas residuais. A separação destes contaminantes ao longo do sistema de tratamento dá origem ao efluente tratado, bem como a resíduos sólidos e gasosos.

A proteção da saúde pública é alcançada reduzindo concentrações de microrganismos patogénicos, controlando os compostos químicos presentes na água e limitando a exposição pública a água reutilizada e, quanto maior for o nível de exposição humano à água, maior deve ser o nível de tratamento (US EPA, 2012).

3.1.1. Contaminantes microbiológicos

Os microrganismos podem ser patogénicos, isto é, podem causar doenças nos hospedeiros. As águas residuais não tratadas podem conter uma grande variedade de

microrganismos patogénicos provenientes das fezes e urina (Chahal et al., 2016). A maioria dos patogénicos encontrados nas águas residuais brutas são microrganismos que habitam o trato gastrointestinal, podendo estar associados a doenças. A Tabela 3.1 representa os principais organismos patogénicos presentes na água residual, bem como as doenças ou sintomas causados por eles.

Tabela 3.1 - Principais patogénicos presentes na água residual e doenças associadas (adaptado de Chahal et al., 2016; Metcalf & Eddy, 2003)

Tipo de organismo	Organismo patogénico	Doença ou principais sintomas
Bactérias	<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite
	<i>Escherichia coli</i>	Gastroenterite
	<i>Legionella pneumophila</i>	Doença dos legionários
	<i>Leptospira spp.</i>	Leptospirose
	<i>Salmonella spp.</i>	Salmonelose
	<i>Shigella spp.</i>	Disenteria
	<i>Vibrio cholerae</i>	Cólera
	<i>Yersinia spp.</i>	Gastroenterite
Vírus	Adenovirus	Infeção respiratória
	Astrovirus	Gastroenterite
	Rotavirus	Gastroenterite
	Enterovirus (vários tipos, e.g., polio, echo, virus de coxsackie)	Gastroenterite, anomalias cardíacas, meningite, febre
	Hepatite A	Hepatite infecciosa
	Hepatite E	Hepatite infecciosa, aborto, morte
	Reovirus	Infeção respiratória, gastroenterite
Protozoários	<i>Cryptosporidium parvum</i>	Criptosporidiose
	<i>Giardia lamblia</i>	Giardíase
	<i>Balantidium coli</i>	Balantidíase
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria amebiana
	<i>Toxoplasma gondii</i>	Toxoplasmose
Helminhas	<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariíase
	<i>Hymenolepsis nana</i>	Himenolepíase
	<i>Taenia saginata</i>	Insónias, perda de peso
	<i>Taenia solium</i>	Insónias, perda de peso
	<i>Trichuris trichiura</i>	Diarreia, anemia, perda de peso

Caso o sistema de tratamento utilizado não for o adequado, a reutilização da água pode resultar numa contaminação com impacto na saúde humana. As vias de exposição a microrganismos presentes na água, no contexto da reutilização, incluem a ingestão de água contaminada ou de alimentos que tiveram contacto com água contaminada, a inalação, através da respiração, de aerossóis de água que contenha patogénicos e o contacto dérmico (Rebelo et al., 2020). O potencial de transmissão de doenças por agentes patogénicos presentes na água residual tratada é a mais comum preocupação associada à reutilização de água. Portanto, é essencial que seja efetuada uma avaliação do risco para a saúde humana no contexto da reutilização de água.

A desinfecção é o processo responsável pela inativação ou destruição de organismos patogênicos. Os seus principais objetivos são conferir a proteção da saúde pública pela diminuição da propagação de doenças, e ao meio ambiente, cumprindo os requisitos de qualidade estipulados no quadro legal e regulamentar existente (Qasim & Zhu, 2017).

É importante fazer a distinção entre microrganismos patogênicos e microrganismos indicadores, sendo estes últimos utilizados para medir a eficiência de desinfecção de um sistema de tratamento. Os microrganismos indicadores não apresentam por si só perigo para a saúde humana, mas são utilizados para detetar a presença de patogênicos o que permite avaliar a probabilidade da existência de riscos para a saúde. Os microrganismos indicadores devem possuir as seguintes características (Cabelli, 1983):

- Estar associados à presença organismos patogênicos;
- A sua concentração deverá ter uma relação direta com o nível de contaminação de origem fecal.
- A sua resistência a desinfetantes e stress ambiental deve ser próxima dos organismos patogênicos;
- A sua pesquisa e identificação recorrendo a técnicas laboratoriais deve ser fácil, rápida e inequívoca.

As bactérias coliformes são os microrganismos indicadores utilizados com maior frequência na caracterização da contaminação microbiológica de águas residuais. Os parâmetros analisados são os coliformes totais e os coliformes fecais pelos métodos de Número Mais Provável (NMP/100mL) e Unidades Formadoras de Colónias (UFC/100mL), sendo este último mais rigoroso. Os métodos analíticos que se utilizam na determinação da quantidade de indicadores presentes na água envolvem métodos de cultura que retardam os resultados por, pelo menos, 24 horas. Por exemplo, podem existir coliformes não patogênicos que costumam ser encontrados no solo, mas que também podem crescer na água em determinadas condições, podendo ser detetados em análises e produzindo informações incorretas sobre a qualidade da água (US EPA, 2012).

As bactérias *Escherichia coli*, *Enterococci* e colífagos (vírus que infetam *E. coli*) são os microrganismos indicadores mais utilizados para caracterizar a qualidade final da água destinada à reutilização (US EPA, 2012).

3.1.2. Contaminantes químicos

No seu ciclo natural, a água contém em solução diversas substâncias químicas, com origem na atmosfera, nas rochas e no solo ou, ainda, em escorrências superficiais. Para além da composição inicial da água de abastecimento, a composição química da água residual bruta é afetada pela origem das mesmas (isto é, urbana, industrial ou de atividades agrícolas), a configuração da rede de drenagem (unitária ou separativa) e do estado e funcionamento da rede de drenagem. Os processos de tratamento utilizados e a eficiência do tratamento afetam a composição química da água residual tratada.

Os constituintes inorgânicos presentes na água residual tratada incluem nutrientes, metais e sais. A sua presença na água pode causar impactos negativos na reutilização da água, como, por exemplo, a salinidade pode queimar as folhas, afetar a estrutura do solo e reduzir a permeabilidade de solos argilosos (Rengasamy et al., 2010; Stavi et al., 2021; US EPA, 2012). Os parâmetros que agregam a maioria dos constituintes inorgânicos são os Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e a Condutividade, embora ambos possam conter, também, alguns constituintes orgânicos. Como é difícil a redução destes parâmetros através da utilização de processos convencionais de tratamento de águas residuais, a sua determinação é importante para se avaliar, numa fase inicial, a adequação da água residual tratada para reutilização na rega (Asano et al., 2007).

A maioria das águas residuais urbanas possuem concentrações de metais pesados abaixo do limite imposto que garante a saúde pública (US EPA, 2012). Deste modo, os sais presentes na água com vista à reutilização, medidos como SDT, não excedem os valores limites de preocupação para a saúde humana, mas podem afetar culturas agrícolas (US EPA, 2012). A utilização de água com sais dissolvidos para regar os solos aumenta a pressão osmótica, resultando numa absorção mais lenta de água pelas raízes, causando stress hídrico na planta e inibindo o seu crescimento (Ayers & Westcott, 1985).

O azoto e o fósforo presentes nas águas residuais tratadas podem, por um lado, resultar em impactos negativos no ambiente (e.g. eutrofização) e, por outro lado, serem benéficos em aplicações agrícolas (US EPA, 2012). Portanto, a necessidade de remoção destes nutrientes depende do tipo de utilização que se pretende dar à água.

A composição orgânica da água residual bruta resulta do contributo de diversas origens, tais como fezes e urina, resíduos de cozinha, detergentes, óleos, gorduras, resíduos industriais e outras substâncias (US EPA, 2012). O fósforo encontra-se presente nos detergentes principalmente sob a forma de trifosfato de sódio, com

concentrações que podem ir até 70% do peso total do detergente. Isto resulta no aumento da concentração de fósforo nas águas residuais e, conseqüentemente, num maior potencial para eutrofização (Glennie et al., 2002).

Na produção de água para reutilização, a presença de compostos orgânicos na água residual importa pelo facto de poderem ser transformados em subprodutos de desinfecção quando o agente desinfetante utilizado é o cloro. Os subprodutos de maior preocupação são os trihalometanos e os ácidos haloacéticos, por apresentarem potencial carcinogénico para a saúde humana (Metcalf & Eddy, 2003).

3.1.3. Contaminantes de interesse emergente

À medida que os métodos analíticos evoluíram, vários compostos químicos antropogénicos têm sido detetados em água para consumo humano, nas águas residuais tratadas e em massas de água superficial e subterrânea, geralmente em níveis muito baixos (US EPA, 2012). Este largo grupo de compostos químicos existentes em concentrações residuais que apresentam toxicidade para os seres vivos é denominado de contaminantes de interesse emergente (US EPA, 2012). Incluem-se neste grupo compostos caracterizados pelo uso (compostos farmacêuticos, produtos de higiene pessoal, produtos tensioativos, aditivos alimentares, retardantes de chama, plastificantes, solventes e biocidas), pelo efeito na saúde humana e ambiente (disruptores endócrinos) ou pelo tipo de contaminante (composto químico ou material genético microbiológico; composto fenólico ou hidrocarbonetos policíclicos aromáticos) (US EPA, 2012).

Em 2015, a Comissão Europeia estabeleceu a primeira Lista de Vigilância (EU *Watch List*) (Decisão 2015/495/EU) para monitorizar diversas substâncias no domínio da política da água (Diretiva 2008/105/CE relativa a normas de qualidade ambiental) (Rizzo et al., 2020). As substâncias alvo são antibióticos, pesticidas e herbicidas, hormonas estrogénicas, compostos anti-inflamatórios, filtros UV e foram selecionados de acordo com o seu potencial de causar dano no ecossistema aquático e de risco significativo a nível europeu, e caso não existam dados suficientes para concluir o tipo de risco. No processo de seleção das substâncias da lista de vigilância é prestada especial atenção aos contaminantes de interesse emergente. Em 2018 (Decisão de Execução 2018/840) e em 2020 (Decisão de Execução 2020/1161), a Comissão Europeia atualizou a lista de vigilância, situação que é repetida regularmente.

3.2. Tratamento convencional das águas residuais urbanas

As ETAR destinam-se a reduzir a carga poluente das águas residuais, de modo que a descarga do efluente tratado no meio recetor não afete a saúde pública e a qualidade da água, e consequente equilíbrio de ecossistemas do meio recetor.

Uma linha de tratamento convencional numa ETAR inclui, geralmente, o tratamento preliminar, o tratamento primário e o tratamento secundário. Caso estas etapas não sejam suficientes para o cumprimento dos limites de descarga ou se tenha em vista a reutilização da água, também é realizado o tratamento terciário. Esta sequência encontra-se representado no esquema da Figura 3.1.

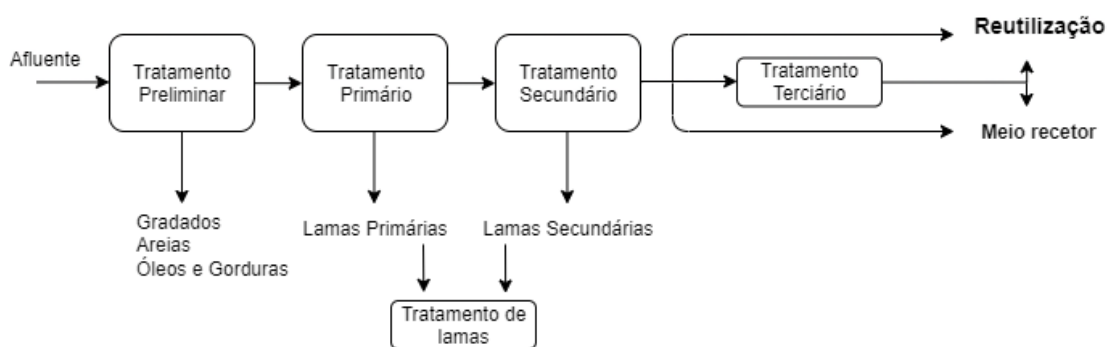


Figura 3.1 – Etapas de uma linha de tratamento característica de uma ETAR

O tratamento preliminar é destinado à remoção de sólidos grosseiros, areias e óleos e gorduras presentes na água residual bruta. O objetivo desta etapa é proteger os órgãos e processos de tratamento a jusante, evitando entupimentos nas tubagens e contaminações na água residual, melhorando a eficiência do tratamento. As operações unitárias que podem ser combinadas ao nível do tratamento preliminar são a gradagem, a equalização, a desarenação e o desengorduramento.

O tratamento primário tem como objetivos a remoção de uma parte significativa dos sólidos sedimentáveis em suspensão (orgânicos e inorgânicos) e, também, a redução da carga orgânica afluyente ao tratamento biológico. Este tratamento pode ser realizado através do processo de sedimentação/decantação ou do processo de flotação, podendo estas operações serem assistidas com recurso à coagulação química. Em geral cerca de 50 a 70% de SST e 25 a 40% de CBO₅ são removidos da água residual nesta etapa (Metcalf & Eddy, 2003). Estes processos e operações são: o pré-arejamento, a coagulação e floculação, a decantação e a flotação.

O tratamento secundário visa, essencialmente, a redução da matéria orgânica biodegradável dissolvida ou em suspensão coloidal que não foi removida até este nível

de tratamento. Geralmente, o tratamento secundário é assegurado por processos biológicos. A jusante dos reatores biológicos existe normalmente uma unidade de tratamento/órgão de tratamento destinada à separação de fases, nomeadamente da biomassa desenvolvida no reator biológico. Esta operação ocorre num decantador ou num flotador. Tipicamente o efluente secundário possui concentrações de CBO₅ e SST entre cerca de 10 mg/L a 30 mg/L (Metcalf & Eddy, 2003).

Todos os sistemas de tratamento com finalidade de reutilização de água requerem um mínimo de tratamento secundário, que permite remover a maior parte da matéria orgânica e nutrientes. Seguidamente, é necessário realizar a desinfecção do efluente secundário para que seja possível reutilizar a água na generalidade dos usos não potáveis. Os níveis de desinfecção a atingir dependem do tipo de uso e são afetados por partículas, incluindo microrganismos, e constituintes orgânicos e inorgânicos dissolvidos que permanecem no efluente secundário. Pode assim ser necessário acrescentar mais etapas ao tratamento antes de se poder reutilizar a água.

De acordo com as normas de qualidade estabelecidas no Decreto-Lei n.º 119/2019, os sistemas de tratamento convencional (nível de tratamento secundário) permitem o cumprimento, em geral, dos requisitos de qualidade de CBO₅, SST, Azoto total e Fósforo total, mas não os requisitos de coliformes, sendo necessário tratamento adicional - desinfecção.

3.3. Tratamento adicional envolvido na produção de ApR

A realização de um tratamento adicional para além do tratamento secundário, por vezes, é necessário no caso da descarga em meios sensíveis, esse tratamento é conhecido como terciário, de afinação ou avançado. O propósito desta fase do tratamento é reduzir ainda mais a quantidade de nutrientes, de sólidos suspensos e dissolvidos, microrganismos ou outros poluentes não removidos pelo tratamento secundário e ainda se encontram presentes na água. No entanto, processos de tratamento avançados podem ser combinados com o tratamento primário ou secundário (e.g. adição de reagentes no decantador primário ou no tanque de arejamento por exemplo para remover fósforo) (Pescod, 1992).

Na presente secção são apresentados os processos de tratamento adicional das águas residuais normalmente envolvidos na produção de ApR.

3.3.1. Desinfecção

A desinfecção é o processo unitário que tem por objetivo reduzir a quantidade de microrganismos patogénicos presentes nas águas residuais, eliminando-os ou reduzindo-os até um nível compatível com a proteção da saúde pública (no caso da descarga em águas balneares) e do ambiente (no caso da descarga em águas conquícolas), ou para possibilitar a reutilização da água sem risco para a saúde pública.

A eficiência dos processos de desinfecção está relacionada com o tipo de patogénicos que se pretende remover (bactérias, vírus, protozoários e ovos de helmintas), pois nem todos os processos inativam todos os tipos de microrganismos com a mesma eficiência. Alguns patogénicos são mais resistentes aos processos de desinfecção que os microrganismos indicadores comuns, pelo que é possível que a análise de águas residuais desinfetadas não acuse a presença de microrganismos indicadores de contaminação fecal e, no entanto, alguns patogénicos ainda possam estar presentes na água (Metcalf & Eddy, 2003).

Os processos de desinfecção normalmente utilizados incluem a cloragem, a radiação Ultra-Violeta (UV) e o ozono. Também pode ser utilizada a filtração por membranas e o ácido peracético.

Os mecanismos de eliminação ou inativação dos patogénicos podem ser: danos ou destruição causados na membrana celular que resultam em lise celular e morte, inibição da atividade enzimática, alteração da permeabilidade celular, do material genético dos microrganismos e da natureza coloidal do protoplasma e remoção física (Metcalf & Eddy, 2003).

As características físicas e químicas do efluente secundário a desinfetar, que dependem do tratamento a que a água foi submetida, devem ser tidas em consideração, dado que pode induzir ao mau funcionamento do agente desinfetante.

Uma possível consequência da baixa eficiência da desinfecção pode ser a subsequente multiplicação dos patogénicos (o chamado *regrowth*), quer seja pela regeneração de microrganismos que sofreram inativação completa por parte do agente desinfetante, quer por encontrarem condições favoráveis para a sua multiplicação.

Não existe um desinfetante ideal para todas as situações pelo que a sua escolha deve ser analisada caso a caso. No entanto, devem ser consideradas as seguintes características (Metcalf & Eddy, 2003):

- Estar disponível em quantidade e a um preço razoável;

- Ser tóxico para os microrganismos e não para o ser humano e/ou quaisquer outros seres vivos;
- Apresentar uma composição homogênea e ser suficientemente solúvel em água;
- Ser eficaz para as condições de temperatura e pH do efluente;
- Não deve reagir com a matéria orgânica;
- Não deve ser corrosivo;
- Não deve apresentar riscos elevados de transporte, armazenamento, manuseamento e utilização.

A eficácia da desinfecção pode ser modelada através de uma expressão simples – a lei de Chick – que traduz o efeito fundamental do tempo de contacto da água com o agente desinfetante.

$$-\frac{dN}{dt} = kN$$

Em que:

- dN/dt – taxa de decréscimo dos microrganismos;
- k – constante da velocidade de decaimento dos microrganismos;
- N – número de microrganismos sobreviventes no instante t .

É muitas vezes necessário atingir eficiências de remoção de microrganismos significativas, devido à elevada concentração de patogénicos tipicamente presentes em águas residuais (NWRI, 2019). Em alternativa à percentagem de remoção utiliza-se uma escala de ordem logarítmica que permite ter uma melhor perceção de resultados. A Tabela 3.2 representa esta conversão de escalas.

Tabela 3.2 - Comparação de escala logarítmica com escala de percentagem

Fator de redução	Redução de ordem logarítmica	Percentagem de redução
10 vezes	1	90,00%
100 vezes	2	99,00%
1000 vezes	3	99,90%
10000 vezes	4	99,99%

A redução de ordem logarítmica (ROL) é pela utilização da seguinte fórmula:

$$ROL = \log\left(\frac{\text{concentração de patogénicos no afluente}}{\text{concentração de patogénicos no efluente}}\right)$$

A eficiência do processo de desinfecção é condicionada por diversos fatores (Metcalf & Eddy, 2003):

- Tipo de desinfetante, quanto maior for o potencial de oxidação mais rápida será a desinfecção;
- Dose de desinfetante, a taxa de desinfecção é diretamente proporcional à dose aplicada;
- Tipo de microrganismo, diferentes tipos de organismos apresentam resistências diferentes, sendo as bactérias os menos resistentes, seguidas de vírus, protozoários, endósporos e os ovos de helmintas, que são os mais resistentes;
- Tempo de contacto, quanto maior for o tempo de contacto maior será a inativação, que resultará numa menor quantidade de desinfetante residual necessária;
- pH, pode afetar a eficiência, no caso da cloragem é mais eficaz para pH mais baixos;
- Temperatura, o aumento da temperatura resulta numa taxa de desinfecção mais rápida;
- Turvação, as partículas suspensas podem proteger os organismos do contacto com o desinfetante, como é o caso da radiação UV;
- Matéria orgânica e inorgânica dissolvida, a sua presença pode consumir oxidante, diminuindo a quantidade disponível para inativar os microrganismos.

A Tabela 3.3 sumariza a escala de redução logarítmica de bactérias, vírus, helmintas e protozoários de acordo com o tipo de tecnologia utilizada.

Tabela 3.3 - Remoção logarítmica de microrganismos por diferente tipo de tecnologia (Capodaglio, 2020)

Processo	Bactérias	Vírus	Helmintas	Protozoários
Lagunagem	1-5	1-4	1.5-3+	2-4
Cloragem	2-6+	0-3	0-1	0-1.5
Ozonização	2-6	2-6		1-4
UV	2-6+	1-6+		3-6+
Microfiltração	4-5	0.3-1		4-6
Ultrafiltração	5-6+	2-6+	>6	4-6+
Nanofiltração	>6	3-6+	>6	>6
Osmose Inversa	>6	4-6+	>6	>6
UV + Ácido Peracético	>6	5-6+		>6

Desinfecção química

Diversos desinfetantes são também oxidantes, isto é, reagem com vários constituintes na água por oxidação-redução. O potencial de um par *redox* é determinado

pela quantidade de espécies numa solução oxidadas e reduzidas e pela natureza destas espécies (Bergendahl & Stevens, 2005).

O poder de desinfecção de um desinfetante está relacionado com o potencial de oxidação das suas espécies químicas (Kim & Hensley, 1997). Quando o potencial de oxidação aumenta, o poder de desinfecção também aumenta e vice-versa. A Tabela 3.4 representa os potenciais de oxidação de desinfetantes comuns.

Tabela 3.4 - Comparação de potenciais redox de diferentes moléculas

Oxidante	Potencial de Oxidação, E_0 (V)
Radicais hidroxilo (HO)	2,86
Átomo de oxigénio (O)	2,42
Molécula de ozono (O ₃)	2,07
Ácido Peracético (CH ₃ CO ₃ H)	1,81
Peróxido de Hidrogénio (H ₂ O ₂)	1,78
Permanganato de Potássio (KMnO ₄)	1,7
Dióxido de Cloro (ClO ₂)	1,57
Cloro (Cl ₂)	1,36
Hipoclorito de Sódio (NaOCl)	0,94

A **cloragem** é o processo de desinfecção da água por adição de cloro molecular ou de compostos de cloro. O cloro é o desinfetante mais comum no tratamento de água. É utilizado sob a forma de gás (Cl₂), Dióxido de Cloro (ClO₂), Hipoclorito de Sódio (NaOCl), Hipoclorito de Cálcio (Ca(ClO)₂) ou cloraminas (US EPA, 2017).

O cloro e o dióxido de cloro apresentam elevada eficiência na inativação de bactérias e de vírus, mesmo na presença de sólidos suspensos. O dióxido de cloro tem uma eficiência mais elevada para os protozoários. As cloraminas têm uma eficiência de desinfecção mais reduzida que os restantes compostos de cloro. O hipoclorito apresenta elevada eficiência na inativação de bactérias e de vírus e baixa na inativação de protozoários (Haida et al., 2022; Metcalf & Eddy, 2003).

Os compostos clorados reagem facilmente com outros compostos, oxidando-os, pelo que quando se pretende desinfetar água residual por cloragem é necessário adicionar uma dose de desinfetante suficiente para oxidar todas as substâncias orgânicas e inorgânicas oxidáveis presentes na água (por exemplo, sulfuretos, nitritos, brometos, ferro e manganês) e para destruir os patogénicos e ainda para deixar uma concentração residual de cloro que impeça o *regrowth* de microrganismos durante o seu transporte em condutas. Isto significa que a desinfecção só é assegurada se a dose de

cloro adicionada à água ultrapassar o chamado ou *breakpoint* (Metcalf & Eddy, 2003). A adição faseada de cloro à água que contém substâncias oxidáveis e amônia é representado graficamente na Figura 3.2.

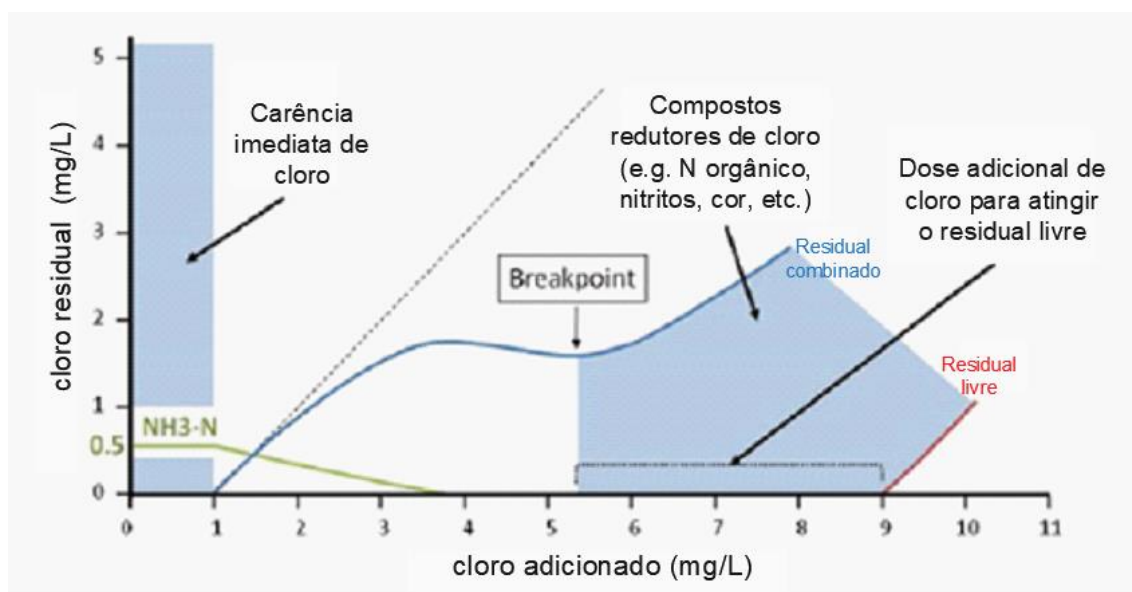
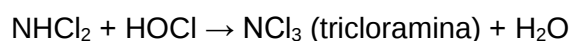
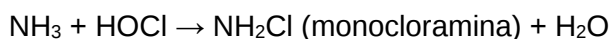


Figura 3.2 - Curva de cloragem ao breakpoint (US EPA, 2017)

À medida que se adiciona cloro, os compostos redutores e a matéria orgânica reagem com o cloro reduzindo-o a íon cloreto (Cl^-). A quantidade de cloro reduzida é designada por carência imediata de cloro (Metcalf & Eddy, 2003).

O cloro depois vai reagir com a amônia presente na água ou nitratos, caso tenha ocorrido nitrificação no tratamento biológico, de que resulta a formação de cloraminas (compostos combinados de azoto), as quais têm capacidade desinfetante, embora a sua reação seja mais lenta, indicadas nas reações seguintes. Quando as cloraminas são os únicos desinfetantes o cloro residual é designado como cloro residual combinado (Metcalf & Eddy, 2003).



Com a contínua adição de cloro, as cloraminas são convertidas em N_2 e N_2O até a sua maioria estar oxidada até ao chamado *breakpoint* (Metcalf & Eddy, 2003).

A partir do *breakpoint* deixa de ocorrer a destruição das cloroaminas e todo o cloro adicionado fica em solução sob a forma de ácido hipocloroso (HOCl) e de íon hipoclorito (OCl^-), constituindo o chamado cloro residual livre (Metcalf & Eddy, 2003).

O dióxido de cloro é um bactericida e virucida eficiente e consegue alcançar maiores eficiências de inativação de vírus que o cloro. Por ser instável e decompor-se rapidamente, o dióxido de cloro é produzido na ETAR. A dose necessária para atingir os objetivos de desinfecção varia de acordo com o pH e o tipo de organismos presentes na água (US EPA, 2017).

A cloragem pode originar subprodutos tóxicos quando o cloro reage com a matéria orgânica. Estes subprodutos podem ser os trihalometanos (clorofórmio, bromodiclorometano, dibromoclorometano e bromofórmio e ácidos haloacéticos, no caso do cloro) e cloritos e cloratos (no caso do dióxido de cloro). A sua formação depende da dose de cloro utilizada, do teor de cloro residual, da presença de matéria orgânica natural (MON), da concentração de Br⁻, do tempo de contacto, do pH e da temperatura. As características químicas da MON são também relevantes, pois nem todas as frações de MON dissolvida presentes na água reagem com o cloro do mesmo modo. Os principais precursores destes produtos são ácidos húmicos e fúlvicos, substâncias mais frequentes em águas doces superficiais (Zazouli & Kalankesh, 2017).

O processo de cloragem deve possuir duas condições para ser eficaz: mistura inicial e tempo de contacto. Uma mistura inicial rápida aquando da injeção de cloro aumenta a ordem de remoção de patogénicos. Portanto, deve ser garantido o regime turbulento nesta fase. Como o cloro necessita de um elevado tempo de contacto (cerca de 30 minutos) o tanque de cloragem pode ser construído em forma de chicanas de modo a aumentar o tempo de retenção hidráulica (Metcalf & Eddy, 2003).

Uma alternativa à desinfecção com cloro é a desinfecção com **ácido peracético**, cujo poder oxidante é superior ao do cloro e do dióxido de cloro, mas o seu custo é superior e o seu armazenamento é difícil devido à sua alta reatividade (Capodaglio, 2020). O ácido peracético é produzido pela reação entre peróxido de hidrogénio e ácido acético. Quando utilizado, decompõe-se em ácido acético e oxigénio (Collivignarelli et al., 2018).

O mecanismo de desinfecção do ácido peracético é a libertação de oxigénio ativo ou a produção de radicais hidroxilo que destroem a membrana celular, bem como determinadas enzimas e DNA (Kitis, 2004).

O ácido peracético combina as características de um peróxido numa molécula de ácido acético e pertence à classe de peróxidos orgânicos, que são compostos químicos sintéticos. Os peróxidos orgânicos podem conter radicais peróxido que são uma fonte de oxigénio e também são instáveis e comburentes (Kitis, 2004).

O ácido peracético produz nenhuns a poucos subprodutos tóxicos ou mutagénicos aquando da reação com material orgânico presente na água. Os seus subprodutos são predominantemente ácidos carboxílicos, que não são reconhecidos como mutagénicos, que se formam pela oxidação de matéria orgânica natural na água por ácido peracético (Monarca et al., 2002). A utilização de ácido peracético causa um aumento de CBO₅ e CQO no efluente desinfetado (Collivignarelli et al., 2018).

A **ozonização** é o processo de desinfecção da água por adição de ozono (O₃). Apesar de ser o processo mais eficiente de desinfecção da água, a sua aplicação tem sido mais reduzida comparativamente a outros processos, devido aos seus elevados custos (Marecos do Monte et al., 2016).

O ozono é eficaz na remoção de compostos orgânicos e inorgânicos, sabor e odor (US EPA, 2017), o que resulta numa vantagem adicional da ozonização, que além da desinfecção, proporciona a oxidação de contaminantes orgânicos não biodegradáveis, como alguns contaminantes de interesse emergente (Gottschalk et al., 2010). É muito eficiente na inativação de bactérias, vírus e até protozoários, como a *Giardia*, embora alguns protozoários, como o *Cryptosporidium parvum* sejam mais resistentes, sendo necessária a aplicação de doses mais elevadas (Metcalf & Eddy, 2003).

O ozono é um gás instável que tem de ser produzido no local de utilização, pois decompõe-se rapidamente em oxigénio. É produzido pela separação de moléculas de oxigénio em átomos de oxigénio, resultando na formação de ozono (US EPA, 2017).

De um modo geral, um sistema de desinfecção por ozono é constituído pelos seguintes componentes (US EPA, 2017):

- Sistema de fornecimento de oxigénio, através de tanques de oxigénio líquido ou pode haver produção de oxigénio no local se a ETAR for de grande dimensão;
- Geradores de ozono e unidades de fornecimento de energia associadas;
- Sistema de transferência para a água e câmaras de contacto;
- Equipamento de destruição de ozono residual e sistemas de monitorização e controlo de ozono.

De modo a entrar em contacto com as substâncias alvo, tem de ser introduzido na água sob a forma de gás. A reação posterior não é evidente, dado que várias reações podem ocorrer simultaneamente (Gottschalk et al., 2010). A sua versatilidade assenta na possibilidade de destruir contaminantes de dois modos diferentes, tanto por ataque molecular direto como por decomposição em radicais hidroxilo (HO) que reagem com outros compostos químicos (Gottschalk et al., 2010).

Contrariamente aos desinfetantes clorados, o ozono não origina a formação de compostos halogenados, exceto quando se verifica a presença de brometo na água. Neste caso, o ozono origina a formação de diversos compostos bromados, dos quais os mais preocupantes são os bromatos (BrO_3^-), por serem potencialmente cancerígenos e de difícil remoção (Aljundi, 2011).

A desinfecção por ozono é normalmente antecedida por uma etapa de filtração, de modo a reduzir a presença de compostos orgânicos e inorgânicos e, assim, reduzir a quantidade de ozono a aplicar (US EPA, 2017).

O ozono pode servir como pré-tratamento à microfiltração de modo a aumentar a sua eficiência. No entanto, se forem utilizados filtros de polímero, o ozono residual tem de ser dissipado antes da filtração para proteger a membrana de oxidação (US EPA, 2017).

Desinfecção física

A desinfecção com recurso a **radiação ultravioleta (UV)** é considerada um mecanismo físico de desinfecção devido à sua capacidade de impedir a replicação dos microrganismos.

A emissão do feixe de UV é efetuada, geralmente, por lâmpadas de mercúrio de três tipos: baixa-pressão baixa intensidade; baixa-pressão alta intensidade e média pressão. As lâmpadas de baixa pressão consomem menos energia do que as de média pressão, mas têm menor poder germicida (US EPA, 2017).

Com uma dosagem apropriada, a radiação UV é um bactericida e virucida eficaz para águas residuais (Metcalf & Eddy, 2003). A desinfecção por radiação UV também pode ser realizada com utilização da luz solar, em lagoas de maturação

A radiação UV penetra na parede celular dos microrganismos, sendo absorvida pelas proteínas e material genético da célula causando danos no seu DNA impedindo a replicação destes microrganismos. A inativação dos microrganismos ocorre num curto espaço de tempo, entre 20 e 30 segundos (Metcalf & Eddy, 2003).

A inativação pela radiação UV é eficaz para a generalidade dos microrganismos patogénicos (bactérias, vírus e até os protozoários), excetuando os ovos de helmintas, que são bastante resistentes à penetração dos UV (Marecos do Monte et al., 2016).

A eficiência da desinfecção por UV depende das características da água residual, da dose/intensidade da radiação, do tempo de exposição e da configuração do reator. O sucesso da desinfecção está diretamente relacionado com a concentração de matéria particulada e coloidal presente na água residual (Metcalf & Eddy, 2003).

A transmitância é definida como a capacidade de a água ser atravessada por um feixe de luz. A transmitância está relacionada com a absorvância, que é definida como a quantidade de luz, de determinado comprimento de onda, que é absorvida pela água e substâncias nela dissolvidas. Deste modo, a transmitância mede o decaimento da radiação quando esta atravessa a água. A presença de sólidos suspensos na água reduz a eficiência de remoção de patogênicos por radiação UV, pois, as partículas em suspensão, além de dispersarem a radiação, atuam como escudos protetores que impedem a radiação UV de atingir os microrganismos adsorvidos à superfície das partículas. Quanto mais elevado for o teor de sólidos suspensos na água, menor a sua transmitância (Marecos do Monte et al., 2016).

Alguns microrganismos que sobrevivem à exposição da radiação UV, embora fiquem inativados, apresentam a capacidade de regenerar o seu DNA danificado num processo conhecido como foto-reativação. Outros microrganismos conseguem o mesmo efeito na ausência de luz, através de um mecanismo de reparação que utiliza moléculas proteicas, designado por “reativação no escuro”. A reativação no escuro pode ocorrer no interior de condutas (Metcalf & Eddy, 2003).

A água desinfetada por apenas radiação UV, tem de ser reutilizada logo após a desinfecção, sem armazenamento. Pode-se prever o aumento mínimo de 1 log de coliformes fecais ao longo da rede de distribuição (Marecos do Monte et al., 2016).

As **lagoas de maturação** apresentam-se como alternativas económicas às tecnologias de tratamento convencional devido à sua fácil operação, consumo energético muito reduzido e pouca necessidade de trabalhos de manutenção (Liu et al., 2018).

As lagoas de maturação conseguem remover uma larga variedade de microrganismos, como bactérias, vírus, protozoários e helmintas. É considerado um processo complexo de remoção por envolver vários fatores: físicos, químicos e biológicos, isolados ou em conjunto, incluindo a luz solar, pH, oxigénio dissolvido, temperatura, predação, tempo de retenção hidráulico e inanição (Awuah et al., 2001; Fisher et al., 2012; Maynard et al., 1999).

As vantagens e desvantagens gerais associadas à utilização de cloro, dióxido de cloro, ozono, ácido peracético, radiação UV e lagoas de maturação na desinfecção de águas residuais estão sumarizadas na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Vantagens e desvantagens das diferentes tecnologias de desinfecção (adaptado de Metcalf & Eddy, 2003)

Tecnologia de desinfecção	Vantagens	Desvantagens
Cloro	Fácil manuseamento e económico; Desinfetante eficaz; Residual pode ser monitorizado e mantido; Tecnologia consolidada	Elevado tempo de contacto; Formação de sub-produtos; Toxicidade residual do efluente; Muito corrosivo
Dióxido de cloro	Mais eficaz que o cloro e com menor tempo de contacto; Deixa residual	Toxicidade residual do efluente; Formação de subprodutos; Produção <i>on-site</i> ; Custos de manutenção médio-altos; Aumento da concentração de sólidos no efluente
Ozono	Tempo de contacto curto; Desinfetante eficaz; Propriedades biocidas não afetadas por pH	Não permite residual; Formação de subprodutos; Produção <i>on-site</i> ; Elevado consumo energético; Elevados custos de manutenção
Ácido peracético	Desinfetante eficaz; Solução simples; Tempo de contacto curto; Deixa residual	Aumenta concentração de CBO ₅ e CQO no efluente; Formação de subprodutos; Custos elevados
Radiação UV	Não deixa toxicidade residual no efluente; Seguro; Não forma sub-produtos; Tempo de contacto curto; Eficaz na inativação de vírus	Não permite residual; Elevado consumo energético; Custos elevados; Desadequado em águas com níveis elevados de sólidos, turvação, cor ou matéria orgânica dissolvida
Lagoas de maturação	Reduzidos custos de operação e energia; Elevada remoção de todo o tipo de microrganismos;	Ocupa uma área muito elevada; Custo de construção dependente do preço do terreno; Controlo de mosquitos necessário

3.3.2. Filtração

A **filtração** tem por objetivo a remoção de sólidos em suspensão de modo a melhorar a qualidade do afluente para a desinfecção (Metcalf & Eddy, 2003), sendo reduzida a turvação e aumentada a transmitância da água residual em tratamento.

Os dois principais mecanismos de remoção de partículas são a adsorção física e a exclusão por tamanho. A adsorção física ocorre quando partículas mais pequenas são adsorvidas a partículas maiores, do meio filtrante, e são posteriormente removidas. A exclusão por tamanho ocorre quando os sólidos suspensos têm dimensão superior aos espaços abertos no meio filtrante sendo impedidos de o atravessar (US EPA, 2017).

A filtração pode servir como um processo de desinfecção, pois a remoção de sólidos permite a remoção de microrganismos, pela adsorção de patogénicos a outras partículas (US EPA, 2017).

O processo de retenção das partículas vai progressivamente colmatando os espaços vazios do meio filtrante, com o consequente aumento da perda de carga, que se traduz por um decréscimo da eficiência de filtração, que aumenta a quantidade de partículas presentes no efluente filtrado. Quando é atingido o limite imposto de sólidos suspensos no efluente, dá-se início à lavagem do meio filtrante. Assim, a operação de filtração compreende a filtração propriamente dita e a lavagem do meio filtrante (Metcalf & Eddy, 2003).

A eficiência da remoção de partículas por filtração depende fundamentalmente dos seguintes fatores (Marecos do Monte et al., 2016):

- Características das partículas a filtrar, sua concentração e natureza (discreta ou floculenta);
- Características do filtro, meio filtrante, geometria do filtro e sistema de recolha da água filtrada;
- Caudal de água a filtrar, que condiciona a velocidade de filtração.

3.3.3. Tratamento avançado

Para os vários usos do efluente tratado, a qualidade da água pode ser atingida através de tratamento convencional (secundário, filtração e desinfecção). No entanto, à medida que a probabilidade de contacto humano com a ApR aumenta, um tratamento mais avançado pode ser necessário.

Ao contrário da oxidação, a **adsorção** é um processo de separação que não origina a formação de subprodutos (Rizzo et al., 2020). Processos de adsorção têm sido utilizados há algum tempo na purificação da água e são comuns em muitas infraestruturas de abastecimento ou de reutilização de água como um elemento permanente da sequência de tratamento (Abdessemed et al., 2000).

O carvão ativado é o adsorvente mais utilizado em tratamento de água para a remoção de poluentes orgânicos e inorgânicos presentes na água (Rizzo et al., 2020). O carvão ativado na sua forma granular (GAC) ou em pó (PAC) tem sido utilizado ao longo do tempo como o material adsorvente mais versátil para vários contaminantes. Devido à sua estrutura microcristalina, o carvão ativado tem excelentes capacidades adsorventes resultantes da sua ampla superfície específica, estrutura microporosa e alta reatividade superficial. Nas suas diferentes formas é utilizado como apoio aos processos biológicos (servir de matriz suporte a biomassa) e físicos (remoção de cor e de cloro), para filtrar e remover constituintes perigosos (Bansal & Goyal, 2005).

Quando se utiliza PAC é necessária uma etapa posterior que remova o carvão ativado. O uso de reatores que utilizem GAC é mais restrito pois não permite uma adaptação a condições atípicas, como por exemplo períodos de chuva, enquanto nestes casos a dose de PAC pode ser aumentada (Rizzo et al., 2020).

Os **Processos de Oxidação Avançada (AOP)** são processos de tratamento de água efetuados a pressão e temperatura próximas das condições ambiente, que geram radicais hidroxilo em quantidade suficiente para interagir com os compostos orgânicos do efluente (Glaze et al., 1987). Os AOP são uma tecnologia recente que tem sido utilizada nos últimos anos devido à sua versatilidade e ampla aplicabilidade (Ayoub et al., 2010).

Os AOP englobam os processos que beneficiam da elevada capacidade oxidante dos radicais hidroxilo ($\text{HO}\cdot$), e distinguem-se uns dos outros pelo modo como esses radicais são gerados. Estes radicais reagem rapidamente com a maioria dos compostos orgânicos (Haag & Yao, 1992). Os AOP podem ser classificados em: processos homogêneos e processos heterogêneos. Muitos AOP são baseados na combinação de um agente oxidante com um catalisador ou radiação.

As principais vantagens dos AOP são as seguintes (Cuerda-Correa et al., 2020):

- Capacidade de mineralização de poluentes orgânicos em dióxido de carbono e água, e oxidação de compostos inorgânicos e iões;
- Reatividade não-seletiva com a maioria dos compostos orgânicos, evitando a presença de subprodutos tóxicos de poluentes primários que não são completamente oxidados.

A principal desvantagem dos AOP reside nos seus elevados custos associados à utilização de reagentes caros e ao consumo energético (Cuerda-Correa et al., 2020).

Na Tabela 3.6, encontram-se listados alguns processos de oxidação avançada que possuem tecnologias de desinfecção comuns.

Tabela 3.6 - Alguns processos de oxidação avançada (AOP) (adaptado de US EPA, 2017)

Processo de Oxidação Avançada	Descrição	Aplicação
UV + Peróxido de Hidrogénio	Fotólise UV e geração de radicais hidroxilo pela reação de luz UV com peróxido de hidrogénio	Remoção de contaminantes de interesse emergente
Ozono + Peróxido de Hidrogénio	Alternativa mais económica a UV + Peróxido de Hidrogénio, mas menos eficiente	Controlo de odor e sabor
UV + Cloro	Processo semelhante a UV + Peróxido de Hidrogénio, mas mais eficiente. No entanto pouca informação disponível sobre os subprodutos que se possam formar	Remoção de contaminantes de interesse emergente

Processos de separação por membrana incluem a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa, que podem ser utilizados separadamente ou associados a outros processos. A Tabela 3.7 sumariza as principais características dos diferentes tipos de membranas e as suas aplicações.

Tabela 3.7 - Tipos de membranas e as suas características (Capodaglio, 2020)

Tipo de membrana	Tamanho dos poros (μm)	Pressão operacional (bar)	Contaminantes removidos
Microfiltração (MF)	0,1 - 10	0,1 - 2	Maioria das bactérias e protozoários
Ultrafiltração (UF)	~ 0,003 - 0,1	1 - 5	Proteínas, coloides, bactérias, polissacarídeos, alguns vírus, macromoléculas
Nanofiltração (NF)	~ 0,001	5 - 20	Vírus, matéria orgânica natural, iões polivalentes, pequenas moléculas
Osmose Inversa (OI)	<0,001	10 - 100	Cor, iões monovalentes, quase todas as impurezas

As membranas podem ser descritas como uma camada fina que funciona sob o princípio da separação física. As partículas são separadas de acordo com as suas propriedades físicas e químicas pela pressurização aplicada sobre elas. O efluente que atravessa a membrana denomina-se de permeado e o que fica retido denomina-se de concentrado (Metcalf & Eddy, 2003).

O material da membrana pode ser polimérico ou cerâmica. As membranas poliméricas são geralmente feitas com os seguintes materiais (US EPA, 2017): polipropileno; fluoreto de polivinilideno; polisulfona e polietersulfona

Cada material apresenta diferentes vantagens e desvantagens, mas todas as membranas poliméricas apresentam o risco de quebrarem, o que compromete a eficácia da membrana. As membranas de cerâmica apresentam-se como alternativa sem risco de quebrarem; no entanto, o seu custo é consideravelmente superior (US EPA, 2017).

A osmose inversa consegue remover constituintes iónicos (0,001 μm ou menos) e é geralmente aplicada na produção de água para consumo, dado que retém até 99% dos solutos dissolvidos na água de alimentação. A ultrafiltração consegue remover as partículas mais pequenas até cerca de 0,01 μm . A microfiltração remove partículas com tamanhos cerca de uma ordem de magnitude superior (Capodaglio, 2020).

3.4. Tratamento multi-barreiras

Multi-barreira é um conceito originalmente concebido para se descrever a uma visão mais alargada no abastecimento de água, incluindo conservação das massas de águas, tratamento, desinfecção e distribuição (Capodaglio, 2020). No seu uso corrente, tratamento multi-barreiras (MBT) refere-se a um contexto mais limitado, descrevendo uma sequência de processos de tratamento para produção de água potável (Capodaglio, 2020). Originalmente, o objetivo do tratamento de água para consumo era reduzir os riscos de patogénicos no abastecimento de água. No entanto, como consequência do progresso na monitorização da água, este objetivo tem sido alargado de modo a incluir a remoção de compostos químicos que apresentam riscos para a saúde humana ou afetam a cor e o sabor da água. O mesmo conceito pode ser aplicado na produção de ApR destinada à rega, usos industriais e outros usos não potáveis que possam causar impactos na saúde humana.

A conjectura por detrás do MBT é que, dado que nenhum processo de tratamento consegue, singularmente, classificar-se como uma barreira absoluta a todos os contaminantes, então os processos específicos posteriores removerão contaminantes que não foram removidos nos processos anteriores. No final, aplicando uma seletividade de processos cada vez maior, apenas uma quantidade mínima de contaminantes será capaz de escapar à sequência de etapas de tratamento. Esta hipótese pode ser considerada segura após algumas décadas de aplicação de MBT na reutilização de água em usos potáveis (Capodaglio, 2020). O MBT é planeado de modo a minimizar eventos indesejáveis com base no conhecimento atual resultante da experiência passada, mas pode não se revelar eficaz face a ocorrências não experienciadas.

No Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, é referido o conceito multi-barreiras como ferramenta de minimização do risco

Na reutilização de água, as barreiras devem considerar os seguintes aspetos (Capodaglio, 2020):

- controlo de poluição na fonte, tentando prevenir a entrada de substâncias perigosas na rede coletora, e em vários pontos no processo de tratamento;
- monitorização em tempo real ou quase-real;
- combinação de processos de tratamento;
- formação dos operadores do sistema de tratamento.

A abordagem multibarreiras resulta numa maior segurança para a saúde pública e o ambiente, porque o sistema de tratamento é redundante, havendo uma probabilidade muito baixa de todos os processos falharem ao mesmo tempo e quanto mais barreiras existirem maior a capacidade de lidar com potenciais falhas (Khan, 2013).

4. Gestão do risco na produção de ApR

De acordo com o guia *ISO Guide 73:2009 Risk management – Vocabulary* (ISO, 2009), a gestão do risco envolve os procedimentos de avaliação e de tratamento do risco. A gestão do risco permite identificar o tipo de falhas que podem surgir aquando do tratamento da água e minimizar a sua ocorrência ou, quando estas falhas se verificam, minimizar os efeitos das suas consequências.

No caso da utilização de ApR, a gestão do risco tem como principal objetivo a proteção da saúde pública, tal como é referido no guia *Guidelines for the Non-potable Uses of Recycled Water in Western Australia* (EHD WA, 2011). No caso da produção de ApR, a gestão do risco tem como principal objetivo garantir a qualidade e quantidade da ApR produzida, sendo a proteção da saúde pública um objetivo acessório, isto porque, à partida, qualquer ETAR já tem esse aspeto em consideração.

Neste capítulo descrevem-se os principais aspetos a considerar na avaliação do risco associado à produção de ApR, assim como no tratamento dos riscos identificados, cuja aplicação será apresentada no capítulo 6.

4.1. Avaliação do Risco

De acordo com o guia *ISO Guide 73:2009* (ISO, 2009), o processo de avaliação do risco envolve as etapas de identificação, análise e apreciação do risco.

Etapa 1 - Identificação do risco

A primeira etapa da avaliação do risco é o “processo de procura, reconhecimento e descrição de riscos”. Na identificação do risco devem ser descritos perigos, eventos, causas e consequências (ISO, 2009).

No caso da produção de ApR, o perigo é definido como um agente (biológico, químico, físico ou radiológico) que caracteriza a qualidade ou a quantidade da ApR produzida ou, ainda, poderá provocar danos no sistema de tratamento. Os eventos são ocorrências capazes de provocar ou aumentar a presença de um determinado perigo, potenciando o risco inerente da produção de ApR e podem ter várias causas (EHD WA, 2011).

No caso da produção de água para reutilização numa ETAR urbana, as consequências dos eventos correspondem à produção de ApR com qualidade inferior ao estabelecido, comprometendo assim a sua utilização, e/ou à produção de ApR em quantidade inferior à estabelecida com os utilizadores, podendo comprometer a

atividade económica desenvolvida por estes (por exemplo, exploração agrícola ou de campos de golfe).

Etapa 2 – Análise do Risco

A segunda etapa da avaliação do risco tem por objetivo a compreensão da natureza do risco e da determinação do nível do risco, fornecendo bases para a apreciação do risco e para a tomada de decisões do tratamento desse risco. A análise do risco pode ser qualitativa, através de uma apreciação empírica, ou quantitativa, através do cálculo da avaliação da probabilidade de incidentes e das consequências associadas (EHD WA, 2011).

Etapa 3 – Apreciação do risco

A terceira etapa da avaliação do risco corresponde à apreciação do risco, consistindo na “comparação dos resultados da análise de riscos com critérios de riscos para determinar se o risco residual é tolerável” (ISO Guide 73). Podem ser considerados diferentes níveis de classificação do risco. Esta classificação deve incluir, no mínimo, 3 níveis: baixo, moderado e elevado. Nos cenários em que se considera que o nível é baixo, não é necessário agir. Nos cenários com nível moderado a elevado é necessário fazer o tratamento do risco, utilizando barreiras de tratamento ou limitando o acesso a locais com ApR de forma a baixar o nível do risco na produção ou na utilização de ApR (EHD WA, 2011).

4.2. Tratamento do risco

Como foi referido na secção 3.5, a utilização de diversas etapas de tratamento na produção de ApR (abordagem multi-barreiras) permite diminuir a presença de perigos biológicos e químicos nas águas residuais tratadas e assim tornar mais segura a reutilização de água.

O tratamento do risco nas barreiras de tratamento pode ser planeado através da aplicação da metodologia HACCP (Análise de Perigos e Controlo de Pontos Críticos) na produção de ApR. Através da HACCP definem-se as medidas preventivas e corretivas a implementar na ETAR para o tratamento do risco.

Nesta etapa avalia-se se a etapa de tratamento / barreira permite que sejam atingidos os objetivos de qualidade – classe ApR – e qual a resposta a dar caso existam eventos que possam afetar os processos de tratamento.

A metodologia HACCP é uma abordagem sistemática para a identificação de perigos e a sua prevenção, com ênfase no controlo do processo para assegurar que as

medidas de tratamento do risco estão a funcionar eficazmente (EHD WA, 2011). Um aspeto que importa salientar é que nem todos os perigos identificados são alvo de medidas de controlo. Quando as tapas de tratamento não afetam a sua concentração não é aplicado controlo (por exemplo, CBO₅ e SST no caso da desinfeção por cloragem).

Um **Ponto Crítico de Controlo (PCC)** consiste no local da linha de tratamento onde é monitorizado um (ou mais) parâmetro que permita validar se a barreira está a funcionar ou não. A monitorização dos PCC implica o estabelecimento de limites – de alerta e crítico – para cada PCC. Limite crítico é o valor que separa um risco com nível aceitável de um risco com nível não aceitável. Além dos PCC, a HACCP considera os **Pontos Controlo da Qualidade (PCQ)** que são etapas do processo em que existe uma capacidade limitada na monitorização ou correção dos perigos (EHD WA, 2011).

HACCP é uma metodologia que facilita a identificação dos perigos e a definição de medidas de controlo apropriadas. É, portanto, uma forma de controlo da qualidade do produto baseada na prevenção e não unicamente em testes aos resultados finais. O procedimento HACCP tem 12 passos (EHD WA, 2011). Os cinco **pré-requisitos** são:

- Criar a equipa que irá realizar o HACCP;
- Descrever o produto;
- Identificar o uso do produto;
- Construir o diagrama do processo;
- Confirmar o diagrama do processo.

Os sete **princípios** do HACCP são:

- Princípio 1: Identificar cada perigo e calcular o risco a este associado.
- Princípio 2: Identificar os passos do processo e os procedimentos operacionais que possam ser controlados para minimizar os riscos, isto é, os PCC.
- Princípio 3: Estabelecer limites críticos para cada PCC, que devem ser estabelecidos de forma a assegurar que cada PCC está sob controlo.
- Princípio 4: Estabelecer um sistema de monitorização e controlo dos PCC.
- Princípio 5: Estabelecer a “Ação corretiva” a ser tomada quando os valores de PCC estão fora dos limites críticos de controlo (ou fora de controlo).
- Princípio 6: Estabelecer procedimentos de verificação e validação, incluindo testes suplementares, para assegurar que o sistema HACCP é eficaz.
- Princípio 7: Elaborar documentação relativa a todos os processos e registos de forma a satisfazer os princípios anteriormente descritos.

5. Enquadramento metodológico

5.1. Abordagem seguida

A presente dissertação tem uma abordagem conceptual à avaliação e tratamento do risco associado à produção de ApR em ETAR urbanas, uma vez que é utilizado um estudo de caso. Optou-se por definir diferentes situações que representam diversas qualidades da ApR, envolvendo, portanto, diferentes processos de tratamento na produção de ApR. Para um caso exemplificativo da produção de ApR numa ETAR urbana, representado por um esquema ou esquemas de tratamento, é feita a avaliação do risco associada à produção de ApR e, a partir dos resultados desta avaliação, é definido o tratamento do risco através da aplicação da metodologia HACCP.

A escolha para esta abordagem justifica-se por vários motivos: permite evitar os constrangimentos associados a um trabalho realizado numa ETAR em termos de pragmatismo; possibilita uma maior criatividade e liberdade na realização do exercício proposto de gestão do risco ao não se estar cingido a um único esquema de tratamento, sem, no entanto, deixar de ser fiel a situações realistas; é possível a análise de ETAR-tipo ajustadas à realidade nacional; e, finalmente, os diferentes casos em análise poderão vir a servir como exemplo a projetos de reutilização futuros.

5.2. Definição de linhas tipo de tratamento

Para a realização do exercício proposto no âmbito da presente dissertação, foram estabelecidas quatro situações de produção de ApR, consideradas representativas do contexto nacional. Para todas as situações é pressuposta como condição de base que as etapas de tratamento anteriores ao processo de afinação da qualidade para a produção de ApR são as mesmas e representam uma ETAR urbana convencional. Desta forma, o pré-tratamento e o tratamento primário são os comuns, e o tratamento secundário é composto por lamas ativadas convencionais e decantador secundário. O efluente tratado nesta ETAR conceptual apresenta uma qualidade adequada a uma descarga efetuada em meio não sensível a eutrofização e contaminação microbiológica. Considera-se que este efluente é correspondente a uma classe D ($\leq 10\,000$ ufc/100 mL de *E. coli*).

O tratamento a realizar ao efluente secundário depende naturalmente da qualidade definida para cada caso-tipo. Desta forma, o exercício desenvolvido nesta

dissertação tem como objetivo responder aos seguintes objetivos de produção de ApR para usos não potáveis, tendo em considerações diferentes constrangimentos:

- Caso 1 – corresponde à produção de ApR ser utilizada na rega de um espaço verde sem restrição de acessos, ou seja, com maiores exigências de qualidade (aplicação de situação comum em Portugal);
- Caso 2 – corresponde à produção de ApR destinada a dois usos distintos que requerem diferente qualidade numa única ETAR (aplicação da abordagem fit-for-purpose);
- Caso 3 – corresponde à existência de alterações na qualidade das águas residuais afluentes à ETAR que possam afetar a qualidade da ApR produzida (aplicação do conceito multi-barreiras);
- Caso 4 – corresponde à produção de ApR com qualidade diferente ao longo do ano e com utilização de sistemas de tratamento com baixo consumo de energia (aplicação de sistema de tratamento com baixo consumo energético).

No **Caso 1**, considera-se a produção exclusiva de ApR de **classe A**. No **Caso 2**, considera-se a produção em simultâneo de duas qualidades diferentes, 50% de **classe A** e outros 50% de **classe B**. No **Caso 3**, é considerada a produção exclusiva de uma água de **classe A**, podendo haver eventos de entrada de água do mar na rede pública de drenagem e, consequentemente, aumento do teor em cloretos das águas residuais. No **Caso 4**, a produção de ApR tem como finalidade o suporte de um ecossistema aquático sensível à contaminação microbiológica, com a produção de uma água de **classe C** em período húmido e **classe B** em período seco.

De modo a produzir ApR de classe A para o **Caso 1** foi considerado um sistema robusto de tratamento baseado na desinfecção com radiação UV com a utilização de uma etapa de microfiltração a montante. É considerada uma etapa de armazenamento da ApR produzida, sendo feita uma cloragem para fornecimento de um residual desinfetante antes do envio da ApR para o ponto de entrega. Esquema de tratamento encontra-se representado na Figura 5.1.

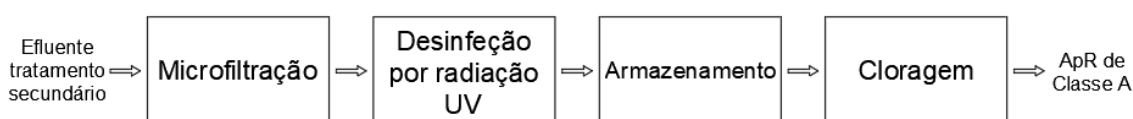


Figura 5.1 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 1

Para a radiação UV ser eficiente, é necessário haver uma concentração reduzida de SST e baixa turvação, sendo estes critérios garantidos com uma etapa de filtração a montante. As membranas de microfiltração oferecem mais segurança ao sistema UV do

que apenas filtros de areia, mas, embora ofereceram menos do que ultrafiltração, esta não se considera necessária, pois a microfiltração é suficiente para o propósito e apenas iria acrescentar mais custos a um sistema de reutilização que, por si só, já é dispendioso. Para dar proteção às membranas de microfiltração, são considerados filtros de cartucho ou de disco a montante, na eventualidade de ocorrer *bulking* ou outras falhas no tratamento secundário. Antes da ApR ser enviada para distribuição, é-lhe adicionada cloro para garantir um residual desinfetante e evitar fenómenos de *regrowth* na rede de distribuição.

No que diz respeito ao **Caso 2**, foram considerados dois esquemas de tratamento diferentes, dado que terão de ser produzidas duas ApR com classes de qualidade diferentes. Para a ApR de classe A, o esquema de tratamento é igual ao do caso 1. Para a produção de ApR de classe B, os processos escolhidos foram a filtração com recurso a filtros de areia e a desinfecção por cloragem, não sendo considerada uma etapa de armazenamento (o utilizador da ApR é que garante esta necessidade). O esquema de tratamento definido para o caso 2 encontra-se representado na Figura 5.2.

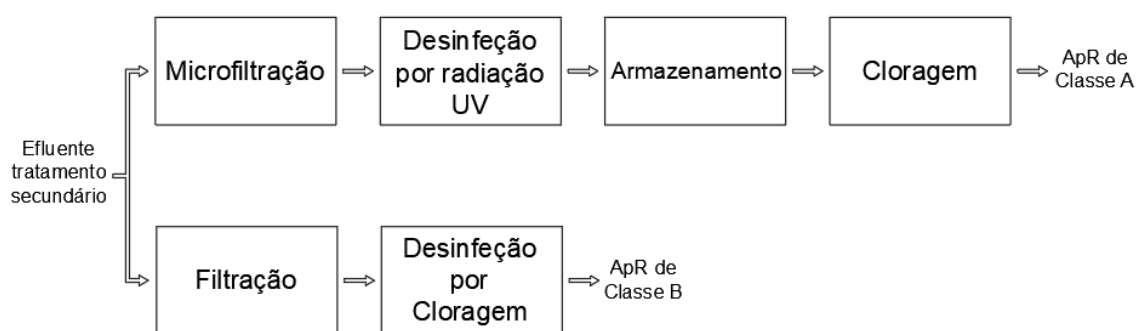


Figura 5.2 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 2

Para o esquema de reutilização de ApR de classe A, foi empregue o mesmo raciocínio que no esquema de reutilização do caso 1.

Para o esquema de reutilização de ApR de classe B, os filtros de areia permitirão remover os microrganismos ligados aos sólidos suspensos e assegurar o funcionamento da desinfecção independentemente da ocorrência de alguma falha no tratamento secundário. É importante salientar que neste caso, a desinfecção é feita por cloragem, que também garante o residual.

Tendo o **caso 3** a implicação da água residual afluenta ter uma concentração variável de cloretos, o esquema de tratamento tem de garantir que estes sejam removidos, comportando processos economicamente mais dispendiosos. Por este motivo, a esta ApR terá um custo superior, sendo a sua melhor aplicação a rega de

campos de golfe, cuja atividade económica justifica os custos elevados de produção desta água. Este esquema de tratamento está representado na Figura 5.3.

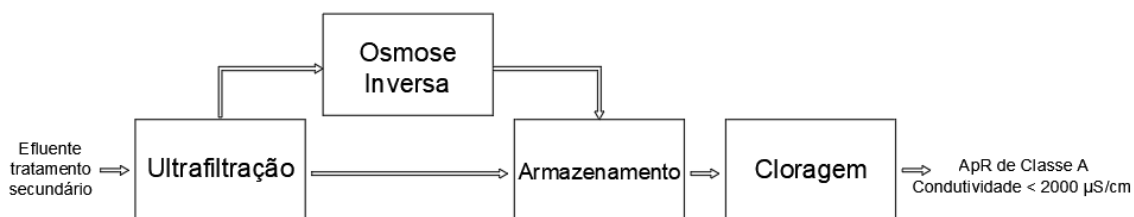


Figura 5.3 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao Caso 3

A remoção de cloretos é realizada, quando necessário, através de osmose inversa. A ultrafiltração tem a função de proteção do funcionamento da osmose inversa e de pré-desinfecção. Tal como nos casos anteriores, os filtros de cartucho ou discos pretendem dar segurança à etapa seguinte e a cloragem tem função de garantir a existência de um residual desinfetante na rede de distribuição de ApR.

Apenas uma parte do caudal passará pela osmose inversa, dado que é um processo muito dispendioso. Este caudal será misturado com o caudal proveniente da ultrafiltração de modo a diluir a sua concentração de sais. Para além de dispendioso, passar todo o caudal pela osmose inversa implicaria uma água praticamente sem sais, o que não é pretendido caso a aplicação seja efetivamente uma rega. Esta distribuição de caudal deve ser efetuada de modo a atingir uma condutividade de 2000 $\mu\text{S/cm}$.

Na Figura 5.4, está representado o esquema de reutilização para o caso 4, apenas composto por lagoas de maturação.

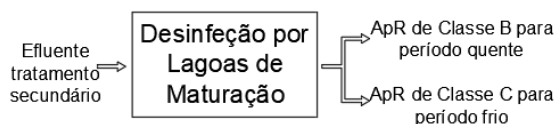


Figura 5.4 – Esquema-tipo de reutilização relativo ao caso 4

Tendo a ApR, neste caso, a finalidade de suporte de um ecossistema aquático, a obtenção de classe C (1 000 ufc/100 mL de *E. coli*) é possível através de um sistema de lagoas de macrófitas. No entanto, a sensibilidade do ecossistema à contaminação microbiológica varia ao longo do ano, sendo maior no período seco. É exigível nessa altura produzir ApR com uma qualidade de classe B. As lagoas de maturação são uma opção fiável e de baixo custo energético e tecnológico para este caso. Como no período seco as temperaturas são mais elevadas e a intensidade solar maior, a eficiência de desinfecção será superior à do período húmido, conseguindo garantir facilmente um efluente de classe B (100 ufc/100 mL de *E. coli*).

5.3. Metodologia de avaliação e tratamento do risco na produção de ApR em ETAR urbanas

A metodologia de avaliação e tratamento do risco na produção de ApR tem por base os princípios do processo de gestão do risco definidos no guia *ISO Guide 73:2009 Risk management – Vocabulary* e a metodologia HACCP.

Para a realização da avaliação do risco, define-se o **risco** como sendo **um não cumprimento da qualidade e quantidade pretendidas para a ApR**. A qualidade da ApR a produzir é a indicada na descrição dos diferentes caos. A quantidade é um valor em m³/d combinado entre o produtor e o utilizador da ApR.

Na secção 4.1 apresenta-se o processo de **avaliação do risco**, o qual é formado por 3 etapas: identificação de riscos, análise do risco e apreciação do risco.

Identificação de riscos

Nesta etapa são identificados os perigos, os eventos ou cenários que podem levar à sua presença. De acordo com o Decreto-Lei n.º 119/2019, o perigo é definido como “os contaminantes ou poluentes, bem como a respetiva origem, ou outra situação com potencial para provocar danos na saúde, a curto ou longo prazo, ou no ambiente, em particular nos recursos hídricos”.

Para os casos em estudo, os perigos que dizem respeito à qualidade da água são os parâmetros de qualidade estabelecidos no Anexo I do Decreto-Lei n.º 119/2019, sendo classificados como perigos químicos e biológicos, e que serão controlados através dos processos de tratamento da ApR. O tratamento do risco no caso destes perigos é feito através das etapas de tratamento a jusante ao tratamento secundário.

Em termos da produção de ApR numa determinada quantidade, o perigo é haver um problema na afluência de águas residuais à ETAR ou na linha de tratamento que faça com que a ApR não tenha a qualidade necessária e por isso não possa ser entregue.

Análise do Risco

É o processo de compreensão da natureza do risco e determinação do nível do risco, fornecendo bases para a apreciação do risco e para as decisões do tratamento desse risco (ISO, 2009). A análise do risco é feita para diferentes cenários, os quais descrevem o impacto dos perigos considerados nas diferentes etapas da linha de tratamento empregue na produção de ApR.

Como no caso da produção de ApR não existem recetores diretos (pessoas e ambiente) aos perigos tal como acontece na utilização de ApR, definiram-se “incidentes” comparáveis aos cenários de exposição aos perigos pelos recetores para desenvolver a avaliação do risco (Ribeiro, 2022). Os incidentes estão assim relacionados com o funcionamento dos processos de tratamento.

Para a realização da avaliação qualitativa do risco considera-se a classificação de consequências (Tabela 5.1) e a classificação da probabilidade de incidentes em termos de qualidade e de quantidade (Tabela 5.2 e na Tabela 5.3, respetivamente).

Tabela 5.1 - Classes de classificação de consequências (Ribeiro, 2022)

Nível	Descrição da classificação de consequências
Marginal	ApR com concentração do parâmetro X que cumpra as normas de qualidade apresentadas no Anexo I do DL n.º 119/2019
Séria	ApR com concentração do parâmetro X que exceda até 75% (inclusive) o valor paramétrico estabelecido nas normas de qualidade apresentadas no Anexo I do DL n.º 119/2019
Crítica	ApR com concentração do parâmetro X que exceda em mais de 75% o valor paramétrico estabelecido nas normas de qualidade apresentadas no Anexo I do DL n.º 119/2019

Tabela 5.2 - Classes de classificação de probabilidade de incidentes, vertente de qualidade da ApR (Ribeiro, 2022)

Nível	Descrição da classificação de probabilidade de incidentes (Qualidade da ApR)
Rara	ApR com concentração do parâmetro X que cumpra as normas de qualidade apresentadas no Anexo I do DL 119/Número máximo anual de inconformidades: amostragem trimestral - 0, amostragem mensal - 1, amostragem quinzenal - 2, amostragem semanal - 3
Ocasional	Número máximo anual de inconformidades: amostragem trimestral - 1, amostragem mensal - 2, amostragem quinzenal - 3, amostragem semanal - 6
Frequente	Número máximo anual de inconformidades. para todas as periodicidades de amostragem - superior ao número máximo admitido

Tabela 5.3 - Classes de classificação de probabilidade de incidentes - vertente de quantidade da ApR (Ribeiro, 2022)

Nível	Descrição da classificação de probabilidade de incidentes (Quantidade da ApR)
Rara	Não fornecimento de ApR até 5% (inclusive) do nº de dias de entrega acordados com o utilizador
Ocasional	Não fornecimento de ApR entre 5% e 15% (inclusive) do nº de dias de entrega acordados com o utilizador
Frequente	Não fornecimento de ApR superior a 15% do nº de dias de entrega acordados com o utilizador

Apreciação do risco

A terceira etapa de uma avaliação do risco corresponde à apreciação do risco, consistindo na “comparação dos resultados da análise de riscos com critérios de riscos para determinar se o risco residual é tolerável” (ISO Guide 73).

Para esta apreciação, é utilizada uma matriz do risco com 3 níveis de classificação do risco – baixo, moderado e elevado. Cada cenário de exposição aos perigos será classificado numa quadrícula da matriz do risco, de acordo com os resultados da análise do risco. A Tabela 5.4 apresenta esses 3 níveis de risco e a decisão associada ao seu tratamento.

Tabela 5.4 - Níveis do risco associado aos diferentes cenários de produção de ApR (Ribeiro, 2022)

Nível	Decisão associada ao tratamento do risco
Baixo	Risco baixo, mas não negligenciável, deverá ser tratado se o custo associado ao seu tratamento for insignificante
Moderado	No caso presente, considera-se tolerável apenas risco baixo, pelo que o tratamento do risco implica a adoção de barreiras e/ou medidas que o reduzam a um nível baixo.
Elevado	Ou se atua no sentido de reduzir o risco ou o projeto de produção de ApR de água não poderá prosseguir

Apresenta-se na Tabela 5.5 a matriz do risco associada à produção de ApR em ETAR urbanas.

Tabela 5.5 - Matriz do risco (Ribeiro, 2022)

Probabilidade de incidentes	Consequência (nos objetivos)		
	Marginal	Séria	Crítica
Rara	baixo	moderado	elevado
Ocasional	moderado	moderado	elevado
Frequente	moderado	elevado	elevado

Análise de Perigos e Controlo de Pontos Críticos

Após a avaliação do risco relativo à produção de ApR numa ETAR urbana, é necessário definir medidas de tratamento do risco para os cenários com nível moderado ou alto. Nestes casos é necessário a aplicação de medidas que garantam o bom funcionamento das etapas de tratamento, ou seja, a integridade das barreiras definidas para a remoção dos perigos identificados da ApR em produção.

A metodologia HACCP é uma abordagem sistemática para a identificação de perigos e a sua prevenção, com ênfase no controlo do processo para assegurar que as medidas de tratamento do risco estão a funcionar eficazmente.

Na presente dissertação, a **aplicação da metodologia HACCP** é feita através dos seguintes passos:

1. Para cada etapa da linha de tratamento, são identificados os perigos que podem resultar num risco para a produção de ApR e, seguidamente, são indicados os eventos perigosos que podem estar na sua origem, para em seguida definir as medidas preventivas à ocorrência destes eventos.
2. Para cada ponto crítico de controlo, são indicados os parâmetros críticos de monitorização e são definidos os limites de alarme e crítico que irão desencadear ações de controlo do processo.
3. Para cada parâmetro de crítico de monitorização, é definido o procedimento de monitorização com indicação do equipamento de monitorização envolvido e o momento e local da monitorização.
4. Finalmente, são definidas as ações corretivas a implementar para os dois tipos de limite (alarme e crítico) estabelecidos para cada parâmetro de monitorização associado aos diferentes pontos críticos de controlo.

6. Resultados e discussão

Este capítulo apresenta os resultados da avaliação e do tratamento do risco associado à produção de ApR nos quatro casos representativos da sua produção em ETAR urbanas convencionais. Como base desta análise, considera-se a aplicação das etapas de tratamento mais comum para a linha líquida: tratamento preliminar, tratamento primário e tratamento biológico, este com o processo de lamas ativadas. O efluente tratado nesta ETAR conceptual é descarregado num meio recetor sem eutrofização e não sensível à contaminação microbiológica. Considera-se que esta ETAR funciona bem e de forma estável, de maneira a garantir a que o efluente secundário apresenta uma qualidade equiparável à classe D do DL 119/2019 ($\text{CBO}_5 \leq 25 \text{ mg O}_2/\text{L}$, $\text{SST} \leq 35 \text{ mg/L}$, $E. coli \leq 10\,000 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$, $\text{NH}_4 \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{N total} \leq 15 \text{ mg/L}$, $\text{P total} \leq 5 \text{ mg/L}$).

Considera-se que a produção de ApR corresponde à linha de tratamento que é colocada à jusante do tratamento secundário, de acordo com o estabelecido no DL 119/2019. Este decreto-lei define classes de ApR para diferentes utilizações. As diferentes qualidades de ApR exigem diferentes tipos de etapas de tratamento e tipos de sistema de desinfeção.

Apresentam-se, de seguida, os resultados da aplicação da metodologia de avaliação e tratamento do risco nos quatro casos hipotéticos apresentados no capítulo anterior.

6.1. Caso 1 – Produção de ApR de classe A

6.1.1. Descrição geral

O caso 1 consiste na produção de uma ApR com a classe A, sendo a utilização prevista para esta ApR a rega de espaços verdes sem restrição de acesso. A produção de ApR é feita de maio a outubro. É considerado o armazenamento da ApR produzida num tanque com um tempo de retenção hidráulico de 24 horas.

Considera-se como evento que possa afetar a qualidade das águas residuais em tratamento a possibilidade de ocorrência de aflúências indevidas na rede pública de drenagem, com descargas de águas residuais industriais de elevada carga orgânica ou com metais pesados.

De acordo com o DL n.º 119/2019, uma ApR de classe A deve apresentar as seguintes características: $\text{CBO}_5 \leq 10 \text{ mg O}_2/\text{L}$, $\text{SST} \leq 10 \text{ mg/L}$, $E. coli \leq 10 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$, $\text{NH}_4 \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{N total} \leq 15 \text{ mg/L}$, $\text{P total} \leq 5 \text{ mg/L}$. Desta forma, o tratamento a realizar para a melhoria da qualidade do efluente do tratamento secundário (equiparável à classe D) deve resultar nas

seguintes eficiências de remoção: 60% para CBO₅, 70% para SST e redução de ordem logarítmica (ROL) de 3 para *E. coli*. Para tal, o **esquema de tratamento** definido para a produção de ApR com **classe A** apresenta as seguintes etapas: microfiltração, radiação UV e cloragem.

6.1.2. Avaliação do risco

Para o caso 1, a Tabela 6.1 e a Tabela 6.2 representam a análise do risco efetuada no que diz respeito à classificação de consequências e da probabilidade de ocorrência dos incidentes (qualidade) e a Tabela 6.3 corresponde à matriz do risco.

Tabela 6.1 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A: classificação de consequências

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da consequência
CBO ₅	- Afluências industriais indevidas	Tratamento secundário	Marginal
Metais pesados			Marginal
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas		Séria
Azoto e Fósforo			Séria
SST	- Colmatção nos filtros - Avaria de equipamentos	Microfiltração	Séria
<i>E. coli</i>	- Avaria de lâmpada - Incrustações nas lâmpadas	Radiação UV	Séria
<i>E. coli</i>	- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Séria

O cenário de afluências industriais indevidas apresenta dois perigos distintos, que podem ter origem em diferentes indústrias. Caso se trate de uma descarga proveniente de uma indústria de laticínios, por exemplo, irá haver uma variação súbita na carga de CBO₅ afluente à ETAR, que não terá, à partida, capacidade de arejamento suficiente para degradar elevada carga orgânica, podendo acontecer um desenvolvimento de bactérias filamentosas (*bulking* filamentoso) que irão perturbar a sedimentação das lamas no decantador secundário. Noutra situação, caso a descarga tenha origem numa indústria metalomecânica, por exemplo, irá haver um crescimento súbito da concentração afluente de metais pesados à ETAR, compostos que inibem o normal funcionamento dos microrganismos, diminuindo a eficácia do tratamento secundário. O nível de consequência é considerado marginal, pois como este cenário se encontra a montante de todas as etapas de tratamento, é possível atenuar as suas consequências, caso a descarga seja detetada rapidamente.

No tratamento secundário é também considerada a ocorrência de dois perigos. Caso ocorra uma avaria no sistema de arejamento das lamas ativadas, a eficácia do processo biológico será reduzida, o que irá influenciar desfavoravelmente a eficiência das etapas de tratamento a jusante. Por isto considera-se que o nível da consequência é sério.

A etapa de microfiltração é onde se inicia o sistema de produção de ApR. Podem surgir avarias no equipamento caso a idade das membranas seja superior à sua idade útil ou haja falhas nos seus ciclos de lavagem que impeçam a filtração do efluente secundário. O seu nível de consequência é sério, pois falhas nesta etapa implicam que a desinfecção seja posta em causa. Sendo a etapa seguinte a desinfecção por radiação UV, é fundamental que o efluente seja bem filtrado. Por isso o perigo identificado é a concentração de SST.

O perigo identificado para a desinfecção com radiação UV é a concentração de *E. coli*. A inativação de patogénicos apenas se realiza caso haja emissão de radiação UV em intensidade suficiente, não se realizando caso existam avarias ou incrustações nas lâmpadas. Na eventualidade de esta ser a única etapa de desinfecção o nível de consequência do cenário proposto seria crítico. No entanto, como é feita cloragem a jusante para fornecimento de um residual de desinfetante à ApR fornecida, o seu nível considera-se apenas sério.

Como etapa final deste esquema de tratamento, está o perigo microbiológico *E. coli* com uma concentração acima da desejada para cumprir os parâmetros de qualidade classe A. Isto pode verificar-se caso a quantidade de cloro seja insuficiente. O nível de consequência é considerado como sério, pois caso o cenário ocorra, a entidade produtora de ApR ainda pode avisar o recetor da água para que, após o local de entrega, este possa ou adicionar reagente desinfetante ou efetue a diluição do efluente com cloro residual em excesso.

Tabela 6.2 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A: classificação de probabilidade de incidentes

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da probabilidade de incidentes
CBO ₅	- Afluências industriais indevidas	Tratamento secundário	Rara
Metais pesados			Rara
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas		Rara
Azoto e Fósforo			Rara
SST	- Colmatção nos filtros - Avaria de equipamentos	Microfiltração	Ocasional
<i>E. coli</i>	- Avaria de lâmpadas - Incrustações nas lâmpadas	Radiação UV	Ocasional
<i>E. coli</i>	- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Rara

O primeiro cenário de afluentes indevidas é considerado raro, pois as indústrias devem possuir capacidade de pré-tratamento dos seus efluentes antes de os descarregar na rede pública de drenagem, sendo que algumas efetuam o tratamento completo.

O cenário no tratamento secundário não será comum, pois, à partida, existem planos de manutenção e monitorização dos equipamentos de arejamento na ETAR, sendo a sua avaria um acontecimento muito pouco provável, ainda que, não impossível de se verificar.

Para a microfiltração, a ocorrência do cenário apresentado verificar-se-á caso existam falhas nos ciclos de lavagem ou quando a idade das membranas é superior à sua idade útil, não tendo havido a sua substituição. Estas falhas não são comuns de ocorrer e a idade útil das membranas apenas é ultrapassada caso a gestão da ETAR não seja competente.

A barreira de desinfecção com recurso a radiação UV, embora não existam dados da ocorrência de avaria de lâmpadas disponíveis, considerou-se que esta situação não será comum ao longo de um ano, tal como a verificação de incrustações nas lâmpadas, pois isto apenas aconteceria caso o sistema de lavagem do sistema estivesse avariado.

Para a última barreira de tratamento, a cloragem, a probabilidade de ocorrência dos cenários propostos foi assumida como rara, pois esta ocorrência estaria associada a falhas no sistema de doseamento de cloro que não serão comuns de acontecer caso o sistema não apresente erros de conceção.

Tabela 6.3 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe A

Cenário	Nível da Consequência	Nível da probabilidade de incidentes	Nível do risco
- Afluentes industriais indevidas	Marginal	Rara	Baixo
	Marginal	Rara	Baixo
- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Séria	Rara	Moderado
	Séria	Rara	Moderado
- Colmatção nos filtros - Avaria de equipamentos	Séria	Ocasional	Moderado
- Avaria de lâmpadas - Incrustações nas lâmpadas	Séria	Ocasional	Moderado
- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Séria	Rara	Moderado

Para o Caso 1, verifica-se que dos 7 cenários propostos, 2 apresentam risco baixo e os restantes 5 apresentam risco moderado. Para os cenários com um nível moderado é

necessário aplicar medidas de tratamento do risco para diminuir ou a ocorrência de incidentes, ou a consequência destes incidentes, ou ambas. Na secção seguinte são apresentadas medidas de tratamento do risco que têm por objetivo fazer com que todos os cenários apresentem risco com nível baixo, o que é conseguido através a aplicação de medidas de controlo dos processos de tratamento.

6.1.3.Tratamento do risco

As medidas aplicadas no tratamento do risco são definidas com base na metodologia HACCP. Nas tabelas seguintes é apresentada a aplicação dessa metodologia para o caso 1. A Tabela 6.4 identifica os perigos e respetivas medidas preventivas para as etapas constituintes do sistema de reutilização do caso 1.

Tabela 6.4 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe A

Perigos	Etapas	Eventos perigosos	Medidas preventivas
SST e <i>E. coli</i>	Microfiltração	Efluente secundário com SST elevados	- Realização de uma pré-filtração do afluente com um filtro de cartucho ou de disco - Design robusto do processo - Manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos - Sistema duplo de filtração caso seja necessário proceder à sua substituição
		Desencaixe do módulo da membrana	
		Rotura da membrana ou perda de pressão	
		Colmatação devido a tempo de utilização elevado	
<i>E. coli</i>	Radiação UV	Incrustações na superfície das lâmpadas	- Limpeza e manutenção do sistema UV - Monitorizar a turvação do afluente - Sistema UV em canal fechado - Garantir que a idade das lâmpadas não excede as 10000 h
		Problemas hidráulicos (velocidade não uniforme no canal, formação de zonas mortas)	
<i>E. coli</i>	Armazenamento	Contaminação de microrganismos patogénicos	- Adição de desinfetante
<i>E. coli</i>	Cloragem	Doseamento insuficiente para garantir residual, devido a avarias na bomba doseadora	- Alarme PLC - Manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos - Controlar CT
		CT insuficiente	

No armazenamento, a contaminação microbiológica pode ocorrer, por exemplo, caso haja acesso de animais (pássaros por exemplo) ao tanque de armazenamento.

A Tabela 6.5 identifica os parâmetros críticos de cada PCC no caso 1, bem como apresenta os seus limites de alerta e críticos.

Tabela 6.5 - Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para a produção de ApR classe A

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Limite de alarme	Limite crítico
Microfiltração	Turvação do efluente	> 5 NTU	> 8 NTU
	Pressão da membrana	Definido pelo fornecedor do equipamento	
Radiação UV	Dose	<140 mJ/cm ² durante mais de 30 minutos	<140 mJ/cm ² durante mais de 60 minutos
	Transmitância	< 55 %	
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	> 10 ufc/100 mL	
Cloragem	Cloro residual	< 0,5 mg/L	< 0,25 mg/L

Para a microfiltração considerou-se que o limite de alarme para a turvação do efluente fossem de 5 NTU, pois é a partir deste valor que a eficiência da radiação UV começa a diminuir (W. Liu, 2006); com 8 NTU já reduziu consideravelmente.

A dose de radiação UV não deve ser inferior a 140 mJ/cm², pois segundo (Kong et al., 2021), é a dose necessária para inativar a maioria dos patogénicos presentes na água em cerca de 4 log.

A Tabela 6.6 define o procedimento de monitorização de cada parâmetro crítico para o caso 1.

Tabela 6.6 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe A

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Procedimento de monitorização		
		Equipamento de monitorização	Quando?	Onde?
Microfiltração	Turvação do efluente	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da membrana
	Pressão da membrana	Equipamento de testagem de integridade de membranas	Mensal	Na membrana
Radiação UV	Dose	Medição com sonda	Contínuo	On-line
	Transmitância	Medição com sonda	Contínuo	On-line
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	Análise laboratorial	Diário	Amostra do tanque de armazenamento
Cloragem	Cloro residual	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da câmara de contacto

Todos os parâmetros são monitorizados em contínuo, exceto a pressão da membrana, que deverá ser testada mensalmente em condições normais de utilização. O sistema UV deve ser monitorizado *on-line*, ou seja, o equipamento de monitorização deve estar integrado no canal.

Por último, a Tabela 6.7 enumera as ações corretivas a efetuar em cada parâmetro caso os seus limites de alarme e crítico sejam atingidos.

Tabela 6.7 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe A

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Tipo de limite	Ações corretivas
Microfiltração	Turvação do efluente	Alarme	1. Verificar sonda 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	1. Verificar sonda 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para substituição de membranas
	Pressão da membrana	Alarme	1. Verificar todas as outras membranas 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	1. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para substituição de membranas
Radiação UV	Dose	Alarme	1. Verificar sistema UV <i>on-site</i> 2. Ativar limpeza da lâmpada
		Crítico	1. Verificar sistema UV <i>on-site</i> 2. Substituir lâmpada
	Transmitância	Alarme	1. Verificar sistema UV <i>on-site</i> 2. Substituir lâmpada
		Crítico	1. <i>Shut down</i> no sistema UV 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	Alarme	1. Adicionar desinfetante à saída do tanque ou avisar o cliente para o fazer quando a água chegar ao ponto de entrega
		Crítico	2. Interromper abastecimento de ApR caso o passo anterior não seja possível
Cloragem	Cloro residual	Alarme	1. Verificar sistema de cloragem 2. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 3. Aumentar dose de imediato
		Crítico	1. Verificar sistema de cloragem 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para arranjo ou substituição do sistema de cloragem

Na maioria dos casos, quando é atingido o limite crítico, tem de se efetuar o *shut down* completo do sistema de produção de ApR pois não será possível alcançar a qualidade pretendida para a ApR.

6.2. Caso 2 – Produção de ApR de classe A e de classe B

6.2.1. Descrição Geral

O caso 2 consiste na produção, numa mesma ETAR, de duas qualidades diferentes de ApR, metade do caudal de classe A e outra metade de classe B, do DL n.º 119/2019. Para tal, são consideradas duas linhas distintas de tratamento (*abordagem fit-for-purpose*).

O **esquema de tratamento** definido para a produção de ApR com **classe A** apresenta a mesma estrutura do Caso 1, tendo as seguintes etapas: microfiltração, radiação UV e cloragem. Só é feito armazenamento da ApR de classe A.

De acordo com o DL n.º 119/2019, uma ApR de classe B deve apresentar as seguintes características: $\text{CBO}_5 \leq 25 \text{ mg O}_2/\text{L}$, $\text{SST} \leq 35 \text{ mg/L}$, $E. coli \leq 100 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$, $\text{NH}_4 \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{N total} \leq 15 \text{ mg/L}$, $\text{P total} \leq 5 \text{ mg/L}$. Desta forma, o tratamento deve permitir um valor de ROL igual 2 para *E. coli*, não sendo necessário remover matéria orgânica e sólidos em suspensão. Assim, o **esquema de tratamento** definido para a produção de ApR com **classe B** apresenta as seguintes etapas: filtros de areia e cloragem.

Como a linha de tratamento para a ApR de classe A é igual à do caso 1, as secções 6.2.2. e 6.3.3. podem ser consideradas como a avaliação e tratamento do risco para esta situação. Portanto, as secções 6.3.2. e 6.3.3. referentes à avaliação e tratamento do risco serão apenas referentes à situação de produção de ApR de classe B.

6.2.2. Avaliação do Risco

Para a classe B do caso 2, a Tabela 6.8 e a Tabela 6.9 representam a análise do risco efetuada no que diz respeito à classificação de consequências e da probabilidade de ocorrência dos incidentes (qualidade) e a Tabela 6.10 corresponde à matriz do risco.

Tabela 6.8 – Análise do risco inerente à produção de ApR classe B: classificação de consequências

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da consequência
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Séria
Azoto e Fósforo			Séria
SST	- Colmatção dos filtros	Filtros de areia	Séria
<i>E. coli</i>	- Alterações do pH - Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Séria
Cloro	- Dosagem excessiva de reagente		Séria

Verifica-se que todos os cenários considerados têm consequências de nível sério.

Os filtros de areia têm como principal função dar segurança à desinfecção e, também, contribuir para alguma remoção de microrganismos associados a partículas sólidas. Portanto o seu cenário de perigo é a sua colmatção, pois ao longo do tempo de uso vão acumulando SST, fator que deve ser tido em consideração durante a operação. Como é a única etapa que protege a desinfecção, o seu nível de consequência é considerado sério.

A desinfecção é apenas composta por cloragem, pelo que é crucial o seu bom funcionamento. Se o pH não se encontrar na faixa ideal a eficiência irá ser diferente para a mesma dose, dosagens erradas podem contribuir para um défice de desinfecção afetando a qualidade final do efluente, ou para um excesso de residual presente na água, que precisará de ser anulado antes da aplicação que lhe for dada.

Tabela 6.9 – Análise do risco inerente à produção de ApR classe B: classificação de probabilidade de incidentes

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da probabilidade de incidentes
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Rara
Azoto e Fósforo			Rara
SST	- Colmatção dos filtros	Filtros de areia	Rara
<i>E. coli</i>	- Alterações do pH - Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Rara
Cloro	- Dosagem excessiva de reagente		Rara

Todos os cenários são de probabilidade rara de ocorrência, caso a gestão da operação da ETAR seja feita de modo competente. A colmatção dos filtros é evitada através da lavagem em contracorrente do leito filtrante. A cloragem é um processo de desinfecção comum, não sendo de esperar dificuldades na sua realização

Tabela 6.10 – Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe B

Cenário	Nível da Consequência	Nível da probabilidade de incidentes	Nível do risco
- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Séria	Rara	Moderado
	Séria	Rara	Moderado
- Colmatção dos filtros	Séria	Rara	Moderado
- Alterações do pH - Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Séria	Rara	Moderado
- Dosagem excessiva de reagente	Séria	Rara	Moderado

Para a classe B do Caso 2, verifica-se que dos 5 cenários propostos, todos apresentam risco moderado sendo necessário aplicar medidas de tratamento do risco para diminuir a consequência destes incidentes. Na secção seguinte são apresentadas medidas de tratamento do risco que têm por objetivo fazer com que todos os cenários apresentem risco com nível baixo, o que é conseguido através a aplicação de medidas de controlo dos processos de tratamento.

6.2.3. Tratamento do Risco

Nesta secção é aplicada a metodologia de tratamento do risco para a ApR classe B.

A Tabela 6.11 identifica os perigos e respetivas medidas preventivas para as etapas constituintes deste esquema de tratamento.

Tabela 6.11 – Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe B

Perigos	Etapas	Eventos perigosos	Medidas preventivas
SST	Filtros Areia	Efluente com turvação elevada	- Acionar lavagem do filtro
		Colmatação devido a tempo de utilização elevado	- Sistema duplo de filtração caso seja necessário proceder à sua substituição
		Formação de biofilme	- Injeção periódica de reagente desinfetante
Cloro	Cloragem	Concentração elevada de amónia	- Controlar concentração de NH ₃ à saída do tratamento biológico
		pH fora da faixa ideal	- Controlar pH
Cloro e/ou <i>E. coli</i>		Doseamento deficiente ou excessivo devido a avarias na bomba doseadora	- Alarme PLC; manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos
<i>E. coli</i>		CT insuficiente	- Controlar CT

Para os filtros de areia, a medida preventiva de acionar a lavagem do filtro é sugerida para ser uma lavagem adicional aos ciclos de lavagem normais do filtro. Na cloragem, apresentam-se 3 perigos diferentes, de acordo com o tipo de eventos influenciar: apenas a quantidade de cloro; a inativação de microrganismos; ambos.

Os limites de alarme e críticos de cada ponto crítico de controlo do esquema de desinfecção da água de classe B, encontram-se definidos na Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para a produção de ApR classe B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Limite de alarme	Limite crítico
Filtros de areia	Turvação do efluente	>5 NTU	>8 NTU
Cloragem	pH do efluente secundário	<6,5 e >8,0	<6,0 e >8,5
	Dose de Cloro (30 min contacto)	<15 mg/L	<10 mg/L
	Cloro residual	<0,5 mg/L	<0,25 mg/L

Para ter uma boa eficiência, o pH da água deve situar-se entre 6,5 e 8. Valores muito desviados desta gama requerem doses mais elevadas para se obter a mesma eficiência. O cloro residual deve ter uma concentração de cerca de 0,5 mg/L para não haver *regrowth* no sistema de distribuição, sendo o limite crítico acima de 1 mg/L indicativo de residual excessivo.

A Tabela 6.13 define o procedimento de monitorização de cada parâmetro crítico para a ApR de classe B.

Tabela 6.13 – Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Procedimento de monitorização		
		Equipamento de monitorização	Quando?	Onde?
Filtros de areia	Turvação do efluente	Medição com sonda	Contínuo	Jusante do filtro
Cloragem	pH do efluente secundário	Medição com sonda	Contínuo	Jusante do tratamento secundário
	Dose de Cloro (30 min contacto)	Medição com sonda	Contínuo	On-line
	Cloro residual	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da câmara de contacto

Por último, a Tabela 6.14 enumera as ações corretivas a efetuar em cada parâmetro caso os seus limites de alarme e crítico sejam atingidos.

Tabela 6.14 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Tipo de limite	Ações corretivas
-----	------------------------------------	----------------	------------------

Filtros de areia	Turvação do efluente	Alarme	1. Verificar sonda 2. Acionar lavagem do filtro
		Crítico	1. Verificar sonda 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para reparação do filtro
Cloragem	pH do efluente secundário	Alarme	1. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 2. Adicionar ácido ou base consoante o necessário
		Crítico	1. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR até corrigir nível de pH
	Dose de Cloro (30 min contacto)	Alarme	1. Verificar sistema de cloragem 2. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 3. Aumentar dose de imediato
		Crítico	1. Verificar sistema de cloragem 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para arranjo ou substituição do sistema de cloragem
	Cloro residual	Alarme	1. Verificar sistema de cloragem 2. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 3. Aumentar dose de imediato
		Crítico	1. Verificar sistema de cloragem 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para arranjo ou substituição do sistema de cloragem

6.3. Caso 3 – Produção de ApR de classe A com eventos de intrusão salina na rede de drenagem

6.3.1. Descrição Geral

Neste caso representa-se a produção de ApR num cenário de existência de alterações na qualidade das águas residuais afluentes à ETAR que possam afetar a qualidade da ApR produzida (conceito multi-barreiras).

Tendo o **caso 3** a implicação da água residual afluente ter uma concentração variável de cloretos, o esquema de tratamento tem de garantir que estes sejam removidos, comportando processos economicamente mais dispendiosos. Por este motivo, a ApR de classe A produzida terá um custo superior, devendo ser utilizada em usos como a rega de campos de golfe, cuja atividade económica justifica os custos elevados de produção desta água.

De acordo com o DL n.º 119/2019, uma ApR de classe A deve apresentar as seguintes características: $\text{CBO}_5 \leq 10 \text{ mg O}_2/\text{L}$, $\text{SST} \leq 10 \text{ mg/L}$, $E. coli \leq 10 \text{ ufc}/100 \text{ mL}$, $\text{NH}_4 \leq 10 \text{ mg/L}$, $\text{N total} \leq 15 \text{ mg/L}$, $\text{P total} \leq 5 \text{ mg/L}$. Desta forma, o tratamento a realizar para a melhoria da qualidade do efluente do tratamento secundário (com classe D) deve resultar nas seguintes eficiências de remoção: 60% para CBO_5 , 70% para SST e ROL de 3 para *E. coli*.

A intrusão salina na rede pública de drenagem resulta em picos na concentração de cloretos nas águas residuais, podendo a condutividade apresentar valores próximos de $5\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ com alguma frequência. É necessário reduzir a condutividade a níveis aceitáveis para rega em campos de golfe, cerca de $2\,000 \mu\text{S}/\text{cm}$ (SWRCB, 2002), recorrendo à mistura de água praticamente pura (filtrada pela osmose inversa) com água filtrada por ultrafiltração. Os valores relativos para cada uma das frações depende do nível de cloretos nas águas residuais afluentes à ETAR, não sendo a fração correspondente à osmose inversa superior a 60% do caudal afluente.

Para tal, o **esquema de tratamento** definido para a produção de ApR com **classe A com remoção de cloretos** é composto pelas seguintes etapas: ultrafiltração, osmose inversa quando for necessário remover cloretos e cloragem.

6.3.2. Avaliação do Risco

A Tabela 6.15 e Tabela 6.16 representam a análise do risco efetuada no que diz respeito à classificação de consequências e da probabilidade de ocorrência dos incidentes (qualidade), respetivamente, e a Tabela 6.17 corresponde à matriz do risco.

Tabela 6.15 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos: classificação de consequências

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da consequência
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Séria
Azoto e Fósforo			Séria
<i>E. coli</i> e SST	- Colmatação nos filtros - Avaria de equipamentos	Ultrafiltração	Séria
Condutividade	- Colmatação nos filtros - Avaria de equipamentos	Osmose Inversa	Séria
<i>E. coli</i>	- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Séria

As membranas de ultrafiltração e de osmose inversa têm o mesmo processo de funcionamento, sendo a diferença a pressão hidrostática e, portanto, os seus cenários irão ser os mesmos. No entanto os seus perigos são diferentes, pois a ultrafiltração tem como função adicional funcionar como pré-tratamento da osmose inversa (perigo – SST), além da função de principal de processo de desinfecção (perigo – *E. coli*). Já a osmose inversa tem como principal função remover cloretos, que estão diretamente relacionados com a condutividade da água, a qual é o perigo definido para esta barreira de tratamento uma vez que é parâmetro que se analisa com facilidade.

Como etapa final deste esquema de tratamento, tem de se garantir sempre a presença de um residual desinfetante na ApR para evitar fenómenos de *regrowth* no sistema de distribuição, sendo por isto que se considera uma consequência de nível sério para a cloragem (perigo – *E. coli*).

Tabela 6.16 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos: classificação de probabilidade de incidentes

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da probabilidade de incidentes
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Rara
Azoto e Fósforo			Rara
<i>E. coli</i> e SST	- Colmatação nos filtros - Avaria de equipamentos	Ultrafiltração	Rara
Condutividade	- Colmatação nos filtros - Avaria de equipamentos	Osmose Inversa	Rara
<i>E. coli</i>	- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Cloragem	Rara

Sendo as membranas uma tecnologia avançada, são equipamentos cuja automação e segurança de processo as tornam mais robustas. No entanto, não pode ser considerado impossível de acontecer. Posto isto considera-se rara a probabilidade de ocorrência de incidentes.

Para a última barreira de tratamento, a probabilidade de ocorrência dos cenários propostos foi assumida como rara, pois esta ocorrência estaria associada a falhas no sistema de doseamento de cloro que não são comuns de acontecer caso o sistema não apresente erros de conceção.

Tabela 6.17 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe A com cloretos

Cenário	Nível da Consequência	Nível da probabilidade de incidentes	Nível do risco
- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Séria	Rara	Moderado
	Séria	Rara	Moderado
- Colmatção nos filtros - Avaria de equipamentos	Séria	Rara	Moderado
- Colmatção nos filtros - Avaria de equipamentos	Séria	Rara	Moderado
- Dosagem insuficiente de reagente - Avaria ou perda de rendimento de equipamentos	Séria	Rara	Moderado

Verifica-se que dos 5 cenários considerados, todos apresentam risco moderado sendo necessário aplicar medidas de tratamento do risco, apresentadas no capítulo seguinte, para diminuir a consequência destes incidentes e reduzir o risco para o nível baixo.

6.3.3. Tratamento do Risco

Na Tabela 6.18, são identificados os perigos e medidas preventivas para cada etapa do sistema de produção de ApR com remoção de cloretos.

Tabela 6.18 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe A com cloretos

Perigos	Etapas	Eventos perigosos	Medidas preventivas
<i>E. coli</i> e SST	Ultrafiltração	Desencaixe do módulo da membrana	- Realização de uma pré-filtração do afluente com um filtro de cartucho ou de disco - <i>Design</i> robusto do processo - Manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos - Várias sequências de membranas caso seja necessário proceder à sua substituição
		Rotura da membrana ou perda de pressão	
		Colmatção devido a tempo de utilização elevado	
Condutividade	Osmose Inversa	Desencaixe do módulo da membrana	- <i>Design</i> robusto do processo - Manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos - Várias sequências de membranas caso seja necessário proceder à sua substituição
		Rotura da membrana ou perda de pressão	
		Colmatção devido a tempo de utilização elevado	
<i>E. coli</i>	Armazenamento	Contaminação de microrganismos patogénicos	- Adição de desinfetante
<i>E. coli</i>	Cloragem	Doseamento insuficiente para garantir residual, devido a avarias na bomba doseadora	- Alarme PLC - Manutenção preventiva dos componentes mecânicos, elétricos e físicos - Controlar CT
		CT insuficiente	

Como as membranas têm o mesmo princípio de funcionamento, sendo apenas diferente o tamanho dos poros e pressão operacional, os incidentes associados e as medidas preventivas necessária são iguais.

Para a cloragem, é necessário considerar a instalação de um alarme PLC, que alerte quando os limites definidos são ultrapassados.

A Tabela 6.19 indica os parâmetros críticos de monitorização de cada PCC e define os seus limites de alarme e limites críticos.

Tabela 6.19 - Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para produção de ApR classe A com cloretos

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Limite de alarme	Limite crítico
Ultrafiltração	Turvação do efluente	> 0,03 NTU	
	Pressão da membrana	Definido pelo fornecedor do equipamento	
Osmose Inversa	Condutividade do efluente	> 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$	
	Pressão da membrana	Definido pelo fornecedor do equipamento	
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	> 10 ufc/100 mL	
Cloragem	Cloro residual	<0,5 mg/L	<0,25 mg/L

A turvação do efluente filtrado pela ultrafiltração deve ser de 0,03 NTU (Metcalf & Eddy, 2003), portanto qualquer valor acima deste reflete um mau funcionamento das membranas.

Para a água filtrada por osmose inversa a sua condutividade deve ser de 0,05 $\mu\text{S}/\text{cm}$, portanto qualquer valor acima deste reflete um mau funcionamento das membranas.

Quando feito o teste da integridade das membranas apenas se consegue saber a pressão normal de funcionamento, de acordo com as características fornecidas pelo fornecedor.

A Tabela 6.20 e a Tabela 6.21 apresentam o procedimento de monitorização e as ações corretivas para a linha de tratamento.

Tabela 6.20 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe A com cloretos

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Procedimento de monitorização		
		Equipamento de monitorização	Quando?	Onde?
Ultrafiltração	Turvação do efluente	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da membrana
	Pressão da membrana	Equipamento de testagem de integridade de membranas	Mensal	Na membrana
Osmose Inversa	Condutividade do efluente	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da membrana
	Pressão da membrana	Equipamento de testagem de integridade de membranas	Mensal	Na membrana
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	Análise laboratorial	Diário	Amostra do tanque de armazenamento
Cloragem	Cloro residual	Medição com sonda	Contínuo	Jusante da câmara de contacto

Tabela 6.21 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe A com cloretos

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Tipo de limite	Ações corretivas
Ultrafiltração	Turvação do efluente	Alarme	1. Verificar sonda 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	1. Verificar sonda 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para substituição de membranas
	Pressão da membrana	Alarme	1. Verificar todas as outras membranas 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	1. Substituição de membranas danificadas
Osmose Inversa	Condutividade do efluente	Alarme	1. Verificar sonda 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	3. Caso o valor de condutividade continue acima do limite, <i>shut down</i> da linha de produção de ApR para substituição de membranas
	Pressão da membrana	Alarme	1. Verificar todas as outras membranas 2. Acionar lavagem das membranas
		Crítico	1. Substituição de membranas danificadas
Armazenamento	Concentração <i>E. coli</i>	Alarme	1. Adicionar desinfetante à saída do tanque ou avisar o cliente para o fazer quando a água chegar ao ponto de entrega 2. Interromper abastecimento de ApR caso o passo anterior não seja possível
Cloragem	Cloro residual	Alarme	1. Verificar sistema de cloragem 2. Verificar medição da sonda com teste de laboratório 3. Aumentar dose de imediato
		Crítico	1. Verificar sistema de cloragem 2. <i>Shut down</i> da linha de produção de ApR para arranjo ou substituição do sistema de cloragem
		Crítico	1. Verificar sistema de cloragem 2. <i>Shut down</i> do sistema de reutilização para arranjo ou substituição do sistema de cloragem

As monitorizações dos parâmetros críticos de cada membrana, exceto a sua integridade, deverão ser realizadas imediatamente a jusante destas, de modo a determinar se estão a funcionar corretamente. Ao contrário do teste de integridade, no qual é possível identificar a membrana específica que apresenta problemas e proceder à sua substituição sem parar o sistema de reutilização, apenas reduzindo o caudal de afluente tratado, quando estes parâmetros apresentam níveis acima do limite, é necessário proceder à paragem do tratamento de modo a identificar os problemas.

6.4. Caso 4 – Produção de ApR para suporte de ecossistemas

6.4.1. Descrição geral

O caso 4 consiste na produção de ApR destinada ao suporte de ecossistemas com utilização de um sistema de tratamento extensivo constituído por lagoas de estabilização, resultando num baixo consumo de energia. Como a eficiência do sistema de tratamento, neste caso o processo de desinfecção varia consoante a temperatura, é prevista a produção de ApR com duas qualidades do DL n.º 119/2019: classe C durante o período mais frio (de novembro a abril) e classe B durante o período mais quente (de maio a outubro).

A linha de tratamento definida para a produção desta água com duas classes diferentes é baseada em lagoas de maturação.

6.4.2. Avaliação do Risco

Para o caso 4, a Tabela 6.22 e a Tabela 6.23 Tabela 6.2 representam a análise do risco efetuada no que diz respeito à classificação de consequências e da probabilidade de ocorrência dos incidentes (qualidade), respetivamente, e a Tabela 6.24 corresponde à matriz do risco.

Tabela 6.22 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe C e B: classificação de consequências

Perigo	Cenário	Bareira de tratamento impactada	Nível da consequência
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Séria
Azoto e Fósforo			Séria
<i>E. coli</i>	- Existência de "dead-zones" ou choque hidráulico - Crescimento de algas que poderão bloquear a incidência de luz solar	Lagoa de maturação	Sério

Sendo as lagoas um tratamento extensivo, com um elevado tempo de retenção hidráulico e sem componentes mecânicos, os incidentes potenciais têm origem nas etapas anteriores. Por exemplo, caso o tratamento secundário não funcione corretamente e haja uma elevada carga de nutrientes a afluir à lagoa, isto pode levar a um crescimento excessivo de algas que, ao bloquearem a incidência da luz solar na água, reduz a eficiência de desinfecção. Outro tipo incidente pode estar associado à afluência de um caudal superior ao expectável, podendo haver choques hidráulicos. Na eventualidade de haver falhas na concepção da lagoa também podem existir *dead-zones* em determinadas partes desta. Por estes motivos, sendo a única etapa de desinfecção, o nível de consequência é sério.

Tabela 6.23 - Análise do risco inerente à produção de ApR classe C e B: classificação de probabilidade de incidentes

Perigo	Cenário	Barreira de tratamento impactada	Nível da probabilidade de incidentes
<i>E. coli</i>	- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Tratamento secundário	Rara
Azoto e Fósforo			Rara
<i>E. coli</i>	- Existência de "<i>dead-zones</i>" ou choque hidráulico - Crescimento de algas que poderão bloquear a incidência de luz solar	Lagoa de maturação	Rara

É muito pouco provável que ocorram os cenários apresentados na lagoa, descritos no parágrafo anterior, no entanto a sua probabilidade de ocorrência não pode ser descartada, sendo classificada como rara.

Tabela 6.24 - Apreciação do risco inerente à produção de ApR classe C e B

Cenário	Nível da Consequência	Nível da probabilidade de incidentes	Nível do risco
- Avaria no sistema de arejamento - <i>Bulking</i> nas lamas ativadas	Séria	Rara	Moderado
	Séria	Rara	Moderado
- Existência de "<i>dead-zones</i>" ou choque hidráulico - Crescimento de algas que irão bloquear luz solar	Marginal	Rara	Moderado

Dos 3 cenários apresentados todos apresentam risco moderado. Na secção seguinte apresenta-se o tratamento do risco para estes cenários.

6.4.3. Tratamento do Risco

Na Tabela 6.25 são identificados os eventos perigosos que poderão ocorrer e as suas medidas preventivas para o caso 4.

Tabela 6.25 - Identificação de perigos e medidas preventivas para a produção de ApR classe C e B

Perigos	Etapas	Eventos perigosos	Medidas preventivas
<i>E. coli</i>	Lagoas de maturação	- Problemas hidráulicos - Crescimento de algas por excesso de nutrientes	- <i>Design</i> do processo adequado para prevenir choque-hidráulico e "dead-zones" - Ter outro sistema de descarga, para o meio recetor não sensível mais próximo

Os eventos perigosos estão associados a problemas hidráulicos e possíveis crescimentos de algas que bloqueiem a luz solar, pois o bom funcionamento da desinfecção está diretamente relacionado com a transmitância da luz solar e do hidrodinamismo da lagoa.

Para o tratamento do risco, é recomendável ter, além de um projeto correto da lagoa, um ponto alternativo de descarga que permita desviar o caudal da lagoa para outro meio recetor localizado próximo da ETAR e com menor sensibilidade à contaminação microbiológica. Esta descarga apenas seria utilizada em caso de emergência.

O único parâmetro crítico neste caso é apenas a concentração de *E. coli* na descarga da lagoa, diretamente relacionado com a qualidade da ApR que se pretende alcançar, tal como é indicado na Tabela 6.26.

Tabela 6.26 - Pontos Críticos de Controlo e respetivos limites (alarme e crítico) para produção de ApR classe C e B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Limite de alarme	Limite crítico
Lagoas de maturação	Concentração de <i>E. coli</i>	Classe C < 1 000 ufc/100 mL em período frio Classe B < 100 ufc/100 mL em período seco	

A Tabela 6.27 e a Tabela 6.28 representam o procedimento de monitorização do parâmetro crítico e ações corretivas do caso 4, respetivamente.

Tabela 6.27 - Requisitos de monitorização dos Pontos Críticos de Controlo para a produção de ApR classe C e B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Procedimento de monitorização		
		Equipamento de monitorização	Quando?	Onde?
Lagoas de maturação	Concentração de <i>E. coli</i>	Análise laboratorial	Semanal	Amostra à saída da lagoa

Tabela 6.28 - Ações corretivas de cada Ponto Crítico de Controlo para a produção de ApR classe C e B

PCC	Parâmetro crítico de monitorização	Tipo de limite	Ações corretivas
Lagoas de maturação	Concentração de <i>E. coli</i>	Alarme	1. Análises de <i>E. coli</i> diárias para verificar se existe efetivamente um problema na desinfecção 2. Caso exista, verificar se o ecossistema tem condições de temporariamente receber a carga <i>E. coli</i> 3. Caso não consiga, descarregar temporariamente noutra meio recetor
		Crítico	

A monitorização da *E. coli* terá ser realizada semanalmente. Caso a sua concentração seja superior ao limite estabelecido para a altura do ano, deverão realizar-se nos dias seguintes análises diárias, a fim de perceber se efetivamente existe algum problema na lagoa ou se a análise inicial não era representativa do estado real da lagoa.

7. Conclusões

Esta dissertação pretende contribuir para a aplicação de uma metodologia de avaliação e tratamento do risco associado à produção de água para reutilização em ETAR urbanas. Para atingir o objetivo proposto procedeu-se a: a) definição de objetivos e revisão do estado da arte das tecnologias de desinfecção de águas residuais; b) análise da metodologia a aplicar; c) definição de casos teóricos representativos de diferentes situações de produção de ApR; d) aplicação da metodologia nesses casos.

O trabalho desenvolvido justifica-se pela necessidade de aplicar procedimentos claros na avaliação do risco na produção de água residual, tal como definido no Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto. A avaliação do risco foi realizada tendo em conta os objetivos estabelecidos para a produção de ApR em termos de qualidade e de quantidade (volume). As classes de qualidade da água consideradas são as definidas no DL n.º 119/2019, tendo os seguintes parâmetros de qualidade: CBO₅, SST, Turvação, *E. coli*, Ovos de parasitas intestinais, Azoto amoniacal, Azoto Total e Fósforo Total.

Estabeleceram-se 4 casos teóricos/hipotéticos como base à definição de esquemas de tratamento apropriados a cumprir os objetivos de qualidade de cada um e serem aplicadas as metodologias de gestão do risco na produção de ApR destinada a usos não potáveis. O objetivo do caso 1 é a produção de uma ApR de classe A para rega sem restrição de acesso. O caso 2, seguindo a abordagem do *fit-for-purpose* para a produção de duas classes de água diferentes, implica a produção de ApR classe A e classe B, na mesma ETAR. O caso 3 ilustra a aplicação do conceito de multi-barreiras para tratar águas residuais contaminadas por influências indevidas salinas na rede de drenagem, produzindo-se uma ApR de classe A. O caso 4 ilustra a produção de ApR para suporte de ecossistemas, apresentando classe B em período quente e classe C em período frio, recorrendo a tecnologias de baixo consumo energético.

Para cada caso foram definidos cenários para a análise do impacto dos perigos em cada etapa do tratamento, atribuindo-lhes níveis de consequência (marginal, sério e crítico) e níveis da probabilidade de ocorrência (raro, ocasional e frequente) em que a sua combinação resultou num nível do risco (baixo, moderado ou elevado). Esta avaliação do risco foi realizada utilizando um método qualitativo sendo, assim, uma aplicação simples de efetuar.

A avaliação do risco não disponibiliza, no entanto, instrumentos para se proceder ao tratamento do risco, de modo a reduzir o seu nível caso este se encontre num nível moderado ou elevado.

Para o tratamento do risco foi então aplicada a metodologia HACCP, começando por identificar perigos e estabelecer medidas preventivas, definindo-se, seguidamente, os PCC e respetivos parâmetros críticos de monitorização com os seus limites de alarme e limites críticos, os procedimentos de monitorização destes parâmetros e, por último, as ações corretivas que se devem efetuar quando os limites são atingidos. A metodologia HACCP serve assim para complementar a avaliação do risco, como ferramenta para a gestão do risco nas ETAR. Importa referir que a sua aplicação se revelou complicada, uma vez que se analisaram casos teóricos/hipotéticos, faltando informação específica relativa ao risco dos processos e equipamentos.

É expectável que, com o aumento de fenómenos de seca em Portugal últimos anos, a produção de ApR comece a ser realizada em cada vez mais ETAR urbanas. Para isso será necessário dispor de ferramentas eficazes que permitam realizar a gestão do risco destes projetos. Assim, recomenda-se a aplicação desta metodologia em casos reais, para sua validação.

Propõe-se também a realização estudos de risco de equipamento, de modo a obter informação que sustente, de um modo mais robusto, a avaliação do risco e a metodologia HACCP, que também estão associados ao desempenho operacional de uma ETAR.

8. Referências Bibliográficas

- Abdessemed, D., Nezzal, G., & ben Aim, R. (2000). Coagulation—adsorption—ultrafiltration for wastewater treatment and reuse. *Desalination*, 131(1), 307–314. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(00\)90029-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0011-9164(00)90029-8)
- Aljundi, I. H. (2011). Bromate formation during ozonation of drinking water: A response surface methodology study. *Desalination*, 277(1), 24–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.03.090>
- APA. (2015). *Plano Nacional da Água - Relatório nº2 Análise dos principais problemas, diagnóstico, objetivos e medidas*.
- APA, MAOTE, & AdP. (2015). *PENSAAR 2020*.
- Asano, T., Burton, F. L., Lerevenz, H., Tsuchihashi, R., & Tchobanoglous, G. (2007). *Water Reuse Issues, Technologies, and Applications*.
- Asano, T., & Cotruvo, J. A. (2004). Groundwater recharge with reclaimed municipal wastewater: Health and regulatory considerations. *Water Research*, 38(8), 1941–1951. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2004.01.023>
- Awuah, E., Anohene, F., Asante, K., Lubberding, H., & Gijzen, H. (2001). Environmental conditions and pathogen removal in macrophyte- and algal-based domestic wastewater treatment systems. *Water Science and Technology*, 44(6), 11–18. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0329>
- Ayers, R. S., & Westcott, D. W. (1985). *Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174)*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Ayoub, K., van Hullebusch, E., Cassir, M., & Bermond, A. (2010). Application of Advanced Oxidation processes for TNT removal: A review. *Journal of Hazardous Materials*, 178, 10–28. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.042>
- Bansal, R., & Goyal, M. (2005). Activated Carbon Adsorption. In *Activated Carbon Adsorption*. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>
- Bergendahl, J. A., & Stevens, L. (2005). Oxidation reduction potential as a measure of disinfection effectiveness for chlorination of wastewater. *Environmental Progress*, 24(2), 214–222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ep.10074>
- Cabelli, V. J. (1983). Microbial indicator systems for assessing water quality. *Antonie van Leeuwenhoek*, 48(6), 613–618. <https://doi.org/10.1007/BF00399546>

- Capodaglio, A. G. (2020). Fit-for-purpose urban wastewater reuse: Analysis of issues and available technologies for sustainable multiple barrier approaches. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1–48. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1763231>
- CE. (2011). *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Roteiro para uma Europa Eficiente na utilização de recursos. COM(2011) 571 final. 31.*
- Chahal, C., van den Akker, B., Young, F., Franco, C., Blackbeard, J., & Monis, P. (2016). Pathogen and Particle Associations in Wastewater: Significance and Implications for Treatment and Disinfection Processes. *Advances in Applied Microbiology*, 97, 63–119. <https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2016.08.001>
- CIS. (2016). *Common implementation strategy for the Water Framework Directive and the Floods Directive - Guidelines on Integrating Water Reuse into Water Planning and Management in the context of the WFD.*
- Collivignarelli, M. C., Abbà, A., Benigna, I., Sorlini, S., & Torretta, V. (2018). Overview of the Main Disinfection Processes for Wastewater and Drinking Water Treatment Plants. *Sustainability*, 10(1). <https://doi.org/10.3390/su10010086>
- Cuerda-Correa, E. M., Alexandre-Franco, M. F., & Fernández-González, C. (2020). Advanced oxidation processes for the removal of antibiotics from water. An overview. In *Water (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 1). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w12010102>
- Diaz, R., & Rosenberg, R. (2008). Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, 321, 926–929. <https://doi.org/10.1126/science.1156401>
- Duong, K., & Saphores, J. M. (2015). Obstacles to wastewater reuse: an overview. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(3), 199–214. <https://doi.org/10.1002/wat2.1074>
- EC. (2020). *European Commission, Directorate-General for Communication, Circular economy action plan: for a cleaner and more competitive Europe.* Publications Office. <https://doi.org/doi/10.2779/05068>
- EHD WA. (2011). *Guidelines for the Non-potable Uses of Recycled Water in Western Australia - Environmental Health Directorate, Water Unit.*
- ERSAR. (2010). *Guia Técnico 14 - Reutilização de Águas Residuais* (ERSAR, Ed.). ERSAR.

- FAO. (2011). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems of Risk*. London, Earthscan/Rome, FAO.
- Fisher, M. B., Iriarte, M., & Nelson, K. L. (2012). Solar water disinfection (SODIS) of *Escherichia coli*, *Enterococcus* spp., and MS2 coliphage: Effects of additives and alternative container materials. *Water Research*, 46(6), 1745–1754. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.048>
- Glaze, W., Kang, J.-W., & Chapin, D. (1987). The Chemistry of Water Treatment Processes Involving Ozone, Hydrogen Peroxide and Ultraviolet Radiation. *Ozone-Science & Engineering - OZONE-SCI ENG*, 9, 335–352. <https://doi.org/10.1080/01919518708552148>
- Glennie, E. B., Littlejohn, C., Gendebien, A., Hayes, A., Palfrey, R., Sivil, D., & Wright, K. (2002). *Phosphates and alternative detergent builders: final report*. Wiltshire: EU Environment Directorate.
- Gottschalk, C., Libra, J., & Saupe, A. (2010). *Ozonation of Water and Waste Water: A Practical Guide to Understanding Ozone and its Applications: Second Edition*. Wiley-VCH.
- Haag, W. R., & Yao, C. C. D. (1992). Rate constants for reaction of hydroxyl radicals with several drinking water contaminants. *Environmental Science & Technology*, 26, 1005–1013.
- Haida, U., Jefri, N., Khan, A., Lim, Y., Lee, K., Liew, K. bin, Kassab, Dr. Y., Choo, C.-Y., Al-Worafi, Y., Chiau, L., Kalusalingam, A., & Ming, L. C. (2022). A systematic review on chlorine dioxide as a disinfectant. *Journal of Medicine and Life*, 15, 313–318. <https://doi.org/10.25122/jml-2021-0180>
- IRAR. (2007). *Recomendação IRAR nº02/2007 - Utilização de Águas Residuais Tratadas*. Lisboa. 2007.
- ISO. (2009). *International Organization for Standardization. Guide 73:2009 Risk management — Vocabulary*.
- Khan, S. (2013). *Drinking Water Through Recycling: The Benefits and Costs of Supplying Direct to the Distribution System. Report of the Australian Academy of Technological Sciences and Engineering*.
- Kim, Y.-H., & Hensley, R. (1997). Effective control of chlorination and dechlorination at wastewater treatment plants using redox potential. *Water Environment Research*, 69.

- Kitis, M. (2004). Disinfection of wastewater with peracetic acid: a review. *Environment International*, 30(1), 47–55. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00147-8](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00147-8)
- Kong, J., Lu, Y., Ren, Y., Chen, Z., & Chen, M. (2021). The virus removal in UV irradiation, ozonation and chlorination. *Water Cycle*, 2, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2021.05.001>
- Lazarova, V., Asano, T., Bahri, A., & Anderson, J. (2013). *Milestones in water reuse : the best success stories*. <https://doi.org/10.2166>
- Leverenz, H. L., Tchobanoglous, G., & Asano, T. (2011). Direct potable reuse: A future imperative. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 1(1), 2–10. <https://doi.org/10.2166/wrd.2011.000>
- Liu, L., Hall, G., & Champagne, P. (2018). Disinfection processes and mechanisms in wastewater stabilization ponds: a review. *Environmental Reviews*, 26(4), 417–429. <https://doi.org/10.1139/er-2018-0006>
- Liu, W. (2006). Effects of UV intensity and water turbidity on microbial indicator inactivation. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 18(4).
- Marecos do Monte, H., Santos, M. T., Barreiros, A. M., & Albuquerque, A. (2016). *Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico - Curso Técnico 5* (ERSAR, Ed.).
- Maynard, H. E., Ouki, S. K., & Williams, S. C. (1999). Tertiary lagoons: a review of removal mechanisms and performance. *Water Research*, 33(1), 1–13. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(98\)00198-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(98)00198-5)
- Metcalf & Eddy. (2003). *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse. 4th Edition*, McGraw-Hill, New York.
- Monarca, S., Richardso, S. D., Feretti, D., Grottolo, M., Thruston, A. D., Zani, C., Navazio, G., Ragazzo, P., Zerbini, I., & Alberti, A. (2002). Mutagenicity and disinfection by-products in surface drinking water disinfected with peracetic acid. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(2), 309–318. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210212>
- Novotny, V., Ahern, J., & Brown, P. (2010). Chapter XI - Ecocities: Evaluation and Synthesis. In *Water Centric Sustainable Communities: Planning, Retrofitting, and Building the Next Urban Environment* (pp. 539–593). <https://doi.org/10.1002/9780470949962.ch11>

- NWRI. (2019). *Guidelines for Direct Potable Reuse in Colorado - National Water Research Institute*. www.nwri-usa.org
- OECD. (n.d.). *Water and agriculture*. Retrieved April 13, 2022, from <https://www.oecd.org/agriculture/topics/water-and-agriculture/>
- Okun, D. A. (2000). Water Reclamation and Unrestricted Nonpotable Reuse: A New Tool in Urban Water Management. *Annual Review of Public Health*, 21(1), 223–245. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.21.1.223>
- Oliveira, R. P. (2021). *Avaliação das disponibilidades hídricas atuais e futuras e aplicação do índice de escassez WEI+*.
- Pescod, M. B. (1992). *Wastewater treatment and use in agriculture - FAO irrigation and drainage paper 47*.
- Qasim, S. R., & Zhu, G. (2017). *Wastewater Treatment and Reuse: Theory and Design Examples, Volume 2: Post-Treatment, Reuse, and Disposal* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/b22366>
- Rebello, A., Quadrado, M., Franco, A., Lacasta, N., & Machado, P. (2020). Water reuse in Portugal: New legislation trends to support the definition of water quality standards based on risk characterization. *Water Cycle*, 1, 41–53. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watcyc.2020.05.006>
- Rengasamy, P., North, S., & Smith, A. (2010). *Diagnosis and management of sodicity and salinity in soil and water in the Murray Irrigation region*.
- Ribeiro, R. (2022). Avaliação e tratamento do risco na produção de ApR em ETAR urbanas: guia de orientação. In *Comunicação pessoal*.
- Ribeiro, R., & Teixeira, A. (2018, June). Importância da revisão da norma EN 12255 num cenário de evolução do tratamento de águas residuais. 18.º ENASB/18.º SILUBESA.
- Rizzo, L., Gernjak, W., Krzeminski, P., Malato, S., McArdell, C. S., Perez, J. A. S., Schaar, H., & Fatta-Kassinos, D. (2020). Best available technologies and treatment trains to address current challenges in urban wastewater reuse for irrigation of crops in EU countries. In *Science of the Total Environment* (Vol. 710). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136312>
- Salgot, M., & Folch, M. (2018). Wastewater treatment and water reuse. In *Current Opinion in Environmental Science and Health* (Vol. 2, pp. 64–74). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>

- Salgot, M., Oron, G., Cirelly, G., Dalezios, N., Diaz, A., & Angelakis, A. (2018). Criteria for Wastewater Treatment and Reuse under Water Scarcity. In *In Handbook of drought and water scarcity Vol. 2: Environmental impacts and analysis of drought and water scarcity*. <https://doi.org/10.1201/9781315226781-15>
- Saliu, T. D., & Oladoja, N. A. (2021). Nutrient recovery from wastewater and reuse in agriculture: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 19(3), 2299–2316. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01159-7>
- Stavi, I., Thevs, N., & Priori, S. (2021). Soil Salinity and Sodicity in Drylands: A Review of Causes, Effects, Monitoring, and Restoration Measures. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712831>
- SWRCB. (2002). *Electrical Conductivity/Salinity Fact Sheet*. In *The Clean Water Team Guidance Compendium for Watershed Monitoring and Assessment State Water Resources Control Board*. https://www.waterboards.ca.gov/water_issues/programs/swamp/docs/cwt/guidance/3130en.pdf
- UN. (2015). *United Nations - Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. <<https://sdgs.un.org/2030agenda>> Acesso em: 17 de maio 2022.
- UN. (2021). *The Sustainable Development Goals Report*.
- UNESCO. (2020). (United Nations World Water Assessment Programme). *United Nations World Water Development Report 2020: Water and Climate Change*, Paris, UNESCO.
- UNESCO. (2021). (United Nations World Water Assessment Programme). *United Nations World Water Development Report 2021: Valuing Water*, Paris, UNESCO. <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2017/>
- UNESCO. (2022). (United Nations World Water Assessment Programme). *United Nations World Water Development Report 2022: Groundwater: Making the invisible visible*, Paris, UNESCO. <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2018/>
- UNFPA. (2022). *United Nations Population Fund - World Population Dashboard*. <<https://www.unfpa.org/data/world-population-dashboard>> Acesso em 24 de abril 2022.
- US EPA. (2012). *Guidelines for Water Reuse, development*.
- US EPA. (2017). *Potable Reuse Compendium*.

Zazouli, M., & Kalankesh, L. (2017). Removal of precursors and disinfection by-products (DBPs) by membrane filtration from water; a review. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 15, 25. [https://doi.org/10.1186/s40201-017-0285-](https://doi.org/10.1186/s40201-017-0285-z)

z



(2022)

ANDRÉ GRAÇA

AVALIAÇÃO E TRATAMENTO DO RISCO NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PARA REUTILIZAÇÃO