



JÉSSICA ANDREIA
GONÇALVES DO
VALE FERREIRA

**SISTEMAS NATURAIS DE
TRATAMENTO DE ÁGUAS
RESIDUAIS**

Relatório de Dissertação do Mestrado em
Engenharia Biológica e Química

ORIENTADORA

Professora Doutora Susana Lucas

Dezembro 2021

JÉSSICA ANDREIA
GONÇALVES DO
VALE FERREIRA

**SISTEMAS NATURAIS DE
TRATAMENTO DE ÁGUAS
RESIDUAIS**

JÚRI

Presidente: Professora Doutora Natália Maria
Ferreira Rebelo de Melo Osório, ESTBarreiro/IPS

Orientadora: Professora Doutora Susana Maria Melo
Fernandes Afonso Lucas, ESTBarreiro/IPS

Vogal: Professora Doutora Rosa Maria de Oliveira
Quinta-Ferreira, Departamento de Engenharia
Química da Universidade de Coimbra

Dezembro 2021

Dedico esta dissertação à minha família

Only those who dare to fail greatly can ever achieve greatly

Robert F. Kennedy

AGRADECIMENTOS

A concretização da presente dissertação de mestrado não seria possível sem um conjunto de fatores e pessoas que merecem ser reconhecidas.

Agradeço ao **Escola Superior de Tecnologias do Barreiro do Instituto Politécnico de Setúbal**, incluindo todos os seus docentes e não docentes, pelo esforço e dedicação no desenvolvimento da minha atividade académica e científica, onde tive a oportunidade de me formar e atingir os meus objetivos a nível pessoal e profissional.

Agradeço de igual modo, ao centro de investigação **INCITE**, na presente instituição de ensino, por acolher este projeto e prestar-me todo o apoio necessário para a sua realização.

À minha orientadora, **Professora Doutora Susana Lucas**, por toda a paciência, encorajamento e disponibilidade, e por todo o esforço que reuniu para que eu finalizasse com sucesso esta dissertação. Agradeço sobretudo, pela humanidade e compreensão que demonstrou pelo facto de eu ter uma disponibilidade limitada.

Ao maior pilar da minha vida, a minha **família**, que se manteve sempre positiva, que nunca me deixou desistir e confiaram em mim em todas as minhas decisões.

Aos meus **colegas de trabalho**, por toda a paciência, por todo o respeito e, principalmente, por todas as facilidades que me deram para que eu concluísse a minha formação, sem nunca me questionarem nem colocarem objeções.

Agradeço também aos meus **amigos**, que estiveram ao meu lado durante todo este percurso e contribuíram para a minha estabilidade social e emocional em todos os momentos.

A todos os que aqui não foram mencionados, mas que cooperaram de forma direta e indireta para a realização deste projeto, o meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho propõe desenvolver uma primeira abordagem, fundamentada através de bibliografia científica existente, sobre os principais tratamentos de águas residuais através de métodos naturais como alternativa aos métodos convencionais praticados atualmente e com forte impacto negativo ao nível da sustentabilidade ambiental e social. Para além deste objetivo, pretendeu-se, também, selecionar e dimensionar um sistema natural de tratamento de efluentes urbanos adequado a um determinado caso prático. Após o estudo bibliográfico, verificou-se que Portugal continua a ter como problema o sua rede de saneamento, apesar de, atualmente, existir uma grande preocupação com as alterações climáticas. Este problema tem maior incidência em localidades rurais e no interior do país. Apesar do abastecimento de água e tratamento de águas residuais serem as duas áreas de maior investimento no país, os custos associados às ETAR's são elevados e, por isso, são normalmente projetados para redes de utilização intensiva. Como tal, as comunidades mais empobrecidas e com menor população não compensam o investimento da criação destas infraestruturas no local. É neste panorama que surgem os Sistemas de Tratamento de Águas Residuais Descentralizados, ou seja, com recurso a métodos naturais.

Depois de uma análise bibliográfica aprofundada, verificou-se que existem inúmeros sistemas naturais para o tratamento de águas urbanas com pequeno ou nenhum recurso a consumos energéticos, nomeadamente, as lagoas, os tratamentos no solo e as *wetlands*. A seleção do adequado tratamento para águas residuais a ser implementado é uma tarefa complexa, pois requer uma ampla experiência e estudos de viabilidade. Após analisar os locais do país com maior necessidade ao saneamento básico, selecionou-se a zona de Ferreira de Zêzere para estudar a possibilidade de implementação de um sistema de tratamento de águas residuais através de métodos naturais, por este ser um município com acessibilidade física a estes recursos inferior a 30%. Por ser uma zona rica em natureza e lençóis de água, apostou-se num sistema *wetland* construída, pois é um dos mais utilizados em Portugal, tendo, assim, mais estudos associados. Do ponto de vista prático, estes sistemas apresentam melhores oportunidades para águas mais poluídas e, por serem construídos, podem ser otimizados quanto à sua eficiência.

Visto esta dissertação ser baseada em bibliografia e não em dados reais para implementação do referido sistema, considerou-se apenas que este teria como foco a remoção de contaminantes com o objetivo de reutilizar a água em atividades que não requerem um controlo rigoroso de qualidade, como a agricultura.

PALAVRAS-CHAVE: Águas Residuais; Tratamentos Naturais; Macrófitas; *Wetlands* construídas; Ferreira de Zêzere.

ABSTRACT

This work proposes to develop a first approach, based on existing scientific literature, about the main wastewater treatments using natural methods, as an alternative to conventional methods currently used and with a strong negative impact on environmental and social sustainability. In addition to the objective, it is also intended to select and dimension a natural system for the treatment of urban effluents, suitable for a specific application case. After the bibliographical study, it was found that Portugal continues to have problems with its sanitation network, although there is currently a great concern with climate change. This problem mostly exists in rural locations and in the interior of the country.

Although water supply and wastewater treatment are two areas with greatest investment in the country, WWTP's associated costs are high and thus normally designed for intensive use networks. As such, the most impoverished communities with a smaller population don't compensate for the investment in creating these infrastructures in the place. In order to improve such case, Decentralized Wastewater Treatment Systems, using natural methods, were created.

After several studies, it was found that there are numerous natural systems for the treatment of urban water with little or no recourse to energy consumption, namely: ponds, soil treatments and wetlands. The selection of the appropriate wastewater treatment to be implemented is a complex task and requires an extensive experience along with feasibility studies.

After analyzing the places in the country with the greatest need for basic sanitation, the Ferreira de Zêzere area was selected to study the possibility of implementing a wastewater treatment system using natural methods. It is a municipality with physical accessibility to these resources of less than 30% and the area is rich in nature and water tables. Therefore, a constructed wetland system was selected, as it is one of the most used in Portugal. From a practical point of view, these systems present a better opportunity for more polluted waters and, because they are built, they can be optimized in terms of their efficiency.

This dissertation is based on bibliography and not on real data for the implementation of the system. Therefore, it was only considered the idea to focus on the removal of contaminants with the aim of reusing water in activities that don't require strict quality control, such as agriculture.

KEYWORDS: Waste Water; Natural Treatments; Macrophytes; Built Wetlands; Ferreira de Zezere.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	i
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO	1
2. OBJECTIVOS	5
3. ENQUADRAMENTO LEGAL	6
4. TRATAMENTOS CONVENCIONAIS	9
4.1 ÁGUAS RESIDUAIS	9
4.2 ETAR'S (ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS).....	19
4.3 TRATAMENTOS CONVENCIONAIS	24
4.3.1 TRATAMENTO PRELIMINAR	27
4.3.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO.....	29
4.3.3 TRATAMENTO SECUNDÁRIO	31
4.3.4 TRATAMENTO TERCIÁRIO.....	34
4.3.5 TRATAMENTO DE LAMAS	35
4.4 O CASO DE PORTUGAL	37
5. TRATAMENTOS NATURAIS.....	41
5.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO NO SOLO	45
5.2 LAGUNAGEM OU LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO.....	48
5.3 WETLANDS, FITO-ETAR's OU LEITO DE MACRÓFITAS	52
5.3.1 WETLANDS NATURAIS.....	53
5.3.2 WETLANDS CONSTRUÍDAS OU ARTIFICIAIS	54
6. CASO DE APLICAÇÃO	62

6.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ZONA REFERENCIADA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA NATURAL DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS.....	62
6.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NATURAL <i>WETLAND</i> EM FERREIRA DE ZÊZERE.....	67
6.2.1 MODELOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA <i>WETLAND</i>	69
7. CONCLUSÃO	71
8. TRABALHOS FUTUROS.....	72
9. BIBLIOGRAFIA.....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Evolução do período sanitário. Fonte: Lofrano & Brown, 2010. Adaptação para português.....	1
Figura 2 - Cloaca Maxima em Roma: a) Planta e b) Fotografia (Monte et al., 2016)	2
Figura 3 - ETAR de Praga (Monte et al., 2016)	3
Figura 4 - Representação do principal objetivo do presente estudo. Adaptado para português (Ullah et al., 2020)	5
Figura 5 - Sólidos totais presentes nas águas residuais e métodos utilizados para a sua determinação.(Soares, 2009)	14
Figura 6 - Imagem ilustrativa do trajeto das águas residuais até ao seu destino final. Ilustração disponibilizada por Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos.....	18
Figura 7 - Diagrama simplificado do funcionamento de uma ETAR. Adaptado (Barreto, 2016)	20
Figura 8 - Diagrama do tratamento de águas residuais de uma ETAR (Moreira, 2014)	21
Figura 9 - Representação simplificada das descargas de águas residuais industriais e urbanas praticadas atualmente. Adaptado para Português (M. Granger et al., 2019)	23
Figura 10 - ETAR Barreiro/Moita (Disponibilizado por Águas de Portugal).....	23
Figura 11 - ETAR de Vilamoura (Disponibilizado por Águas de Portugal)	24
Figura 12 - ETAR de Urra, Portalegre (Disponibilizado por Águas de Portugal).....	24
Figura 13 - Esquema geral do tratamento de águas residuais (Monte et al., 2016).....	25
Figura 14 – Principais operações unitárias envolvidas nos diferentes níveis de tratamento das águas residuais (Adaptado de Ullah et al., 2020)	26
Figura 15 - Sistema de Gradagem. Fonte: www.ecodepur.pt	27
Figura 16 - Tamisadores de malha filtrante. Fonte: https://klinger.pt/	28
Figura 17 - Representação genérica do conceito de floculação. Fonte: http://www.tecquimica.cefetmg.br/	30
Figura 18 - Esquema representativo do processo de crescimento suspenso por lamas ativadas (Jorge & Jesus, 2014).....	32
Figura 19 - Esquema representativo do processo com crescimento em biofilme ((Jorge & Jesus, 2014).....	33
Figura 20 - Decantador Secundário da ETAR de Alverca (S. I. S. Mendes, 2014)	34

Figura 21 - Reservatório de lamas na ETAR de Lagos. Fonte: www.aguasdoalgarve.pt	35
Figura 22 - Cobertura do grupo AdP em Portugal (R. C. Marques & Simões, 2020) ...	38
Figura 23 - Indicadores do estado atual de Saneamento de Águas Residuais em Portugal. Dados de 2019 (Disponível na página eletrónica do ERSAR).....	39
Figura 24 - Localização das zonas húmidas nos ecossistemas (A. Mendes, 2010)	42
Figura 25 - Wetland naturais ((B. Sousa, 2019)	43
Figura 26 - Constructed Wetland. Fonte: https://www.biomatrixwater.com/msr-constructed-wetlands/	44
Figura 27 - Representação esquemática da técnica de infiltração lenta no solo (Amaral, 2011)	46
Figura 28 - Representação esquemática da técnica de infiltração rápida no solo (Amaral, 2011).....	47
Figura 29 - Caminhos hidráulicos típicos para as águas residuais tratadas por infiltração rápida no solo (USEPA, 2000).....	47
Figura 30 - Representação esquemática da técnica de escoamento superficial no solo (Amaral, 2011).....	48
Figura 31 - Sistema de tratamento por Lagunagem (Machado, 2016)	49
Figura 32 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização anaeróbia (SILVA FILHO, 2007).....	50
Figura 33 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização facultativa (SILVA FILHO, 2007).....	51
Figura 34 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização aeróbia (Silva F., 2007)	52
Figura 35 - Representação gráfica de uma wetland artificial de fluxo superficial (Benassi et al., 2018).....	55
Figura 36 - Representação gráfica de uma wetland artificial de fluxo subsuperficial (Benassi et al., 2018).....	56
Figura 37 - Representação gráfica de uma wetland artificial de fluxo subsuperficial horizontal (Benassi et al., 2018).....	56
Figura 38 - Representação gráfica de uma wetland artificial de fluxo subsuperficial vertical (Benassi et al., 2018).....	57
Figura 39 - Representação gráfica da aplicação dos sistemas de wetland artificial de fluxo superficial vertical e horizontal em simultâneo (Benassi et al., 2018)	57
Figura 40 - Tipos de plantas aquáticas encontradas nas wetlands (A. Mendes, 2010).....	60

Figura 41 - Acessibilidade física do serviço de recolha e drenagem de águas residuais inferior a 70% (PENSAAR 2020)	63
Figura 42 - Indicação da localização do concelho Ferreira de Zêzere no distrito de Santarém. Fonte: https://www.jornaldeabrant.es.pt	65
Figura 43 - Hidrografia do concelho de Ferreira de Zêzere (Ferreira, 2019)	66
Figura 44 - Classes de ocupação do solo no concelho de Ferreira de Zêzere (Ferreira, 2019)	66
Figura 45 - Proposta de um sistema wetland para tratamento de águas residuais. Autoria Própria adaptado de Shinohara, 2021.	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes presentes nas águas residuais domésticas e respetivas consequências para a saúde pública e meio ambiente (Henze et al., 2008) (Adaptado para português)	11
Tabela 2 - Características físicas, químicas e biológicas das águas residuais e as suas origens (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010)	12
Tabela 3 - Concentração (mg/m^3) dos principais metais encontrados nas águas residuais municipais. Adaptado para português (Henze et al., 2008).....	15
Tabela 4 - Origens de sólidos e lamas numa ETAR convencional. Adaptado de Santos, Jorge Filipe Sequeira; Correia (2012)	36
Tabela 5 - Principais constituintes das águas residuais e os mecanismos de remoção ocorridos nas wetlands artificiais (Poças, 2015).....	58
Tabela 6 - Principais vantagens e desvantagens dos tipos de wetlands artificiais abordados (Adaptado de M. Santos, 2016).....	59
Tabela 7 - Municípios com taxas de acessibilidade física ao serviço inferiores a 30% (ZERO, 2016)	64

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Adp – Águas de Portugal

APA – Agência Portuguesa do Ambiente

BOD – Carência Bioquímica de Oxigénio

CE – Comunidade Europeia

CEE – Comunidade Económica Europeia

COD – Carência química de Oxigénio

DQA – Diretiva Quadro da Água

ERSAR – Autoridade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos

ETAR – Estação de Tratamento de Águas Residuais

EUA – Estados Unidos da América

IED – Diretiva de Emissões Industriais

INCITE – Centro de Inovação em Ciência e Tecnologia

IPCC – Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas

IPS – Instituto Politécnico de Setúbal

MTBE – Éter metil terc-butílico

NDMA – n-nitrosodimetilamina

PENSAAR – Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Esgoto

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SSF – Sólidos Suspensos Fixos

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

UWWTD – Diretiva dos Tratamentos de Águas Residuais

1. INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO HISTÓRICO

O objeto principal da presente dissertação irá ser o tratamento de águas residuais praticado atualmente no nosso país. Assim sendo, este capítulo será um enquadramento histórico sobre como surgiu o conceito de saneamento e sobre o motivo que levou a que este se tornasse um alvo de preocupação e de extrema importância.

Durante muitos anos as águas residuais não tratadas eram despejadas em corpos de água ou, alternativamente, eram aplicadas nos campos para manter a fertilidade dos solos (Salgot & Folch, 2018).

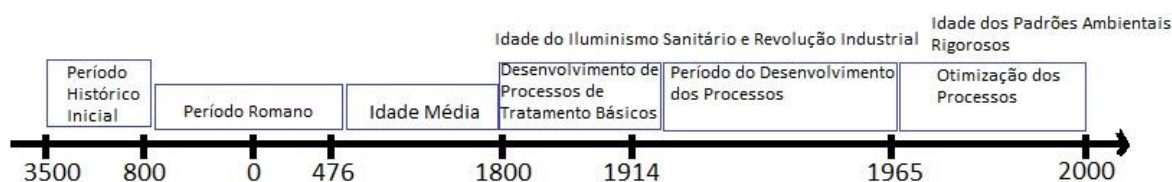


Figura 1 - Evolução do período sanitário. Fonte: Lofrano & Brown, 2010. Adaptação para português.

Ao traçar uma linha do tempo (Figura 1), a evolução das práticas de saneamento poderia ser dividida em cinco períodos históricos principais: História Antiga, Período Romano, Idade Média, Idade do Iluminismo Sanitário e Idade Industrial e a 'Idade dos Padrões Ambientais Rigorosos' (Lofrano & Brown, 2010). Até ao nascimento da primeira civilização avançada, a disposição de excrementos humanos era administrada através de buracos no solo, cobertos após o uso, conforme a Lei Mosaica de Saneamento explica. Por falta de qualquer tipo de registo da altura, é impossível avaliar a saúde das populações antigas. No entanto, pode-se concluir que, apesar das medidas impressionantes utilizadas para obter água potável pura, os centros urbanos tinham sérios problemas de saúde pública devido à falta de gestão nas águas residuais. O mesmo se pode referir sobre o Período Romano, que apesar de serem engenheiros brilhantes e terem sistemas com tecnologias modernas (Figura 2), não existem muitos registos acerca do impacto da gestão das águas residuais na saúde das civilizações romanas. Ao longo da idade média, a água era considerada não saudável, pois era consumida sem qualquer tipo de tratamento originando doenças na população (Lofrano & Brown, 2010).

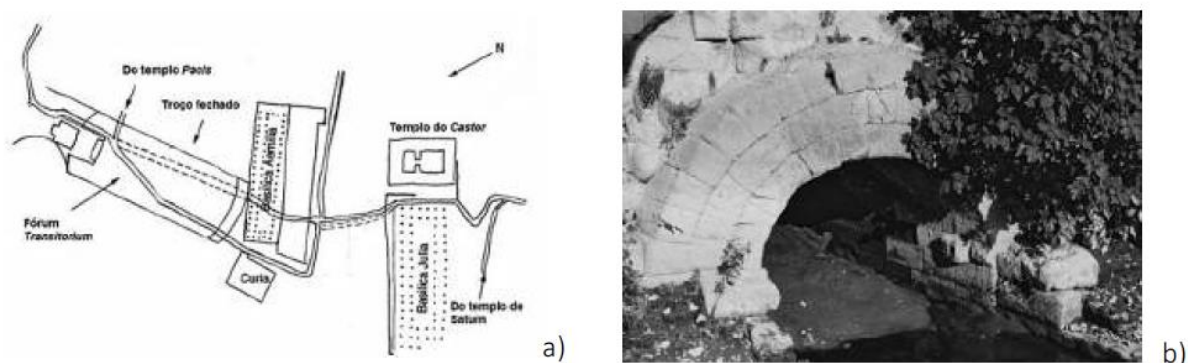


Figura 2 - Cloaca Maxima em Roma: a) Planta e b) Fotografia (Monte et al., 2016)

Verificou-se, que desde as épocas do Império Romano até ao Século 17, as estratégias de drenagem e saneamento em meio urbano não sofreram na Europa nenhum avanço. Em termos sanitários, pode-se mesmo falar em regressão ao longo de pelo menos uma parte da Idade Média, quando a higiene e limpeza eram completamente ignoradas (Matos et al., 2008). A conceção moderna de recolha e tratamento de água residual tem as suas origens nos primeiros estudos de microbiologia efetuados pelos cientistas Van Leeuwenhoek (1632-1723), Needham (1713-1781), Spallanzani (1729-1799), entre outros, que prepararam o caminho para as descobertas fundamentais de Louis Pasteur (1822-1895) (Sousa, 2016).

Os primeiros trabalhos relevantes de drenagem e de evacuação de águas residuais ocorrem, nas principais cidades europeias, entre os séculos 16 e 17. Embora a Revolução Industrial tenha iniciado no século 18, devido às restrições económicas, sociais e institucionais, foi só no século 19 que surgiram mudanças na forma como a água era gerida (Lofrano & Brown, 2010). Este avanço deveu-se ao rápido crescimento das cidades industrializadas, tornando insuportável a gestão dos resíduos praticada na altura. Assim sendo, surgiram as primeiras soluções mais direcionadas para os problemas de higiene do que para os problemas de saúde pública, pois na altura ainda se desconhecia que as águas residuais eram um veículo de microrganismos patogénicos (Monte et al., 2016). É de notar que as grandes epidemias de cólera e tifo foram consequência direta da aglomeração de pessoas em pequenos espaços durante o período da Revolução Industrial e da inexistência de tratamento das águas, facto que foi demonstrado pelo médico Dr. John Snow (1813-1858) (Sousa, 2016).

O início do século 19 foi marcado por uma significativa evolução no setor, uma verdadeira revolução tecnológica, com a introdução dos sistemas de abastecimento e de distribuição de água domiciliária, construídos com tubagens de ferro fundido. E foi em 1842,

na Alemanha, que se iniciou o primeiro plano nacional de drenagem de águas residuais, num sistema unitário. A partir daí, inúmeros países também começaram a projetar sistemas de drenagem (Matos et al., 2008).

Apesar destes avanços, o tratamento sistemático de águas residuais apenas remonta ao início do século 20, impulsionada pelo desenvolvimento da teoria do germe por Koch e Pasteur nos meados do século 19 e que marcou a nova era sanitária (Coelho, 2008). Este período foi denominado por 'Idade dos Padrões Ambientais Rigorosos', com uma revolução na gestão das águas residuais, nas ciências ambientais e na visão da sociedade em relação à poluição. Em 1912, a *Royal Commission on Sewage Disposal* introduziu o conceito CBO (Carência Bioquímica de Oxigénio), que corresponde à quantidade de oxigénio utilizada na oxidação bioquímica da matéria orgânica, estabelecendo padrões e testes a serem aplicados a esgotos e efluentes. Também, no início do século 20, o avanço na compreensão da contaminação ambiental ocorreu com a introdução da cromatografia gasosa e da espectrofotometria de absorção atómica, que permitiu uma caracterização precisa dos poluentes existentes nas águas residuais (Lofrano & Brown, 2010).

Finalmente, os cientistas concluíram que havia uma relação real entre a gestão das águas residuais, a saúde pública e a saúde ambiental. Assim sendo, determinaram como objetivos principais para o tratamento de águas residuais o facto de haver a necessidade de atingir o saneamento do maior número possível de comunidades e a, possível, reutilização dessas águas, encontrando o destino adequado para as mesmas (Salgot & Folch, 2018).

Nos últimos 40 anos, o número de estações de tratamento ao serviço das comunidades quase que triplicou. Um exemplo das primeiras ETAR's europeias construídas é a ETAR de Praga (Figura 3), localizada na margem esquerda do rio Vltava, construída entre 1901 e 1906 e que funcionou até 1967, tendo sido declarada como museu cultural em 2010 (Monte et al., 2016). A implementação de normas por decreto-lei conduziu a alterações substanciais no controlo da poluição nas águas residuais de forma a salvaguardar a saúde pública e produzir um efluente tratado com características compatíveis para a sua utilização para fins industriais, na rega e para uso recreativo (Coelho, 2008).



Figura 3 - ETAR de Praga (Monte et al., 2016)

Os países que foram as maiores referências na evolução do tratamento de águas residuais foram o Reino Unido e a Alemanha, uma vez que foram dos primeiros a ser industrializados. Os sistemas ingleses, também muito utilizados nos EUA, eram sistemas extensivos, ou seja, exigiam a utilização de grandes áreas. Já os sistemas de tratamento da Alemanha eram concentrados, uma vez que os processos de tratamento utilizados funcionavam de forma compacta. As tecnologias mais utilizadas na altura eram a lagunagem, sistemas *Imhoff* e filtros biológicos (Sousa, 2016).

Os sistemas de lagunagem surgiram por volta da década de 1880. Este método refere-se ao tratamento de águas residuais utilizando processos biológicos e naturais, como lagoas ou pântanos, sendo considerados sistemas de alta performance e de custo reduzido (B. Sousa, 2019). Os sistemas de *Imhoff*, introduzidos em 1905, consistem na sedimentação de sólidos, por fluxo horizontal, numa câmara de armazenamento de lodo (biomassa), reduzindo cerca de 40% de matéria orgânica (Felipe & Nascimento, 1989). Os filtros biológicos surgiram mais tarde com a necessidade de se obter uma maior purificação da água residual e recorrer, simultaneamente, a métodos de tratamento que ocupassem áreas menores. Estes filtros referem-se a solos arenosos que retêm uma grande parte dos poluentes presentes nas águas (Sousa, 2016).

Com o passar do tempo e mediante as necessidades e obstáculos encontrados, foram sendo investigadas novas tecnologias de tratamento e otimizadas as já existentes, nomeadamente, a criação de filtros artificiais, processos por lamas ativadas e, um dos maiores progressos dos últimos anos, a utilização de membranas (para osmose inversa, microfiltração e ultrafiltração).

Dentro deste contexto, a presente dissertação irá recair sobre o estudo de tratamentos de águas residuais alternativos, como forte incidência nos sistemas com recurso a métodos naturais, por serem ambiental, social e economicamente sustentáveis.

2. OBJECTIVOS

Os tratamentos convencionais podem já não ser totalmente capazes de resolver os problemas de poluição ambiental e de saúde pública, mas continuam a ser os mais implementados e eficientes. Para além disso, podem funcionar em conjunto com novas técnicas de tratamento para obter eficiências maiores, quer em termos de remoção de poluentes quer em termos económicos. No entanto, não resolvem problemas de impacto ambiental e não são extensíveis a toda a população nacional, pois são mais vantajosos em localidades abrangidas por maior número populacional (Cabrita, 2013). Assim sendo, a presente tese tem como finalidade apresentar uma revisão bibliográfica de alternativas aos tratamentos convencionais descritos anteriormente, como solução aos tratamentos comuns de águas residuais. Neste caso serão estudados tratamentos por processos naturais com plantas e físicos.

Pretende-se, também, comparar as diversas técnicas possíveis, verificar em que condições se justifica a sua utilização, em que locais devem ser implementadas e se devem ser aplicadas isoladamente ou em conjunto. De ressaltar, que o foco do estudo da implementação destas técnicas será em zonas de Portugal Continental, em que esta necessidade existe. A Figura 4 dá-nos uma noção mais intuitiva de qual o objetivo central da presente dissertação.

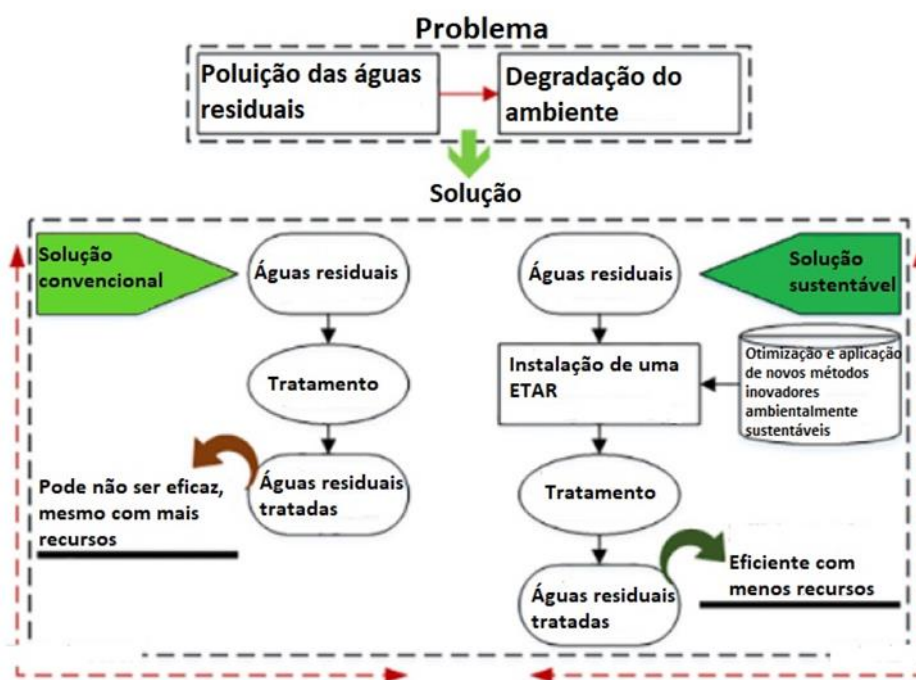


Figura 4 - Representação do principal objetivo do presente estudo. Adaptado para português (Ullah et al., 2020)

3. ENQUADRAMENTO LEGAL

Neste capítulo será exposto o enquadramento legal em vigor, onde poderá ser comprovado como as condições de acesso a um saneamento básico estão previstas na Lei e são um direito de toda a população. Para além da preocupação social, estes regulamentos criados também mostram uma forte preocupação ambiental, criando objetivos e prioridades a cumprir na gestão das águas urbanas de forma a atenuar os impactos ambientais.

O tratamento de águas residuais tem como objetivo principal a remoção da sua carga poluente, manifestada pelas suas características físicas, químicas e biológicas, de forma a produzir um efluente final de qualidade conforme as normas de descarga impostas pela legislação vigente e pelos objetivos de qualidade definidos para o meio recetor (Mavioso, 2010).

A nível europeu, as águas residuais seguem diretrizes específicas, com base no tipo de efluente, que visam garantir que todos os ecossistemas terrestres, aquáticos e zonas húmidas cumprem o 'bom estado ecológico e químico', sendo estas as (Granger et al., 2019):

→Diretivas do Quadro da Água (DQA, 2000/60/CE);

→Diretivas de Tratamentos de Águas Residuais Urbanas (UWWTD, 91/271/EEC);

→Diretivas de Águas Subterrâneas (2006/118/EC);

→Diretivas de Padrões de Qualidade Ambiental (2008/105/EC) e

→Diretivas de Emissões Industriais (IED, 2010/75/EU), para o controlo das emissões diretas e indiretas das indústrias.

Todos estes instrumentos combinados constituem o principal mecanismo de proteção em relação às águas residuais e cada um regula um elemento específico das várias origens deste efluente. Todos os Estados-Membros são obrigados a desenvolver e cumprir um conjunto de medidas eficazes em termos de custos e de forma a proteger o ambiente e as populações (Granger et al., 2019). Segundo a Agência Portuguesa do Ambiente, a diretiva mais relevante é a **Diretiva 91/271/CEE**, de 21 de maio de 1991, que tem como objetivo primordial "proteger o ambiente dos efeitos nefastos das descargas de águas residuais urbanas". Esta diretiva foi transportada para a legislação portuguesa, dando origem aos Decreto-Lei nº152/97 e Decreto-Lei nº348/98:

Consultando o Diário da República:

Decreto-Lei nº152/97, 19 de junho – Decreto que define as normas de qualidade a que as águas superficiais devem obedecer, em função dos respetivos usos. Cada município, no âmbito do quadro legal em vigor, deverá procurar a solução mais adequada, numa dupla perspetiva de eficácia da aplicação de recursos e de proteção do ambiente.

Decreto-Lei nº 348/98, 9 de novembro – Decreto que indica os requisitos a que devem obedecer as descargas provenientes de estações de tratamento de águas residuais efetuadas em zonas sensíveis sujeitas a eutrofização.

Importa também referir a Diretiva do Quadro da Água (**Diretiva 2000/60/EC**), de 23 de outubro de 2000, que é transportada para o direito nacional pela **Lei nº 58/2005**, que constitui um instrumento de política comunitária integrada no domínio das águas (rios, lagos, águas costeiras e águas subterrâneas) com o intuito de alcançar o seu bom estado físico-químico e ecológico. A Diretiva-Quadro da Água visa evitar a poluição na origem, fixando mecanismos de controlo para garantir uma gestão sustentável de todas as fontes de poluição, e impondo objetivos ecológicos para os ecossistemas aquáticos (Amaral, 2011).

É da responsabilidade de Portugal cumprir as seguintes obrigações (APA, 2021):

→Garantir que todas as aglomerações com uma carga gerada superior a 2 000 habitantes. disponham de sistemas de coletores de águas residuais e que estas sejam sujeitas a um tratamento secundário antes da descarga no meio recetor;

→Identificar zonas sensíveis, sendo que todas as aglomerações com uma carga igual ou superior a 10 000 habitantes. que descarreguem em zonas sensíveis devem ser sujeitas a um tratamento mais rigoroso do que o secundário;

→Proceder ao controlo das descargas das ETAR's urbanas para verificação do cumprimento dos requisitos exigidos pelas Diretivas e

→Publicar e divulgar, de 2 em 2 anos, um relatório e um programa de implementação de diretivas das águas residuais urbanas.

Relativamente à exploração e construção de uma Estação de Tratamento de Águas Residuais, sejam as usualmente utilizadas ou as com novas tecnologias associadas, devem cumprir obrigatoriamente um conjunto de legislação de âmbito ambiental, nomeadamente, os licenciamento apropriados. Dependendo da localização aprovada, a instalação do sistema público de saneamento de águas residuais urbanas pode ainda impor a constituição de servidões ou a execução de expropriações, caso a localização implique a ocupação de terrenos privados ou a ocupação de áreas protegidas. Visto o seu funcionamento envolver a

utilização do domínio hídrico, através da rejeição de águas residuais, necessita de um título que certifique essa utilização. A descarga de águas residuais no meio recetor cumpre determinados critérios de qualidade, de forma a acautelar as condições ambientais e defender a saúde pública. Assim sendo, o grau de tratamento a que as águas residuais são sujeitas é definido pelas condições do meio recetor e pelos usos previstos para as águas tratadas, estas condições encontram-se regulamentadas através do **Decreto-Lei nº152/97**, de 19 de junho, e do **Decreto-Lei nº 236/98**, de 1 de agosto. Este último determina normas, critérios e objetivos de qualidade das águas, de acordo com os seus usos, sobretudo, águas para consumo humano, agricultura e águas balneares. Caso seja para utilização em zonas florestais ou jardins públicos, são aplicáveis outras normas de qualidade (Barreto, 2016)

Com objetivo de cumprir todos os requisitos legais e, simultaneamente, oferecer um sistema de saneamento de qualidade a toda a população foram criados vários métodos de tratamento de águas residuais, como será explicado nos capítulos seguintes.

4. TRATAMENTOS CONVENCIONAIS

Neste trabalho serão estudados sistemas naturais de tratamento de águas residuais como alternativa aos praticados atualmente e será este o tema fundamental a ter em atenção. No entanto, considerou-se importante que o leitor tivesse conhecimento dos tratamentos praticados atualmente e o porquê de substituí-los. Assim sendo, neste capítulo será explicado o conceito de águas residuais, a sua composição e características e os métodos convencionais de tratamento, mostrando o impacto negativo que estes possuem.

4.1 ÁGUAS RESIDUAIS

Antes de 1940 a maioria das águas residuais municipais eram geradas de fontes domésticas. Com o desenvolvimento industrial, houve um aumento significativo de águas residuais industriais despejadas nos sistemas de coleta municipais sem serem alvo de tratamentos. Estas águas continham uma concentração elevada de metais pesados e compostos orgânicos sintetizados nas atividades industriais, que eram difíceis e caros de tratar (Tchobanoglous et al., 1990).

As águas residuais podem ser definidas como uma mistura de água utilizada em atividades domésticas e industriais com sólidos gerados por essas mesmas atividades. A sua eliminação das residências, instituições e estabelecimentos comerciais e industriais ocorre sob a forma de efluentes (Soares, 2009). A produção de lixo pelas atividades humanas é inevitável e uma parte significativa desse lixo vai acabar nas águas residuais. A quantidade e a qualidade destas são determinadas por vários fatores. A quantidade e o tipo de lixo doméstico produzido é influenciado pelo comportamento e estilo de vida dos habitantes (Henze et al., 2008).

Tendo em conta a sua origem, existem dois tipos de águas residuais: as *domésticas* e as *industriais*. As primeiras, geralmente, resultam das atividades habitacionais podendo ser águas fecais e saponáceas. Nestas estão incluídas as águas turísticas, com características sazonais, em que a carga poluente varia conforme de onde provêm, e as águas pluviais, provenientes da precipitação atmosférica com predominância de sólidos suspensos. O segundo tipo de águas residuais são as industriais, com características específicas em função do tipo e processo de produção. Deve-se ainda considerar as resultantes da mistura destes dois tipos, que se denominam por *águas residuais urbanas*. (Cruz, 1997).

As águas residuais contêm constituintes químicos e microbiológicos que não são totalmente removidos ou inativados nas estações de tratamento. O residual de alguns desses constituintes presente nos efluentes tratados pode constituir a causa de alguns riscos para a saúde pública e para o ambiente. O controlo desses riscos baseia-se necessariamente no conhecimento da sua proveniência e dos impactos sobre a saúde humana e no ambiente em geral. Estas águas podem conter substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas e suspensas em água (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010), que podem ser:

- Provenientes da água superficial ou subterrânea, que constitui a origem de água bruta para produção de água para consumo humano;
- Adicionadas e produzidas em reações químicas e bioquímicas no decurso do processo de tratamento de água bruta para produção de água potável;
- Adicionadas no decurso da utilização da água de abastecimento público por múltiplas atividades: uso doméstico, comercial, industrial e outras;
- Provocadas pelas águas pluviais em sistemas de drenagem unitários;
- Introduzidas com a água de infiltração nos coletores;
- Produzidas por reações químicas e bioquímicas durante o transporte nos sistemas de drenagem e
- Adicionadas durante o transporte nos sistemas de drenagem para controlo de cheiro e de corrosão.

As águas residuais urbanas consistem, assim, numa complexa mistura de substâncias, povoadas por numerosos microrganismos de diversos tipos, muitos dos quais são de origem fecal, sendo alguns patogénicos, e por inúmeros compostos químicos (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010).

Os principais poluentes presentes nas águas residuais são (Sousa, 2016):

- Matéria Orgânica;
- Nutrientes inorgânicos (por exemplo, azoto e fósforo);
- Sais dissolvidos;
- Sólidos suspensos e sedimentáveis;
- Hidrocarbonetos;
- Microrganismos e
- Substâncias tóxicas: metais pesados, ácidos e bases inorgânicos, detergentes, pesticidas, compostos fenólicos, cianetos, entre outros.

Estes componentes encontram-se organizados por tipo de constituintes na Tabela 1. Tendo cada um deles uma contribuição relevante no tipo de água residual.

A origem das águas residuais condiciona fortemente as características físicas, químicas e biológicas do efluente. Por conseguinte, o conhecimento dessas mesmas características é imprescindível para o correto dimensionamento e operacionalidade dos sistemas de tratamento das águas residuais, bem como a avaliação da sua admissibilidade para rejeição do efluente no meio recetor e/ou na sua possível reutilização (Soares, 2009). Estas características encontram-se sintetizadas na Tabela 2.

Tabela 1 - Constituintes presentes nas águas residuais domésticas e respetivas consequências para a saúde pública e meio ambiente (Henze et al., 2008) (Adaptado para português)

Constituintes	Tipos	Consequências
Microrganismos	Bactérias patogénicas, vírus e vermes	Risco ao tomar banho ou ao consumir marisco
Materiais orgânicos biodegradáveis	Redução do oxigénio de rios e lagos	Peixe morto
Outros materiais orgânicos	Detergentes, pesticidas, gorduras, óleos, solventes, fenóis, etc.	Efeitos tóxicos, inconvenientes estéticos, bioacumulação na cadeia alimentar
Nutrientes	Azoto, fósforo e amónio	Eutrofização, redução de oxigénio e efeitos tóxicos
Metais	Chumbo, cádmio, crómio, cobre, mercúrio, etc.	Efeitos tóxicos e bioacumulação
Outros materiais inorgânicos	Ácidos e Bases	Corrosão e efeitos tóxicos
Efeito termal	Água quente	Alterações na flora e fauna
Odores	Sulfureto de hidrogénio	Efeitos tóxicos
Radioatividade		Efeitos tóxicos

Tabela 2 - Características físicas, químicas e biológicas das águas residuais e as suas origens (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010)

Características	Origens
Físicas	
Cor	Resíduos domésticos e industriais, decomposição da matéria orgânica.
Cheiro	Decomposição das substâncias dissolvidas e em suspensão.
Temperatura	Águas residuais domésticas e industriais.
Sólidos	Águas de abastecimento, águas residuais domésticas e industriais, erosão do solo, infiltração nos coletores.
Químicas Orgânicas	
Carboidratos	Águas residuais domésticas e industriais.
Proteínas	Águas residuais domésticas e industriais.
Óleos e gorduras	Águas residuais domésticas e industriais.
Detergentes	Águas residuais domésticas e industriais.
Pesticidas	Resíduos agrícolas.
Fenóis	Águas residuais industriais.
Compostos voláteis	Águas residuais domésticas e industriais.
Poluentes prioritários	Águas residuais domésticas e industriais.
Químicas Inorgânicas	
Alcalinidade	Águas residuais domésticas, água potável e água subterrânea infiltrada.
Cloretos	Águas residuais domésticas, água potável e água subterrânea infiltrada.
Metais pesados	Águas residuais industriais.
Azoto	Águas residuais domésticas e agropecuárias.
Fósforo	Águas residuais domésticas, industriais e de origem natural.

pH	Águas residuais domésticas e industriais.
Enxofre	Água de abastecimento, residuais e domésticas.
Poluentes prioritários	Águas residuais domésticas e industriais.
Gases	
Ácido sulfídrico	Decomposição de águas residuais domésticas.
Metano	Decomposição de águas residuais domésticas.
Oxigénio	Água do abastecimento público e da infiltração de águas superficiais.
Biológicas	
Animais	Cursos de água e ETAR.
Plantas	Cursos de água e ETAR
Bactérias	Água de abastecimento público, infiltração de águas superficiais e ETAR.
Vírus	Águas residuais domésticas.

Dentro das características físicas, a temperatura é um dos parâmetros mais influentes no processo de tratamento das águas residuais, uma vez que condiciona ou regula muitos dos outros parâmetros. Em geral, temperaturas mais elevadas, em relação à temperatura ambiente, tendem a facilitar os processos de sedimentação, remoção de óleos e gorduras e a digestão das lamas. No entanto, se o valor da temperatura for extremamente acentuado, poderá ocorrer uma diminuição do oxigénio dissolvido, dificultando os processos biológicos aeróbios causados pela morte dos microrganismos decompositores (Soares, 2009).

Um critério bastante utilizado para quantificar a carga poluente de uma água residual é o teor de sólidos totais (ST), que comportam essencialmente dois tipos de sólidos: os sólidos dissolvidos totais (SDT), que devido à sua reduzida dimensão ($< 0,45 \mu\text{m}$) permanecem na água mesmo após filtração, e os sólidos suspensos totais (SST), que representam a matéria sólida retida por filtração. Vários fatores podem influenciar a percentagem relativa da carga poluente entre os SDT e SST, nomeadamente o pH, que pode alterar a capacidade de sorção das partículas e/ou promover a sua precipitação/dissolução, e que influencia o modo de funcionamento dos tratamentos físico-químicos e biológicos. O intervalo de pH ideal é entre os valores de 6 a 9, de modo a possibilitar o desenvolvimento e manutenção da comunidade microbiológica envolvida no processo de tratamento. A matéria sólida presente numa

água residual pode ainda ser classificada quanto à natureza química dos seus compostos, ou seja, orgânica ou inorgânica, cuja proporção depende se a fonte é doméstica ou industrial. Os sólidos de natureza orgânica são designados sólidos suspensos voláteis (SSV), enquanto os de natureza inorgânica/mineral são designados por sólidos suspensos fixos (SSF), como representado na Figura 5 (Soares, 2009).

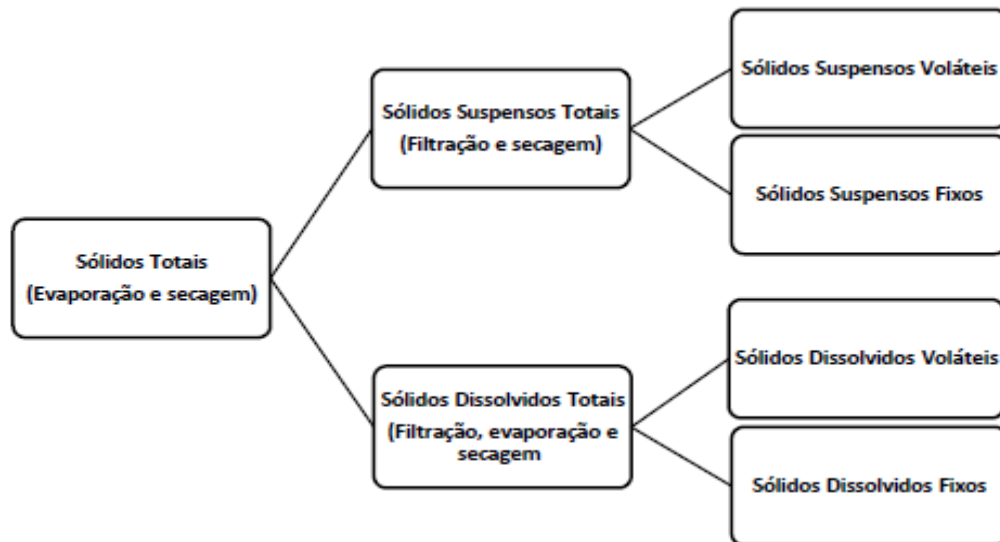


Figura 5 - Sólidos totais presentes nas águas residuais e métodos utilizados para a sua determinação. (Soares, 2009)

Para além das características químicas mencionadas na Tabela 2, existem outras de elevada importância, como a condutividade elétrica, o potencial redox, a quantidade de oxigénio dissolvido e a carência química e bioquímica do oxigénio, esta última explicada mais à frente.

→ Substâncias químicas veiculadas pelas águas residuais

As características das águas residuais urbanas são extremamente variáveis, dependendo do tipo de rede de drenagem – unitária e/ou separativa – das características socioeconómicas da população e do seu estado de saúde, variando entre localidades, devido à própria natureza da água de onde esta é originária. Considera-se que, anualmente, surgem cerca de 10 mil novos compostos químicos, podendo estes atingir as águas residuais (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010). Assim sendo, a análise química exaustiva da composição das águas residuais torna-se difícil, tendo sido necessário desenvolver parâmetros que quantificassem a concentração de um conjunto de compostos com determinadas características em comum, como por exemplo, os parâmetros BOD e COD.

BOD e COD (*Biological and Chemical Oxygen Demand*)

A matéria orgânica é o principal poluente das águas residuais. Assim sendo, essa matéria é medida através dos parâmetros *BOD* e *COD*. Estes referem-se à medida da carência de oxigénio tanto químico (quantidade de oxigénio que pode ser consumido por reações químicas, sendo assim possível medir a quantidade de material orgânico presente numa amostra) como bioquímico (quantidade de oxigénio dissolvido necessário para que os microrganismos aeróbios presentes digiram a matéria orgânica presente numa amostra de água residual) (Henze et al., 2008).

A carga poluente diária ou anual das águas residuais pode formar uma boa base para uma avaliação da composição das águas residuais. A composição das águas residuais municipais varia significativamente de um local para outro e, num determinado local, varia ao longo do tempo. A maioria dos componentes não são alvo direto de tratamento, tais como os metais, mas contribuem para a toxicidade das águas, seja em relação aos processos biológicos (lamas) nas estações de tratamento ou em relação às águas recetoras (sistemas de abastecimento de água potável). Os valores típicos para a concentração dos principais metais encontrados nas águas residuais municipais são referidos na Tabela 3 (Henze et al., 2008).

Tabela 3 - Concentração (mg/m³) dos principais metais encontrados nas águas residuais municipais. Adaptado para português (Henze et al., 2008).

Metal	Concentração Elevada	Concentração Média	Concentração Baixa
Alumínio	1000	600	350
Cádmio	4	2	1
Crómio	40	25	10
Cobre	100	70	30
Chumbo	80	60	25
Mercúrio	3	2	1
Níquel	40	25	10
Prata	10	7	3
Zinco	300	200	100

A principal preocupação da comunidade científica concentra-se nos poluentes designados como ‘substâncias tóxicas’ onde se incluem, por exemplo, os produtos químicos n-nitrosodimetilamina (NDMA), utilizado nos foguetes, éter metil terc-butilico (MTBE), aditivo de gasolina altamente solúvel, substâncias medicamente ativas, como desreguladores endócrinos e pesticidas, produtos químicos industriais e compostos fenólicos encontrados em surfactantes não iónicos. Estas substâncias causam graves danos ambientais, principalmente na fauna, e na saúde pública. Para além disso, devido à decomposição da matéria orgânica por acumulação de águas residuais não tratadas, formam-se fossas sépticas com a produção de gases tóxicos e, conseqüentemente, desenvolvimento de microrganismos provocadores de doenças (Tchobanoglous et al., 1990).

→ Microrganismos veiculados pelas águas residuais

As águas contêm grandes quantidades de microrganismos – bactérias, algas, protozoários, fundos, vírus e até crustáceos – a grande maioria dos quais é inofensiva para o Homem. Porém, alguns microrganismos são patogénicos e a sua presença na água faz desta um veículo privilegiado, sendo a causa de elevadas taxas de mortalidade nos países subdesenvolvidos, principalmente na população infantil. Estes tipos de microrganismos presentes na águas residuais domésticas e industriais provêm das excreções (fezes e urina) do Homem como de animais, provenientes de matadouros e indústrias agropecuárias. A quantidade e tipo de microrganismos presentes varia de um determinado local para outro dependendo de vários fatores, entre eles, fatores condicionantes da sobrevivência dos microrganismos nas águas residuais (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010). Os principais microrganismos considerados patogénicos para o Homem e para o ambiente encontram-se sintetizados na Tabela 4. A Tabela 5 refere-se à sua concentração típica (nº de microrganismo/100mL).

Tabela 4 - Principais microrganismos patogénicos encontrados nas águas residuais e respetivas doenças associadas (Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, 2010)

Grupo	Microrganismos	Doenças e Sintomas
Bactérias	<i>Campylobacter jejuni</i>	Gastroenterite.
	<i>E.coli</i>	Enterite, diarreia.
	<i>Salomonella</i> (várias espécies)	Febre, salmoneloses.
	<i>Shigella spp.</i> <i>Vibrio. cholerae</i>	Disenteria bacilar. Cólera.
	<i>Yersinia enterocolitica</i>	Gastroenterite e septicemia.
Protozoários	<i>Balantidium coli</i>	Diarreia, disenteria e úlcera do cólon.
	<i>Entamoeba histolytica</i>	Úlcera do colon, disenteria amibiana e abscesso do fígado.
	<i>Giardia lamblia</i>	Diarreia e má absorção.
Virús	Enterovírus	
	Poliovírus	Paralisia, meningite asséptica.
	Coxsackievírus	Paralisia, meningite asséptica, febres, doenças respiratórias e cardíacas.
	Ecovírus	Infeções respiratórias, meningites, diarreia, prurido e febres.
	Reovírus	Doenças respiratórias, gastroenterites.
	Adenovírus	Conjuntivites, diarreias e doenças respiratórias.
	Rotavírus	Gastroenterite infantil.
	Vírus da Hepatite A e E	Hepatite A
	Calivírus	Gastroenterites e diarreias.

Tabela 5 – Concentração típica de alguns microrganismos (nºmicrorganismo/100 mL) presente nas águas residuais (Henze et al., 2008) (Adaptado para português)

Microrganismo	Concentração elevada	Concentração Baixa
<i>E. coli</i>	5×10^8	10^6
<i>Coliforms</i>	10^{13}	10^{11}
<i>Cl. Perfringens</i>	5×10^4	10^3
<i>Fecal streptococcae</i>	10^8	10^6
<i>Salmonella</i>	300	50
<i>Campylobacter</i>	10^5	5×10^3
<i>Listeria</i>	10^4	5×10^7
<i>Staphylococcus aureus</i>	10^5	5×10^3
<i>Coliphages</i>	5×10^5	10^4
<i>Giardia</i>	10^3	10^2
<i>Roundworms</i>	20	5
<i>Enterovirus</i>	10^4	10^3
<i>Rotavirus</i>	100	20

À medida que a pesquisa sobre as características das águas residuais tornou-se mais extensa e as técnicas para análise dos ‘constituintes específicos e seus potenciais efeitos sobre a saúde e o meio ambiente’ tornaram-se mais abrangentes, o conhecimento científico aumentou significativamente proporcionando avanços consideráveis de novos métodos de tratamento para lidar com as questões ambientais e de saúde (Tchobanoglous et al., 1990).

As águas residuais atravessam várias etapas até ao seu destino final. A Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos tem disponível na sua página eletrónica uma ilustração que representa todas essas etapas, Figura 6.



Figura 6 - Imagem ilustrativa do trajeto das águas residuais até ao seu destino final. Ilustração disponibilizada por Entidade Reguladora de Serviços de Águas e Resíduos

Analisando a Figura 6, verifica-se que o processo se inicia com a **Descarga**, ou seja, com o encaminhamento das águas residuais produzidas nas edificações para o sistema público de coletores. Estes sistemas asseguram a condução das águas residuais (**Drenagem e Transporte**) domésticas, industriais e pluviais até ao destino final adequado. Em Portugal existem cerca de 60 353 Km de coletores responsáveis por esta condução. A etapa da **Elevação** tem por finalidade introduzir energia no escoamento quando o mesmo não possa ser realizado por ação da gravidade. Após esta fase, as águas residuais chegam às Estações de Tratamento (ETAR) onde sofrem um conjunto de operações (**Tratamento**) que asseguram as características ideais para a sua descarga nas águas recetoras. A esta última etapa dá-se o nome de **Rejeição**, que constitui a integração das águas residuais num meio recetor aquático ou terrestre (ERSAR, 2019).

Como mencionado, o tratamento de efluentes é efetuado em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR). O projeto de uma ETAR não é apenas condicionado pelas características do efluente a tratar (caudal e carga poluente carregada) e pelos processos adotados para o tratamento, mas também pelos fatores ambientais locais (T. Sousa, 2016).

É neste contexto que as Engenharias Ambiental e Química/Biológica surgem como resposta aos impactos ambientais e de saúde pública causados pela gestão inadequada das águas residuais. Para tal, é fundamental ter conhecimentos sobre os principais constituintes das águas residuais, os impactos causados por esses constituintes, os tratamentos existentes para os remover ou modificar e soluções conscientes para a reutilização e/ou o descarte dos mesmos.

4.2 ETAR'S (ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS)

As estações de tratamento de águas residuais são consideradas infraestruturas de extrema importância para despoluição de cursos de água para onde, diariamente, são canalizados, através de redes de esgotos, grande carga de diversos efluentes poluentes de forma quase ininterrupta. Assim, são consideradas por muitos como o destino mais adequado à promoção de saúde pública e à preservação dos recursos hídricos. O principal objetivo destas infraestruturas é o tratamento final das águas residuais produzidas em ambiente doméstico e industrial, geralmente designados de esgotos sanitários ou despejos industriais, através de um processo longo e faseado, permitindo uma possível reutilização destas ou escoamento das mesmas para o mar ou rio. Este processo, técnico-industrial, composto por uma série de tratamentos físicos, biológicos e químicos, pretende ser configurado de forma a, técnica e economicamente, obter um desfecho adaptado às condições do projeto, isto é, a diminuição da quantidade de matéria total poluente da água (Cerdeira, 2008).

Uma ETAR engloba uma fileira de operações unitárias de tratamento destinadas a remover as substâncias poluentes e também, em certos casos, os microrganismos

patogénicos presentes nas águas residuais, de modo a produzir um efluente (água residual tratada) com a qualidade pretendida. Esta qualidade é requerida por uma licença de descarga, emitida pela autoridade competente do Ministério do Ambiente, com base na legislação relativa à descarga no meio recetor (Decreto-Lei nº152/97), ou noutra, caso o destino desse efluente seja a reutilização. As águas superficiais, que geralmente constituem o meio recetor dos efluentes das ETAR, devem-se encontrar em “bom estado”, que é definido pelo seu ‘bom estado ecológico’ – que corresponde à ausência de pressões antropogénicas significativas e sem que se faça, sentir os efeitos da industrialização, urbanização ou intensificação da agricultura – e pelo seu bom estado químico’- que está relacionado com a presença de substâncias químicas no ambiente aquático em concentrações que não são suscetíveis de causar danos significativos para o meio ambiente e para a saúde pública (Barreto, 2016).

Como já referido, numa ETAR as águas residuais atravessam várias fases, com o propósito de separar ou diminuir a quantidade de matéria poluente da água. A Figura 7 ilustra os principais processos utilizados numa ETAR, que serão abordados no tópico seguinte (Barreto, 2016).

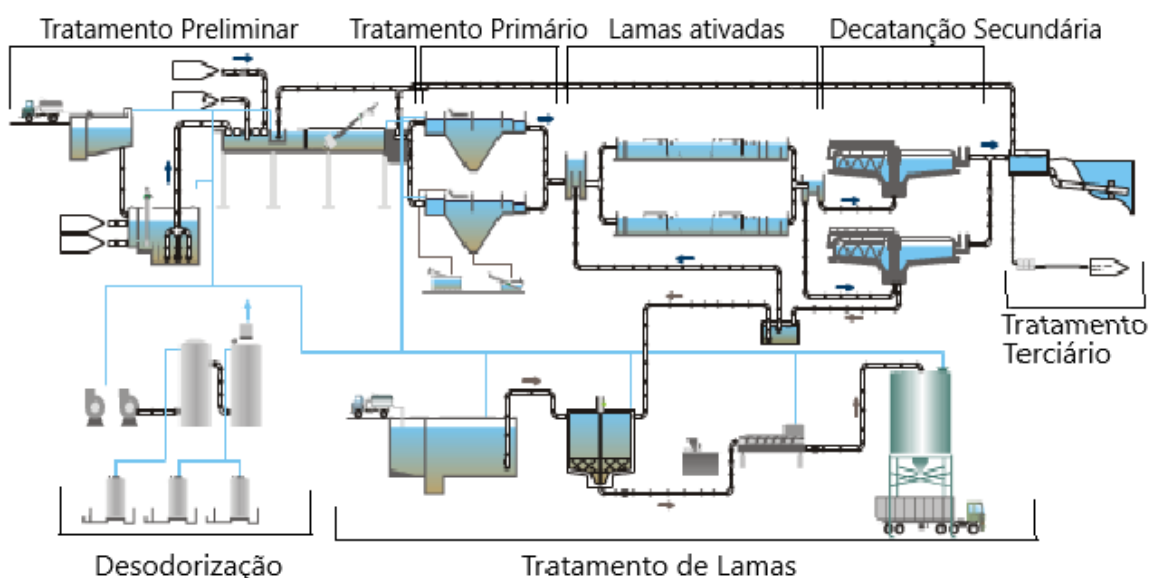


Figura 7 - Diagrama simplificado do funcionamento de uma ETAR. Autoria própria, adaptado de Barreto (2016)

As fileiras de operações existentes em cada ETAR são definidas tendo em conta os níveis de tratamento necessários que as respetivas águas residuais têm de sofrer para diminuir a sua carga poluente (Figura 8). Estes níveis variam conforme as características das águas a serem tratadas, que depende de local para local (Alves, 2013).

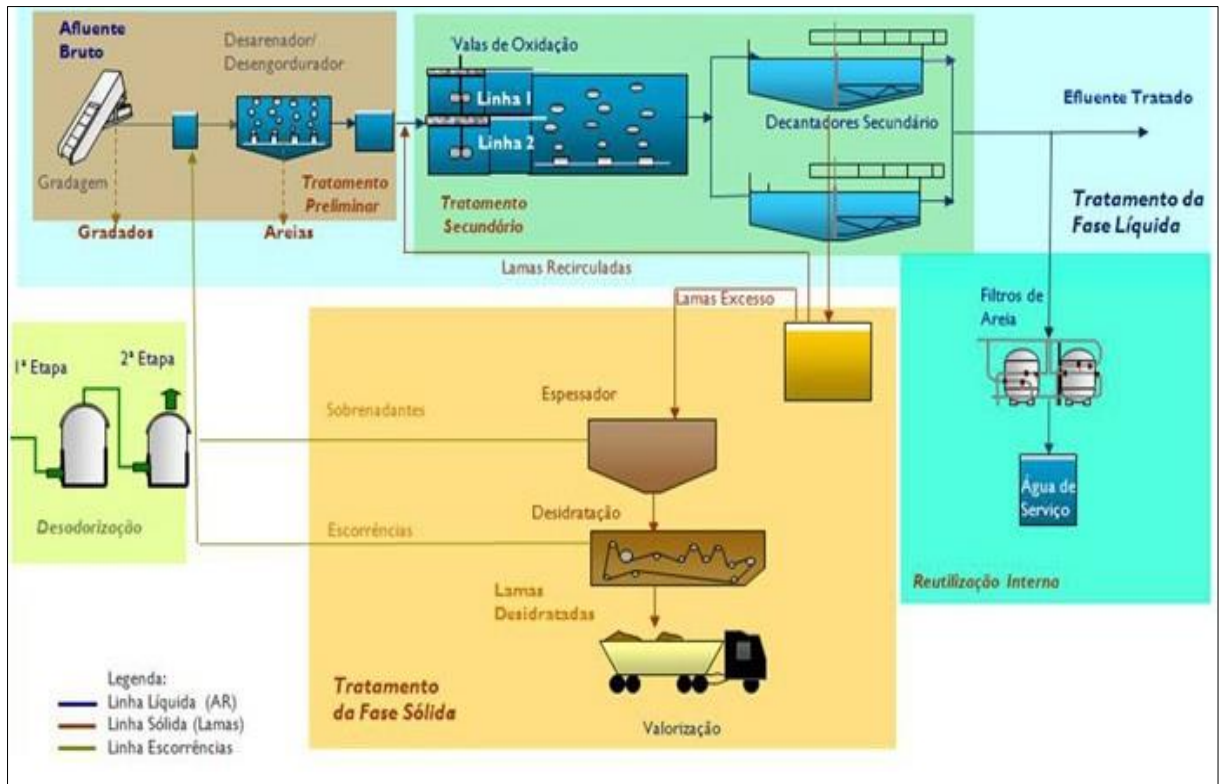


Figura 8 - Diagrama do tratamento de águas residuais de uma ETAR (Moreira, 2014)

Relativamente a Portugal, a Tabela 6 indica o número de Estações de tratamento de águas residuais existentes no país, estes dados foram atualizados no presente ano pelo Instituto Nacional de Estatística. O número de ETAR's aqui mencionado não inclui as estações de tratamento a título individual das indústrias.

Tabela 6 - Número de Estações de tratamento de águas residuais por localização geográfica de Portugal segundo o Instituto Nacional de Estatística. Dados atualizados a 8 de abril de 2021 (INE, 2021).

Localização geográfica de Portugal	Número de ETAR's
Norte	1048
Centro	-
Área metropolitana de Lisboa	93
Alentejo	519
Algarve	91
Açores	-
Madeira	22

Através da análise da Tabela 6 é possível verificar que, apesar de Portugal ser um país com expressividade em sistemas de tratamento de águas residuais, com cerca de 1773 ETAR's, ainda existe um número populacional significativo sem acesso a este recurso, sendo essencial um maior trabalho por parte das entidades competentes. A Agência Europeia do Ambiente refere que ainda existe uma grande necessidade de encontrar soluções reais, principalmente no setor industrial, para uma gestão consciente dos efluentes gerados. Apesar de a legislação estar, cada vez mais, rigorosa em relação a este tema, ainda existe setores que não têm a capacidade de a colocar em prática, continuando a gerar poluição com as suas descargas diretas no meio ambiente. Assim sendo, é imperativo reunir esforços para ir de encontro com as necessidades, tanto a nível populacional como ambiental.

A Figura 9 mostra os dois principais tipos de águas residuais geradas e o caminho que cada uma destas prossegue até ao seu destino final.

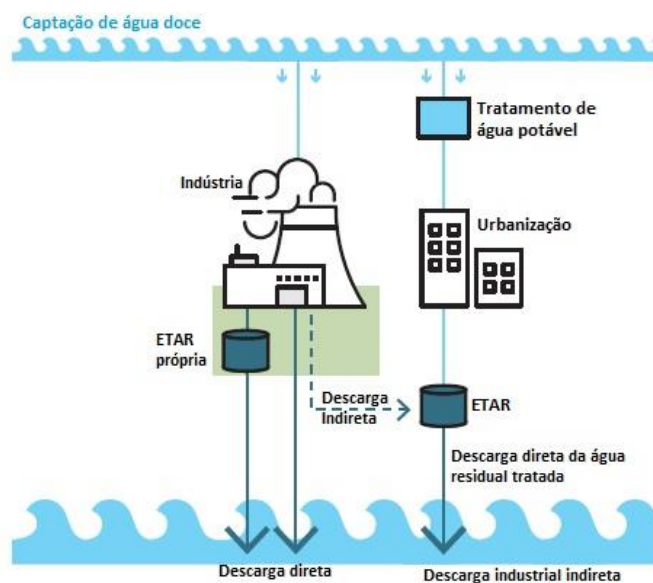


Figura 9 - Representação simplificada das descargas de águas residuais industriais e urbanas praticadas atualmente. Adaptado para Português (M. Granger et al., 2019)

As ETAR's foram pensadas como um esforço para apoiar o saneamento das populações, de forma a melhorar a saúde pública com o controlo da poluição presente nas águas residuais, consequentemente das águas superficiais e melhorando, também, a qualidade ambiental (M. Granger et al., 2019).

Algumas das ETAR's existentes em Portugal são referidas abaixo:



Figura 10 - ETAR Barreiro/Moita
(Disponibilizado por Águas de Portugal)

ETAR situada no Barreiro/Moita, inaugurada em 2011, trata os esgotos de cerca de 90% da população dos dois concelhos, lançando-os, posteriormente, no estuário do Rio Tejo, com as suas características ideais (Águas de Portugal).



Figura 11 - ETAR de Vilamoura
(Disponibilizado por Águas de Portugal)

Construída nos finais dos anos 80 e reabilitada em 2005, tem como objetivo melhorar a qualidade do efluente final descarregado no meio recetor e garantir a sua reutilização, por exemplo, na rega dos campos de golfe (Águas de Portugal).



Figura 12 - ETAR de Urra, Portalegre
(Disponibilizado por Águas de Portugal)

Adoção de sistemas de saneamento descentralizados, que serve as pequenas localidades de Urra e Caia e que visa garantir a instalação de soluções de tratamento na região do Alentejo, onde predominam aglomerados populacionais pequenos e dispersos (Águas de Portugal).

4.3 TRATAMENTOS CONVENCIONAIS

A seleção do adequado tratamento para águas residuais a ser implementado é uma tarefa complexa, pois requer uma ampla experiência e estudos de viabilidade. Convencionalmente, essa seleção é baseada em fatores técnicos e económicos, no entanto, fatores sociais, governamentais e ambientais também têm um forte impacto na decisão final (Ullah et al., 2020).

As tecnologias de tratamento de águas residuais envolvem várias fases. Estas fases, geralmente, são classificadas em quatro níveis, o *preliminar*, *primário*, *secundário* e *terciário*. A complexidade dos processos de cada fase depende da fonte, do tipo, do fluxo, características e destino da água em questão. Em cada nível de tratamento são removidos contaminados diferentes (Ullah et al., 2020).

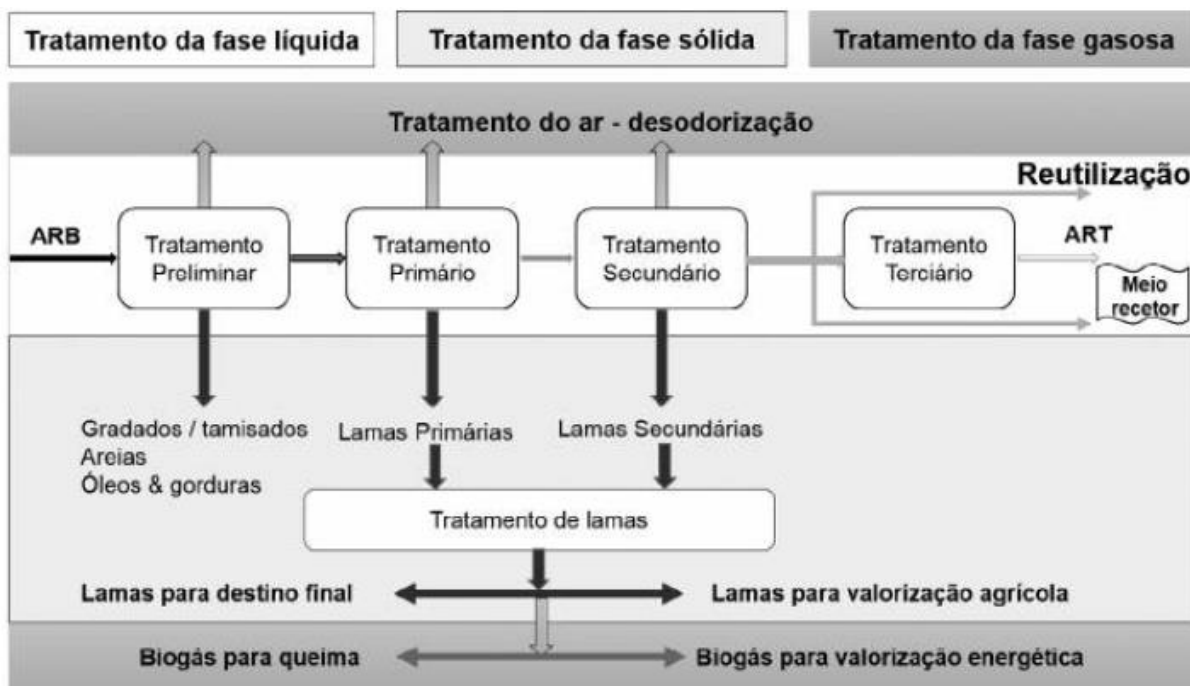


Figura 13 - Esquema geral do tratamento de águas residuais (Monte et al., 2016). Consiste no tratamento da fase líquida, referente ao tratamento do efluente, tratamento da fase sólida ou das lamas produzidas e, por fim, tratamento da fase gasosa ou tratamento de gases de combustão obtidos.

Os métodos de tratamento utilizados nas ETAR são classificados em operações e processos. As operações atuam sobre o efluente exercendo ações puramente físicas. Os processos procedem à remoção dos contaminantes mediante reações químicas e biológicas. Através da Figura 13 temos uma noção das principais etapas que a água residual tem de sofrer para ser devolvida ou reutilizada com as características ideais, no entanto, em casos especiais também pode ter que ser submetida a um tratamento primário avançado (imediatamente após o tratamento primário), a um terciário, com remoção de nutrientes (após o tratamento secundário ou biológico), e a um tratamento avançado final (Sousa, 2016).

O **tratamento da fase líquida** é constituído pelo *tratamento preliminar*, que compreende a remoção de sólidos grosseiros, areias, gorduras e ainda, por vezes, uma equalização de caudais e de carga poluente e tem como objetivo proteger os processos de tratamento seguintes, evitando obstruções dos circuitos hidráulicos e contaminações das águas e lamas. Para além do tratamento preliminar, também inclui o *tratamento primário*, onde o conjunto de operações e processos asseguram a remoção de sólidos em suspensão, o *secundário*, que consiste na redução de matéria orgânica biodegradável dissolvida ou em suspensão coloidal e o *tratamento terciário*, que complementa os anteriores, quando tal é exigido, removendo nutrientes (azoto e/ou fósforo) e microrganismos patogénicos. Dependendo do destino final da água residual e da qualidade requerida, pode ainda ocorrer um *tratamento avançado* para remover poluentes dissolvidos presentes em pequenas concentrações (Monte et al., 2016).

O **tratamento da fase sólida** refere-se ao tratamento dos resíduos (areias, gorduras, lamas, gradados, etc) produzidos no tratamento da fase líquida e, que geram odores desagradáveis. Por fim, os gases dissolvidos provenientes da dissolução do ar atmosférico na água, mas principalmente gerados nas reações químicas e bioquímicas, como por exemplo, o gás sulfídrico, o dióxido de carbono e o metano, prejudiciais para o ambiente e saúde pública, também devem ser tratados, denominando-se esta última etapa por **tratamento da fase gasosa** (Monte et al., 2016).

Todos os tratamentos referidos são constituídos por diversas operações unitárias, que podem ser mais ou menos complexas, dependendo do destino da água residual. No entanto, as operações unitárias mais importantes e utilizadas em todas as estações de tratamento de águas residuais encontram-se representadas na Figura 14 e serão detalhadas a seguir.

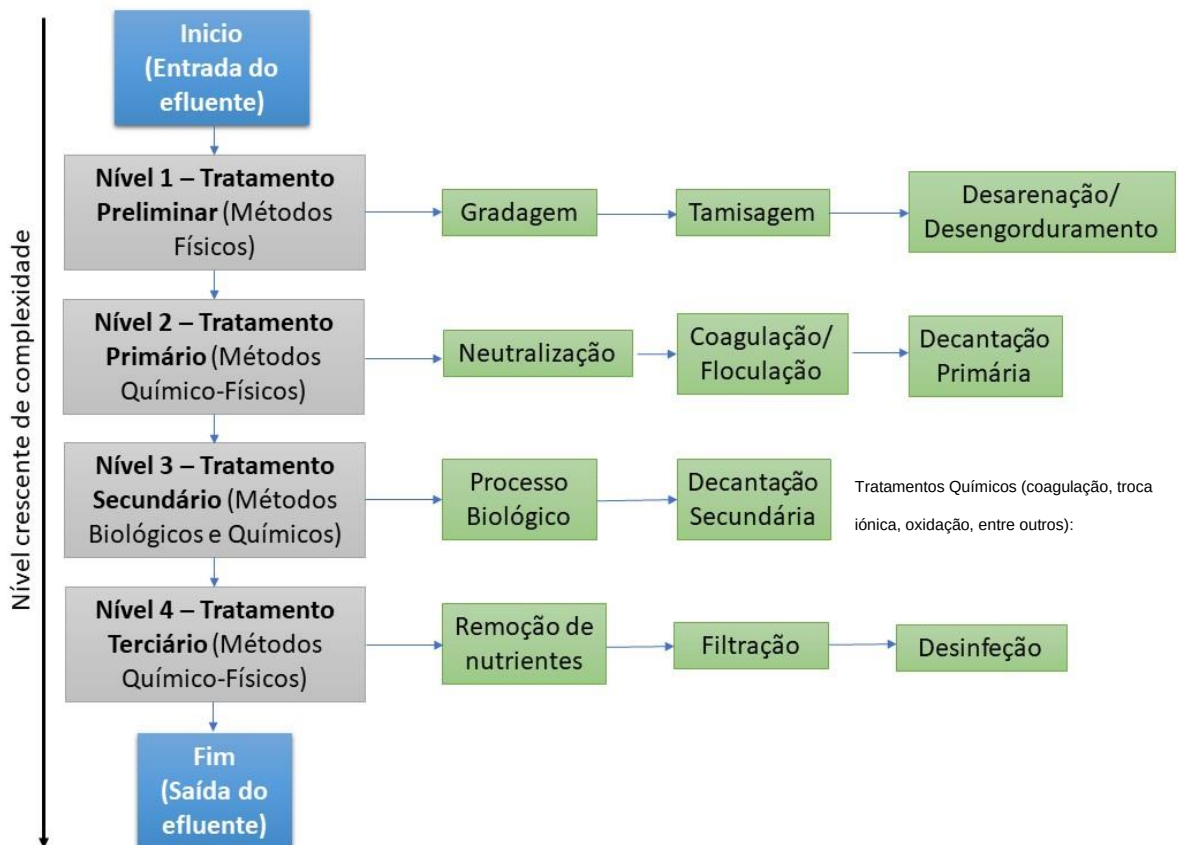


Figura 14 – Principais operações unitárias envolvidas nos diferentes níveis de tratamento das águas residuais. Autoria própria, adaptado de Ullah et al. (2020)

4.3.1 TRATAMENTO PRELIMINAR

Como já referido, o objetivo do tratamento preliminar é a remoção de sólidos grosseiros e outras matérias de grandes dimensões, frequentemente encontrados nas águas residuais. Este tratamento ajuda a remover ou reduzir o tamanho destas partículas. Estes sólidos consistem em pedaços de madeira, tecido, papel, plásticos, lixo, entre outros, como matéria fecal. Neste nível de tratamento também são removidos sólidos inorgânicos pesados, como areias, metais ou vidros (Sonune & Ghate, 2004).

→ Gradagem

A gradagem é a remoção de sólidos de maior dimensão. O objetivo deste processo é a proteção de dispositivos de transporte e tratamento a jusante, a eliminação de sólidos flutuantes de maiores dimensões e melhorar a eficiência de tratamento do sistema, eliminando uma grande parcela de matéria orgânica inicialmente (Moreira, 2014).

Esta operação é efetuada obrigando o efluente a passar através da câmara de grades, que têm como função a retenção dos sólidos, prevenindo os depósitos e obstrução dos canais, condutas e outros equipamentos. Os materiais removidos nesta fase são maioritariamente plásticos, pedras, latas, madeiras, papel, etc. As grades podem apresentar-se segundo malhas de orifícios retangulares ou circulares e a sua classificação é feita consoante a dimensão dos orifícios da malha e tipo de limpeza utilizado (Figura 15) (Moreira, 2014).

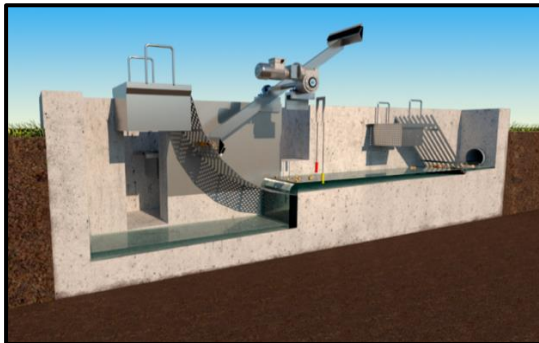


Figura 15 - Sistema de Gradagem. Fonte: www.ecodepur.pt

→ Tamisagem

A tamisação é uma operação semelhante à gradagem, ou seja, permite a retenção de partículas sólidas presentes no efluente através da passagem do efluente por um crivo mecânico de malha apertada (metálica ou têxtil), porém, os espaçamentos da malha dos tamisadores são de dimensão inferior e, por isso, conseguem reter sólidos de dimensões mais reduzidas (Figura 16). Usualmente, esta operação é aplicada logo após a gradagem, mas, dependendo do tipo de água residual a tratar, pode ser introduzida no tratamento

primário ou secundário. Consequentemente, este tipo de equipamento provoca perdas de carga bastante significativas, principalmente quando se pretende remover partículas muito pequenas, pelo que a sua utilização nas estações de tratamento de águas residuais deve ser ponderada (Sousa, 2016).

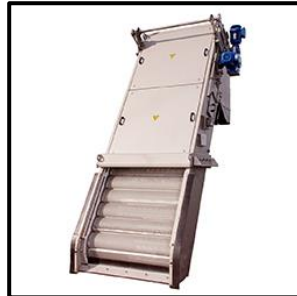


Figura 16 - Tamisadores de malha filtrante. Fonte: <https://klinger.pt/>

→ Desarenação/ Desengorduramento

O desarenamento baseia-se na remoção dos materiais presados (metais, areias, carvão, entre outros), permitindo a passagem de sólidos orgânicos. Este passo evita a deposição de areias e afins nas condutas e canais a jusante, protegendo os equipamentos. Relativamente ao desengorduramento, este refere-se à eliminação de gorduras por emulsão. Frequentemente, estas duas operações são realizadas em conjunto (Moreira, 2014).

O desareamento é uma parte fundamental no tratamento de águas residuais, pois evita a abrasão e desgaste dos equipamentos mecânicos, a deposição de areais em tubos e canais e o acúmulo destas nos tanques. Existem três tipos de desareadores (CONAGUA, 2010):

- De fluxo horizontal, onde o fluxo passa pela câmara na direção horizontal e a velocidade é controlada.
- tanque areado, que consiste num tanque em espiral onde a velocidade do fluxo é induzida e controlada e é fornecido ar ao sistema e
- Em vórtice, que se baseia num tanque cilíndrico no qual o fluxo entra tangencialmente e as forças gravíticas e centrífugas criadas fazem com que as areias se separem.

As gorduras são constituídas por substâncias sólidas, à temperatura ambiente, essencialmente de origem animal e vegetal. Estas encontram-se na forma de partículas livres ou em aglomerados com matérias em suspensão. A operação de remoção de gorduras, à qual se dá o nome de desengorduramento, conduz à recuperação de gorduras, mas também de outros produtos flutuantes, incluindo detritos de animais ou vegetais,

sabões, espumas (detergentes), elastómeros, plásticos, entre outros. No tratamento de águas residuais de origem doméstica, o desengorduramento é indispensável se não existir a operação de decantação primária, por forma a proteger os tratamentos biológicos a jusante, pois o decantador primário contribui igualmente para a remoção de substâncias que se acumulam à superfície, como as gorduras. No entanto, este é um equipamento mal-adaptado à remoção de gorduras, quando estas se apresentam em quantidades significativas. Esta operação pode ser realizada de duas formas distintas (Ferreira, 2013):

- A primeira, superficial, por flotação devido à baixa densidade e ao seu carácter hidrófobo. Sendo a remoção efetuada por uma ponte raspadora;
- A segunda, por sedimentação, associada às areias e a alguma matéria orgânica que são removidas do fundo do equipamento.

4.3.2 TRATAMENTO PRIMÁRIO

O tratamento primário é projetado para remover sólidos orgânicos e inorgânicos por processos físicos, como a sedimentação e flotação, e que em alguns casos pode ser facilitado pela adição de agentes químicos. Aproximadamente 25-50% da carência de oxigénio bioquímico inicial, 50-70% do total de sólidos suspensos e 65% de óleos e gorduras são removidos durante esta fase. Algum fósforo e azoto orgânico, como metais pesados, também são removidos durante o tratamento primário, no entanto, os constituintes coloidais suspensos permanecem no efluente (Sonune & Ghate, 2004).

O Decreto-lei nº 152/97 de 19 de Junho, define tratamento primário como “o tratamento das águas urbanas por qualquer processo físico e/ou químico que envolva a decantação das partículas sólidas em suspensão, ou por outro processo em que a CBO das águas recebidas seja reduzida em, pelo menos, 20% antes da descarga e o total das partículas sólidas em suspensão seja reduzido em, pelo menos, 50%” (D. Maria & Martins, 2017).

→Neutralização

Um dos processos mais comum no tratamento de águas residuais é o ajuste do pH, para valores próximos de 7, processo este designado por neutralização. Este processo ocorre porque, para a descarga das águas superficiais, estas não podem ser nem excessivamente ácidas nem alcalinas, devendo ter um valor de pH aceitável, normalmente entre 6.0 e 8.5. Valores de pH fora do intervalo permitido podem desencadear reações adversas nas fases de tratamento posteriores. Os produtos químicos utilizados e o processo de otimização de pH utilizado variam com as características da água residual a ser tratada (Marques, 2009).

→Coagulação/Floculação

As partículas coloidais, devido à sua natureza, podem ser removidas através de um processo físico-químico denominado por coagulação/floculação. Este processo consiste na agregação mútua dos coloides em suspensão para formar pequenos aglomerados (flocos) de dimensões e peso suficiente para serem removidos por decantação ou filtração (Figura 17). Apesar dos dois termos serem utilizados como um único, estes são dois processos distintos e geralmente realizados em etapas sequenciais. Este processo é frequentemente aplicado no tratamento de águas com o intuito de remover a turvação, eliminar populações bacterianas, virais e outros microrganismos de natureza patogénica, eliminar parcialmente substâncias com características organoléticas como gosto e cheiro, e remover metais pesados, fosfatos, algas e outros organismos (Silva, 2010).

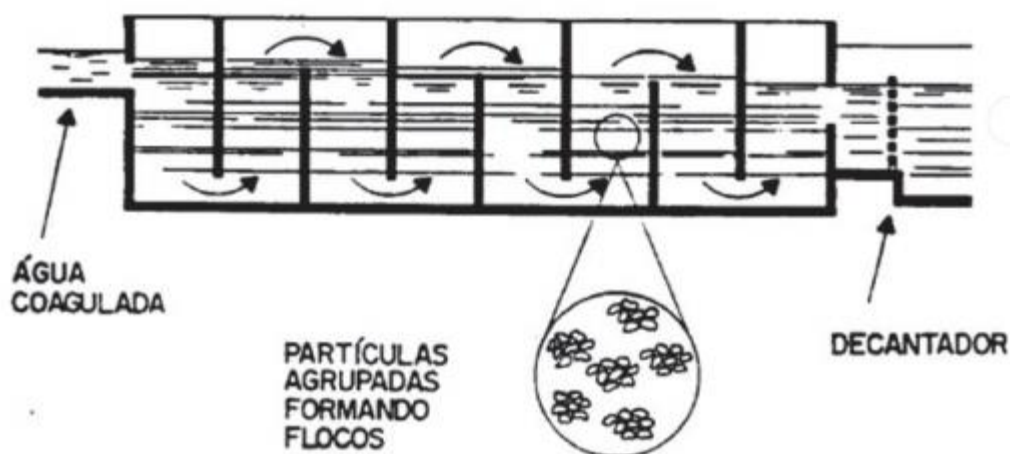


Figura 17 - Representação genérica do conceito de floculação. Fonte: <http://www.tecquimica.cefetmg.br/>

A coagulação, que decorre em condições de agitação rápida, promove a desestabilização da dispersão coloidal hidrófoba presente num sistema aquoso. Esta desestabilização ocorre por adição de compostos coagulantes, favorecendo os movimentos (colisões) das moléculas da água e proporcionando o contacto e a aglomeração das partículas, por redução das forças repulsivas entre estas. Seguidamente, na floculação, as partículas coloidais são colocadas em contacto umas com as outras, levando ao aumento do floco por adsorção dos microflocos. Este fenómeno de agregação altera a distribuição granulométrica dos flocos em solução. Por fim, o efluente é conduzido para o decantador primário onde sofrerá sedimentação das partículas sólidas em suspensão (Silva, 2010).

→Decantação Primária

O principal método utilizado no tratamento primário é a sedimentação, que se baseia na diferença entre as partículas sólidas e a massa do líquido, sendo que a operação se designa por decantação primária. Esta técnica promove a remoção de SST através do mecanismo de sedimentação floculenta, originando lamas que se aglomeram no fundo do decantador. Estas lamas são designadas por lamas primárias e apresentam uma quantidade elevada de matéria orgânica (D. Maria & Martins, 2017).

Para que ocorra a decantação por gravidade das partículas em suspensão, o efluente bruto é introduzido pela parte inferior do decantador, saindo por umas aberturas existentes na coluna central. Para que o efluente possa ser decantado, a coluna central é rodeada por um cilindro metálico. No correto funcionamento dos decantadores devem ser tidos em conta os tempos de retenção ou de residência e a carga superficial que deve ser inferior à velocidade de queda das partículas. À medida que o efluente atravessa o decantador, as partículas sólidas sedimentáveis separam-se do líquido, depositando-se no fundo do tanque. A água decantada é encaminhada para os reatores biológicos. Por outro lado, as partículas sedimentadas (lamas) no fundo do tanque são removidas continuamente por raspadores de fundo presos a uma ponte giratória e encaminhadas para um poço de bombagem de lamas e escumas (Cunha, 2017).

Os tanques de sedimentação primária recebem água residual bruta, antes do tratamento biológico, podendo ser retangulares ou circulares. Estes tanques são projetados para fornecer um tempo de retenção até três horas e podem ser removidos cerca de 50 a 70% de sólidos suspensos. A eliminação destes sólidos reduz a carência bioquímica de oxigénio em cerca de 30% (CONAGUA, 2010).

4.3.3 TRATAMENTO SECUNDÁRIO

O objetivo do tratamento secundário é a remoção dos resíduos orgânicos e sólidos que se encontram em suspensão após o tratamento primário. Em termos de distribuição de tamanhos, 30% são partículas suspensas, 6% coloidais e cerca de 65% sólidos dissolvidos. Este nível de tratamento consiste no tratamento biológico de águas residuais, utilizando diferentes tipos de microrganismos em ambiente controlado. São aplicados vários processos aeróbios, diferindo principalmente na forma como o oxigénio é fornecido ao meio e na taxa metabólica da matéria orgânica (Sonune & Ghate, 2004). Existem vários processos possíveis que funcionam sobre princípios semelhantes, como por exemplo, os sistemas aeróbios intensivos, quer por biomassa (microrganismos) suspensa (lamas ativadas), quer por biomassa fixa (leitos percoladores e biodiscos), e os sistemas aquáticos por biomassa suspensa (lagunagem). O efluente resultante deste tratamento tem uma elevada concentração de microrganismos, mas poucos materiais poluentes remanescentes. Os microrganismos são removidos após sedimentarem (Moreira, 2014).

→ Processo Biológico

Os principais objetivos do tratamento biológico, relativamente a águas residuais domésticas, são transformar constituintes biodegradáveis em produtos finais aceitáveis, capturar e incorporar sólidos coloidais suspensos e não sedimentáveis num filme biológico, transformar ou remover nutrientes, como o azoto e o fósforo, e, em alguns casos, remover alguns compostos orgânicos específicos. Relativamente aos efluentes industriais, o objetivo é remover ou reduzir a concentração de compostos orgânicos e inorgânicos, tendo em atenção que alguns destes são tóxicos para os microrganismos e, por isso, é necessário um pré-tratamento antes (Safoniuk, 2004).

Os principais processos biológicos utilizados podem ser divididos em duas categorias: *Processo de crescimento suspenso* e *Processo de crescimento em biofilme (fixo)*. A seleção do tipo de processo a implementar depende do tipo de microrganismos envolvidos, de fatores ambientais que afetam o seu desempenho, de fatores nutricionais e da cinética da reação. Os microrganismos selecionados podem ser comunidades mistas, incluindo bactérias, fungos, protozoários e algas (Safoniuk, 2004).

Processo de crescimento suspenso: os microrganismos responsáveis pelo tratamento são mantidos em suspensão líquida por métodos de mistura apropriados. Muitos processos de crescimento em suspensão usados no tratamento de águas residuais municipais e industriais são realizados utilizando uma concentração positiva de oxigénio dissolvido (processo aeróbio), mas existem operações em reações sem oxigénio (processo anaeróbio), esta última é frequentemente utilizada no tratamento de águas residuais industriais com concentrações orgânicas elevadas. O processo de crescimento suspenso mais comum é o processo de lamas ativadas, que envolve a produção de uma massa com microrganismos capazes de estabilizar um resíduo em condições aeróbias (Figura 18) (Safoniuk, 2004).

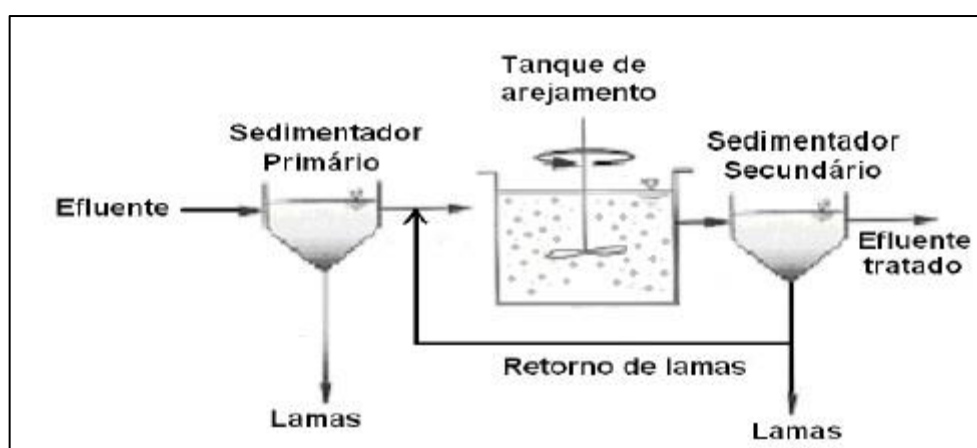


Figura 18 - Esquema representativo do processo de crescimento suspenso por lamas ativadas (Jorge & Jesus, 2014)

Processo de crescimento em biofilme (biomassa fixa): consiste no desenvolvimento de uma camada de microrganismos aderidos a um meio de suporte/biofilme. A matéria orgânica presente na água residual serve de alimento para os microrganismos. Com o crescimento do biofilme, as camadas mais profundas vão deixar de ter acesso ao alimento, acabando por morrer, consequentemente, estas desprendem-se do biofilme e são arrastadas para o decantador secundário, levando consigo matéria orgânica consumida. Durante o processo de crescimento as camadas mais profundas estão também privadas de oxigénio, onde é possível a realização de desnitrificação. Nas zonas, onde não existe privação de oxigénio, ocorre em conjunto com a oxidação da matéria orgânica, a nitrificação, transformando amónia em nitrito e nitrato (Figura 19) (Jorge & Jesus, 2014).

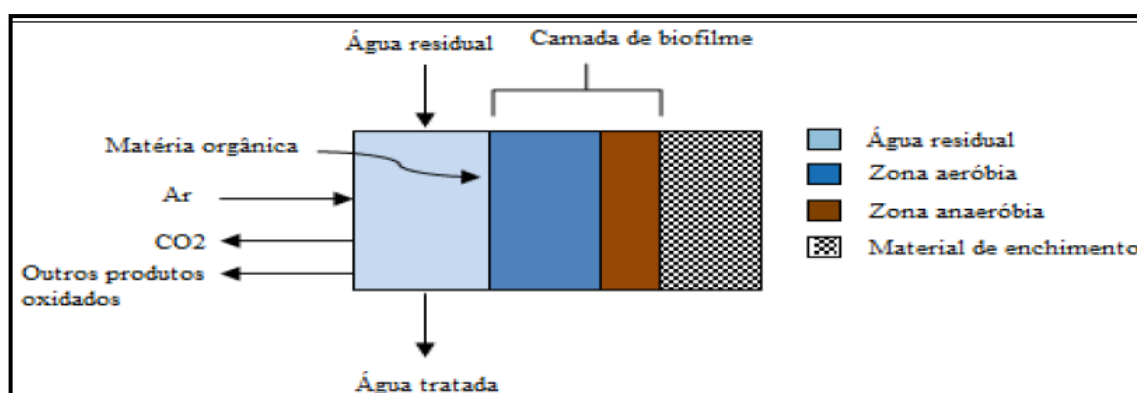


Figura 19 - Esquema representativo do processo com crescimento em biofilme ((Jorge & Jesus, 2014)

→Decantação Secundária

A decantação secundária encontra-se acoplada ao tratamento biológico com o intuito de remover os produtos formados durante o processo biológico. Esta tem como objetivo a deposição gravítica da matéria que se encontra em suspensão, permitindo a saída do efluente tratado. Parte do efluente tratado é enviado para o mar enquanto a outra parte é sujeita a um tratamento terciário de forma a poder ser aproveitada, como por exemplo, em regas e lavagens (Oliveira, 2017).

Esta etapa do processo de tratamento de águas residuais ocorre devido ao excesso de microrganismos, que se desenvolveram durante o processo biológico. Este excesso biológico forma lamas que se depositam no fundo por ação da gravidade. É na decantação secundária que estes resíduos são, lentamente e através de uma ponte raspadora, removidos da superfície do efluente juntamente com as lamas que se encontram no fundo. Por fim, obtém-se um efluente clarificado, estabilizado e com baixo teor de matéria orgânica e sólidos suspensos (S. I. S. Mendes, 2014).



Figura 20 - Decantador Secundário da ETAR de Alverca (S. I. S. Mendes, 2014)

4.3.4 TRATAMENTO TERCIÁRIO

O tratamento terciário pode ser definido como qualquer processo de tratamento em que as operações unitárias podem ser adicionadas durante o tratamento secundário, como por exemplo, a adição de um filtro para remoção de sólidos em suspensão, ou podem ser processos mais complexos como a adição de processos unitários para compostos orgânicos, sólidos em suspensão e remoção de azoto e fósforo. Este tratamento pode ser efetuado por, por exemplo, precipitação química, filtração granular, filtração por membrana e a adsorção de carbono. Adicionalmente, pode ainda existir uma etapa de desinfecção, caso se verifique essa necessidade. Atualmente, o tratamento terciário aplica-se a águas de reutilização (Jorge & Jesus, 2014)

Na maioria dos casos, o tratamento terciário destina-se à remoção de nutrientes (compostos de azoto e de fósforo), a fim de evitar a eutrofização do meio recetor, visto os nutrientes promoverem um crescimento rápido e exagerado das espécies vegetais aquáticas, com consequente diminuição da concentração de oxigénio dissolvido na água e morte de seres vivos. Para além disso, também visa a redução de microrganismos patogénicos através da etapa de desinfecção. O tratamento terciário pode ainda ter como objetivo a remoção de substâncias orgânicas (nomeadamente compostos orgânicos sintéticos) e inorgânicas dissolvidas (como sais) (S. I. S. Mendes, 2014):

O processo de desinfecção é responsável pela destruição parcial de microrganismos patogénicos, pois estes não são todos eliminados durante as fases de tratamento anteriores. Por questões de saúde pública, e sempre que a taxa de morte natural dos microrganismos patogénicos não é suficientemente rápida para garantir determinados padrões de qualidade da água no meio recetor, a desinfecção torna-se essencial. A seleção

do método de desinfecção depende do tipo de microrganismo a remover, pois nem todos os métodos inativam de forma eficiente todos os microrganismos presentes, sendo crucial realizar uma avaliação para a escolha do desinfetante ideal, considerando que o mesmo não deve ser agressivo a metais, vestuário e outros constituintes do sistema de tratamento, devendo ser eficaz a temperaturas normais e demonstrando-se tóxico em pequenas concentrações para os microrganismos mas não para ser humanos e animais (Gaspar, 2012).

4.3.5 TRATAMENTO DE LAMAS

A realização do tratamento das águas residuais produz um produto indesejável denominado de 'lamas de depuração'. Estas são constituídas por sólidos inorgânicos e orgânicos, conteúdo 1 a 5% de SST, de mistura num líquido com inúmeros sólidos dissolvidos. As lamas são um dos constituintes que apresentam o maior volume no tratamento das águas. O destino a dar a estas lamas é uma questão discutida desde há muito. No controle e incorporação destes resíduos em solos, torna-se imperativo adotar uma forma de gestão adequada, promovendo a sua valorização. Para tal, um dos parâmetros mais importantes a analisar é o teor de metais pesados, visto serem os mais nocivos, quer para a fauna quer para a flora (Santos, Jorge Filipe Sequeira; Correia, 2012).



Figura 21 - Reservatório de lamas na ETAR de Lagos. Fonte: www.aguasdoalgarve.pt

Consoante o tipo de tratamento adotado, as lamas podem ser classificadas em dois tipos principais: **lamas primárias** (produzidas na decantação primária), constituídas maioritariamente por matéria fecal, desperdícios de comida, fibras, argilas, metais pesados e minerais, e que se decompõem rapidamente devido ao facto de não sofrerem qualquer tipo de tratamento, ou **lamas secundárias** (produzidas na decantação secundária), que são compostas por sólidos que não foram removidos no decantador primário e por sólidos biológicos que resultam da conversão de matéria solúvel durante o tratamento secundário (Santos, Jorge Filipe Sequeira; Correia, 2012).

A Tabela 4 oferece uma melhor perceção dos produtos obtidos em cada uma das fases do tratamento de águas residuais.

Tabela 4 - Origens de sólidos e lamas numa ETAR convencional. Adaptado de Santos, Jorge Filipe Sequeira; Correia (2012)

Processos Unitários	Tipos de sólidos ou lamas
Gradagem/Tamisagem	Sólidos grosseiros
Desarenação	Areis e escumas
Decantação primária	Lamas primárias e escumas
Tratamento Biológico	Sólidos em suspensão
Decantação secundária	Lamas secundárias e escumas

O tratamento de lamas deve traduzir-se pela obtenção de um produto com potencial de valorização. Este tratamento é realizado em quatro etapas (Barbosa, 2008):

- **Espessamento:** Operação responsável pelo aumento da concentração de sólidos e consequente diminuição de volumes das lamas provenientes dos decantadores, removendo uma porção da fração líquida das massas. O objetivo é proporcionar às lamas uma estrutura física que possibilite menores custos associados aos processos posteriores de tratamento, condicionamento, armazenamento e transporte para o destino final.
- **Estabilização:** Este processo é realizado por via biológica, em condições aeróbias ou anaeróbias, ou por via química. Por via biológica, são criadas as condições ideais para os microrganismos decomporem a fração facilmente biodegradável da matéria orgânica, e por estabilização química através da inativação de microrganismos existentes nas lamas, permitindo a redução de maus odores. Pelo processo biológico anaeróbio, ocorre produção de metano que possibilita a valorização energética.

- **Condicionamento:** Favorece o processo de desidratação. Contudo, este permite ainda a alteração física, recuperação e desinfecção dos sólidos e o controlo de odores. Efetua-se através de processos físicos, térmicos ou químicos e
- **Desidratação:** Este último passo finaliza a linha de tratamento de lamas. O objetivo é reduzir o teor de humidade, favorecendo as operações de armazenamento e transporte. Pode ocorrer de forma natural, envolvendo processos de evaporação natural e percolação, feita através de leitos de secagem ou lagoas de lamas, ou de forma mecânica, recorrendo a equipamentos de remoção da água presente nas lamas.

Após finalizado o tratamento de lamas, estas podem ter vários destinos finais, como a valorização agrícola, sendo aplicadas nos solos, ou eliminadas por deposição em aterros sanitários, podendo ter valorização energética e na incineração.

4.4 O CASO DE PORTUGAL

Desde a década de 1990, os serviços de saneamento em Portugal têm passado por grandes evoluções no que diz respeito ao acesso, à qualidade de serviço prestado e à estrutura de mercado. A reestruturação do setor da água, iniciada em 1993, abriu-se ao setor privado e, posteriormente, estabeleceu uma autoridade regulatória dedicada à água. Nesse período, a cobertura do abastecimento de água cresceu de 80% para 96% e a qualidade da água melhorou de 50% para 99%, enquanto ao nível de águas residuais, a sua captação melhorou de 28% para 82% e a qualidade dos recursos hídrico de 28% para 78%. Desde aí, a administração central do Estado, através da empresa Águas de Portugal (AdP), tem assumido um papel importante na reforma do sector da água em Portugal, criando vários sistemas regionais de abastecimento de água, e o Plano Estratégico de Abastecimento de Água e Esgoto – PENSAAR – renovado de 6 em 6 anos (R. C. Marques & Simões, 2020).

Em Portugal, as principais reguladoras da gestão da água são o Ministério do Ambiente, autoridade máxima, a Autoridade Reguladora dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR), responsável pela supervisão, controlo e regulação do sistema de saneamento, e a Agência Portuguesa do Ambiente (APA). Por último, a Águas de Portugal (AdP) tem um papel fundamental no desenvolvimento do setor, a par dos municípios titulares dos serviços e dos operadores privados que divulgam as boas práticas no sector das águas e contribuem para o aumento da sua cobertura (Figura 22) (R. C. Marques & Simões, 2020).

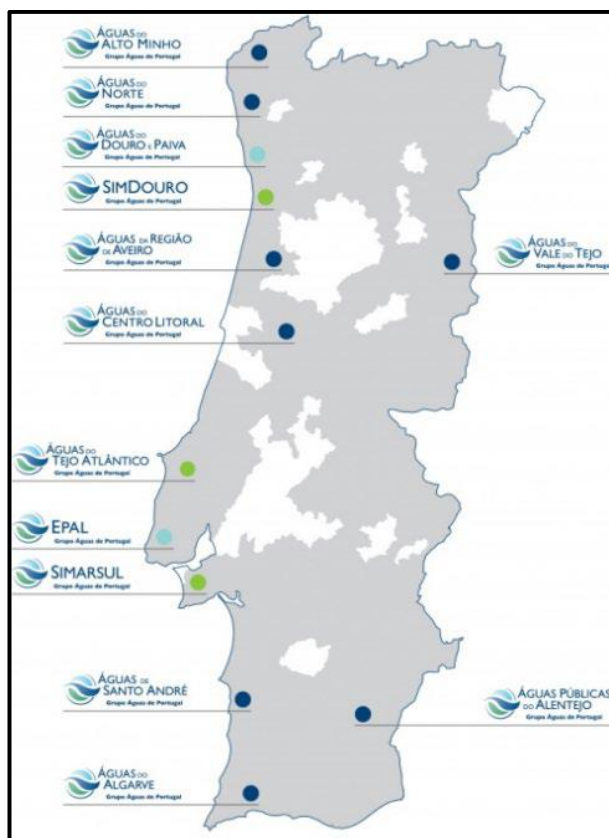


Figura 22 - Cobertura do grupo AdP em Portugal (R. C. Marques & Simões, 2020)

Portugal continua a ser um país onde problemas antigos, como o tratamento de águas residuais e de resíduos, coexistem como os novos problemas, como as alterações climáticas, apesar de existir uma grande preocupação com os problemas ambientais. As duas áreas de maior investimento ambiental nas últimas décadas são precisamente o abastecimento de água, drenagem e tratamento de águas residuais e a reciclagem de resíduos. Em ambos os casos, o investimento público trouxe melhorias significativas, contudo os problemas graves persistem, com consequências negativas para o ambiente e saúde pública (Coelho, 2020).

Através da Figura 23, disponibilizada pela ERSAR, é possível verificar que a zona Norte-centro do país é a mais fustigada, não sendo a água considerada de qualidade para consumo. No entanto, através de estudos realizados pela mesma entidade reguladora, sabe-se que perto de 90% das habitações em Portugal são abastecidas com água segura, contrastando com os 77% registados no início do século. Também na drenagem e tratamento de águas residuais a evolução foi positiva, com cerca de 85% dos alojamentos cobertos por drenagem e 90% das águas residuais sujeitas a tratamento. O nível de tratamento de águas residuais, contudo, não é suficientemente elevado para garantir a sua despoluição (Coelho, 2020).



Figura 23 - Indicadores do estado atual de Saneamento de Águas Residuais em Portugal. Dados de 2019 (Disponível na página eletrónica do ERSAR)

A crescente pressão sobre o Planeta e os seus recursos surge como uma nova abordagem ao modelo de desenvolvimento. Encontramo-nos há décadas numa situação paradoxal, que combina, na área dos recursos naturais, elevado potencial de talentos, recursos e infraestruturas, mas também significativos problemas estruturais. Posto isto, é necessário agir perante o agravamento dos sinais da crise climática, degradação e escassez de recursos hídricos e perda de biodiversidade (Relatório PENSAAR, 2020).

Na presente dissertação será abordada a hipótese de se recorrer a tratamentos por sistemas naturais, com a utilização de processos físicos, biológicos e com plantas, como por exemplo, processos *in situ*, sistemas de tratamento no solo, sistemas de escoamento superficial e em lagoas, processos *ex situ*, entre outros. Estes sistemas serão estudados no decorrer do presente trabalho e serão implementados nas regiões mais carenciadas, neste setor, de Portugal.

Para a seleção de um sistema de tratamento é necessário ter em conta alguns fatores, como por exemplo (Maria et al., 2019):

- A qualidade do efluente bruto;
- A qualidade pretendida do efluente final;
- Os custos do investimento;
- Os custos de exploração;
- Os custos de transportes (sistemas de drenagem e bombagem) e
- Impactos ambientais.

Agora que se tem uma ideia de todo o percurso realizado pelas águas urbanas, desde as habitações/indústrias/atividades comerciais até ao seu destino final, compreende-se a preocupação em alterar e/ou otimizar estes métodos para que os impactos causados tanto a nível ambiental como a nível social sejam atenuados. Uma das maneiras para concretizar estes objetivos é a utilização de sistemas naturais com recursos a processos biológicos e/ou físicos, tema que será abordado no próximo capítulo.

5. TRATAMENTOS NATURAIS

Este será o capítulo onde serão estudados os sistemas naturais para o tratamento de águas residuais. Foram selecionados os sistemas com maior quantidade de estudos associados e, por isso, com maior credibilidade nos resultados e métodos. Será, também, explicado as diferenças entre eles, as suas características e as vantagens/desvantagens de cada um.

Os custos associados às tecnologias existentes nas ETAR's e nas infraestruturas são elevados e são normalmente projetados para redes de utilização intensiva. Como tal, as comunidades de países em desenvolvimento não são capazes de suportar estes sistemas economicamente, visto a rede de utilizadores ser de pequena escala. É neste panorama que surgem os **Sistemas de Tratamento de Águas Residuais Descentralizados**, ou seja, com recurso a métodos naturais (B. Sousa, 2019). Estes sistemas são, normalmente, designados por zonas húmidas, e referem-se a lagos, pântanos, estuários, entre outros, estando alagados durante uma parte ou na totalidade do ano, promovendo assim condições para o aparecimento de flora totalmente distinta das áreas contíguas (A. Mendes, 2010). A Figura 24 serve para uma melhor compreensão do termo de *zonas húmidas* e onde estas poderão ser encontradas.



Figura 24 - Localização das zonas húmidas nos ecossistemas (A. Mendes, 2010)

O escoamento hidráulico nas zonas húmidas naturais é geralmente lento (em parte devido à densidade vegetal) permitindo a deposição de sedimentos e promovendo um maior tempo de contacto entre a água e as várias superfícies existentes nas zonas húmidas naturais. Estas zonas são ainda ricas em microrganismos que transformam e degradam uma enorme variedade de substâncias (Mendes, 2010).

Assim sendo, os sistemas de tratamento de águas residuais podem dividir-se em dois grupos (Santos & Brito, 2001):

→ **Sistemas intensivos ou convencionais:** sistemas que através de apreciáveis consumos energéticos utilizam pequenas áreas de implementação por habitante equivalente (por exemplo, lamas ativadas e leitos percoladores (leitos de material altamente permeável, nos quais se aderem os microrganismos e através dos quais o líquido a ser tratado é lixiviado));

→ **Sistemas extensivos ou naturais:** baseados em processos naturais, com pequeno ou nenhum recurso a consumos energéticos e que ocupam áreas superiores de implementação por habitante equivalente (por exemplo, lagunagem, tratamentos no solo e fito-ETAR's ou *wetlands*).

Os sistemas extensivos de origem natural têm sido mundialmente utilizados como meio de deposição de águas residuais, contudo, apesar destes apresentarem uma capacidade depuradora assinalável, muitos entraram em rutura, quando ultrapassados os seus limites máximos de processamento, incorporando nutrientes em excesso e substâncias po-

luentes, quer nos sedimentos e/ou metabolizando-os nos próprios organismos vivos, como plantas (Mendes, 2010).

Os **sistemas *wetlands*** ou, também designadas por Fito-ETAR's, referem-se a porções de terreno naturais que estão húmidas durante grande parte do ano devido à sua localização, tornado estes ecossistemas mais produtivos biologicamente, conseguindo transformar grande parte dos poluentes presentes na generalidade das águas residuais em produtos biológicos ou nutrientes, que podem ser utilizados para outras atividades biológicas (Figura 25) (Sousa, 2019).

Também se desenvolveram os sistemas *constructed wetlands* (Figura 26), engenhosamente projetados para tratar águas, otimizando características específicas próprias das zonas húmidas naturais. Estes sistemas são considerados alternativas de baixo custo e podem ser classificados em sistemas de fluxo superficial ou de fluxo subsuperficial. Estas novas tecnologias são especialmente indicadas para países em desenvolvimento devido ao baixo custo na manutenção, no entanto, a maior desvantagem é a necessidade de uma grande área para a sua implementação (Ayaz & Akça, 2001).



Figura 25 - *Wetland* naturais ((B. Sousa, 2019)



Figura 26 - *Constructed Wetland*. Fonte: <https://www.biomatrixwater.com/msr-constructed-wetlands/>

Já a **lagunagem** passa pelo tratamento de águas residuais utilizando processos biológicos e naturais, beneficiando da elevada área superficial e do longo tempo de retenção hidráulico, para dispensar o alto consumo de energia elétrica que é característico dos processos convencionais de tratamento de águas residuais. Apesar de naturais, são sistemas de alta performance, de custo reduzido, sendo especialmente adequados a climas quentes (Sousa, 2019).

Os sistemas de **tratamento no solo** correspondem a uma aplicação planeada e controlada das águas residuais através do solo e plantas, sendo tratadas por processos físicos, químicos e biológicos. Estes sistemas de tratamento são, usualmente, implementados a jusante de instalações de pré-tratamento incluindo, designadamente, uma gradagem inicial (Amaral, 2011).

Embora as plantas sejam os componentes mais óbvios destes ecossistemas, o tratamento de águas residuais é realizado por meio de uma combinação integrada de componentes biológicos, físicos e químicos integrados entre as plantas, os substratos e a comunidade microbiana inerente (Ayaz & Akça, 2001).

A seleção do sistema de tratamento de águas residuais deve atender a diversos fatores, nomeadamente à qualidade do afluente bruto, qualidade pretendida do efluente final, custos de investimento, custos de exploração e custos de transporte (sistemas de drenagem e bombagem de águas residuais). Os custos associados ao tratamento são menores quando o número de habitantes num determinado local é elevado e, nestes casos, os sistemas intensivos são mais vantajosos. Por outro lado, para pequenos aglomerados populacionais caracterizados por dispersão geográfica, a utilização de sistemas extensivos apresentam-se como sendo a melhor opção, principalmente em zonas com um número elevado de horas de sol ao longo do ano e temperaturas acima da média nacional, favorecendo a aplicação destes sistemas (Santos & Brito, 2001).

Apesar de serem sistemas mais vantajosos para locais com pouca densidade populacional, estes também têm pontos positivos relevantes em áreas metropolitanas com maior aglomeração populacional, tais como (Ayaz & Akça, 2001):

- Custos iniciais reduzidos, havendo a possibilidade de utilizar materiais baratos e permitindo a autoconstrução;
- Desenvolvimento de unidades de tratamento seguras para a saúde pública e ambiental;
- Integração da comunidade em atividades de teor ambiental, como agricultura;
- Possibilidade de reutilização e descarga com maior segurança.

5.1 SISTEMAS DE TRATAMENTO NO SOLO

O recurso a sistemas naturais para o tratamento de águas residuais já é utilizado desde há muito tempo, tendo ocorrido a maior proliferação de sistemas de tratamento no solo na Europa na segunda metade do século XIX. A descarga de águas residuais no solo, após os rios atingirem níveis inaceitáveis de poluição, era o único meio viável de tratamento disponível à data. No entanto, apesar do recurso ao tratamento no solo se ter prolongado durante o século XX e continuar a existir, outras tecnologias de tratamento foram preferidas devido a este método necessitar da utilização de extensas áreas, dos solos terem tendência a colmatar e o grau de tratamento atingido não ser, por vezes, suficiente para o cumprimento das exigências de qualidade (Borges, 2014).

A introdução das águas residuais no solo, além de suprimir as necessidades das plantas, relativamente à maior disponibilidade de água e nutrientes, também conduz a uma recarga dos lençóis de água subterrâneos e/ou evapotranspiração. A aplicação destas águas nos solos pode ser realizada por inundação periódica, pulverização, gotejamento, entre outras técnicas (Freitas, 2020). Estes sistemas são divididos em três tipos:

→ Sistemas de Infiltração lenta no solo

Este método consiste na aplicação das águas residuais sobre uma área com vegetação, com a finalidade de fornecer água e nutrientes para o crescimento das plantas. Como observado na Figura 27, parte do efluente sofre evaporação e outra parte é infiltrado, sendo a maioria absorvido pelas plantas. Esta técnica é aplicada em solos com alta permeabilidade e pode ocorrer através de fissuras, de borrifos ou inundação (Fonseca, 2007).

Embora os sistemas de infiltração lenta no solo sejam os mais caros dos sistemas naturais para implementar, a sua vantagem é o impacto positivo nas práticas de desenvolvimento sustentável. Além de tratarem águas residuais, também fornecem um retorno económico da reutilização destas águas e nutrientes, principalmente, na possibilidade de produção e comercialização de produtos agrícolas e na sua aplicação em projetos de reflorestamento em áreas com carência de água. Nestes sistemas, o efluente é introduzido a uma taxa controlada e são tratadas à medida que passam pelo solo por filtração, adsorção, troca iónica, precipitação, ação microbiana e adsorção pelas plantas. A vegetação é um componente crítico nestes sistemas, visto servir para extrair nutrientes, reduzir a erosão e manter a permeabilidade do solo (Farmer, 1991).

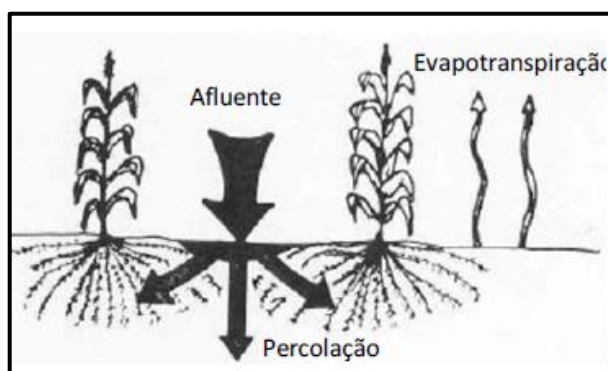


Figura 27 - Representação esquemática da técnica de infiltração lenta no solo (Amaral, 2011)

➔ Sistemas de Infiltração rápida no solo

Dos três sistemas de tratamento de águas residuais, o sistema de infiltração rápida no solo é o que tem a capacidade de tratar um maior volume de efluente, numa área menor. Nesta técnica, as águas residuais são introduzidas em bacias rasas construídas em depósitos no solo, profundos e permeáveis. Esta aplicação pode ocorrer por inundação ou por aspersão (Figura 28). O tratamento pode ocorrer por filtração, adsorção, troca iónica, precipitação e ação microbiana à medida que o efluente percorre a matriz do solo, não sendo utilizada vegetação. O fósforo e a maioria dos metais ficam retidos no solo, enquanto que os constituintes orgânicos tóxicos são adsorvidos ou degradados. À medida que a água residual se infiltra no solo, esta pode ser direcionada para lençóis freáticos ou aquíferos subterrâneos. Caso se recorra ao uso de drenos, é possível controlar o acúmulo da água subterrânea e, assim, recuperá-la para nova utilização na indústria ou agricultura (USEPA, 2000).

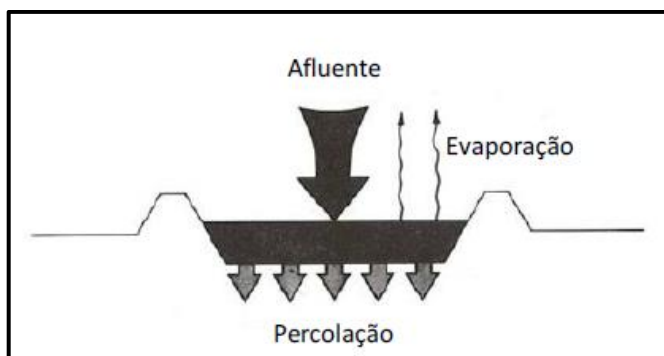


Figura 28 - Representação esquemática da técnica de infiltração rápida no solo (Amaral, 2011)

Apesar das inúmeras vantagens existentes na implementação desta técnica para o tratamento de águas residuais, as preocupações com o aumento dos níveis de azoto nos aquíferos próximos levam a algumas modificações nestes projetos, nomeadamente, na sua localização. Estes sistemas podem se localizar perto de outros corpos de água naturais se provarem que não afetaram a qualidade destes, no entanto, a utilização da drenagem ou poços é uma alternativa benéfica para evitar o impacto adverso nas águas subterrâneas adjacentes e, para além disso, também se torna possível recuperar uma grande parte da água e reutilizá-la conscientemente. Este método já é implementado à mais de 100 anos e pode ser considerado como um sistema de tratamento primário ou secundário (Figura 29) (USEPA, 2000).

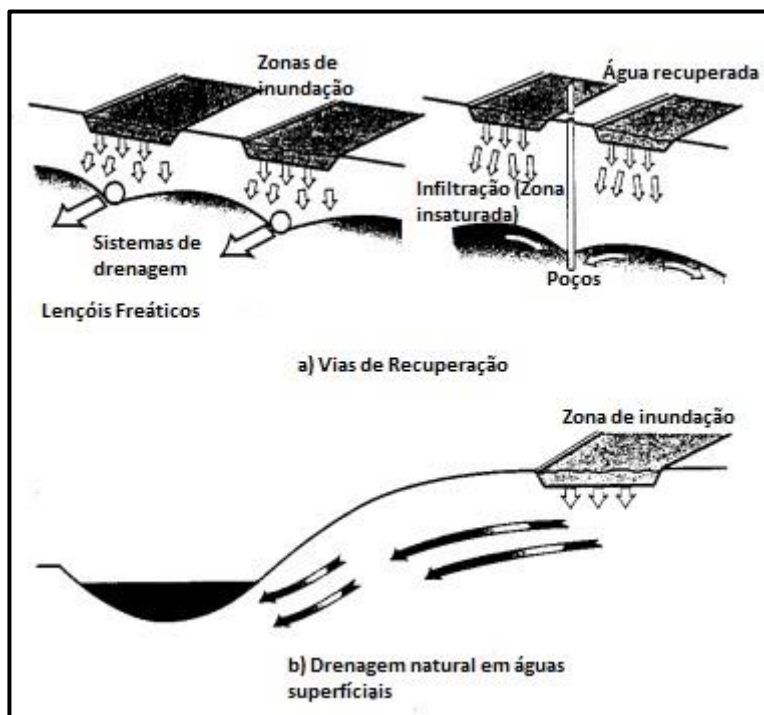


Figura 29 - Caminhos hidráulicos típicos para as águas residuais tratadas por infiltração rápida no solo (USEPA, 2000)

→ Sistemas de escoamento superficial no solo

A Figura 30 mostra o funcionamento simplificado do tratamento de águas residuais por escoamento superficial. Como observado, as águas são aplicadas em taxas mais elevadas que a capacidade de infiltração de solos, sendo estes inclinados. De seguida, ocorre o escoamento superficial até canais de recolha, que se encontram no fim do sistema. À medida que a água escoar sobre o terreno, parte dela evapora-se, outra infiltra-se e a restante, que em solos de baixa permeabilidade corresponde a cerca de 50 a 60% do total de efluente, chega às bacias de recolha. Este procedimento deve ser implementado em solos de baixa permeabilidade, como solos argilosos, em terrenos moderadamente inclinados e deve existir a presença de vegetação, pois aumenta a taxa de absorção de nutrientes disponíveis no solo e a perda de água por transpiração. Vários estudos indicam que nestes sistemas obtém-se taxas de remoção de 75 a 90% de azoto (absorvido pelas plantas), 50 a 70% de fósforo (adsorvido pelas argilas coloidais) e de até 90% de sólidos em suspensão (removidos por sedimentação e filtração) (Franco et al., 2014)

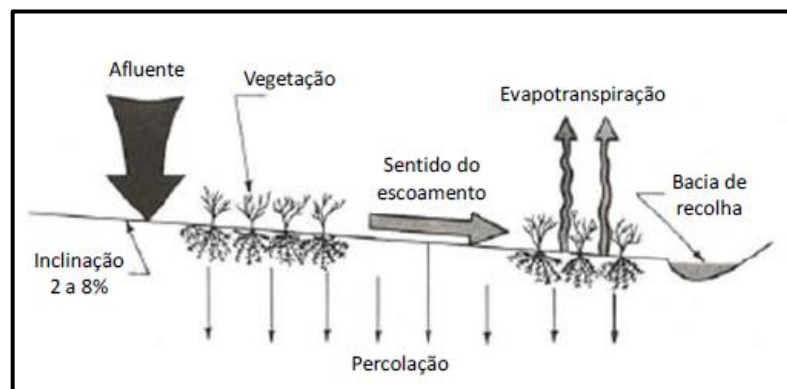


Figura 30 - Representação esquemática da técnica de escoamento superficial no solo (Amaral, 2011)

5.2 LAGUNAGEM OU LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO

Estes sistemas são, por definição, um processo de tratamento natural de águas residuais realizado por bactérias (anaeróbias/aeróbias) e algas. São utilizados em todo o mundo durante os últimos 50 anos, em populações que variam entre centenas de pessoas a mais de um milhão, e em diversos climas. O desempenho destas lagoas depende de muitos fatores e é muito difícil derivar um modelo que tenha em consideração todos os parâmetros envolvidos na previsão do seu desempenho. Portanto, estes modelos devem ser usados apenas para orientação. Modificações no projeto físico de uma lagoa, como por exemplo ao nível das dimensões, profundidades, recirculação, remoção de algas do efluente, entre outras, podem melhorar a qualidade do efluente (Alexiou et al., 2003).

Os sistemas de lagunagem (Figura 31) consistem em lagoas que, à partida, não têm necessidade de intervenção de meios mecânicos de arejamento no processo de tratamento, e podem classificar-se como *anaeróbias*, *aeróbias* e *facultativas* consoante as condições de degradação e estabilização da matéria orgânica (Borges, 2014). As lagoas aeróbias e facultativas podem, por sua vez, ser subdivididas em duas categorias, de acordo com a fonte de oxigénio utilizada, podendo ser de origem natural ou com arejamento mecânico adicional. Ainda podem ser consideradas como uma classe de lagoas aeróbias, as lagoas de maturação (Gonçalves, 2018). Estes sistemas podem ser de fluxo contínuo, intermitente e sem fluxo. A lagunagem é um processo que necessita de grande disponibilidade de área, altas temperaturas e boa exposição solar, mas requer pouca manutenção e poucos ou nenhuns equipamentos. É devido a estas características que os sistemas de lagunagem têm maior incidência no tratamento de águas residuais na zona do Alentejo (Borges, 2014).



Figura 31 - Sistema de tratamento por Lagunagem (Machado, 2016)

No tratamento por lagunagem, a água residual atravessa um conjunto de lagoas onde ocorrem processos idênticos aos que ocorrem em meio natural. Relativamente à sua classificação consoante os níveis de oxigénio, as **lagoas aeróbias** operam na presença de oxigénio, que por sua vez é obtido de um modo natural, através do contacto com a atmosfera, ou mecânico, através de agitadores de superfície ou difusores instalados no fundo da lagoa, as **lagoas anaeróbias** funcionam na ausência de oxigénio, logo são cobertas evitando o contacto com a atmosfera, estas têm facilidade de tratar águas residuais com características variáveis a nível de sólidos, óleos e gorduras, sendo indicadas para o tratamento de águas residuais industriais. Por último, as **lagoas facultativas** recorrem ao arejamento, através do contacto com a atmosfera. Neste último caso, os constituintes

sólidos têm tendência a sedimentar e formar uma camada de substrato orgânico, no fundo da lagoa. Passado algum tempo, haverá uma tendência para que a camada de substrato aumente e então formam-se condições anaeróbias (Machado, 2016). De forma geral, as lagoas anaeróbias, aeróbias e facultativas são projetadas para a remoção de matéria orgânica, enquanto nas **lagoas de maturação** o principal objetivo de tratamento é a remoção de organismos patogénicos. Com a evolução da tecnologia da lagunagem, surgem, novas classes de lagoas de estabilização que têm como objetivo, não só, a remoção de matéria orgânica e remoção de organismos patogénicos, como também a remoção/recuperação de nutrientes e remoção de metais pesados, como é o caso das lagoas fotossintéticas de alta carga (*High Rate Algal Ponds*) e das lagoas de biomassa fixa (*Attached-growth Waste Stabilization Ponds*) (Gonçalves, 2018).

O funcionamento de cada tipo de lagoa está representado de forma esquematizada nas Figura 32, Figura 33 e Figura 34.

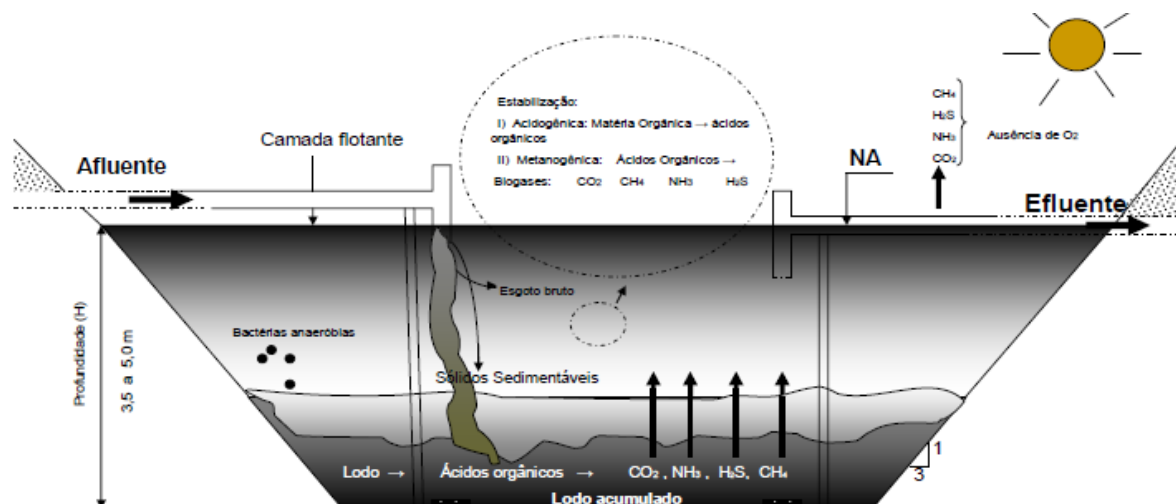


Figura 32 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização anaeróbia (SILVA FILHO, 2007)

Os **sistemas de lagunagem anaeróbios** (Figura 32) são reatores de fluxo contínuo que operam a temperatura ambiente e com baixas cargas de matéria orgânica. Por isso, são utilizados em fases de pré-tratamento para a remoção de BOD, COD e SS em águas residuais domésticas e industriais. Estes sistemas são, normalmente, inseridos em linhas de tratamento envolvendo lagoas facultativas e aeróbias. Os mecanismos de tratamento envolvem a remoção de SS (Sólidos Suspensos), por meio da sedimentação, e, portanto, o BOD associado também é removido. Os sólidos sedimentados são digeridos anaerobicamente com a produção de biogás (Alexiou *et al.*, 2003).

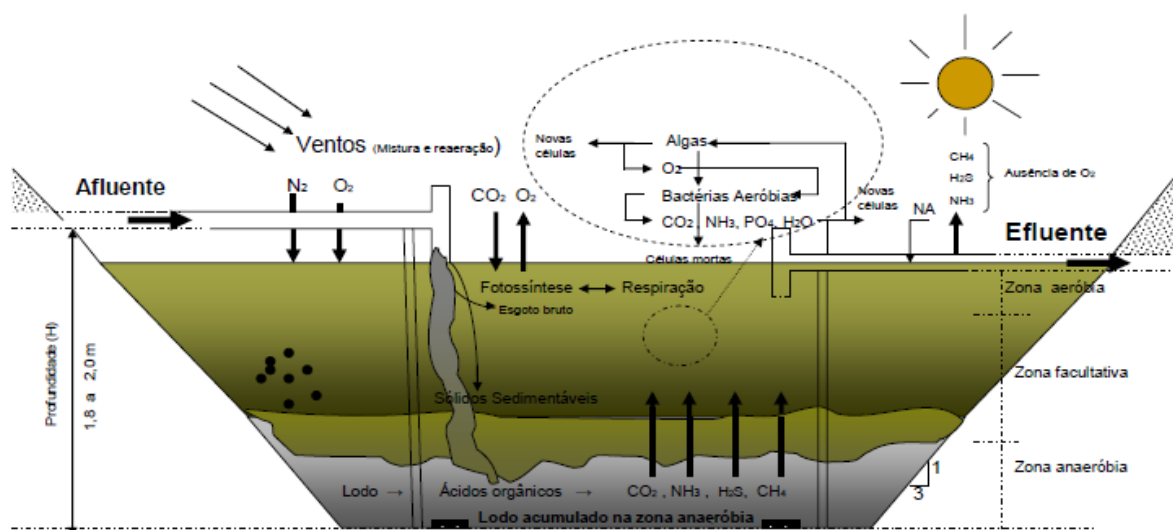


Figura 33 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização facultativa (SILVA FILHO, 2007)

A Figura 33 representa uma **lagoa facultativa**, este sistema de tratamento demora vários dias e é constituído por mecanismos que ocorrem nas três zonas da lagoa denominadas por: *zona aeróbia*, *zona facultativa* e *zona anaeróbia*. A **zona anaeróbia** é formada por matéria orgânica sedimentada, dando origem a lamas que permanecem no fundo da lagoa e são decompostas e convertidas, maioritariamente, em CO_2 e CH_4 , restando apenas material inerte sedimentado. Na **zona aeróbia**, onde ocorre a entrada da luz a produção de oxigénio realizada pelas algas presentes é dependente, não só da energia luminosa, mas de diversos outros fatores, como a disponibilidade de nutrientes e da temperatura do meio. A zona onde pode haver presença ou ausência de oxigénio é na **zona facultativa**. Tendo em conta que a fotossíntese só ocorre durante o dia, fazendo com que à noite possa prevalecer a falta de oxigénio na maior parte da lagoa, é importante que haja diversos grupos de bactérias responsáveis pela estabilização da matéria orgânica, que possam sobreviver e proliferar tanto na presença como na ausência de oxigénio. As algas utilizam o CO_2 libertado pelas bactérias, sintetizam a matéria necessária para o seu próprio desenvolvimento e libertam oxigénio na presença de luz solar. Assim, são as principais responsáveis pela produção da maioria do oxigénio dissolvido na lagoa (TRUPPEL, 2002).

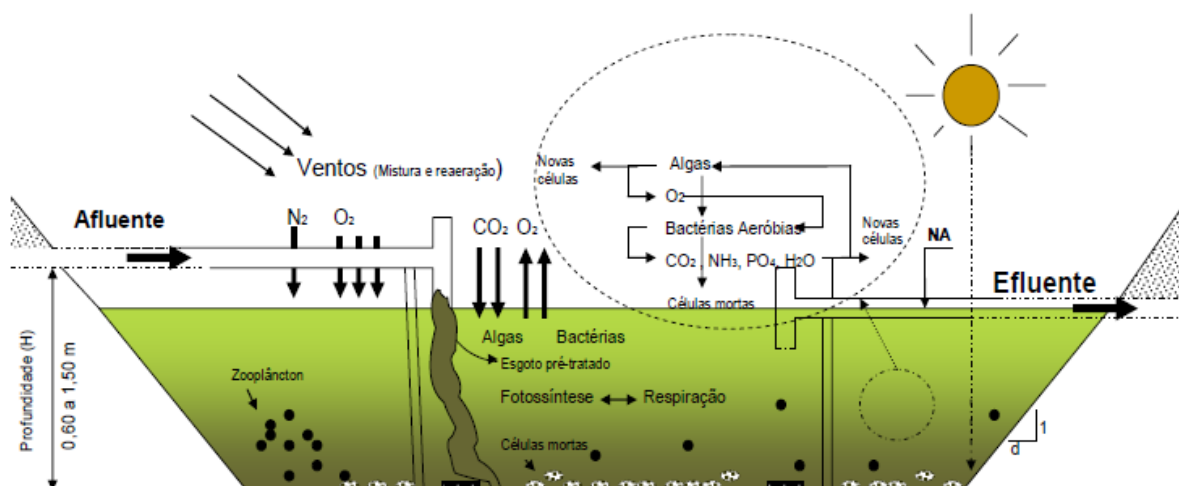


Figura 34 - Representação do funcionamento de uma lagoa de estabilização aeróbia (Silva F., 2007)

Relativamente às **lagoas aeróbias** (Figura 34), a sua principal finalidade é a remoção de nutrientes e patogénicos, ou seja, o seu principal objetivo é a desinfecção do efluente. São mais rasas que as outras, para permitir uma entrada de raios UV mais eficaz. Os principais fatores que influenciam o processo de remoção de bactérias, vírus e outros microrganismos presentes são: menores profundidades, maior introdução de energia solar, elevado pH e elevada concentração de oxigénio dissolvido (Silva F., 2007).

As vantagens do tratamento por lagunagem são os baixos custos de investimento e exploração e razoáveis percentagens de remoção da BOD (Carência Bioquímica de Oxigénio/*Biological Oxygen Demand*) e SST (Sólidos Suspensos Totais). Por outro lado, têm alta sensibilidade às baixas temperaturas, necessitam de grandes superfícies e originam maus odores (Machado, 2016).

5.3 WETLANDS, FITO-ETAR's OU LEITO DE MACRÓFITAS

São sistemas biológicos de tratamento de águas residuais em que são utilizadas culturas de plantas que interagem diretamente com as águas residuais e servem de suporte a microrganismos. O tratamento de águas residuais que utiliza plantas aquáticas baseia-se no crescimento cooperativo entre as plantas e os microrganismos associados a estas. A degradação da matéria orgânica é atribuída aos microrganismos que proliferam na rizosfera e rizoplane. Uma vez estabelecidos nas raízes das plantas, os microrganismos estabelecem uma relação simbiótica com a planta aquática. Esta relação normalmente produz um efeito sinérgico que resulta num aumento da taxa de degradação de águas residuais junto às

raízes. A matéria orgânica degradada pelos microrganismos origina produtos de fácil absorção, que as plantas utilizam como fonte de alimento. Por sua vez, os microrganismos também absorvem os metabolitos libertados pelas raízes das plantas. Os sólidos em suspensão também são removidos devido às cargas elétricas que estão associadas às raízes. Estas atraem matéria coloidal que fica adsorvida e é posteriormente utilizada, quer pelas plantas quer pelos microrganismos. A zona radicular é uma zona oxigenada, pois as plantas têm a capacidade de deslocar oxigénio existente nas folhas para as raízes permitindo a formação de zonas aeróbias. A sombra provocada pelas plantas limita a entrada de luz solar evitando o crescimento explosivo de algas. Todos estes mecanismos aqui mencionados permitem um tratamento bastante eficiente das águas residuais. Para além disto, durante a passagem da água através do meio poroso (leito artificial), das raízes e rizomas, ocorrem também fenómenos de filtração, de oxidação-redução, de absorção e de precipitação, de que resulta uma remoção de nutrientes, parcialmente de azoto e fósforo, juntamente com uma redução dos microrganismos patogénicos (Macário et al., 2018).

As *wetlands* podem ser do tipo naturais, já inseridas nos ecossistemas, ou construídas (artificiais), sendo projetadas pelo Homem de forma a reproduzir um sistema o mais real possível, com a possibilidade de ser otimizado.

5.3.1 WETLANDS NATURAIS

Estes sistemas têm importantes funções dentro dos ecossistemas onde estão inseridos, sendo as mais importantes (Salatti, 2003):

- A capacidade de regularização de fluxos de água, amortecendo os picos de enchentes;
- A capacidade de modificar e controlar a qualidade das águas;
- A sua importância na função de reprodução e alimentação da fauna aquática;
- A proteção da biodiversidade como área de refúgio da fauna terrestre e
- O controlo da erosão, evitando o assoreamento dos rios.

Apesar da potencialidade destes sistemas em controlar o fluxo de nutrientes e poluentes, vários esforços conservacionistas inibiram a sua utilização para o tratamento de águas residuais. Este fator originou diversos estudos para o desenvolvimento de *wetlands* construídas com o intuito de reproduzir fielmente estes sistemas, otimizando as suas características ideias para a finalidade em estudo (Salatti, 2003).

5.3.2 WETLANDS CONSTRUÍDAS OU ARTIFICIAIS

As *wetlands* construídas ou artificiais, compreendem diversas estratégias para a simulação de *wetlands* naturais, utilizando os princípios básicos de modificação da qualidade da água das áreas alagadas naturais. Do ponto de vista prático, estes sistemas artificiais oferecem melhores oportunidades para o tratamento de águas poluídas do que os naturais, pois podem ser maximizados quanto à sua eficiência, quanto à diminuição dos parâmetros BOD e COD, aos processos de remoção de nutrientes e ao controlo do sistema hidráulico e vegetação (Salatti, 2003).

Há basicamente dois tipos principais de *wetlands* artificiais, classificadas de acordo com o nível da coluna de água: as de fluxo superficial e as de fluxo subsuperficial, sendo esta última dividida em fluxos subsuperficial horizontal e vertical, dependendo da direção do fluxo do fluido. Estes tipos de *wetlands* são descritos a seguir (Benassi et al., 2018).

Wetlands artificiais de fluxo superficial

Os sistemas de fluxo superficial são das tecnologias mais antigas e consistem num canal raso ou sequência de canais, preenchidos com 20-30 cm de substrato adequado para suportar vegetação enraizada, com uma camada de água com profundidade entre 0,1 m a 0,8 m, dependendo da finalidade do tratamento, das características da água residual e das condições climáticas. As estruturas de entrada e saída do efluente são colocadas ao mesmo nível. É necessário existir, no fundo do sistema, uma barreira impermeável, por exemplo solo nativo, para evitar infiltrações e, consequentemente, contaminação das águas subterrâneas. Nestes sistemas, o esgoto flui horizontalmente acima da superfície do leito, semelhante à maioria das zonas húmidas naturais, e exposto à atmosfera. Por esta razão, há uma elevada probabilidade de exposição humana a organismos patogénicos e, portanto, estas *wetlands* são geralmente utilizadas posteriormente aos processos de tratamento secundário (Santos, 2016).

Como observado na Figura 35, os sistemas com escoamento superficial apresentam uma superfície líquida acima do meio de enchimento e permitem boas condições para a formação de biofilmes. É de acordo com a configuração do leito, a altura do nível do líquido, as características do efluente e da planta usada, da temperatura e de outras condições ambientais, que podem predominar mecanismos de remoção aeróbios, anaeróbios e anóxicos (Pinto, 2009).

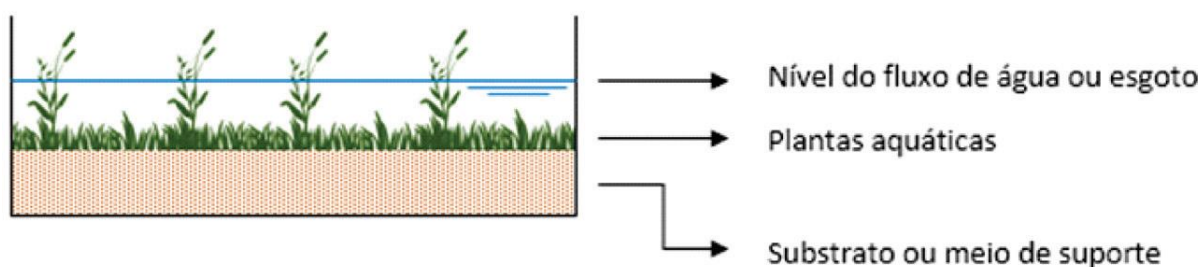


Figura 35 - Representação gráfica de uma *wetland* artificial de fluxo superficial (Benassi et al., 2018)

A grande vantagem destes sistemas é que imitam fielmente os sistemas naturais e, portanto, são assumidos como habitat naturais para inúmeras espécies e, assim, promovem a biodiversidade dos ecossistemas. Por outro lado, exigem grandes áreas de terra e operam a uma faixa de temperaturas muito restrita devido à sensibilidade do ecossistema, sendo as temperaturas quentes as mais ideais (Santos, 2016).

Wetlands artificiais de fluxo subsuperficial

Nas *wetlands* artificiais de fluxo subsuperficial (Figura 36), as águas residuais entram pela superfície do sistema, atravessando, por ação da gravidade o material filtrante até chegar às raízes das plantas e, posteriormente, ao fundo do sistema. Este método é o preferencial quando se pretende evitar a transmissão de doenças e produção de maus odores, visto o efluente não permanecer na superfície, não estando exposto aos fatores externos. A passagem pelo substrato resulta no contacto com bactérias facultativas e com as raízes das macrófitas, onde ocorre a depuração da matéria orgânica através da formação de biofilmes. O nível da água não deve ultrapassar um terço da altura do substrato, mantendo assim um maior controlo da passagem do líquido através do leito. Estes sistemas podem ser de fluxo horizontal ou de fluxo vertical, dependendo da sua configuração. No sistema horizontal, o efluente entra de um lado do sistema, atravessa-o no sentido horizontal, e é drenado na outra extremidade, enquanto que no fluxo vertical há, normalmente, distribuição da água por toda a superfície do sistema, atravessando o leito filtrante, através de um pequeno declive no fundo para permitir a sua saída na outra extremidade (Shinohara, 2021) (Zinato & Guimarães, 2017).

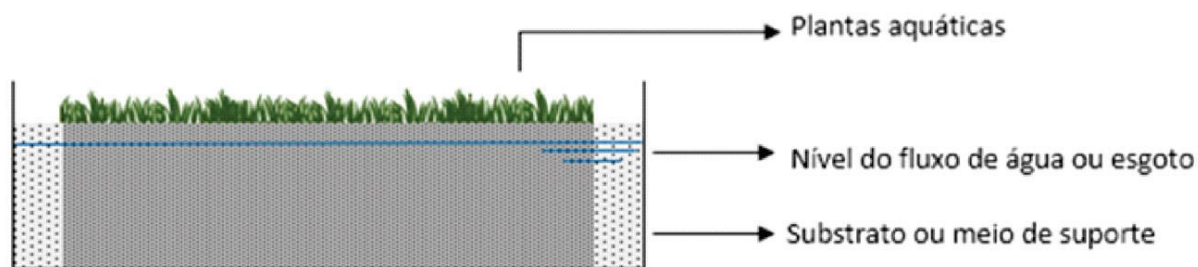


Figura 36 - Representação gráfica de uma *wetland* artificial de fluxo subsuperficial (Benassi et al., 2018)

Fluxo Subsuperficial horizontal

Neste caso, o efluente é descarregado numa das extremidades do leito, deslocando-se horizontalmente, atravessando o meio poroso e a rizosfera. O solo apresenta geralmente uma pequena inclinação, promovendo o fluxo horizontal. Estes sistemas são os mais usuais na maioria dos países europeus e mediterrâneos. As principais vantagens face a sistemas de fluxo superficial advêm principalmente da minimização de condições propícias à formação de mosquitos e outros organismos vetores da propagação de doenças, em virtude da água residual ser mantida abaixo da superfície do leito. Devido às baixas taxas de transferência de oxigénio neste caso, são os processos anaeróbios que degradam a matéria orgânica. A remoção de sólidos suspensos e redução de carência bioquímica de oxigénio são processos interligados neste tipo de sistemas. Na Figura 37 consta uma representação de um leito de macrófitas de fluxo subsuperficial horizontal (Mavioso, 2010).

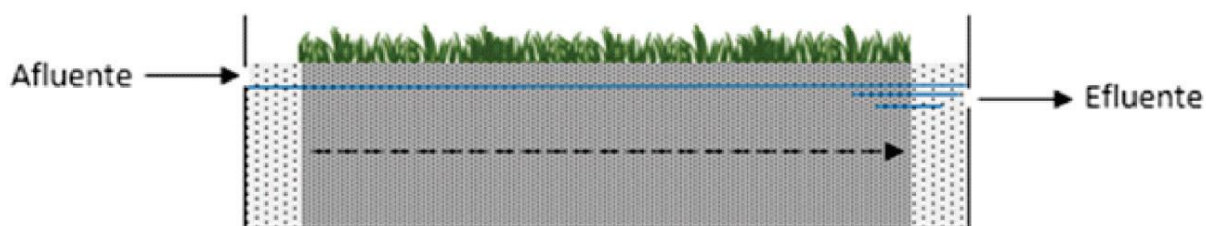


Figura 37 - Representação gráfica de uma *wetland* artificial de fluxo subsuperficial horizontal (Benassi et al., 2018)

Fluxo Subsuperficial Vertical

Nos sistemas de fluxo vertical, o efluente é distribuído pela superfície do leito num escoamento preferencialmente vertical, através do meio poroso. A base do leito, de geometria plana, dispõe de um sistema de drenagem, geralmente tubagens perfuradas, destinadas a recolher o efluente tratado e conduzi-lo para a saída. Neste caso, existem dois sentidos de escoamento, o vertical descendente, mais comum, e o vertical ascendente. Nos

sistemas descendentes a água residual passa verticalmente pela superfície do leito, infiltrando-se rapidamente, até ser recolhida na parte inferior, junto à base do leito. Nos sistemas ascendentes o escoamento ocorre em contracorrente e por capilaridade, normalmente com a utilização de sistemas mecanizados. A eficiência de remoção de poluentes nestes sistemas depende da capacidade de arejamento do solo e, portanto, das propriedades do material de enchimento (Mavioso, 2010). A Figura 38 representa um leito de macrófitas de fluxo subsuperficial vertical.

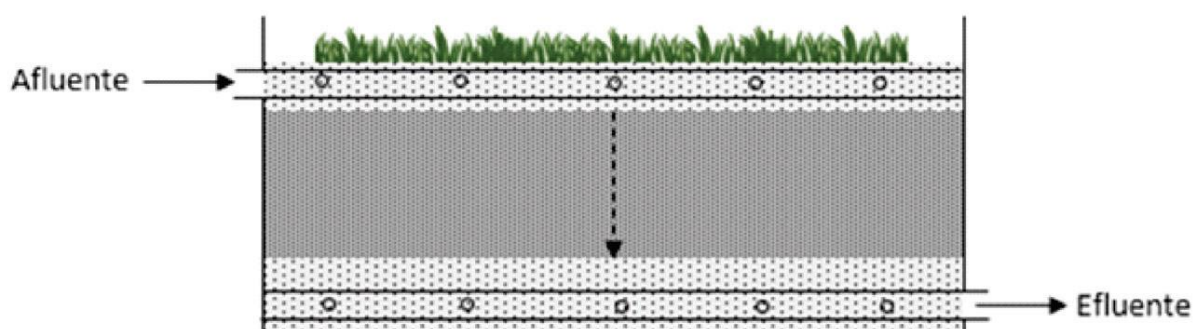


Figura 38 - Representação gráfica de uma *wetland* artificial de fluxo subsuperficial vertical (Benassi et al., 2018)

A associação dos dois sistemas em simultâneo são denominados de sistemas mistos ou híbridos (Figura 39) e têm como objetivo otimizar a exploração desta técnica, apresentando melhores eficiências na capacidade de remoção de nutrientes.

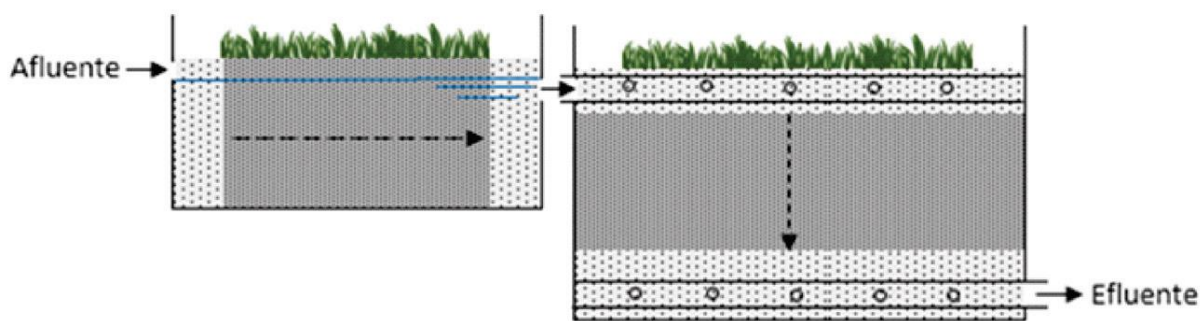


Figura 39 - Representação gráfica da aplicação dos sistemas de *wetland* artificial de fluxo superficial vertical e horizontal em simultâneo (Benassi et al., 2018)

As *wetlands* construídas têm capacidade para remover diversos poluentes. A Tabela 5 apresenta um resumo dos principais constituintes das águas residuais e os mecanismos de remoção destes sistemas.

Tabela 5 - Principais constituintes das águas residuais e os mecanismos de remoção ocorridos nas *wetlands* artificiais (Poças, 2015)

Constituintes	Mecanismos de remoção
Sólidos Suspensos	Sedimentação e filtração
Metais	Precipitação, utilização pela planta, oxidação/redução, sedimentação e filtração
Patogénicos	Predação, morte natural, radiação UV e utilização de antibióticos provenientes das raízes das macrófitas
Fósforo	Adsorção, utilização pela planta e adsorção
Azoto	Utilização pela planta
Orgânicos solúveis	Degradação aeróbia e anaeróbia, nitrificação e desnitrificação

Em conclusão, na seleção da *wetland* artificial, aplicada a uma situação de tratamento de águas residuais, devemos ter em conta as vantagens e desvantagens de cada uma de forma a fazer a escolha indicada para uma determinada localização. Para auxiliar na seleção, a Tabela 6 resume as principais vantagens e desvantagens de cada tipo de *wetland* artificial.

Tabela 6 - Principais vantagens e desvantagens dos tipos de *wetlands* artificiais abordados (Adaptado de M. Santos, 2016)

Tipo de <i>wetland</i>	Vantagens	Desvantagens
Fluxo Superficial	Construção Fácil; Custos de operação e manutenção baixos; Produção mínima de lamas e excelente integração paisagística e Eficiências de remoção elevadas;	Necessita de uma grande área, o que implica elevados custos de capital; Dependência sazonal; Proliferação de roedores e odores desagradáveis; Risco de transmissão de doenças devido à exposição humana e de animais
Fluxo Subsuperficial Vertical	Construção fácil, Custos de construção, operação e manutenção moderados; Baixa produção de lamas; Baixa proliferação de mosquitos e menor odor gerado; Boas eficiências de remoção.	Remoção dependente do clima e características da água; Necessário pré-tratamento das águas residuais antes de entrar na <i>wetland</i>;
Fluxo Subsuperficial Horizontal	Construção fácil; Custos de construção, operação e manutenção moderados; Baixa produção de lamas; Baixa proliferação de mosquitos e menor odor gerado; Boas eficiências de remoção.	Necessita de uma área relativamente grande; Remoção dependente do clima e características da água; Necessário pré-tratamento das águas residuais antes de entrar na <i>wetland</i>; Transferência limitada de oxigénio, o que implica uma redução da nitrificação.

→ Macrófitas

As plantas cultivadas nos sistemas naturais são denominadas por hidrófitas, macrófitas aquáticas, hidrófitas vasculares, plantas aquáticas ou plantas aquáticas vasculares. O termo *macrófitas* é o mais utilizado. Estas plantas crescem em ambientes de transição entre sistemas aquáticos e terrestres e produzem quantidades expressivas de matéria seca, com elevado teor de nutrientes. As macrófitas precisam de nutrientes para o seu desenvolvimento como todas as plantas, podem ocupar extensas áreas e o seu desenvolvimento reflete a qualidade da água em que vivem. Estes vegetais são classificados de acordo com o seu biótipo e reflete o grau de adaptação das macrófitas ao meio aquático (Poças, 2015). Existem cinco tipos de macrófitas aquáticas, como representado na Figura 40.

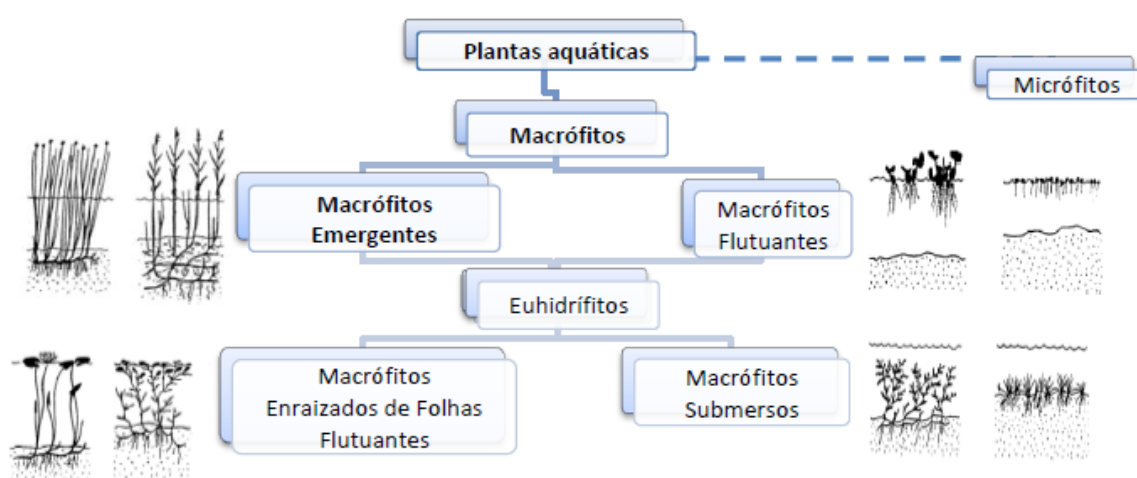


Figura 40 - Tipos de plantas aquáticas encontradas nas *wetlands* (A. Mendes, 2010)

De acordo com Pinto (2009), cada tipo de macrófita é definida da seguinte maneira:

→**Macrófitas emergentes:** Plantas enraizadas no solo com a maior parte dos caules e folhas fora de água. Encontram-se geralmente nas margens dos cursos e massas de água, como por exemplo, o caniço *Phragmites australis*, as espadanas *Typhía latifolia*, os lírios dos pântanos *Íris pseudocorus* e o junco *Scirpus lacustris*.

→**Macrófitas flutuantes:** Plantas que flutuam à superfície da água, não estando enraizadas no leito, como por exemplo, o jacinto-aquático *Eichhornia crassipes*, as lentilhas-da-água *Lemna spp.* e a *Azzola filiculoides*. Estas têm a maior parte dos caules e folhas emersos.

→**Macrófitas enraizadas com folhas flutuantes:** Plantas fixadas ou ancoradas ao leito, mas que têm a maioria das folhas à superfície, como por exemplo, a pinheirinha de água *Myriophyllum aquaticum* e os nenúfares (*Nymphaea spp.* e *Nuphar spp.*).

→**Macrófitas submersas:** Plantas enraizadas ao leito ou em suspensão na água, que têm as partes vegetativas abaixo da superfície da água embora, muitas vezes os órgãos reprodutores estejam à superfície ou acima dele. Alguns exemplos são o limo meste *Potamogeton pectinatus* e o *Elodea canadensis*.

Por fim e após análise de todas as tecnologias existentes para o tratamento de águas residuais de forma natural, a seleção da melhor tecnologia deve ser feita com base num conjunto definido de critérios de sustentabilidade, que podem ser facilmente modificados e ajustados às condições locais específicas. Os sistemas de tratamento mecânico, que utilizam processos naturais, ou seja, sistemas naturais artificiais ou construídos, tendem a ser usados quando os solos adequados não estão disponíveis para a implementação de sistemas naturais. Os sistemas de lagoas podem ser suplementados por pré-tratamentos ou após os tratamentos primários ou secundários, são utilizados para tratar uma variedade de águas residuais e funcionam num ampla variedade de condições climáticas. Já os sistemas de tratamento em solos aproveitam os nutrientes contidos nas águas residuais e, através do crescimento da planta e da sua adsorção pelo solo, convertem os nutrientes biologicamente disponíveis em formas menos disponíveis de biomassa, que é então recolhida para uma variedade de usos, como suplementos para ração de gado (Farmer, 1991).

Voltando a analisar a Figura 23, verifica-se que em Portugal, os locais onde existem ainda problemas na qualidade da água e na sua captação, são nas zonas Norte e Centro do País. Assim sendo, é nestes locais onde se incidirá o próximo capítulo, Caso Aplicação, com o objetivo de estudar e analisar as características meteorológicas, geológicas e populacionais destes locais numa tentativa de solucionar o problema da falta de acessibilidade a águas tratadas, selecionando o método de tratamento de águas residuais adequado às necessidades destas zonas.

6. CASO DE APLICAÇÃO

Um dos objetivos da presente dissertação é disponibilizar informação relativa à situação vivida em Portugal, identificando as principais zonas com um sistema de saneamento fraco e/ou inexistente de forma a estudar a implementação de um dos sistemas de tratamento de águas residuais analisados no Capítulo 5. Será sobre este objetivo que incidirá o presente capítulo.

6.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ZONA REFERENCIADA PARA IMPLEMENTAÇÃO DE UM SISTEMA NATURAL DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Relativamente ao abastecimento de água, a nível nacional, 95% da população é servida por rede pública. Sendo que as áreas predominantemente urbanas são as que apresentam maiores níveis de acessibilidade física ao serviço (99%), seguidas das áreas mediantemente urbanas (94%) e em último lugar as áreas predominantemente rurais (90%). No que se refere ao saneamento de águas residuais, Portugal tem níveis de acessibilidade física a este serviço na ordem dos 81%, sendo que destes, 78% são encaminhadas para ETAR, ou seja, 3% da população está servida por rede de coletores, mas sem ETAR. A tipologia da área de intervenção, de rural para urbana, tem associada diferentes taxas de acessibilidade física, de 95% nas áreas predominantemente urbanas, para 77% nas áreas mediantemente urbanas e 69% nas áreas predominantemente rurais (Associação Portuguesa do Ambiente, 2015).

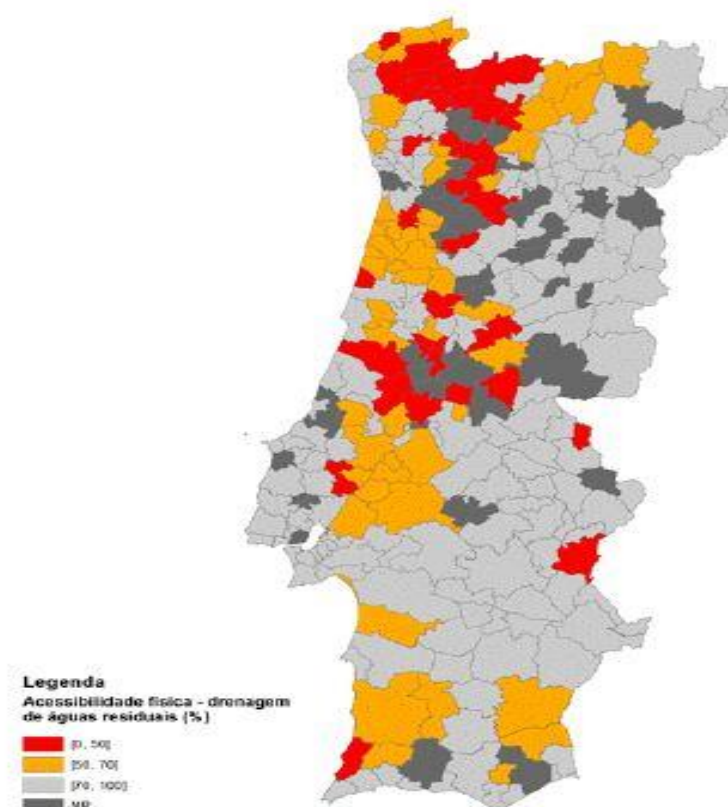


Figura 41 - Acessibilidade física do serviço de recolha e drenagem de águas residuais inferior a 70% (PENSAAR 2020)

De forma a perceber a dimensão nacional no que se refere à acessibilidade física do serviço de recolha e drenagem de águas residuais (Figura 41), a APA questionou cerca de 265 Entidades Gestoras da Água, das quais 42 não responderam (NR) e 76 têm uma taxa de cobertura igual ou inferior a 70%, que corresponde a um total de 1 245 605 alojamentos.

Comparando a Figura 23 com a Figura 41, continua-se a verificar que é na zona Centro-Norte de Portugal que incide a maior carência na acessibilidade física ao saneamento de águas residuais. Esta zona inclui os concelhos de Leiria, Santarém e Castelo Branco, havendo, como confirmado nas respetivas figuras, outros com iguais necessidades.

A ZERO – Associação Sistema Terrestre Sustentável analisou os dados relativos ao saneamento em Portugal Continental e elaborou uma ranking com os municípios com o pior serviço. Estes dados tiveram como base o RASARP – Relatório Anual dos Serviços de Água e Resíduos em Portugal, fornecido pela ERSAR – Entidade Reguladora dos Serviços de Água e Resíduos, publicado em 2015. Este estudo aponta para um valor médio de 83% de taxa de cobertura dos serviços de saneamento no Continente e permite constatar que apenas cerca de um terço dos municípios, 86 num total de 278, apresentam taxas de acessibilidade física superiores a 90%. Numa situação oposta, existem 41 municípios, urbanos e rurais, com taxas de acessibilidade física do serviço inferiores a 50%, sendo que

11 destes, todos rurais, apresentam taxas inferiores a 30% (ZERO, 2016) , indicados na Tabela 7.

Tabela 7 - Municípios com taxas de acessibilidade física ao serviço inferiores a 30% (ZERO, 2016)

Município	Taxa de acessibilidade física ao serviço (%)
Castelo de Paiva	11
Celorico de Basto	16
Baião	19
Ferreira de Zêzere	20
Mondim de Basto	21
Figueiró dos Vinhos	22
Sever de Vouga	22
Vila Nova de Poiares	24
Cinfães	25
Penela	26
Vila Verde	29

Após a análise dos locais com maior necessidade de recursos a sistemas de tratamento de águas residuais, selecionou-se a zona de **Ferreira de Zêzere** (Figura 42), por ser um dos municípios com acessibilidade física inferior a 30% e se localizar numa zona rica em natureza, apresentando potenciais características para a construção de um sistema natural de tratamento de águas.



Figura 42 - Indicação da localização do concelho Ferreira de Zêzere no distrito de Santarém. Fonte: <https://www.jornaldeabrant.es.pt>

O concelho de Ferreira do Zêzere, tem uma área de aproximadamente 190 Km². É limitado a Norte pelo concelho de Alvaizere (distrito de Leiria), a Sul pelo concelho de Tomar, a Oeste por Vila Nova de Ourém e a Este por Vila de Rei (distrito de Castelo Branco). Apresenta uma densidade populacional de cerca de 315,7 habitantes por Km, 8619 habitantes no total, registado nos censos 2011. Em termos de geologia o concelho insere-se numa zona com uma estrutura geológica variada, com terrenos provenientes da desagregação de xistos, quartzitos e grés, sendo constituído pela maior parte dos solos com média permeabilidade. O concelho é limitado a nascente pelo importante curso de água – Rio Zêzere e, no qual, se situa a Albufeira do Castelo de Bode. Toda a região tem um subsolo bastante rico em água, de acordo com a Figura 43 (Ferreira, 2019). No que se refere à temperatura, os valores médios anuais são de 16°C, verificando-se no mês de janeiro uma média a rondar os 9°C. Nos meses de verão, as temperaturas são, normalmente, superiores a 23°C, concluindo, que é uma localidade com temperatura amena durante a maioria do ano (*In Website ECOS do Ribatejo*, n.d.).

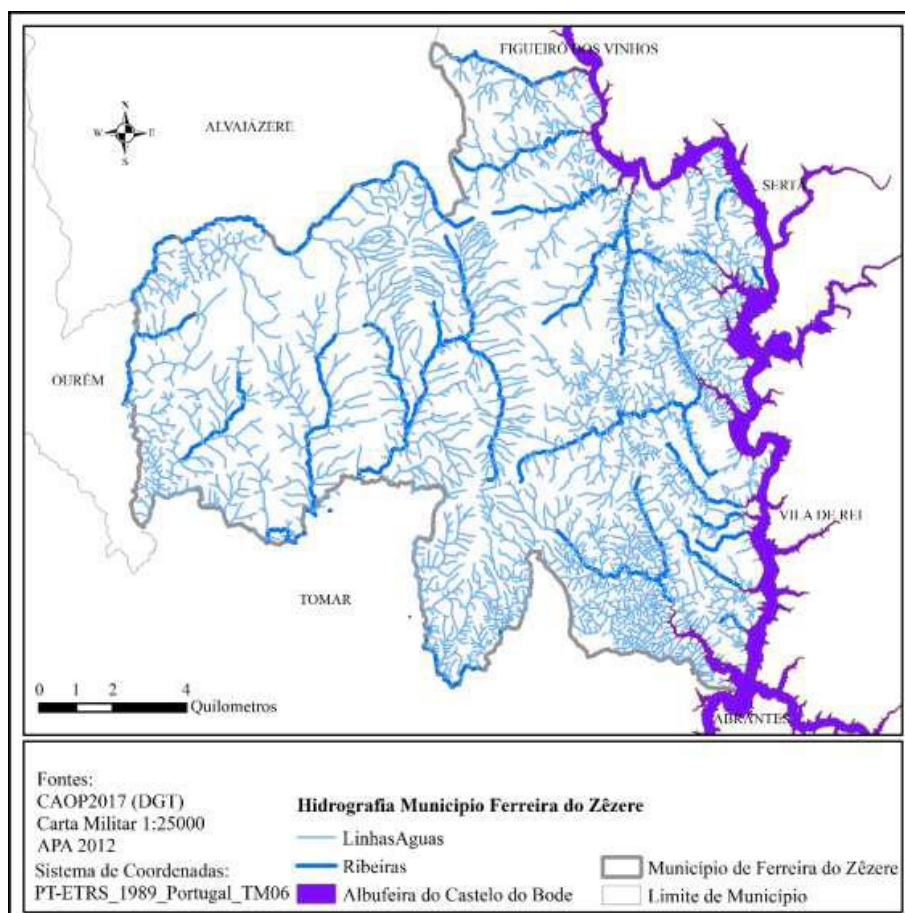


Figura 43 - Hidrografia do concelho de Ferreira de Zêzere (Ferreira, 2019)

Da análise da Figura 44, verifica-se que a utilização do solo é predominantemente Florestas, seguida da Agricultura e Corpos de água, o que evidencia que é uma localidade com as características indicadas para a implementação de sistemas naturais de tratamento de águas residuais.

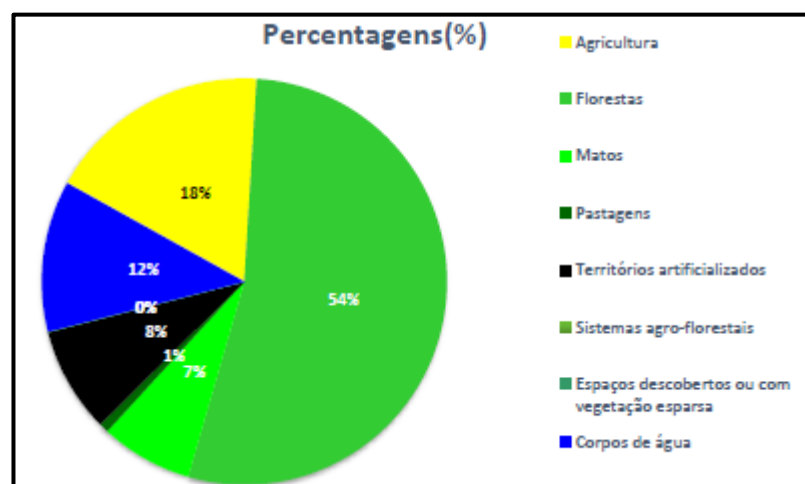


Figura 44 - Classes de ocupação do solo no concelho de Ferreira de Zêzere (Ferreira, 2019)

Na seleção do sistema de tratamento a implementar pretende-se que este seja economicamente e ambientalmente viável. O sistema selecionado para este caso particular foram as **wetlands construídas**. Apesar de não ter sido testado na prática, ou seja, não se realizou o dimensionamento nem a implementação desta tecnologia, o processo de seleção foi fundamentado segundo determinadas características do local e da população, como a área necessária/custo, a eficiência da tecnologia na remoção de poluentes e a falta de uma rede de saneamento na referida localidade. Ressalva-se que, apesar de ter sido esta a tecnologia escolhida para o caso em estudo, não se descarta a aplicabilidade de outras hipóteses.

6.2 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA NATURAL WETLAND EM FERREIRA DE ZÊZERE

O objetivo da presente dissertação consiste em propor um sistema alternativo para o tratamento de águas residuais recorrendo a métodos naturais. Após a análise da bibliografia, verificou-se uma necessidade relevante na zona de Ferreira do Zêzere e considerou-se que o método natural *wetland* poderá ser uma potencial solução.

Normalmente, os passos iniciais necessários para realizar a implementação em escala real de uma *wetland* construída são (Sousa, 2019):

→ **Análises ao solo** de forma a avaliar as características do solo e determinar os parâmetros relevantes (caracterização granulométrica para aferir a textura do solo e classificá-lo quanto à sua composição, solo arenoso, argiloso, etc e ensaios de respirometria, que determina a respiração microbiana de modo a verificar a capacidade de biodegradação de contaminantes, e análise à composição química do solo, densidade, pH e humidade, e

→ **Análises às águas residuais produzidas** pela população para determinar a sua qualidade, de forma a perceber se é possível reutilizá-las depois de passarem pela *wetlands*.

Em Ferreira de Zêzere a escolha do local preciso para a construção da *wetland* deve ter em conta a disponibilidade de área, topografia, permeabilidade do solo, recursos ambientais existentes, assim como possíveis impactos na vizinhança. O melhor local será o que estiver mais próximo da fonte de efluente e com ligeira inclinação, para que a água flua através da gravidade.

O sistema projetado para o caso em estudo foi baseado nos critérios de Shinohara (2021) para um caso semelhante. No entanto, neste caso o sistema é constituído apenas por um único estágio, como é possível verificar na Figura 45.

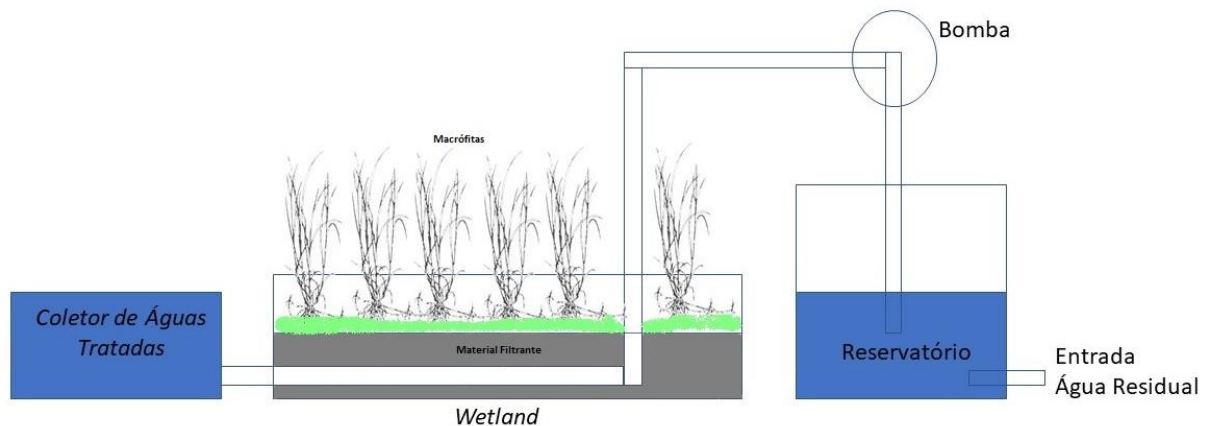


Figura 45 - Proposta de um sistema *wetland* para tratamento de águas residuais. Autoria Própria, adaptado de Shinohara, 2021.

O sistema construído para o objetivo proposto consiste numa *wetland* vertical, conforme estudos realizados por Seco (2008) e Shinohara (2021), constituído por:

1. Um **reservatório**, alimentado pelas águas residuais domésticas e que funcionará como um tratamento primário (tanque séptico). Neste tanque é realizada a separação e transformação da matéria sólida contida no efluente, recorrendo a processos físicos e biológicos, como filtração, sedimentação e digestão biológica. Estes tanques podem ser enterrados no solo e compostos por filtros, biofilmes e microrganismos decompositores. Após finalizado o tempo de retenção necessário para a primeira fase de purificação do efluente, este é bombeado para o sistema de *wetland*;
2. O **sistema de *wetland*** é considerado como tratamento secundário e é assegurado por um leito de macrófitas, constituído pelo material de enchimento, que além do seu funcionamento como filtro, serve também de suporte às plantas. As macrófitas utilizadas com maior frequência em Portugal são as *Typhas latifolia*. O enchimento deve ser constituído com granulometria e altura diferentes, de modo a minimizar o risco de colmatção, normalmente é utilizada areia ou argila e, no fundo, brita, sendo esta a zona impermeável do sistema;
3. Após finalizado o processo de tratamento, o efluente é distribuído pela superfície do leito, através do meio poroso (areia ou argila). A base do leito, de geometria plana, dispõe de um sistema de drenagem, geralmente tubagens perfuradas, destinadas a recolher o efluente tratado e conduzi-lo para um **coletor**. Por fim, as águas tratadas deverão ser rigorosamente analisadas para verificar a eficiência do tratamento e a sua possível reutilização.

O facto de se ter optado por uma *wetland* contruída de fluxo vertical deve-se por ser um dos métodos mais utilizados em Portugal e, por isso, haver mais estudos em redor destes sistemas, no entanto, este tipo de fluxo tem tempos de retenção mais longos em comparação com outros sistemas, o que aumenta o tempo de processamento das águas residuais, sendo esta aplicação a mais indicada se o efluente se tratar de águas altamente poluídas. De forma a otimizar estes sistemas, principalmente se for necessária uma remoção de concentrações de nutrientes mais elevada, existem várias opções de arejamento ou adição de carbono ativo para aumentar a eficiência dos filtros.

Para o projeto de construção de uma *wetland* deve-se ter em conta, também, a sua dimensão necessária para cumprir as exigências propostas pelo município. Para tal, recorreu-se à bibliografia existente e encontrou-se vários modelos matemáticos, dos mais simples aos mais complexos, dependendo das variáveis a ter em consideração, e selecionou-se os seguintes para este caso em particular:

6.2.1 MODELOS PARA O DIMENSIONAMENTO DE UM SISTEMA WETLAND

Segundo Lambert (2018), a área necessária para a construção de uma *wetland* pode ser estimada através de uma cinética de primeira ordem obtida pela seguinte equação:

$$A = \frac{Q (\ln C_i - \ln C_f)}{KT p n} \quad \text{Eq.1}$$

Onde:

A = Área superficial necessária para a construção da *wetland* (m²);

Q = Caudal de entrada do efluente (m³/dia);

C_i = Concentração inicial de BOD no efluente (mg/L)

C_f = Concentração final de BOD no efluente (mg/L)

KT = Constante cinética da reação;

p = Profundidade média do filtro (m) e

n = Porosidade do material filtrante.

Após saber a área mínima necessária para atender o volume de água a ser tratado, Lambert (2018) também propôs um modelo para calcular o tempo de retenção necessário para tratar o referido volume:

$$V = \frac{Tr \cdot Q}{n} \quad \text{Eq.2}$$

Onde:

V = Volume de efluente (m³);

Tr = Tempo de retenção (dias);

Q = Caudal diário do efluente (m³/dia) e

n = Porosidade do meio filtrante.

Estes dois modelos são uma forma muito simplificada de se obter uma primeira noção para um situação real. Naturalmente que para um projeto futuro a uma escala maior deve-se ter em consideração outras variáveis, como por exemplo, o número de população a abastecer, a capacidade de tratamento das plantas, o tipo de filtros a utilizar como o seu tempo de vida e variáveis físicas, como a temperatura, pH, entre outras.

Sendo a presente dissertação uma primeira abordagem aos tratamentos naturais existentes para as águas residuais, como estes podem ser potenciais soluções ao impacto negativo dos sistemas comumente utilizados e a sua possível utilização no nosso país, as considerações apresentadas acima serão o reflexo dos próximos passos a dar para a implementação real de um projeto de saneamento eficiente e ambientalmente sustentável. Estes aspetos serão abordados no capítulo Trabalhos Futuros. Seguidamente será feita uma análise conclusiva de todo o estudo efetuado ao longo deste capítulo e se a implementação destes sistemas é ou não uma solução a considerar no futuro.

7. CONCLUSÃO

Os sistemas naturais de tratamento de águas residuais destacam-se pela sua aplicabilidade a situações mais peculiares, como é o caso presente. O dimensionamento de uma estação de tratamento de água residual deve ter em conta os consumos de água da população e quantidade de água residual produzida, de forma a projetar um sistema com capacidade para corresponder às exigências do município. As características da *wetland* construída deverão ter em consideração a qualidade das águas residuais produzidas (Sousa, 2019).

Neste trabalho foi proposto um sistema simples para atenuar um problema real de saneamento em Ferreira de Zêzere. Visto ser um sistema projetado apenas com recurso à bibliografia existente, não é possível concluir se o mesmo será eficaz em escala real, no entanto, todos os estudos já efetuados por outros autores sugerem resultados promissores. Neste caso, devido a ser um estudo prematuro e sem dados reais, considerou-se apenas que este sistema de tratamento de águas residuais teria como foco a remoção de contaminantes de forma a estas águas poderem ser reutilizadas em atividades que não exigem um controlo rigoroso da qualidade da água, como por exemplo, a agricultura.

Como já mencionado, um dos critérios mais importantes a ter em conta e que têm criado vários impedimentos para a implementação em grande escala destes sistemas é a sua relação custos/resultados. Isto porque os custos associados às *wetlands* verticais construídas, como neste caso em particular, estão dependentes do custo do substrato filtrante, custo do terreno e custos com o ciclo de vida do sistema. Assim sendo, estes sistemas têm um custo moderadamente elevado devido à necessidade de uma grande área de implementação e de grandes quantidades de brita, para além disso, como os leitos de macrófitas são considerados unidades de tratamento secundários, terá de existir sempre um tanque séptico de modo a evitar o entupimento da camada filtrante de brita do sistema.

Apesar de ser um projeto em fase embrionária e com poucas conclusões associadas, deve-se considerar que as soluções de tratamento de águas residuais por sistemas naturais apresentam vantagens significativas comparativamente aos atualmente utilizados. São sistemas de fácil implementação e operação, de baixo custo e ambientalmente sustentáveis. Poderão ser consideradas alternativas pouco viáveis para localidades com um número elevado de populações e muito industrializadas, no entanto, são boas opções para zonas ricas em natureza e pouco habitadas, sendo um bom ponto de partida para estudar estes sistemas como foco na reutilização de águas residuais na agricultura e alimentação animal, sendo as maiores atividades económicas em localidades rurais.

8. TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação apresentou como objetivo fundamental a investigação de soluções para o tratamento de águas residuais por métodos naturais e físicos, comparando estes com os sistemas atualmente utilizados, e apresentando uma proposta de implementação das novas soluções, tendo em conta o panorama do país.

Este trabalho incidiu maioritariamente sobre a bibliografia já existente, realizando uma compilação de toda a informação considerada fundamental sobre este tema, de modo a facilitar trabalhos futuros que abordem este tema.

Assim sendo, pode-se verificar que ainda existe um longo percurso pela frente para se atingir o objetivo final, de se construir e priorizar estes tipos de sistemas no nosso país de forma a combater a falta de acessibilidade de várias populações a um saneamento básico.

Para este projeto, o sistema natural escolhido foi uma wetland construída de fluxo vertical. Por isso, para trabalho futuro deve-se aprofundar com maior rigor todos os sistemas naturais existentes, fazer um levantamento de todas as características, vantagens e desvantagens de cada um, de forma a perceber qual é o mais adequado para uma certa localidade e população, tendo por base as necessidades a colmatar. É, também, imprescindível realizar trabalho de campo, para averiguar as características do local, a vegetação existente, a acessibilidade a outros meios necessários para o correto funcionamento do sistema e o impacto social e ambiental que o sistema pode trazer para o ecossistema em redor.

Após efetuado todo o trabalho de campo e de pesquisa é necessário estudar os modelos de dimensionamento para o projeto, com base em todas as variáveis recolhidas previamente, características das águas residuais, quantidade a tratar das mesmas, características e capacidade do meio filtrante, características e eficiência das macrófitas selecionadas, temperatura, oxigénio do sistema, pH, entre outras. Deve-se verificar a necessidade de pré-tratamentos, com recurso a métodos físicos, não esquecendo que todos estes parâmetros dependem fundamentalmente do destino dado à água tratada, que deve obedecer a exigências específicas consoante a reutilização pretendida.

De uma forma geral, haverá sempre aspetos a analisar e que serão otimizados ao longo do referido percurso. É importante salientar que projetos com esta envergadura são, muitas vezes, demorados e requerem alguns custos iniciais, mas são, cada vez mais, necessários para combater danos populacionais e, principalmente, danos ambientais. Assim sendo, é da nossa responsabilidade reunir todos os esforços necessários para cumprir-mos com a nossa obrigação de preservar o mundo em que vivemos, acrescentando, também, qualidade de vida.

9. BIBLIOGRAFIA

Alexiou, G. E., & Mara, D. D. (2003). Anaerobic waste stabilization ponds. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109(1), 241–252.

Alves, N. F. T. (2013). *Projecto de pré-dimensionamento de uma ETAR em Luanda - Angola.*

Amaral, R. O. M. (2011). *Avaliação de Soluções Naturais para o Tratamento de Excedentes Poluídos de Sistemas de Águas Residuais.*

APA. (2021). *Legislação Comunitária.* <https://www.apambiente.pt/agua/legislacao-comunitaria>

Associação Portuguesa do Ambiente. (2015). **PENSAAR 2020.** *Uma Estratégia ao Serviço da População: Serviços de Qualidade a um Preço Sustentável. Volume 1: Fase 1 - Situação de Referência.*

Ayaz, S., & Akça, L. (2001). *Treatment of wastewater by natural systems.*

Barbosa, J. A. (2008). *Valorização de Lamas Provenientes do Tratamento de Águas Residuais.* 61.

Barreto, J. M. P. N. (2016). *Estudo de ETAR.* 192.

Benassi, R. F., Subtil, E., et al. (2018). *Manual de sistemas de Wetlands construídas para o tratamento de esgotos sanitário: implantação, operação e manutenção.* Universidade Federal Do ABC, May, 52.

Borges, D. R. M. (2014). *Contribuição para a solução de tratamento de águas residuais domésticas da Vila de São Sebastião.* 92.

Cabrita, T. (2013). *Processos físico-químicos de tratamento de águas residuais industriais: estado da arte e novas fronteiras.* 1–112.

Coelho, R. (2020). As vulnerabilidades ambientais e os meios de as resolver: Um Green New Deal para Portugal. *Como Reorganizar Um País Vulnerável?*, 549–581.

CONAGUA. (2010). Volumen 26 Diseño de Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Municipales: Pretratamiento y Tratamiento Primario. In *Manual de agua potable, alcantarillado y saneamiento.*

Cruz, L. P. V. da. (1997). Principais técnicas de tratamentos de águas residuais. *Millenium*, 1.

Cunha, J. (2017). *Contribuição para a melhoria do processo de espessamento de lamas primárias em etar municipal.*

ECOS do Ribatejo. (n.d.). Concelho Ferreira do Zêzere. <http://www.ribatejo.com/ecos/fzezere/fzcaracterizacao.html>

ERSAR. (2019). SANEAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS. <http://www.ersar.pt/pt/setor/caracterizacao/saneamento-de-aguas-residuais>

Farmer, J. K. (1991). Wastewater treatment technologies. *Pollution Engineering*, 23(9), 66–70. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822121-1.00001-1>

Felipe, A., & Nascimento, A. (1989). *Adaptação E Melhoria Em Ete Com Tanque Imhoff Improvement in Imhoff Tank.*

Ferreira, M. (2019). *APLICADOS À GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS E INDUSTRIAIS : Caso de estudo do Concelho de Ferreira do Zêzere.* Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Fonseca, S. (2007). *Avaliação de uma estação de tratamento de esgoto doméstico por escoamento superficial.* Universidade Federal de Viçosa.

Franco, A. C. R., Gobbo, C. G. R., De Melo, G. L., & Da Silva, V. A. (2014). Tratamento de esgotos domésticos por disposição no solo pelo método de escoamento superficial. *Revista Em Agronegocio e Meio Ambiente*, 7(2), 391–411.

Freitas, E. C. B. de. (2020). *Seleção de Tecnologias de Tratamento de Esgoto Utilizando Análise Multicritério.*

Gaspar, A. da C. (2012). *Influência dos Sólidos em Suspensão Sobre a Eficiência de Desinfecção de Águas Residuais Tratadas por Radiação Ultravioleta.*

Gonçalves, E. S. (2018). *Contribuição para a Avaliação da Viabilidade da Reutilização de Águas Residuais Tratadas para Produção de Água para Consumo Humano . Estudo de Caso : Mindelo , São Vicente (Cabo Verde).*

Henze, M., Loosdrecht, M., Ekama, G., & Brdjanovic, D. (2008). *Biological Wastewater Treatment* (First Edit). Publishing, IWA.

INE. (2021). Número de ETAR em Portugal. https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0009607&selTab=tab0&xlang=pt

IPS - INCITE. (n.d.). <https://investigacao.ips.pt/incite>

Jorge, A., & Jesus, T. De. (2014). *Avaliação e otimização da ETAR de Celorico de Basto.*

Lambert, N. (2018). *PROPOSTA DE IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE WETLAND CONSTRUÍDA PARA O TRATAMENTO DE ESGOTO NA, ZONA RURAL DO MUNICÍPIO DE TOLEDO.*

Lara Cerdeira. (2008). *Acompanhamento do Arranque /Exploração de uma ETAR.* 1–121.

M. Granger, I. Marnane, & D. Alvarez. (2019). *Industrial waste water treatment pressures on environment* - EEA Industrial waste water treatment – pressures on Europe's environment.

Macário, M., Saraiva, A., Ericka, F., Luís, F., & Oliveira, M. (2018). *Leitos húmidos construídos como alternativa aos sistemas de tratamento de águas residuais convencionais.* *Revista Da UIIPS*, 6(3), 83–97.

Machado, T. (2016). *Projeto e Exploração de Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR's).* Universidade da Madeira.

Marecos do Monte, Helena; Albuquerque, A. (2010). *Reutilização de Águas Residuais.*

Maria, D., & Martins, D. E. A. (2017). *Optimização da sedimentação primária no tratamento de águas residuais : Simulação e aplicação de técnicas estatísticas.*

Maria, F., Santos, D. O. S., & Ferreira, T. (2019). *Estudo técnico e económico em sistemas de bombagem de águas residuais.*

Marques, R. C., & Simões, P. (2020). Revisiting the comparison of public and private water service provision: An empirical study in Portugal. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1–21. <https://doi.org/10.3390/w12051477>

Marques, V. (2009). *Tratamento de efluentes industriais por processos Mendes físico – químicos.*

Mavioso, J. F. (2010). *Tratamento de águas residuais através de Leitos de Macrófitas - A influência da vegetação.*

Mendes, A. (2010). *Fito-ETAR: uma eco-tecnologia aplicada ao tratamento de águas residuais: Análise do Comportamento Hidráulico.* 79.

Mendes, S. I. S. (2014). Valorização de lamas de tratamento de águas residuais urbanas para utilização agrícola.

Monte, H. M., Santos, M. T., Barreiros, A. M., & Albuquerque, A. (2016). *Tratamento de Águas Residuais - Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico.*

Moreira, C. (2014). *Etar.* *Revista de Ciência Elementar*, 2(2), 1–3. <https://doi.org/10.24927/rce2014.146>

Oliveira, B. D. L. (2017). *Controlo e avaliação do sistema de tratamento de águas residuais da ETAR de Gaia Litoral e ETAR de Febros.* 62.

Pinto, J. M. (2009). *Avaliação da Eficiência de Remoção do Contaminante de Origem Farmacêutica Atenolol pela Planta Phragmites australis em Leitos Construídos de Macrófitas.*

Poças, C. D. (2015). *Utilização Da Tecnologia De Wetlands Para Tratamento Terciário: Controle De Nutrientes.* *Universidade de São Paulo*, 93.

Relatório PENSAAR. (2020). *Relatório de Monitorização do PENSAAR 2020 PENSAAR 2020-Uma Nova Estratégia para o Sector de Abastecimento de Água e Saneamento de Águas Residuais.*

Safoniuk, M. (2004). Wastewater Engineering: Treatment and Reuse (Book). In *Chemical engineering* (Issue 7, pp. 10–11).

Salatti, E. (2003). *Utilização de sistemas de de Wetlands construídas para tratamento de águas.* Instituto Biológico, 1/2(1993), 113–116.

Santos, Jorge Filipe Sequeira; Correia, M. C. M. (2012). *Metodologia De Tratamento De Lamas E Organização Do Balanço De Massas.* Instituto Politécnico de Lisboa.

Santos, D., & Brito, C. (2001). Tratamento de efluentes por processos naturais. *Tecnovisão Escola Superior de Tecnologia*, 11, 29–31.

Santos, M. (2016). *Effects of vegetation, seasonality, organic and nitrogen loading rates in the performance of Horizontal Subsurface Constructed Wetlands.*

Seco, T., Duarte, A., Peres, J., & Bentes, I. (2008). Avaliação do Desempenho de Sistemas de Leitos de Macrófitas no Tratamento de Águas Residuais Domésticas. *Civil.Uminho.*

Shinohara, P. (2021). *Implementação de um sistema francês de wetland construída como proposta para tratamento de água residuária do restaurante universitário* (Vol. 3, Issue 2).

Silva, M. M. M. da. (2010). *Ensaio de coagulação floculação da água residual afluente à ETAR de Avis.*

Silva Ferreira, C. (2013). *Contributo para o Estudo de Tratamento de Gorduras em ETAR Urbanas.*

SILVA FILHO, P. A. da. (2007). *Diagnóstico Operacional de Lagoas de Estabilização.* 169.

Soares. (2009). *Caraterização de resíduos e ensaios laboratoriais para a otimização do processo de tratamento de águas residuais industriais.*

Sonune, A., & Ghate, R. (2004). *Developments in wastewater treatment methods.* *Desalination*, 167(1–3), 55–63.

Sousa, B. (2019). *ESTUDO DA IMPLEMENTAÇÃO DE SISTEMAS NATURAIS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE CAUDAIS VARIÁVEIS.*

Sousa, T. (2016). *Estações de Tratamento de Águas Residuais: conceitos e dimensionamento.*

Tchobanoglous, G., Burton, F., & Stensel, H. D. (1990). No Title. In I. Metcalf & Eddy (Ed.), *Wastewater Engineering: An Overview* (Fourth Ed, pp. 3–24).

TRUPPEL, A. (2002). *Redução De Odores De Uma Lagoa De Estabilização De Esgoto Sanitário E Avaliação Da Qualidade De Seu Efluente.*

Ullah, A., Hussain, S., Wasim, A., & Jahanzaib, M. (2020). Development of a decision support system for the selection of wastewater treatment technologies. *ELSEVIER*.

USEPA. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet Rapid Infiltration Land Treatment. *United States Environmental Protection Agency*, 1–7.

ZERO. (2016). *RANKING DOS 10 MUNICÍPIOS EM PORTUGAL CONTINENTAL COM PIOR DESEMPENHO AO NÍVEL DO SANEAMENTO.* <https://zero.org/zero-elabora-ranking-dos-10-municipios-em-portugal-continental-com-pior-desempenho-ao-nivel-do-saneamento/>

Zinato, T. M. C., & Guimarães, M. M. (2017). *Estudo Sobre a Utilização De “Wetlands” Construídas Para Tratamento De Águas Residuárias No Brasil.* VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 1–9.