



M 2021

REAPROVEITAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS TRATADAS NAS ETAR - TRATAMENTO SECUNDÁRIO EM SISTEMAS MBR

JOANA VASCONCELOS NETO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA

À FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO EM
ENGENHARIA QUÍMICA

Mestrado Integrado em Engenharia Química

Reaproveitamento de Águas Residuais Tratadas nas ETAR - Tratamento Secundário em Sistemas MBR

Dissertação de Mestrado

de

Joana Vasconcelos Neto

Desenvolvida no âmbito da unidade curricular de Dissertação

realizado em

Ambiágua



Orientador na FEUP: Prof. Adélio Mendes

Coordenador na Ambiágua: Eng. Pedro Nascimento



julho de 2021

Agradecimentos

A realização da presente dissertação de mestrado contou com vários apoios, quer a nível profissional quer a nível pessoal, de pessoas e instituições às quais estou profundamente grata.

Primeiro, quero agradecer ao Professor Adélio Mendes pela orientação e pelo constante incentivo a realizar um trabalho de maior qualidade e rigor, estimulando sempre o meu espírito crítico.

Um agradecimento especial ao Eng. Pedro Nascimento pela total disponibilidade e entusiasmo, e por me ter fornecido todos os meios necessários para avançar com o projeto. A toda a equipa da Ambiágua, na pessoa do Eng. Joaquim Santos, agradeço pela integração no seio da empresa e pelo apoio económico. Em particular, à Celina e à Bruna pelo carinho e pelos conhecimentos transmitidos ao longo destes cinco meses de trabalho.

Também quero agradecer à Professora Olga Nunes e ao Professor Fernando Pereira pela receptividade e pela autorização para a realização das análises à água nos laboratórios pelos quais são responsáveis. A execução das diferentes técnicas analíticas teve sempre o apoio da Sara Soares e da Liliana Pereira, a quem agradeço pela instrução e dedicação.

À professora Ana Matos, docente da Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra, pela colaboração e empenho na realização das análises virológicas à água.

Também estendo os meus agradecimentos ao Professor Fernando Rocha pela prontidão e interesse em ajudar-me a melhorar o meu trabalho, sobretudo na parte económica.

Por último, mas não menos importante, um enorme agradecimento aos pilares da minha vida, que são os meus amigos e a minha família. Quero agradecer a toda a minha família pelo apoio e amor incondicional em todas as etapas da minha vida, mas em especial aos meus pais por serem exemplos de honestidade e de resiliência e por nunca me cortarem as asas, e ao meu irmão por me desafiar a ser sempre a minha melhor versão.

Ao Diogo, à Joanhina e aos amigos para a vida que fiz na faculdade, Susana, Edu, Maria e Naná, quero agradecer a força e a confiança que me dão constantemente, além de serem os melhores companheiros e de me proporcionarem os melhores momentos de diversão e de tranquilidade da minha vida.

O Prof. Adélio Mendes, orientador desta dissertação, é membro integrado do LEPABE - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente Biotecnologia e Energia, financiado por: Financiamento Base - UIDB/00511/2020 da Unidade de Investigação - Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia - LEPABE - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Resumo

A água, enquanto bem essencial para a vida humana, para o equilíbrio dos ecossistemas, para a produção de alimentos e para a geração de energia, deve ser conservada. O consumo crescente de água e as alterações climáticas criam desequilíbrios nas disponibilidades de água, quer em quantidade quer em qualidade. Assim, toda a legislação desenvolvida no âmbito deste setor, a nível mundial, europeu e nacional, tem como missão a proteção dos recursos hídricos existentes, garantindo a sua sustentabilidade. Para responder a este desafio, têm vindo a ser desenvolvidas técnicas de tratamento que permitem a reutilização de água residual como fonte alternativa de abastecimento. Neste contexto, a tecnologia de reatores biológicos com membranas apresenta-se como uma solução inovadora e eficaz ao fornecer um efluente tratado de elevada qualidade, livre de microrganismos patogénicos, com uma carência bioquímica de oxigénio inferior a 3 mg/L e uma turvação inferior a 1 NTU.

Dadas as alterações climáticas, Portugal apresenta um risco elevado de stress hídrico, nomeadamente em distritos das zonas centro e sul do país. A ETAR da Murteira, situada no concelho de Benavente, em Santarém, serviu de exemplo para o estudo do uso de um reator biológico com membranas de ultrafiltração para reutilização de água residual tratada. Foi analisada extensivamente a qualidade da água produzida por esta unidade, de acordo com as normas em legislação aplicável.

Analizando os requisitos da legislação portuguesa referentes à produção de água residual recuperada para reutilização, concluiu-se que o efluente tratado poderá ser utilizado em usos urbanos e industriais, embora a agricultura seja o destino mais adequado devido à presença de nutrientes inorgânicos. Além disso, apesar dos elevados custos de investimento e de exploração, os resultados económicos revelaram-se bastante promissores.

Palavras-chave:

Reator biológico com membranas; ETAR; reutilização; água residual tratada; sustentabilidade

Abstract

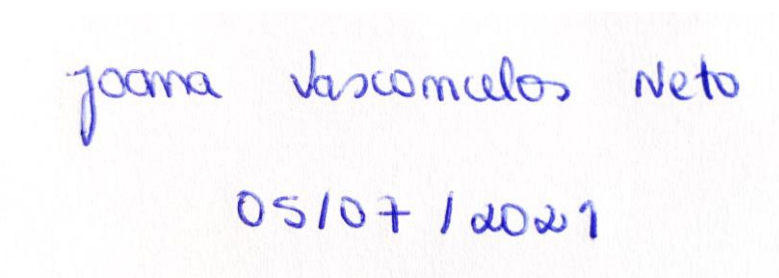
Water, as an essential resource for human life, for the balance of ecosystems, for food production and for energy generation, must be conserved. The growing consumption of water and climate change lead to scarcity of clean water. Thus, all legislation developed within this sector, at global, European, and national levels, has as its mission the protection of existing water resources, ensuring their sustainability. To meet this challenge, treatment techniques that allow the reuse of wastewater as an alternative source of supply have been developed. In this context, the technology of membrane biological reactors presents itself as an innovative and effective solution by providing a high-quality treated effluent, free of pathogenic microorganisms, with a biochemical oxygen demand of less than 3 mg/L and a turbidity of less than 1 NTU.

Because of climate change, Portugal is at high risk of water stress, particularly in districts in the centre and south of the country. The Murteira wastewater treatment plant, located in the district of Santarém, served as an example for the study of the use of a biological reactor with ultrafiltration membranes for reuse of treated wastewater. The quality of the water produced by this unit was extensively analysed, according to the regulations in applicable legislation.

Analysing the requirements of the Portuguese legislation concerning the production of recovered wastewater for reuse, it was concluded that the treated effluent can be used for urban and industrial uses, although agriculture is the most appropriate destination due to the presence of inorganic nutrients. Furthermore, despite the high investment and operating costs, the economic results were very promising.

Declaração

Declara, sob compromisso de honra, que este trabalho é original e que todas as contribuições não originais foram devidamente referenciadas com identificação da fonte.



Joana Vasconcelos Neto
05/07/2021

Índice

1	Introdução.....	1
1.1	Enquadramento e Apresentação do Projeto	1
1.2	Apresentação da Empresa	3
1.3	Contributos da Autora para o Trabalho.....	3
1.4	Organização da Dissertação.....	4
2	Contexto e Estado da Arte	5
2.1	Reutilização de Água Residual Tratada	5
2.1.1	Principais Aplicações da Água Residual Tratada.....	7
2.1.2	Processos de Separação por Membranas para Recuperação de Águas Residuais	7
2.1.3	Requisitos Legais da Qualidade da Água Residual Tratada para Reutilização	10
2.2	Reatores Biológicos com Membranas	11
2.2.1	Descrição e Princípios de Funcionamento de um MBR	11
2.2.2	Sistema Tradicional vs Sistema MBR.....	13
2.2.3	Operação e Manutenção de um MBR	15
3	Instalação Industrial	17
3.1	Descrição da Solução de Tratamento	17
4	Materiais e Métodos	21
4.1	Análises Microbiológicas Realizadas pela Autora.....	22
4.2	Análises Físico-químicas Realizadas pela Autora	23
4.3	Análises Viroológicas.....	26
5	Resultados e Discussão.....	28
5.1	Controlo da Qualidade da Água Residual Tratada na ETAR da Murteira	28
5.1.1	Análises Realizadas pelo Laboratório Acreditado	28
5.1.2	Análises Microbiológicas Realizadas pela Autora	31
5.1.3	Análises Físico-químicas Realizadas pela Autora	32
5.1.4	Análises Viroológicas.....	36
5.2	Análise Económica	37

5.2.1	Custo de Investimento	37
5.2.2	Custos de Operação e Manutenção	37
5.2.3	Custo da Água Residual Tratada	39
6	Conclusões	41
7	Avaliação do Trabalho Realizado	43
7.1	Objetivos Realizados	43
7.2	Desenvolvimentos Futuros	43
7.3	Apreciação Final	43
8	Referências	44
Anexo A - Normas de Qualidade de Água para Reutilização		49
Anexo B - Reatores Biológicos com Membranas		52
Anexo C - Análise Económica		53
Apêndice A - Materiais e Métodos		55
Apêndice B - Resultados e Discussão		56

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Extrato do mapa do risco global de água na zona de Samora Correia.....</i>	<i>3</i>
<i>Figura 2 - Representação esquemática do processo de filtração por membrana num MBR.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 3 - Representação esquemática de um a) EMBR e de um b) SMBR</i>	<i>12</i>
<i>Figura 4 - Módulo de membranas de placa plana</i>	<i>13</i>
<i>Figura 5 - Comparação de um sistema convencional de lamas ativadas com um sistema MBR.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 6 - Incrustação das membranas em MBR por a) entupimento dos poros e por b) deposição do bolo de lama na superfície</i>	<i>15</i>
<i>Figura 7 - Diagrama de processo da ETAR da Murteira.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 - Reator biológico durante uma intervenção às membranas, na ETAR da Murteira</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 - Estrutura de uma unidade de MBR.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 10 - Imagem da instalação laboratorial para a realização das análises microbiológicas</i>	<i>23</i>
<i>Figura 11 - Imagens a) dos frascos preparados e rotulados e b) da instalação para a leitura de oxigénio dissolvido.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 - Instalação laboratorial para a determinação do azoto amoniacal.....</i>	<i>25</i>
<i>Figura 13 - TOC (Total Organic Carbon).</i>	<i>25</i>
<i>Figura 14 - Imagens do a) ICP, b) interior do equipamento e do c) amostrador automático</i>	<i>26</i>
<i>Figura 15 - Resultados dos principais parâmetros analisados pelo laboratório acreditado normalizados pela respetiva norma de qualidade para reutilização para rega (classe A).</i>	<i>29</i>
<i>Figura 16 - Contagens de heterotróficos totais nas amostras de entrada e de saída da ETAR, em PCA. 32</i>	
<i>Figura 17 - Comparação entre os resultados obtidos pelo laboratório acreditado e pela autora relativamente aos parâmetros: a) CBO₅, b) SST, c) turvação, d) azoto amoniacal, e) azoto total, nos dias 4, 11 e 18 de maio; e f) boro, no dia 4 de maio</i>	<i>34</i>
<i>Figura A.1 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega.....</i>	<i>49</i>
<i>Figura A.2 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solos</i>	<i>49</i>
<i>Figura A.3 - Descrição das classes de rega - usos e nível de tratamento adequado em função das várias classes de qualidade da água.....</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.4 - Normas de qualidade de água para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano)</i>	<i>50</i>
<i>Figura A.5 - Normas de qualidade de água para reutilização em uso industrial (proteção para contacto humano)</i>	<i>51</i>

<i>Figura C.1 - Fatura relativa aos preços dos agentes de limpeza das membranas.</i>	<i>53</i>
<i>Figura C.2 - Extrato das tarifas de abastecimento de água para 2021 das AR.....</i>	<i>54</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Principais características dos processos de membranas movidos por pressão</i>	<i>8</i>
<i>Tabela 2 - Condições de descarga do efluente final da ETAR da Murteira</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 3 - Características das unidades de MBR instaladas na ETAR da Murteira</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 4 - Parâmetros, métodos analíticos e periodicidade de amostragem utilizados pelo laboratório acreditado</i>	<i>21</i>
<i>Tabela 5 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas bissemanais e normas de qualidade de água para reutilização para rega (classe A)</i>	<i>28</i>
<i>Tabela 6 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas mensais e normas de qualidade para reutilização para rega.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabela 7 - Resultados obtidos pela autora nas campanhas semanais e normas de qualidade da água para reutilização para rega (classe A).</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 8 - Resultados obtidos da pesquisa e quantificação de vírus nas amostras de entrada e de saída.</i>	<i>36</i>
<i>Tabela 9 - Parcelas consideradas no cálculo do custo de investimento.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabela 10 - Parcelas consideradas no cálculo dos custos de O&M</i>	<i>38</i>
<i>Tabela 11 - Cenários estudados para a obtenção do preço da água residual tratada</i>	<i>39</i>
<i>Tabela B.1 - Condições de operação típicas e qualidade do efluente de um MBR</i>	<i>52</i>
<i>Tabela S.1.1 - Parâmetros, métodos analíticos e periodicidade de amostragem utilizados pela autora.</i>	<i>55</i>
<i>Tabela S.2.1 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas bissemanais, com as respectivas incertezas e limites de quantificação.</i>	<i>56</i>
<i>Tabela S.2.2 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas mensais, com as respectivas incertezas e limites de quantificação</i>	<i>56</i>
<i>Tabela S.2.3 - Resultados obtidos pela autora nas campanhas semanais, com as respectivas incertezas e limites de deteção.</i>	<i>57</i>
<i>Tabela S.2.4 - Resultados obtidos no ICP.....</i>	<i>58</i>
<i>Tabela S.2.5 - Caudal de água tratada e energia elétrica ativa consumida ao longo do ano de 2020 na ETAR de Murteira</i>	<i>59</i>
<i>Tabela S.2.6 - Custos pormenorizados envolvidos na reabilitação da ETAR da Murteira em 2017</i>	<i>59</i>

Notação e Glossário

R	retenção	
C	concentração	$\text{mol}\cdot\text{m}^{-3}$
J	fluxo	$\text{m}^3\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
r	raio dos poros	m
ΔP	diferença de pressão	Pa
Δx	espessura da membrana	m

Letras gregas

ϵ	porosidade	
η	viscosidade	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
τ	fator de tortuosidade	

Índices

p	permeado
f	feed (alimentação)

Lista de Siglas

ApR	Água para Reutilização
CCG	Conselho de Cooperação do Golfo
CE	Comissão Europeia
CE	Condutividade elétrica
CIP	<i>Clean in Place</i> (limpeza no local)
DEQ	Departamento de Engenharia Química
EMBR	<i>External membrane bioreactor</i> (reator biológico com membranas externas)
ETAR	Estação de Tratamento de Águas
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
LEPABE	Laboratório de Engenharia de Processos, Ambiente, Biotecnologia e Energia
MBR	<i>Membrane biological reactor</i> (Reator biológico com membranas)
MF	Microfiltração
MLSS	<i>Mixed liquor suspended solids</i> (sólidos suspensos no licor misto)
NF	Nanofiltração
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Units</i> (Unidades Nefelométricas de Turbidez)
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
OMS	Organização Mundial de Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
PE	Polietileno
PES	Polietersulfona
PP	Polipropileno
PVDF	Difluoreto de polivinilideno
RO	<i>Reverse osmosis</i> (osmose inversa)
SAR	<i>Sodium Adsorption Ratio</i> (Relação de adsorção de sódio)
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SMBR	<i>Submerged membrane bioreactor</i> (reator biológico com membranas submersas)
SMU	<i>Submerged Membrane Unit</i>
SRT	<i>Solids retention time</i> (tempo de retenção de sólidos)
SST	Sólidos suspensos totais
TMP	<i>Transmembranar pressure</i> (pressão transmembranar)
UF	Ultrafiltração

WAS *Waste activated sludge* (lamas em excesso)

1 Introdução

A presente dissertação, intitulada “Reaproveitamento de Águas Residuais Tratadas nas ETAR - Tratamento Secundário em Sistemas MBR”, foi elaborada em ambiente empresarial, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química, pela Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.

1.1 Enquadramento e Apresentação do Projeto

Após milhares de anos de desenvolvimento humano em que a água foi um recurso abundante em muitas áreas, observa-se que esta situação está a mudar radicalmente. As alterações climáticas e o crescente consumo de água provocam uma enorme pressão nos recursos hídricos existentes, de tal forma que, sobretudo nas zonas mais áridas do mundo, a escassez de água se tem vindo a tornar na maior ameaça à segurança alimentar, à saúde humana e aos ecossistemas naturais¹. Em zonas como o Médio Oriente, a escassez de água é uma preocupação diária. Nos países do Conselho de Cooperação do Golfo (CCG), praticamente não há rios, há pouca precipitação e o fornecimento de água doce é limitado, o que leva a uma elevada dependência da produção de água por dessalinização. Sendo este processo dispendioso, estes países tornam-se líderes na reutilização dos seus efluentes de esgotos tratados para irrigação paisagística².

A recuperação e reutilização de água surgem como estratégias que permitem conservar este importante recurso, constituindo uma fonte de água constante e fiável, que reduz a quantidade de água extraída do ambiente. Além disso, em alguns casos, os requisitos de tratamento são inferiores aos da água utilizada em ambiente urbano devido a um menor contacto humano. Assim, o contributo desta prática é essencial na transição para a economia circular na medida em que diminui as necessidades de energia, custos de reparação e impactos ambientais. Por outro lado, a reutilização de água pode representar um perigo para a saúde humana, animal e ambiental, devido à presença de vírus, bactérias, substâncias farmacêuticas ativas, metais pesados, entre outros³. Em resumo, a água pode ser reutilizada inúmeras vezes e para diversos fins desde que sofra os tratamentos necessários para obter a qualidade compatível com esses usos e que a sua utilização seja economicamente viável, ambientalmente segura e aceite pela opinião pública⁴.

Apesar do progresso da reutilização de água como fonte de água alternativa a nível global, o seu potencial ainda não é explorado em muitas zonas. Em Portugal, o interesse pela reutilização de águas residuais tratadas tem vindo a aumentar devido às alterações climáticas, que originam escassez de água de boa qualidade para consumo humano, à consciencialização do valor da água e ao desenvolvimento de políticas mais sustentáveis. Nesta sequência, são cada vez mais

exigentes as normas referentes à qualidade da água residual recuperada, especialmente no caso da sua reutilização.

Várias organizações têm apresentado estratégias para promover a reutilização de água. A nível internacional, destacam-se a Organização Mundial de Saúde (OMS) e a Organização Internacional de Normalização (ISO - *International Organization for Standardization*), e, no contexto europeu, a Comissão Europeia (CE). A OMS determina as normas de proteção da saúde pública, especialmente quando estão em causa usos potáveis. Já a ISO define as normas destinadas à reutilização de águas residuais tratadas para rega (agrícola e paisagística, de espaços públicos e privados) e para usos urbanos e industriais através da avaliação de risco para a saúde e para o ambiente. Consequentemente, nos últimos anos têm vindo a ser desenvolvidas novas tecnologias, para além dos processos clássicos de tratamento de águas residuais, tais como os processos de membranas⁴, de forma a cumprir as exigências da legislação aplicada nos projetos de reutilização de água.

Os reatores biológicos com membranas (MBR - *Membrane Biological Reactor*) integram membranas de micro e ultrafiltração associadas ao tratamento biológico com arejamento prolongado, permitindo a separação dos poluentes dispersos na água, nomeadamente poluentes orgânicos, nutrientes, metais, sais e microrganismos. Existem desde os anos 60, porém foi em 1989 que sofreram um grande avanço devido à invenção de Yamamoto *et al.*⁵, onde foi utilizado pela primeira vez um módulo de membranas submersas num reator biológico. Esta técnica permitiu reduzir o consumo de energia através da supressão da bomba de extração, o que levou ao aumento significativo do uso destes reatores para tratar águas residuais municipais. A tecnologia MBR apresenta vários benefícios em relação aos processos convencionais, como a excelente qualidade da água tratada, a área reduzida necessária para instalação e a facilidade de operação⁶.

A ETAR da Murteira localiza-se em Samora Correia, freguesia pertencente ao concelho de Benavente. Uma vez que esta região se encontra na zona de elevado risco global de água (Figura 1), foi desenvolvido um caso de estudo onde se avaliou um sistema MBR enquanto ferramenta de tratamento para reutilização de águas residuais.

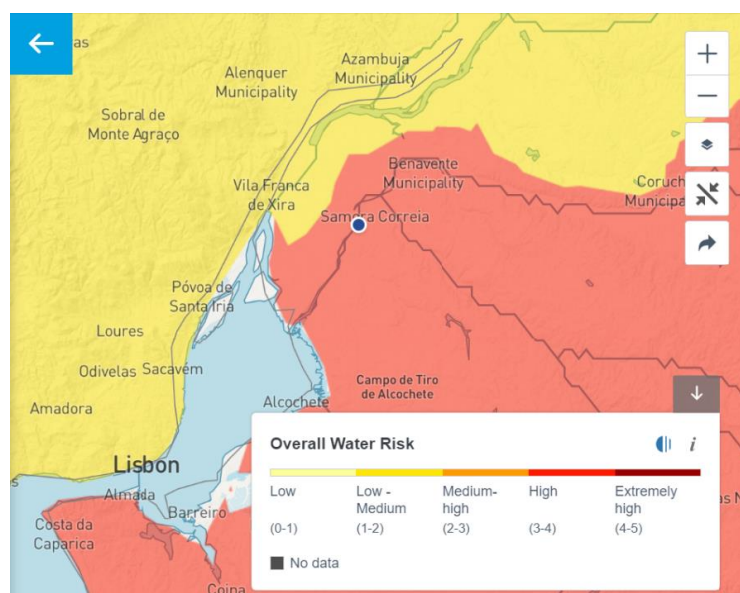


Figura 1 - Extrato do mapa do risco global de água na zona de Samora Correia⁷.

1.2 Apresentação da Empresa

A Ambiágua - Gestão de Equipamentos de Água, S. A., sediada em Vila Nova de Famalicão, foi criada em 2003 com atividade no setor de tratamento de águas. Integra o Grupo ACA desde 2009 e é constituída por uma equipa técnica multidisciplinar, nomeadamente de engenheiros do ambiente, químicos, sanitários, eletromecânicos, eletrotécnicos e civis. Assim, desenvolve desde a conceção, dimensionamento e elaboração de projeto de sistemas de tratamento de águas à construção, seleção de equipamentos, instalação, arranque e exploração desses sistemas. Em 2010, internacionalizou-se iniciando a sua atividade em Angola, onde opera com a empresa Ambiáfrica - Soluções Ambientais, S. A., que beneficia do saber fazer da Ambiágua.

O Grupo ACA, detentor do lema “O futuro é agora. Estamos a construí-lo!”, destaca-se na área da construção e engenharia e apresenta também uma estratégia de crescimento sustentado, que o permitiu expandir-se para território internacional, encontrando-se atualmente em 8 países.

1.3 Contributos da Autora para o Trabalho

O presente projeto consistiu na avaliação da utilização de água residual tratada em sistema MBR em usos urbanos, em usos industriais e para rega. O estudo engloba não só o controlo da qualidade da água, como também a análise económica da solução apresentada. A autora realizou todo o trabalho, à exceção das análises à água adjudicadas a um laboratório exterior devidamente acreditado, Laboratório Agroleico do Montijo, assim como as análises virológicas, que foram realizadas no Laboratório de Microbiologia da Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra.

1.4 Organização da Dissertação

A dissertação apresentada encontra-se dividida em oito capítulos, incluindo as referências, e segue a organização tradicional. O presente capítulo apresenta e contextualiza o tema abordado, bem como os objetivos e a organização da dissertação. Uma vez que o propósito do projeto é estudar o uso de um reator biológico com membranas de ultrafiltração para reutilização de água residual, é apresentado o estado da arte da tecnologia de tratamento.

De seguida, foram descritas as etapas de tratamento implementadas na ETAR da Murteira, que integram um tratamento secundário em sistema MBR. Foi desenvolvido um plano de monitorização da qualidade do efluente final, onde foram analisados vários parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água, ao longo de dois meses. Os resultados obtidos foram comparados com os requisitos legais aplicáveis a projetos de reutilização de águas residuais tratadas, o que permitiu identificar os usos mais adequados, garantindo uma correta e eficiente aplicação da água.

Por último, elaborou-se um estudo económico a partir do qual foi possível avaliar a relação custo-benefício da aplicação de uma unidade MBR numa estação de tratamento e reutilização de água, face à aquisição de água potável para os fins em estudo. Finalmente, foram apresentadas as principais conclusões do trabalho, assim como os desafios futuros.

2 Contexto e Estado da Arte

2.1 Reutilização de Água Residual Tratada

Os recursos hídricos variam de região para região pois dependem do clima e das características geológicas locais. Por outro lado, as necessidades de água também não são constantes. O crescimento populacional, a crescente urbanização, o desenvolvimento industrial e a agricultura são fatores que aumentam o consumo de água. Outros, como o turismo, determinam aumentos sazonais de necessidade de água, principalmente em períodos de baixa precipitação atmosférica e de elevada evaporação⁴. Estas situações podem criar desequilíbrios entre necessidades e disponibilidades de água.

Por outro lado, a descarga de efluentes domésticos e industriais não tratados em ambientes aquáticos causa desequilíbrios nos ecossistemas. Estas alterações estão associadas à presença de nutrientes (como azoto e fósforo), que podem originar a eutrofização e o florescimento de algas⁸, e à contaminação química e biológica, introduzindo limitações ao aproveitamento de alguns recursos hídricos. Além disso, a construção de grandes barragens e a dessalinização de água do mar revelam ser medidas insuficientes ou onerosas para assegurar a sustentabilidade dos recursos hídricos. Consequentemente, surgem estratégias de mitigação da falta de água, como a implementação de medidas de uso mais eficiente de água e a sua reutilização. Esta última estratégia tem emergido nos últimos anos, de forma enfática, como um paradigma da gestão integrada dos meios hídricos⁴. Em suma, as motivações para a recuperação e reutilização de água são múltiplas, sendo a decisão óbvia em situações extremas de necessidade ou económica quando o custo de tratamento da água para a tornar apta para determinada utilização é inferior ao custo da água da rede pública.

A reutilização de água pode ter um impacto significativo na redução parcial ou total do efeito da descarga dos efluentes nos ambientes recetores, permitindo ainda restringir a quantidade de água extraída de fontes de água naturais. Além do mais, os nutrientes presentes nas águas residuais são essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, tornando benéfica a sua utilização na irrigação⁹.

No âmbito da preservação do ambiente, é habitualmente utilizada uma abordagem “à medida do fim a que se destina” (*fit-for-purpose*), que consiste na elaboração de um plano de qualidade específico para o fim a que a água para reutilização (ApR) se destina. Para tal, é necessário avaliar o risco para a saúde humana e para o meio ambiente, analisando as especificidades locais do ponto de aplicação das águas e as características ambientais, como os tipos de culturas, solos e predominância de ventos¹⁰. A análise de risco para a saúde humana é importante sobretudo quando o fim de reutilização implica um contacto (direto ou indireto)

com pessoas, sendo necessário ter especial atenção à presença de microrganismos. Esta abordagem permite que a água seja direcionada para onde é efetivamente necessária, com a garantia de que a sua qualidade é adequada ao fim pretendido, e que os custos associados sejam racionalizados.

No que diz respeito às aplicações de água reutilizada na indústria, é importante distinguir reutilização de reciclagem. A reciclagem é a transformação de um produto em matérias-primas que podem ser usadas novamente, normalmente para um produto completamente diferente. Uma vez que este processo consome energia, a reutilização acaba por ser prioritária. A reutilização consiste na utilização de um bem sem alterar a sua estrutura, isto é, reaproveitá-lo ou dar-lhe uma nova função. Isto reduz a poluição e o desperdício, tornando-a num processo mais sustentável. A prática de reutilização de água tem uma longa história, nomeadamente desde o início da Idade do Bronze (3000 a.C.), data correspondente às primeiras provas encontradas de irrigação agrícola com águas residuais, na Grécia. Contudo, foi a partir do século XX que começou a ser vista como uma oportunidade para utilizar a água de forma eficiente, limitando a sua captação. Na década de 1950, o Japão começou a reutilizar águas residuais para aplicações industriais¹¹.

Portugal é aparentemente um país com abundantes recursos hídricos. No entanto, fatores como as alterações climáticas, as características demográficas e a pressão de algumas atividades económicas importantes causam diferenças acentuadas na disponibilidade destes recursos. Por exemplo, na região do Algarve, onde o turismo e o golfe constituem a base estrutural da sua economia, a gestão sustentável dos recursos hídricos é fundamental para o equilíbrio socioeconómico e ambiental da região. Esta manutenção emerge do elevado consumo de água destas atividades e da escassez de recursos hídricos nesta zona, com uma precipitação média anual acumulada de 571 L/m² nos últimos 32 anos¹². Tendo em conta a tendência de diminuição das disponibilidades hídricas no contexto nacional e o consequente aumento da pressão sobre as massas de água, verifica-se um grande potencial de implementação de sistemas de produção de água residual tratada para reutilização. Além disso, uma vez que Portugal apresenta uma fração significativa da população servida por estações de tratamento de águas residuais, o efluente final constitui um volume de água apreciável, de cerca de 43 milhões m³ no ano de 2015. Este volume pode integrar uma alternativa para novas utilizações, tanto em utilização direta como após tratamento complementar. Em 2019, apenas 1,2 % da água residual tratada em estações de tratamento foi reutilizada, sendo que grande parte desta foi utilizada pelas entidades gestoras para uso próprio e somente 16 % foi fornecida a outras entidades para ser reutilizada¹³.

2.1.1 Principais Aplicações da Água Residual Tratada

As aplicações da água residual tratada são selecionadas de acordo com a necessidade e compatibilidade da sua qualidade com o padrão de qualidade exigido. A rega agrícola é o principal domínio da reutilização de água uma vez que esta consome cerca de 70 % do abastecimento total de água doce do mundo¹⁴, o que leva vários países a reutilizarem água para este fim.

Contudo, existem outros destinos importantes, mencionados por ordem decrescente de volume utilizado: a rega paisagística (na qual se destaca a rega de campos de golfe), fins industriais (nomeadamente reciclagem de água de arrefecimento), a recarga de aquíferos, determinados usos recreativos e ambientais, usos urbanos não-potáveis (como a descarga de autoclismos) e, ainda, como reforço para produção de água para consumo humano⁴.

Verifica-se que há um enorme espectro de possíveis aplicações da água recuperada, sendo que cada aplicação arrasta perigos e, conseqüentemente, requisitos especiais para o tratamento das águas residuais, que ajudam a combater essas preocupações. Assim, é necessário justificar a viabilidade e utilidade da reutilização de água residual, bem como o seu potencial para ajudar a resolver a escassez crítica de água.

2.1.2 Processos de Separação por Membranas para Recuperação de Águas Residuais

O crescente aparecimento de contaminantes nos meios hídricos devido às atividades agrícolas, domésticas e industriais requer por um lado um controlo rigoroso da qualidade de água, e por outro o desenvolvimento de tratamentos de águas mais eficazes. Desta forma, têm vindo a ser explorados processos de separação por membranas que utilizam a pressão como força motriz, tais como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (RO - *reverse osmosis*)¹⁵, dado que permitem uma excelente qualidade de permeado.

Um processo de filtração por membranas pode ser definido pela passagem de um fluxo de alimentação por uma membrana, que constitui uma barreira permeável e seletiva, dividindo-o numa fração de retido (ou concentrado) e numa fração de permeado (ou água tratada). Os processos de membranas movidos por pressão utilizam a diferença de pressão entre a alimentação e o lado do permeado, que se designa por pressão transmembranar (TMP - *transmembranar pressure*), como força motriz para transportar o solvente (neste caso, água) através da membrana. As partículas e os materiais dissolvidos são retidos consoante o seu tamanho, forma e carga¹⁵.

O desempenho de uma membrana é caracterizado através de dois parâmetros: a seletividade e o fluxo. O fluxo é definido como o volume que passa através da membrana por unidade de área e de tempo. A seletividade é normalmente expressa pelo coeficiente de retenção (R), que é uma medida da fração de soluto ou sólido que é retida, calculado através da Equação (1)¹⁶.

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \quad (1)$$

em que C_p é a concentração de soluto no permeado e C_f é a concentração de soluto na alimentação (*feed*). O valor de R varia entre 0 (o soluto e o solvente passam livremente pela membrana) e 1 (retenção completa do soluto), dependendo da utilização da membrana, da sua estabilidade relativamente à colmatagem e da sua resistência ao pH, da pressão aplicada e da velocidade transmembranar. O tempo de vida útil da membrana afeta a viabilidade económica do processo devido aos custos de reparação, substituição e arranque do equipamento, devendo este ser superior a 3 anos¹⁶. Atualmente encontram-se facilmente no mercado membranas com duração de 10 anos.

Os processos de membranas podem ser classificados de acordo com o tamanho dos seus poros e a pressão transmembranar¹⁵. Na Tabela 1 estão sumarizadas as características dos processos de membranas.

Tabela 1 - Principais características dos processos de membranas movidos por pressão

[Adaptado de ^{15,17}].

Parâmetro	Microfiltração	Ultrafiltração	Nanofiltração	Osmose inversa
Pressão (bar)	0,1 - 2	0,1 - 5	3 - 20	5 - 120
Dimensão do poro (nm)	100 - 10 000	2 - 100	0,5 - 2	< 0,5
Mecanismo de separação	Filtração	Filtração	Filtração e difusão	Difusão
Remoção de:	SST, turvação, protozoários, algumas bactérias e vírus	Macromoléculas, coloides, bactérias, alguns vírus e proteínas	Moléculas pequenas, dureza e vírus	Moléculas muito pequenas, cor, dureza e iões

A escolha do material das membranas é determinante na sua função e desempenho, devendo ter em conta a sua afinidade com água, a microestrutura (porosidade e tamanho dos poros), a estabilidade térmica, química e mecânica e ainda a relação custo-benefício. As membranas devem operar entre pH = 4 e pH = 10, contudo podem ser expostas a valores de pH entre 1 e 12 durante a limpeza de recuperação. Além disso, são expostas a diversos produtos químicos tóxicos, incluindo oxidantes, como cloro e hipoclorito, juntamente com altas forças de corte da água e do ar durante longos períodos de operação¹⁸.

Para satisfazer estas condições operatórias, devem ser usados materiais estáveis. Existem fundamentalmente duas categorias de materiais de membranas: orgânicos (poliméricos) e inorgânicos (cerâmicos). Atualmente, as membranas poliméricas são dominantes no tratamento e na dessalinização da água devido ao seu baixo custo. Contudo, apresentam fraca estabilidade mecânica, são de curta duração e de difícil recuperação quando colmatam, o que limita as suas aplicações¹⁹.

Os polímeros mais utilizados na construção de membranas poliméricas para o tratamento de água são o difluoreto de polivinilideno (PVDF), polietileno (PE), polietersulfona (PES) e polipropileno (PP)²⁰. O PE e o PP destacam-se pelo seu custo reduzido, contudo são bastante hidrofóbicos e apresentam uma distribuição de tamanho de poros ampla devido ao processo de fabrico¹⁸.

As membranas cerâmicas são preparadas através da combinação de um metal com um não-metal na forma de óxido, nitreto ou carboneto, sendo as mais comuns feitas de alumina, zircônia e sílica²¹. Estas membranas são muito aplicadas em MF e UF e, comparativamente com as poliméricas, apresentam vantagens como: uma distribuição estreita e bem definida dos poros, maior porosidade, melhor separação e fluxos mais elevados a pressões menores, estabilidades térmica, mecânica e química mais elevadas e períodos de vida útil mais longos, são mais hidrofílicas e de mais fácil recuperação após entupimento^{19,22,23}. Entre as suas desvantagens encontram-se o seu elevado custo e a pouca flexibilidade por serem materiais duros. Existem ainda as membranas cerâmicas compósitas, em que são combinadas mais do que um tipo de cerâmicas, nanopartículas, redes organometálicas e polímeros, que permitem adicionar ou melhorar propriedades e funcionalidades²¹.

Do ponto de vista estrutural, as membranas podem ser simétricas (porosas ou não porosas) ou assimétricas. As simétricas apresentam uma estrutura interna uniforme e uma espessura entre 100 e 200 µm, enquanto as assimétricas são constituídas por uma camada superior muito fina, com uma espessura menor do que 0,5 µm, suportada por uma subcamada porosa, com uma espessura entre 50 e 200 µm¹⁶. A camada superior determina a velocidade de permeação, enquanto a subcamada porosa atua apenas como suporte. Uma vez que a velocidade de permeação é inversamente proporcional à espessura da camada que faz efetivamente barreira, as membranas assimétricas permitem um fluxo de água bastante superior às membranas simétricas de espessura comparável.

As membranas de MF e UF têm sido largamente utilizadas em MBR. O fluxo de água na MF e na UF é proporcional à pressão aplicada (lei de Darcy). A uma dada pressão, o fluxo de água é muito superior na MF do que na UF. A lei de Hagen-Poiseuille pode ser usada para membranas com poros cilíndricos, escoamentos convectivos laminares, para determinar o fluxo volumétrico convectivo através das membranas¹⁵:

$$J = \frac{\varepsilon r^2}{8 \eta \tau} \frac{\Delta P}{\Delta x} \quad (2)$$

Assim, o fluxo de permeado, J , depende das características da água (viscosidade, η), da pressão aplicada (ΔP) e das propriedades da membrana (tamanho dos poros, r ; porosidade, ε ; tortuosidade, τ ; e espessura da membrana, Δx). A proporcionalidade inversa com a viscosidade reflete a dependência do fluxo volumétrico com a temperatura. Visto que a viscosidade da água

diminui com o aumento da temperatura, o fluxo de água através da membrana aumenta com o aumento da temperatura¹⁵. Além disso, é possível constatar que o fluxo de permeado é tanto maior quanto maior for o gradiente de pressão aplicado através da membrana.

2.1.3 Requisitos Legais da Qualidade da Água Residual Tratada para Reutilização

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da ONU é constituída por 17 Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável (ODS) e foi aprovada em setembro de 2015 por 193 membros, entre os quais Portugal. Os ODS desdobram-se em 169 metas e foram definidos para transformar o mundo até 2030 no que diz respeito às áreas de maior importância para a humanidade e para o planeta. A água, e em particular a gestão adequada do ciclo urbano da água, ocupa um papel central e transversal nesta agenda, nomeadamente no ODS 6 (Água potável e saneamento), onde se promove, entre outras metas, uma melhor qualidade da água através da diminuição da poluição, da redução para metade da quantidade de águas residuais não tratadas e do aumento substancial da reciclagem e da reutilização, a nível global²⁴.

A legislação relativa à qualidade da água residual tratada para reutilização ou descarga varia de país para país, de local para local (no caso da sua descarga) e de aplicação para aplicação (no caso da sua reutilização). A nível nacional, o Decreto-Lei n.º 226-A/2007, de 31 de maio, determina que as águas residuais tratadas devem ser reutilizadas, sempre que possível ou adequado, para rega de jardins, espaços públicos e campos de golfe. Neste seguimento, e tendo em conta a perspetiva “à medida do fim a que se destina”, as normas de qualidade da água a aplicar a cada reutilização são definidas com base na avaliação do risco para a saúde e para o ambiente.

Relativamente aos requisitos legais da qualidade da água, o Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto, estabelece normas, critérios e objetivos de qualidade com a finalidade de proteger o meio aquático e melhorar a qualidade das águas em função dos seus principais usos. Este aplica-se quer à utilização das águas para consumo humano, para suporte da vida aquícola, águas balneares e de rega, quer à descarga das águas residuais na água e no solo.

No caso específico da reutilização de água residual tratada, o Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, define as normas de qualidade de ApR, obtida a partir do tratamento de águas residuais, a aplicar por uso, tendo por base uma avaliação de risco. O referido decreto aplica-se à reutilização de água proveniente de ETAR domésticas, urbanas e industriais, destinada a usos como a rega, usos paisagísticos, usos urbanos e usos industriais. As normas de qualidade adequadas a cada utilização apresentam-se no Anexo A.

2.2 Reatores Biológicos com Membranas

Os reatores biológicos com membranas representam um processo inovador para o tratamento de águas residuais municipais e industriais, em que os decantadores do sistema convencional de lamas ativadas são substituídos pelo módulo de separação por membranas.

2.2.1 Descrição e Princípios de Funcionamento de um MBR

O MBR é uma tecnologia de tratamento de águas residuais que combina um reator biológico com a separação por membranas de ultra e microfiltração. Neste processo, o reator biológico tem a mesma função que o tanque arejado num sistema de lamas ativadas, onde a água residual é tratada pela atividade de microrganismos. Num sistema MBR, em vez de se separar a água tratada dos microrganismos por gravidade, são usadas membranas porosas. Como se pode ver na Figura 2, os diâmetros dos poros das membranas utilizadas no MBR são suficientemente pequenos para rejeitar flocos das lamas ativadas, bactérias e vírus ou partículas de grandes dimensões. Por conseguinte, um MBR produz água tratada de alta qualidade, não contendo quase nenhum sólido suspenso detetável¹⁸.

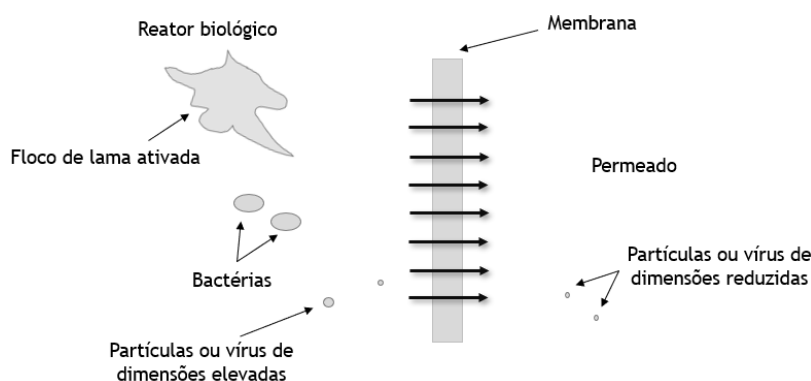


Figura 2 - Representação esquemática do processo de filtração por membrana num MBR.

Existem duas configurações possíveis de sistemas de membranas: a primeira, em que as membranas são montadas externamente ao reator biológico, EMBR - *external membrane bioreactor* (Figura 3a), e a segunda, onde as membranas estão submersas no reator, SMBR - *submerged membrane bioreactor* (Figura 3b). O segundo é mais utilizado do que o primeiro pois apresenta um consumo de energia inferior e um desenho mais simples. Contudo, o facto de serem submersas dificulta o acesso às membranas, sobretudo aquando da sua limpeza, e requer um arejamento sistemático para evitar incrustação. A primeira configuração também pode ser utilizada para o tratamento de águas residuais, sendo a alimentação bombeada para a membrana e uma parte é recolhida no permeado, enquanto a outra é devolvida ao MBR. Esta configuração tem a capacidade de controlar significativamente a colmatação da membrana, o que resulta num fluxo constante⁶.

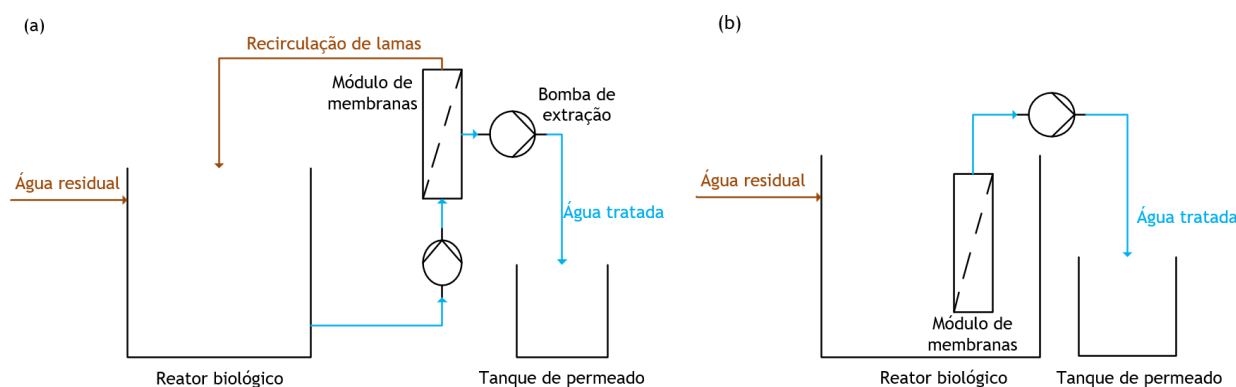


Figura 3 - Representação esquemática de um a) EMBR e de um b) SMBR.

A configuração das membranas, isto é, a sua geometria e a forma como são montadas e orientadas em relação ao fluxo de água é determinante para o desempenho global do MBR. Essencialmente, as membranas devem ser configuradas de modo a apresentarem: uma razão entre a área superficial das membranas e o volume do MBR elevada, um elevado grau de turbulência para evitar a sua colmatção, um gasto de energia por unidade de volume de água tratada e um custo por unidade de área de membrana reduzidos e um desenho que facilite a sua limpeza²⁵. Note-se que algumas destas propriedades são mutuamente exclusivas. Por exemplo, a promoção da turbulência resulta num maior gasto de energia, assim como uma razão área superficial das membranas/volume do MBR mais elevada implica produzir poros mais estreitos, o que afeta a turbulência e a limpeza.

Com base em dois tipos de configuração de membranas, planar e tubular, são possíveis vários desenhos de módulos. Os módulos de placa plana e de espiral enrolada envolvem membranas planas, enquanto os módulos tubulares, capilares e de fibras ocas são baseados na configuração de membranas tubulares¹⁶. A diferença entre os últimos três desenhos de módulos é o diâmetro dos tubos utilizados, sendo este maior do que 10 mm no tubular, entre 0,5 e 10 mm no capilar e menor do que 0,5 mm no de fibras ocas¹⁶. Assim, verifica-se que a razão área superficial da membrana/volume é maior nos sistemas de fibras ocas. A escolha da configuração do módulo é determinada essencialmente por considerações económicas e pela aplicação. Na prática, devem ser considerados parâmetros como: o custo, a facilidade de limpeza, os custos de operação e manutenção e a frequência de substituição das membranas. As configurações mais utilizadas na tecnologia MBR são: fibras ocas, tubular e placa plana.

Os módulos de membranas de fibras ocas são atrativos por permitirem uma razão área superficial da membrana/volume do módulo elevada, um custo de fabrico reduzido e ainda por resistirem a condições severas (como limpezas químicas). A sua principal desvantagem é a facilidade de incrustação, o que exige uma elevada frequência de limpeza das membranas²⁶.

No caso da configuração tubular, os seus benefícios práticos são a sua elevada resistência mecânica, taxa de incrustação reduzida, longa duração e limpeza e substituição simples. No

entanto, apresenta um elevado custo de capital e operacional, o que limita a sua utilização em grande escala²⁶.

Atualmente, os módulos de membranas de placa plana (Figura 4) são amplamente utilizados na indústria de tratamento de águas e de águas residuais, nomeadamente no caso de estudo. As suas principais vantagens são a facilidade de limpeza e de substituição das membranas, assim como uma boa eficiência. Porém, também apresentam um elevado custo de investimento, o que leva à constante procura de uma relação custo-benefício mais equilibrada²⁷.



Figura 4 - Módulo de membranas de placa plana²⁸.

2.2.2 Sistema Tradicional vs Sistema MBR

O processo convencional de lamas ativadas consiste num reator biológico, que trata a água residual utilizando microrganismos, e num tanque de sedimentação ou decantador secundário, que separa a água tratada da mistura de lamas ativadas. Os tanques de sedimentação não são extremamente eficazes nesta separação uma vez que as lamas mais leves são arrastadas com o efluente tratado. Tipicamente, a concentração de sólidos suspensos do sobrenadante do tanque de sedimentação é de cerca de 5 mg/L¹⁸. Já nos processos MBR, o tamanho reduzido dos poros das membranas impede a passagem da maioria dos agentes patogénicos, permitindo uma qualidade do efluente superior.

Tanto o processo convencional como o MBR exploram a capacidade metabólica dos microrganismos nos reatores biológicos para o tratamento de água residual. Deste modo, a taxa de tratamento de água residual é proporcional à concentração de biomassa ativa no reator. Contudo, nos processos convencionais, devido às limitações dos decantadores secundários, a concentração de lamas é inferior. Os decantadores operam com base nas propriedades de deposição por gravidade e nas interações entre as partículas de lamas ativadas. Assim, a concentração máxima aconselhável de sólidos suspensos no licor misto (MLSS - *mixed liquor suspended solids*) num decantador secundário é de 5 000 mg/L, enquanto os MBR permitem concentrações entre os 8 000 e os 12 000 mg/L¹⁸. No caso dos sistemas MBR, concentrações de MLSS mais elevadas permitem volumes do reator menores, reduzindo a área necessária para instalação (Figura 5). Além disto, uma vez que os microrganismos tendem a degradar-se durante

o crescimento e que a velocidade da sua degradação é proporcional à concentração da biomassa (decaimento endógeno)¹⁸, um processo MBR produz menos lamas em excesso (WAS - *waste activated sludge*), reduzindo os custos associados à recolha e tratamento de lamas.

Outro parâmetro importante num reator biológico, que determina a qualidade da água tratada e a concentração de MLSS, é o tempo de retenção de sólidos (SRT - *solids retention time*). SRT é o tempo médio que uma partícula passa no reator. Geralmente, o aumento do SRT contribui para o aumento da concentração de microrganismos no reator e para a diminuição da concentração de substrato, aumentando a eficiência do tratamento^{18,29}. Assim, tempos de retenção de sólidos mais elevados nos processos MBR (> 20 dias), comparativamente com os dos processos convencionais (5 - 15 dias), contribuem para uma maior qualidade do efluente final¹⁸.

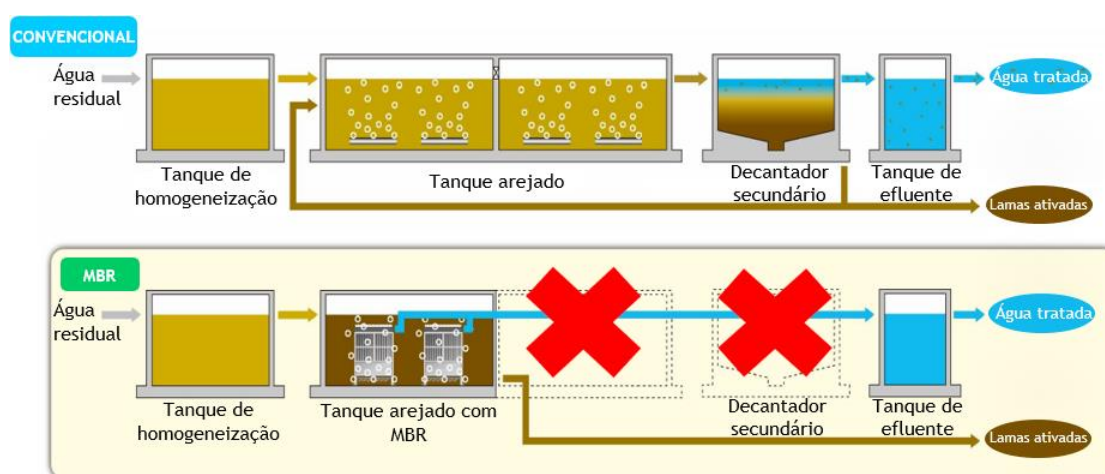


Figura 5 - Comparação de um sistema convencional de lamas ativadas com um sistema MBR
[Adaptado de²⁸].

Contudo, a par destas vantagens, a tecnologia MBR apresenta também algumas limitações que afetam o seu desempenho e aplicação. As suas principais desvantagens são o seu elevado custo de capital e de operação, a necessidade de manutenção das membranas e a maior tendência para formar espuma do que um sistema convencional^{2,18,30}. Embora a instalação das membranas requeira um custo de capital elevado, o preço das membranas tem vindo a diminuir drasticamente nos últimos vinte anos. Já os custos energéticos para operar um MBR podem ser duas vezes maiores do que no caso tradicional¹⁸.

Ainda assim, a desvantagem mais crítica é a colmatação das membranas, isto é, a deposição indesejável de partículas retidas, coloides, macromoléculas e sais na superfície da membrana ou nos seus poros³¹. A colmatação das membranas resulta na diminuição da eficiência de filtração e do fluxo de permeado e no rápido aumento da pressão transmembranar, levando a um elevado consumo de energia, frequente limpeza ou substituição das membranas, o que aumenta os custos de operação e manutenção^{32,33}. A incrustação das membranas pode ocorrer quer pelo entupimento dos poros quer pela deposição do bolo de lama na superfície da

membrana, como se pode ver na Figura 6. Por conseguinte, têm vindo a ser desenvolvidas várias resoluções para esta limitação de forma a tornar este processo cada vez mais apelativo para o tratamento e reutilização de águas municipais e industriais.

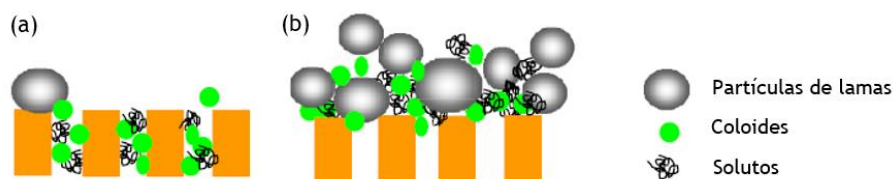


Figura 6 - Incrustação das membranas em MBR por a) entupimento dos poros e por b) deposição do bolo de lama na superfície [Adaptado de ³¹].

2.2.3 Operação e Manutenção de um MBR

As condições típicas de operação de um MBR, assim como os intervalos de valores para cada parâmetro do efluente, são apresentadas no Anexo B. Em relação à manutenção de um MBR, a TMP é um parâmetro de monitorização importante no controlo do nível dos depósitos, indicando quando este atinge o limite operacional aceitável. Geralmente, o processo de incrustação dá-se em duas fases: primeiro, um aumento gradual da TMP devido à acumulação de depósitos; e, depois, um aumento súbito quando regiões da membrana atingem um fluxo local igual ao fluxo crítico efetivo da alimentação^{20,34}.

Os principais métodos para controlar ou evitar a colmatação das membranas são: utilização de um pré-tratamento adequado, procedimentos operacionais para o controlo dos depósitos e métodos de limpeza de manutenção e recuperação. Alguns pré-tratamentos comuns no caso de processos de ultra e microfiltração são³⁵: coagulação, adsorção, pré-oxidação, pré-filtração, sendo que estes podem ser combinados. Também têm vindo a ser feitos alguns estudos de alteração das superfícies das membranas com o objetivo de as tornar menos suscetíveis à incrustação. Verificou-se que a taxa de incrustação é mais elevada em superfícies das membranas rugosas do que em superfícies lisas^{36,37}. Por outro lado, membranas hidrofóbicas são mais suscetíveis à incrustação do que membranas hidrofílicas. É possível tornar as membranas mais hidrofílicas através de radiação UV¹⁵.

Os procedimentos de controlo operacional de depósitos são disponibilizados pelos fornecedores. O arejamento é muito importante para prevenir a acumulação de sólidos e a ocorrência de depósitos na superfície da membrana. As taxas de arejamento das membranas para arraste de depósitos variam entre 3 e 12 L min⁻¹ m⁻² de ar, sendo que podem ser contínuas ou não. Além deste método, os fornecedores também utilizam frequentemente o relaxamento, isto é, um período no qual se interrompe a extração de permeado de forma que o ar possa remover os sólidos da superfície da membrana. Uma estratégia comum de relaxamento, que é a que se

utiliza na instalação industrial da presente dissertação, consiste no período de 1 minuto sem extração de permeado a cada 9 minutos de produção de água²⁰.

Adicionalmente, utilizam-se limpezas químicas quer para manutenção quer para recuperação das membranas. A limpeza de manutenção envolve a retrolavagem com uma solução de limpeza, durante 60 a 75 minutos, 1 a 2 vezes por semana. Contudo, a combinação do arraste com ar com as limpezas de manutenção não é totalmente eficaz no controlo dos depósitos na superfície das membranas, o que provoca o aumento da perda de carga com o tempo. Assim, deve ser feita uma limpeza de recuperação 2 a 4 vezes por ano, ou quando necessário mediante os valores de TMP. Neste caso, é necessário um período de contacto entre a solução química e as membranas de cerca de 4 a 6 horas²⁰. A escolha do agente de limpeza depende das características da alimentação, isto é, da natureza das impurezas. No caso da remoção de depósitos inorgânicos, recorre-se à limpeza ácida, enquanto a limpeza alcalina é utilizada para remover os orgânicos dissolvidos.

3 Instalação Industrial

A estação de tratamento de águas residuais da zona industrial da Murteira foi projetada em 1995 para uma capacidade de 325 m³/dia, de modo a servir a população envolvente. Em 2012, foi acrescentado um efluente industrial proveniente da lavandaria ELIS, em cerca de 320 m³/dia. Assim, instalou-se um sistema MBR no reator biológico já existente para aumentar a capacidade de tratamento da ETAR.

A ETAR da Murteira foi dimensionada para um caudal de 645 m³/dia, servindo uma população de 2000 habitantes. As afluições à ETAR são gravíticas e provêm de quatro bacias e duas estações elevatórias que drenam uma área industrial e uma área urbana (com contribuições de origem industrial). O caudal afluente à estação elevatória inicial tem um valor máximo de 25 L/s, sendo que o tanque de equalização elimina as variações de caudais afluentes que possam existir. As condições de descarga do efluente final, de acordo com o disposto na legislação aplicável, a respeitar pelo titular da licença são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Condições de descarga do efluente final da ETAR da Murteira.

Parâmetro	VLE
pH (Escala de Sörensen)	6 a 9
Carência química de oxigénio (mg/L O ₂)	125
Carência bioquímica de oxigénio (mg/L O ₂)	25
Sólidos suspensos totais (mg/L)	35
Óleos e gorduras (mg/L)	15
Fósforo total (mg/L P)	3
Detergentes (mg/L)	2

3.1 Descrição da Solução de Tratamento

A solução proposta é composta por uma estação elevatória das águas residuais afluentes, uma unidade de peneiração (tamisação), um tanque de homogeneização/equalização, um reator biológico provido de sistema MBR, um espessador estático de lamas em excesso, um sistema de aproveitamento de água tratada e um edifício de exploração. A proposta apresentada resulta das alterações exigidas pelo sistema MBR, isto é, a tecnologia requer um tanque de homogeneização (para equalizar os caudais afluentes ao reator biológico) e um pré-tratamento adequado, neste caso, peneiração (para prevenir o entupimento das membranas). A Figura 7 apresenta o diagrama do processo da ETAR da Murteira.

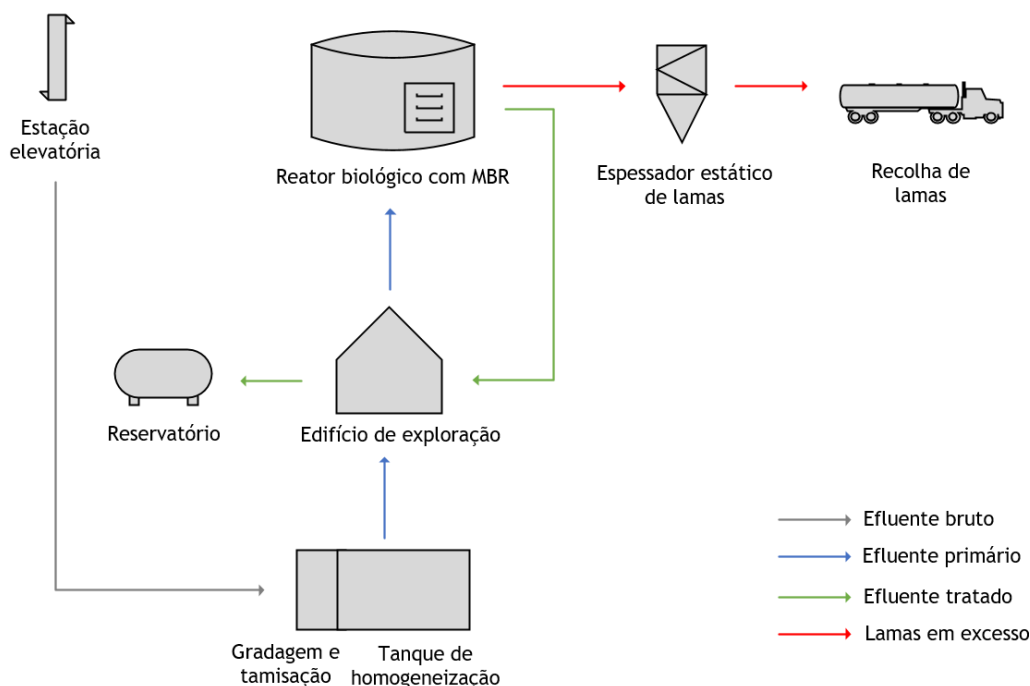


Figura 7 - Diagrama de processo da ETAR da Murteira.

A chegada das águas residuais da estação de bombagem é efetuada através de dois interceptores de escoamento gravítico, um que transporta o efluente urbano e outro que transporta o efluente industrial. Após elevação do afluente bruto até à obra de entrada, o caudal de águas residuais afluentes é medido através de um medidor eletromagnético e segue para o peneiro (tamisador), com malha de 3 mm, que por sua vez descarrega os resíduos sólidos removidos para um contentor. A montante do peneiro está instalada uma grade manual, com espaçamento de 30 mm entre barras, para retenção de sólidos grossos e proteção do equipamento de tamisação. Após esta etapa, o efluente é encaminhado para o tanque de homogeneização, de forma gravítica, de modo a permitir uma constância de cargas e picos de caudais, antes de entrar no tratamento biológico. Este tanque tem um volume de aproximadamente 215 m³ e apresenta um sistema de pré-arejamento, com o objetivo de reduzir alguma carga orgânica, bem como evitar a formação de odores desagradáveis causados por processos de anaerobiose resultantes da estagnação do efluente.

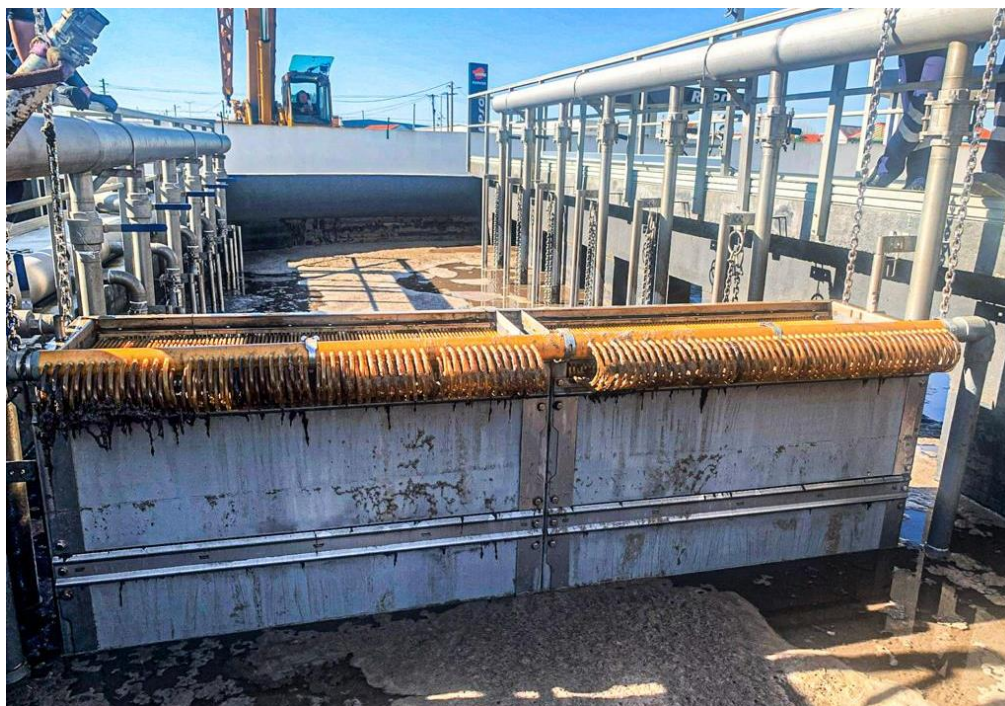


Figura 8 - Reator biológico durante uma intervenção às membranas, na ETAR da Murteira (fotografia tirada pela autora).

As águas residuais, devidamente homogeneizadas, entram no reator biológico, onde os microrganismos (predominantemente bactérias e protozoários) oxidam a matéria orgânica presente na água residual, na presença de oxigénio. A separação do efluente tratado da biomassa ativa é feita através de membranas de ultrafiltração, que dispõe de ar para a sua contínua limpeza, de modo a evitar a sua colmatção. O volume do reator aeróbio é de 395,8 m³, sendo que as membranas ocupam um volume de 82,1 m³. Este reator contém um soprador e uma rede de difusores de bolha fina, que asseguram o fornecimento de oxigénio necessário para a oxidação biológica, além do que já é disponibilizado pelo sistema de limpeza das membranas. As unidades de MBR, cujas características se apresentam na Tabela 3, estão submersas no reator (Figura 8).

Tabela 3 - Características das unidades de MBR instaladas na ETAR da Murteira.

Marca	Kubota
Modelo	RM 200
Número de unidades	7
Número de cartuchos	200/unidade
Tipo de membrana	Membrana plana de ultrafiltração
Material da membrana	Polietileno clorado
Área de filtração por membrana	1,45 m ²
Tamanho médio do poro	0,2 µm
Máxima TMP	0,2 bar

O módulo de membranas Kubota SMU (*Submerged Membrane Unit*), representado na Figura 9, é constituído por uma parte superior, a caixa das membranas, e por uma parte inferior, a grelha

de difusores. A caixa das membranas contém vários cartuchos de membranas, que estão ligados ao tubo coletor de permeado através de tubos transparentes de poliuretano. Os cartuchos são constituídos por dois painéis de membranas separadas por um espaço de igual tamanho. A água entra de fora para dentro, é filtrada e sai tratada pelos bicos, que se ligam aos tubos transparentes já referidos. A injeção de ar é feita de forma ascendente, através da rede de difusores de bolhas grossas, existentes na base do tanque. O difusor de ar consiste num tubo central com bifurcações espaçadas regularmente.

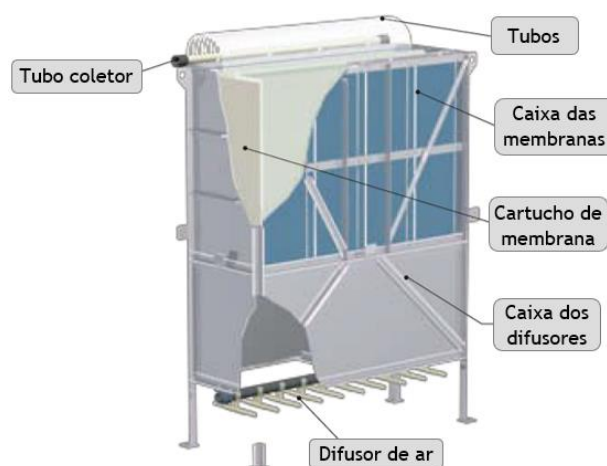


Figura 9 - Estrutura de uma unidade de MBR [Adaptado de ²⁸].

Durante a operação do módulo de membranas Kubota SMU, o principal parâmetro monitorizado é a TMP. Os valores de TMP são medidos através de um medidor de pressão, instalado na bomba de sucção de permeado, variando entre 0 e 200 mbar. Quando o valor se aproxima de 200 mbar, recomenda-se a execução de uma limpeza química no local, denominada *Clean In Place* (CIP). A limpeza química deve ocorrer entre 2 e 4 vezes por ano e consiste na introdução de 5,1 L de solução de hipoclorito de sódio diluído (0,25 a 0,6 %) por cartucho de membrana no tubo coletor de permeado, para eliminar a película que se adere à membrana. A solução de limpeza é inserida durante cerca de 10 a 15 minutos e, de seguida, deve deixar-se o sistema em repouso durante aproximadamente 2 horas para assegurar a recuperação da permeabilidade. No caso de incrustação por matéria inorgânica, utiliza-se uma solução ácida ao invés do hipoclorito de sódio. Se a incrustação estiver associada à presença de cálcio, podem aplicar-se ácido cítrico (0,5 a 1,0 %) ou ácido clorídrico (> 2,0 %).

A água recolhida é transportada para um reservatório, com capacidade de 5000 L, para reaproveitamento na ETAR, nomeadamente para lavagem de pavimentos e equipamentos, diluição das soluções, entre outras. Quanto às lamas biológicas em excesso, estas são extraídas do reator e elevadas para o espessador gravítico. O sobrenadante do espessador é encaminhado graviticamente para o circuito de escorrências.

4 Materiais e Métodos

O controlo da qualidade do efluente tratado é fundamental para um projeto de reutilização de água. Desta forma, desenvolveu-se um plano de monitorização na ETAR da Murteira, que consistiu na recolha de amostras na obra de entrada e, essencialmente, no fim da linha de tratamento. As amostras foram, posteriormente, analisadas tanto num laboratório acreditado (Laboratório Agroleico do Montijo) como no DEQ/FEUP pela autora. O principal objetivo deste estudo foi analisar os parâmetros físicos, químicos e microbiológicos da água presentes na legislação aplicável à reutilização de água residual tratada, definindo quais os usos específicos compatíveis com a sua qualidade.

A monitorização na ETAR da Murteira decorreu durante os meses de abril e maio de 2021. No que diz respeito às análises realizadas pelo laboratório acreditado, os amostradores automáticos foram colocados no reservatório, às segundas e quintas-feiras, e recolhidos 24 h depois, enquanto a recolha de amostras pontuais para analisar na faculdade pela autora foi efetuada manualmente através da torneira que permite a reutilização de água no recinto da ETAR, uma vez por semana, às terças-feiras. Neste caso, para as análises microbiológicas as amostras foram colhidas em recipientes estéreis e analisadas no próprio dia, ao passo que as restantes foram conservadas no frigorífico e analisadas três dias depois devido à disponibilidade do laboratório.

Assim, os parâmetros presentes no anexo I do Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, foram analisados pelo laboratório externo, de acordo com a Tabela 4. Porém, este decreto não define os métodos a utilizar, por isso recorreu-se ao Decreto-Lei n.º 236/98, de 1 de agosto. Alguns poderão não ser os métodos de referência mencionados, mas estão de acordo com o seu artigo 75.º, ou seja, conduzem a resultados equivalentes e comparáveis aos obtidos com aqueles, nomeadamente no que se refere ao limite de deteção, exatidão e precisão.

Tabela 4 - Parâmetros, métodos analíticos e periodicidade de amostragem utilizados pelo laboratório acreditado.

Parâmetro	Método analítico	Periodicidade de amostragem
CBO ₅ (mg/L O ₂)	Método das diluições	Bissemnal
SST (mg/L)	Gravimetria	
Turvação (NTU)	Turbidimetria	
<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)	Filtração por membranas	
Ovos de parasitas intestinais (Nº/L)	Contagem com o auxílio de microscópio	
Azoto amoniacal (mg /L NH ₄ ⁺)	Destilação e titulação	
Azoto total (mg/L N)	Analizador direto	
Fósforo total (mg/L P)	Absorção molecular	
pH	Potenciometria	

Alumínio (mg/L Al)	Absorção atômica	Mensal
Berílio (mg/L Be)	Absorção atômica	
Cobalto (mg/L Co)	Absorção atômica	
Fluoretos (mg/L F ⁻)	Elétrodo seletivo	
Ferro (mg/L Fe)	Absorção atômica	
Lítio (mg/L Li)	Absorção atômica	
Manganês (mg/L Mn)	Absorção atômica	
Molibdênio (mg/L Mo)	Absorção atômica com câmara de grafite	
Selênio (mg/L Se)	Absorção atômica	
Vanádio (mg/L V)	Absorção atômica	
SAR	Cálculo	
Salinidade: CE (dS/m) SDT (mg/L)	Electrometria Secagem e pesagem	
Boro (mg/L B)	Absorção molecular	

Os parâmetros apresentados na Tabela 4 foram analisados pela autora no DEQ/FEUP, conforme indicado no Apêndice A, à exceção da *E. coli* (que foi substituída pela contagem de heterotróficos totais no sentido de fornecer uma análise mais ampla) e dos ovos de parasitas intestinais, fósforo total, fluoretos, molibdênio, berílio, selênio e vanádio (devido à falta ou avaria do equipamento necessário).

4.1 Análises Microbiológicas Realizadas pela Autora

As bactérias heterotróficas são microrganismos que utilizam carbono orgânico como fonte de nutrientes. A contagem de bactérias heterotróficas fornece informações sobre a qualidade bacteriológica da água de uma forma ampla. A enumeração de microrganismos foi feita através do método de filtração por membranas, usando um meio não seletivo, PCA (*Plate Count Agar*), que permitiu a detecção inespecífica de bactérias heterotróficas cultiváveis.

A instalação laboratorial é apresentada na Figura 10, sendo o material utilizado: uma chama para manter a esterilidade, bombas de vácuo, rampas e funis de filtração, salina (a 0,85 %), filtros de nitrato de celulose (tamanho de poro de 0,2 µm), PCA (23,5 g em 1 L), micropipetas de 1 e de 5 mL, proveta de 100 mL, uma estufa bacteriológica e uma lupa.

Foram filtrados 1 mL de amostra diluída 10 vezes em série, 10 e 100 mL através de filtros de nitrato de celulose (0,20 µm de porosidade; Sartorius) em triplicado. Em seguida, as membranas foram incubadas em PCA (VWR), a 30 °C, durante 72 h, para enumerar os heterotróficos totais. As contagens de bactérias cultiváveis foram expressas em Log₁₀ (unidades formadoras de colônias/100 mL), sendo reportado o valor médio e o desvio-padrão para cada ensaio. Para avaliar a significância das diferenças entre os valores médios foi usado o teste t-student a um nível de $p < 0,01$ (PAST 4.0³⁸).



Figura 10 - Imagem da instalação laboratorial para a realização das análises microbiológicas.

4.2 Análises Físico-químicas Realizadas pela Autora

Os parâmetros físicos e químicos foram analisados pela autora com base nos métodos padrão para a análise de água e de água residual³⁹, tendo sido efetuadas leituras em duplicado para cada caso. Para a realização destas análises utilizaram-se os seguintes materiais e equipamentos: pipetas volumétricas de 1, 2, 10, 20, e de 100 mL, micropipetas de 1 e de 5 mL, balões volumétricos de 100 e de 200 mL, gobelés de 50, 100 e de 600 mL, kitassato de 500 mL, filtros de microfibras de vidro (47 nm de porosidade; Fisherbrand), bomba de vácuo, funil de filtração, pinça, cápsulas de porcelana, placa de aquecimento, balança, barras magnéticas e cronómetro.

- **CBO₅**

O teste da CBO determina o oxigénio consumido na degradação da matéria orgânica, sendo o seu valor calculado através da diferença entre o oxigénio dissolvido inicial e o oxigénio dissolvido após o período de incubação. Para a determinar recorreu-se ao método das diluições. Para isso, colocaram-se 2 L de água destilada num recipiente de plástico e adicionou-se 1 mL de cada nutriente e de sobrenadante de terra por cada litro de água de diluição. De seguida, prepararam-se seis fracos preenchidos até ao máximo: dois com água de diluição, dois com amostra, dois com amostra diluída duas vezes com água de diluição e dois com amostra diluída cinco vezes com água de diluição, como mostra a Figura 11a. Por último, foi mergulhada uma sonda sem criar bolhas de ar e foi lido o valor de oxigénio dissolvido no momento e passados 5 dias, segundo o esquema da Figura 11b, tendo ficado os frascos armazenados na incubadora, a 20 °C.



Figura 11 - Imagens a) dos frascos preparados e rotulados e b) da instalação para a leitura de oxigênio dissolvido.

- **SST**

Os sólidos suspensos totais correspondem à matéria em suspensão presente na água. Para que possam ser quantificados, são retirados da amostra em estudo através de filtração usando um filtro de microfibras de vidro previamente pesado. Depois de filtrada, esta é submetida à evaporação em estufa a 105 °C, seguindo-se um processo de arrefecimento no exsicador. Por último, o filtro com a amostra é novamente pesado e, desta forma, determina-se o teor de SST presente na amostra por gravimetria.

- **Turvação**

A turvação é uma propriedade ótica da água e mede a quantidade de luz que é dispersa pelas partículas suspensas ou coloides presentes na água quando uma luz é incidida na amostra. Este parâmetro foi medido diretamente no turbidímetro, inserindo um frasco com 10 mL com amostra, que fornece o resultado em Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU - *Nephelometric Turbidity Units*).

- **Azoto amoniacal**

A concentração de azoto amoniacal foi determinada através de um elétrodo seletivo (Figura 12), cuja reta de calibração obtida se apresenta no Apêndice B. Para a análise, adicionou-se 1 mL de solução ISA (solução de NaOH 10 N, para ajuste de pH) a 100 mL de amostra e aguardaram-se 5 minutos para se anotar o valor lido. A leitura foi realizada em mg/L NH₃.



Figura 12 - Instalação laboratorial para a determinação do azoto amoniacal.

- **Azoto total**

A concentração do azoto total pode ser lida no analisador de carbono orgânico total e de azoto total (Figura 13) quando há necessidade de realizar testes rápidos e fiáveis de carbono e/ou azoto em amostras provenientes de fontes naturais, domésticas e industriais, como foi o caso.



Figura 13 - TOC (Total Organic Carbon).

- **pH**

O pH foi determinado por potenciometria, usando um medidor de pH.

- **Alumínio, cobalto, ferro, lítio, manganês, SAR e boro**

A concentração destes elementos, inclusivamente do cálcio, do magnésio e do sódio (necessários para calcular a SAR) foi determinada no ICP (*Inductively Coupled Plasma*), representado na Figura 14a. O ICP é um método de espectrometria de emissão ótica, em que é transferida energia do plasma de argon (Figura 14b) para a amostra em análise, de forma a excitarem os elementos químicos. O princípio deste método baseia-se na luz libertada em comprimentos de onda específicos pelos átomos excitados à medida que transitam para um nível de energia mais baixo. Assim, o ICP mede a quantidade de luz emitida a cada comprimento de onda e usa essa informação para calcular a concentração de um dado elemento na amostra uma vez que esta é proporcional ao número de átomos ou iões que fazem a transição, pela lei de *Lambert Beer*.

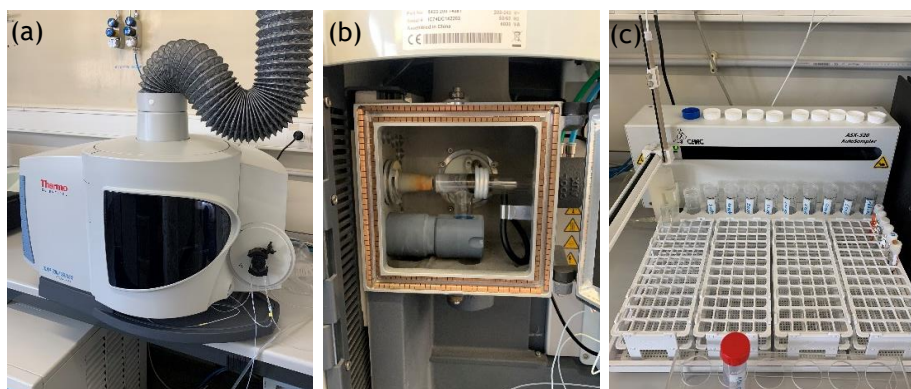


Figura 14 - Imagens do a) ICP, b) interior do equipamento e do c) amostrador automático.

Para calibrar o equipamento são medidas soluções que contêm quantidades conhecidas de cada elemento e é criada uma reta de calibração. Para se efetuar a leitura, colocam-se os padrões no amostrador automático (Figura 14c), assim como as amostras que se pretendem analisar, e os resultados são obtidos no computador, através do programa iTEVA, e extraídos sob a forma de um ficheiro de texto. Note-se que os resultados foram obtidos em intensidade e, posteriormente, convertidos em concentração através da respetiva reta de calibração.

- **Salinidade**

A salinidade da água corresponde ao seu teor de sais dissolvidos totais (SDT). Desta forma, também pode ser estimada pela sua condutividade elétrica (CE) visto que sais em solução tornam a água condutora de corrente elétrica. A CE pode ser medida diretamente no condutivímetro, enquanto a concentração de SDT foi determinada através de secagem e pesagem. Para isso, pesou-se uma cápsula de porcelana antes e depois da evaporação de 100 mL de amostra.

4.3 Análises Viroológicas

A qualidade virológica da água é de extrema importância para a proteção da saúde pública. Os principais vírus patogénicos humanos transmissíveis através de meio aquático são os vírus entéricos, tais como o Adenovírus, o Norovírus, o Rotavírus, o vírus da Hepatite A e o vírus da Hepatite E⁴⁰. Os vírus entéricos estão associados a sintomas como diarreia, febre e vômitos e ainda com doenças respiratórias, como bronquiolite⁴¹⁻⁴³.

Além destes, o vírus JC é um vírus humano, ubíquo na população mundial, e excretado na urina em quantidades elevadas da grande maioria da população adulta⁴⁴. Por este motivo, é um vírus frequentemente encontrado em águas residuais também e, sendo um vírus exclusivamente humano, poderá ser encarado como indicador de contaminação dessa origem. O vírus JC geralmente é contraído na infância e provoca uma infeção rara no cérebro, a leucoencefalopatia multifocal progressiva⁴⁴. Quando é reativado e começa a multiplicar-se, os

primeiros sintomas podem ser falta de coordenação e dificuldade em falar ou raciocinar, evoluindo progressivamente para demência e incapacidade de falar.

Dada a situação atual de pandemia provocada pela COVID-19, ainda foi analisado o SARS-CoV-2 uma vez que as águas residuais podem ser úteis na deteção precoce de surtos deste vírus, bem como na identificação de diversos genomas existentes no seio da comunidade⁴⁵. Assim, foram analisados e quantificados o vírus da Hepatite A, que apresenta um tamanho de 27-32 nm⁴⁰, o vírus JC, que tem um diâmetro de aproximadamente 40 nm⁴⁶, e o SARS-CoV-2, com um diâmetro médio de 100 nm⁴⁷, o que permite aferir a capacidade de remoção de agentes patogénicos que compõem as águas residuais do MBR em estudo.

As análises virológicas foram realizadas pela Professora Ana Matos, Diretora Técnica do Laboratório de Análises Clínicas da Universidade de Coimbra, e o método utilizado foi PCR (*polymerase chain reaction*) em tempo real, realizado sobre o extrato de ácidos nucleicos obtidos após concentração da amostra de água residual. Para isso, foi recolhida uma amostra de entrada (junto à obra de entrada) e uma de saída da ETAR (pela torneira, devidamente desinfetada), no dia 18 de maio de 2021.

5 Resultados e Discussão

Os resultados do presente trabalho derivam quer do plano de monitorização da qualidade da água residual tratada desenvolvido na ETAR da Murteira quer da análise económica que permite obter a relação custo-benefício da solução apresentada. Para efeitos de comparação com a legislação prevalecem os resultados do laboratório acreditado visto que os seus métodos são acreditados. As análises realizadas pela autora tiveram como principais objetivos a aprendizagem e familiarização com os métodos e parâmetros analisados, assim como a comparação com os resultados do laboratório acreditado.

5.1 Controlo da Qualidade da Água Residual Tratada na ETAR da Murteira

5.1.1 Análises Realizadas pelo Laboratório Acreditado

Segundo o artigo 18.º do Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, que diz respeito à verificação da conformidade, nenhuma amostra deve exceder o valor paramétrico em mais de 75 % e o número máximo anual de amostras não conformes não deve exceder os limites descritos no anexo III do referido decreto-lei. Assim, tendo em conta que foram colhidas 10 amostras, o número máximo de amostras que podem ser não conformes é 2. Os parâmetros presentes no Quadro 1.a. do anexo I do mesmo decreto-lei, foram analisados duas vezes por semana durante dois meses, pelo laboratório acreditado, sendo os seus resultados indicados na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas bissemanais e normas de qualidade de água para reutilização para rega (classe A).

Parâmetro	Resultado Data da colheita										Norma de qualidade
	16/04	20/04	23/04	27/04	30/04	04/05	07/05	11/05	18/05	21/05	
CBO ₅ (mg/L O ₂)	<LQ	3	<LQ	3	2	3	2,2	2,3	2,5	2,7	≤10
SST (mg/L)	<LQ	<LQ	5	6	<LQ	6	10	7,1	<LQ	5,2	≤10
Turvação (NTU)	1,5	1,7	3	1	1,3	0,9	4	5	<LQ	<LQ	≤5
<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)	8	0	-	0	0	0	0	0	0	0	≤10
Ovos de parasitas intestinais (Nº/L)	0	0	0	0	2	0	2	0	3	2	≤1
Azoto amoniacal (mg /L NH ₄ ⁺)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	14	<LQ	<LQ	10
Azoto total (mg/L N)	11	20	10	17	3	15	3	16,5	14,1	10,6	15
Fósforo total (mg/L P)	3	3	3	3	2	2	2,24	2,15	2,28	3,13	5
pH	7,7	7,4	7,7	7,9	7,6	7,6	7,8	7,6	7,6	7,8	6,5 a 8,5*

*Norma de qualidade de água mais restrita para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano).

LQ = Limite de quantificação

Tabela completa, incluindo incertezas e limites de quantificação, no Apêndice B

Através da análise da Figura 15, em que os resultados obtidos para cada parâmetro foram divididos pela respetiva norma de qualidade, é de fácil constatação os parâmetros que não se encontram dentro dos limites legais. No gráfico, todas as barras que se encontram ao nível ou abaixo de 1 cumprem as normas de qualidade, enquanto as que se encontram acima são não conformes. Através do gráfico, é possível observar alguns incumprimentos no que diz respeito aos ovos de parasitas intestinais, ao azoto amoniacal e ao azoto total. Os restantes parâmetros cumpriram sempre os requisitos legais.

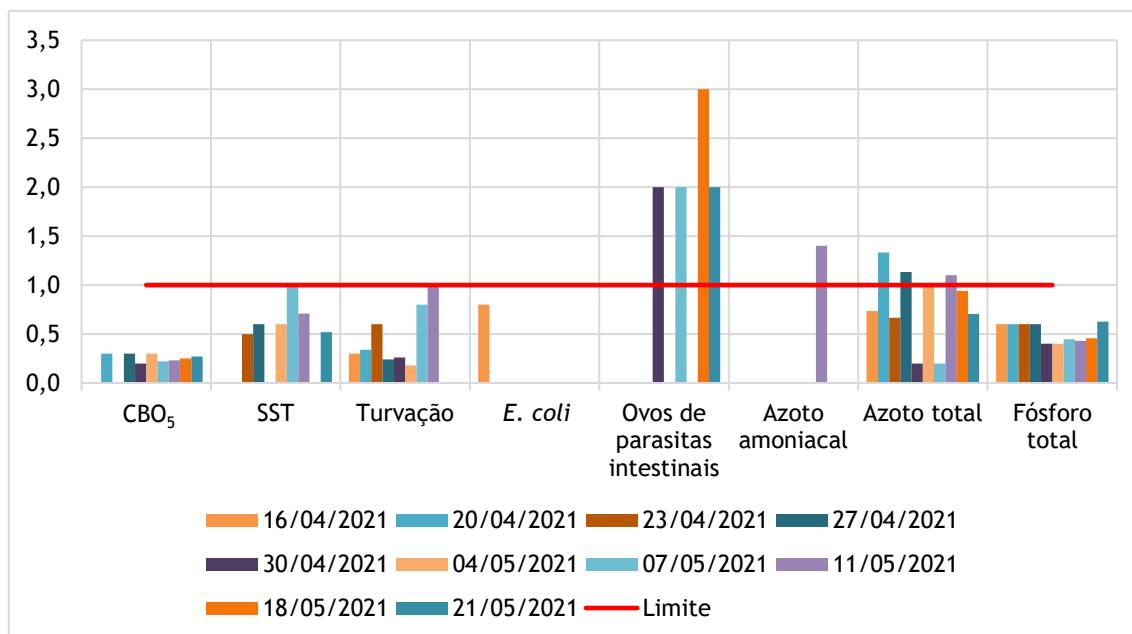


Figura 15 - Resultados dos principais parâmetros analisados pelo laboratório acreditado normalizados pela respetiva norma de qualidade para reutilização para rega (classe A).

Como se pode verificar pela Tabela 5, o limite máximo admissível para os ovos de parasitas intestinais é várias vezes ultrapassado. Os parasitas intestinais mais comuns podem ser categorizados em dois grupos: protozoários e helmintos⁴⁸. Os ovos de parasitas intestinais apresentam um tamanho bastante superior ao tamanho dos poros das membranas em estudo (0,20 μm). Por exemplo, os ovos de *Trichuris trichiura* possuem cerca de 20 a 24 μm de largura e 50 a 55 μm de comprimento²⁰. Deste modo, não era expectável que os ovos atravessassem as membranas. Outra evidência do correto funcionamento das membranas é a ausência da *E. coli*, que apresenta um diâmetro de cerca de 0,6 a 1,2 μm e um comprimento de cerca de 2 a 3 μm ²⁰, no efluente tratado.

Estes resultados podem ser justificados pela presença de parasitas no reservatório (local onde foram colocados os amostradores automáticos) uma vez que este nunca tinha sido limpo. Assim, foi efetuada uma desinfecção do mesmo com hipoclorito de sódio e realizou-se uma análise pontual no sentido de se averiguar esta hipótese. A recolha foi feita no dia 11 de junho e o resultado foi de 0 ovos de parasitas intestinais por litro de água residual, o que é um forte

indicativo de que o reservatório já estaria contaminado e de que as membranas estão a funcionar corretamente. Assim, assumiu-se que este parâmetro estaria sempre dentro das normas de qualidade, sendo recomendável uma limpeza frequente do reservatório, assim como o cuidado em mantê-lo fechado no sentido de se prevenir o reaparecimento de microrganismos.

Relativamente ao azoto, este pode existir nas águas residuais sob a forma de azoto molecular dissolvido, sob as formas orgânicas (aminas e proteínas) e inorgânicas (nitratos, nitritos e amoniacal)⁴⁹. Relativamente ao resultado do azoto amoniacal do dia 11 de maio, suspeita-se que este possa ser um erro de análise uma vez que foi um caso isolado. Contudo, seria necessário realizar mais análises para se obterem resultados mais conclusivos, o que não foi possível devido à limitação de tempo. Depois, o facto de o azoto amoniacal apresentar um valor residual em praticamente todas as análises sugere que a concentração de azoto total medida corresponde praticamente a azoto na forma de nitratos e/ou nitritos. A ETAR da Murteira não apresenta remoção de azoto, uma vez que a respetiva licença de descarga das águas residuais não o solicita. Contudo, a remoção de azoto é importante uma vez que este composto causa eutrofização e, além disso, os nitratos podem constituir um perigo para a saúde humana⁵⁰, sendo importante monitoriza-lo no caso da reutilização de água. Para baixar a concentração de azoto total, sugere-se que se faça uma recirculação do licor misto para um tanque anóxico, construído junto ao tanque de homogeneização, de forma que os nitratos produzidos no reator biológico sejam reduzidos a azoto gasoso pela carga orgânica do efluente bruto. Este processo é conhecido como desnitrificação pré-anóxica²⁰.

Em suma, todos os parâmetros se encontraram dentro dos limites permitidos por lei para reutilização para rega, à exceção do parâmetro azoto total. Apesar do uso deste efluente ser benéfico na agricultura, diminuindo a quantidade de fertilizantes necessários, uma concentração de azoto acima da norma legal poderá provocar formação de biofilme e obstrução dos sistemas de rega. Sendo este um parâmetro facultativo, considera-se que o efluente em estudo pode ser utilizado para este fim, contudo a sua aplicação seria mais segura se fosse usado, por exemplo, um processo de desnitrificação pré-anóxica. Ainda assim, o projeto de reutilização de água residual para rega poderá ser viável noutras ETAR cujo tratamento secundário se baseie na tecnologia MBR e onde já existam processos de nitrificação-desnitrificação.

Relativamente aos usos urbanos, a única limitação encontrada refere-se à aplicação do efluente tratado em usos recreativos de enquadramento paisagístico devido à concentração de fósforo total, que deveria ser igual ou inferior a 2 mg/L em lagos urbanos ou fontes, onde há risco de eutrofização. A qualidade do efluente tratado revelou ser compatível com os restantes usos urbanos, podendo este ser utilizado para lavagem de ruas, no combate a incêndios, como água de arrefecimento e ainda para autoclismos.

Por último, uma vez que as normas de qualidade da água para reutilização em usos industriais apenas se referem à turvação e à *E. coli*, não se verificam amostras não conformes, o que significa que o efluente tratado pode ser livremente utilizado para estes efeitos.

Na Tabela 6 apresentam-se os resultados obtidos pelo laboratório acreditado relativamente aos parâmetros analisados mensalmente, que dizem respeito à proteção das culturas agrícolas, florestais e solos, no caso da reutilização de água para rega.

Tabela 6 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas mensais e normas de qualidade para reutilização para rega.

Parâmetro	Resultado Data da colheita		Norma de qualidade
	16/04	18/05	
Alumínio (mg/L Al)	<LQ	<LQ	5,0
Berílio (mg/L Be)	<LQ	<LQ	0,1
Cobalto (mg/L Co)	<LQ	<LQ	0,05
Fluoretos (mg/L F ⁻)	0,31	0,37	2,0
Ferro (mg/L Fe)	<LQ	<LQ	2,0
Lítio (mg/L Li)	<LQ	<LQ	2,5
Manganês (mg/L Mn)	<LQ	<LQ	0,2
Molibdénio (mg/L Mo)	<LQ	<LQ	0,01
Selénio (mg/L Se)	<LQ	.*	0,02
Vanádio (mg/L V)	<LQ	<LQ	0,1
SAR	10	8	Variável
Salinidade: CE (dS/m)	1,24	1,25	
SDT (mg/L)	800	680	
Boro (mg/L B)	<LQ	<LQ	

*Análise não concretizada devido a avaria num aparelho.

Tabela completa, incluindo incertezas e limites de quantificação, no Apêndice B

Em relação aos parâmetros presentes na Tabela 6, verifica-se que todos cumprem as normas de qualidade exigidas para proteção das culturas agrícolas, florestais e solos. No caso da salinidade e do boro, os valores de referência devem ser definidos mediante a resistência das culturas em questão.

5.1.2 Análises Microbiológicas Realizadas pela Autora

Após 3 dias de incubação a 30 °C, a contagem de heterotróficos totais na amostra inicial apresentou uma média de $8,27 \pm 0,67 \text{ Log}_{10}(\text{ufc}/100 \text{ mL})$, enquanto na amostra de saída foi de $4,39 \pm 0,35 \text{ Log}_{10}(\text{ufc}/100 \text{ mL})$. Assim, verifica-se que houve uma redução log de cerca de 4, como é possível observar na Figura 16, o que corresponde a 99,94 % de redução dos heterotróficos totais com o tratamento em sistema MBR.

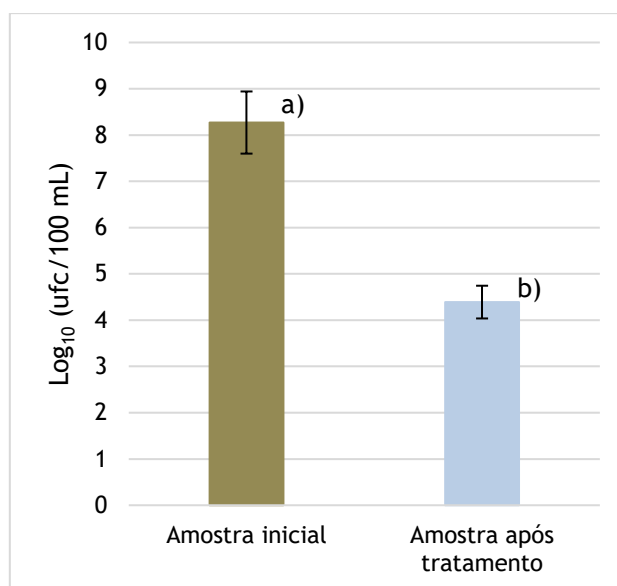


Figura 16 - Contagens de heterotróficos totais nas amostras de entrada e de saída da ETAR, em PCA. As amostras em a) e em b) são significativamente diferentes (t-student; $p < 0,01$).

Embora a *Escherichia coli* seja utilizada frequentemente como indicador da qualidade bacteriológica da água⁵¹, a contagem das bactérias heterotróficas totais forneceu uma análise mais ampla e permitiu confirmar a eficiência de remoção de bactérias do tratamento MBR.

5.1.3 Análises Físico-químicas Realizadas pela Autora

Os cálculos realizados pela autora para a obtenção dos resultados apresentados na Tabela 7 estão presentes no Apêndice B. Verifica-se que todos os resultados obtidos pela autora se encontram dentro dos limites legais para reutilização para qualquer tipo de rega, assim como para usos urbanos e industriais. A quantidade de amostras analisadas pela autora é bastante reduzida uma vez que o principal objetivo da realização destas análises foi a aprendizagem dos métodos usados para avaliar a qualidade da água. Além disso, permitiu a comparação com os resultados obtidos no laboratório certificado, assim como a validação de diferentes métodos.

Tabela 7 - Resultados obtidos pela autora nas campanhas semanais e normas de qualidade da água para reutilização para rega (classe A).

Parâmetro	Resultado			Norma de qualidade
	Data da colheita			
	04/05	11/05	18/05	
CBO ₅ (mg/L O ₂)	2,5	2,4	<LD	≤10
SST (mg/L)	4,5	4,5	1,5	≤10
Turvação (NTU)	1,70	0,40	0,25	≤5
Azoto amoniacal (mg/L NH ₄ ⁺)	<LD	<LD	<LD	10
Azoto total (mg/L N)	1,047	7,462	13,975	15
pH	7,36	7,94	7,63	6,5 a 8,5*
Alumínio (mg/L Al)	<LD	<LD	<LD	5,0
Cobalto (mg/L Co)	<LD	<LD	<LD	0,05
Ferro (mg/L Fe)	0,081	<LD	0,016	2,0
Lítio (mg/L Li)	0.030	0.033	0.024	2.5

Manganês (mg/L Mn)	0,011	0,022	0,0015	0,2
SAR	10	9	6	Variável
Salinidade: CE (dS/m)	1,806	1,579	1,294	
SDT (mg/L)	1141,5	1015,0	813,5	
Boro (mg/L B)	0,070	0,071	0,118	

*Norma de qualidade de água mais restrita para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano).

LD = Limite de detecção

Tabela completa, incluindo incertezas e limites de detecção, no Apêndice B

Tendo em conta as campanhas analíticas efetuadas pela autora e pelos Laboratórios Agroleico, é possível efetuar comparações entre os parâmetros: CBO₅, SST, turvação, azoto amoniacal, azoto total e pH nas amostras recolhidas nos dias 4, 11 e 18 de maio; e entre os parâmetros: alumínio, cobalto, ferro, lítio, manganês, SAR, condutividade elétrica, SDT e boro somente na amostra recolhida no dia 18 de maio. Na Figura 17 representam-se graficamente os resultados obtidos para os parâmetros cujos desvios observados entre as duas medições foram mais significativos (desvio relativo > 10 %).

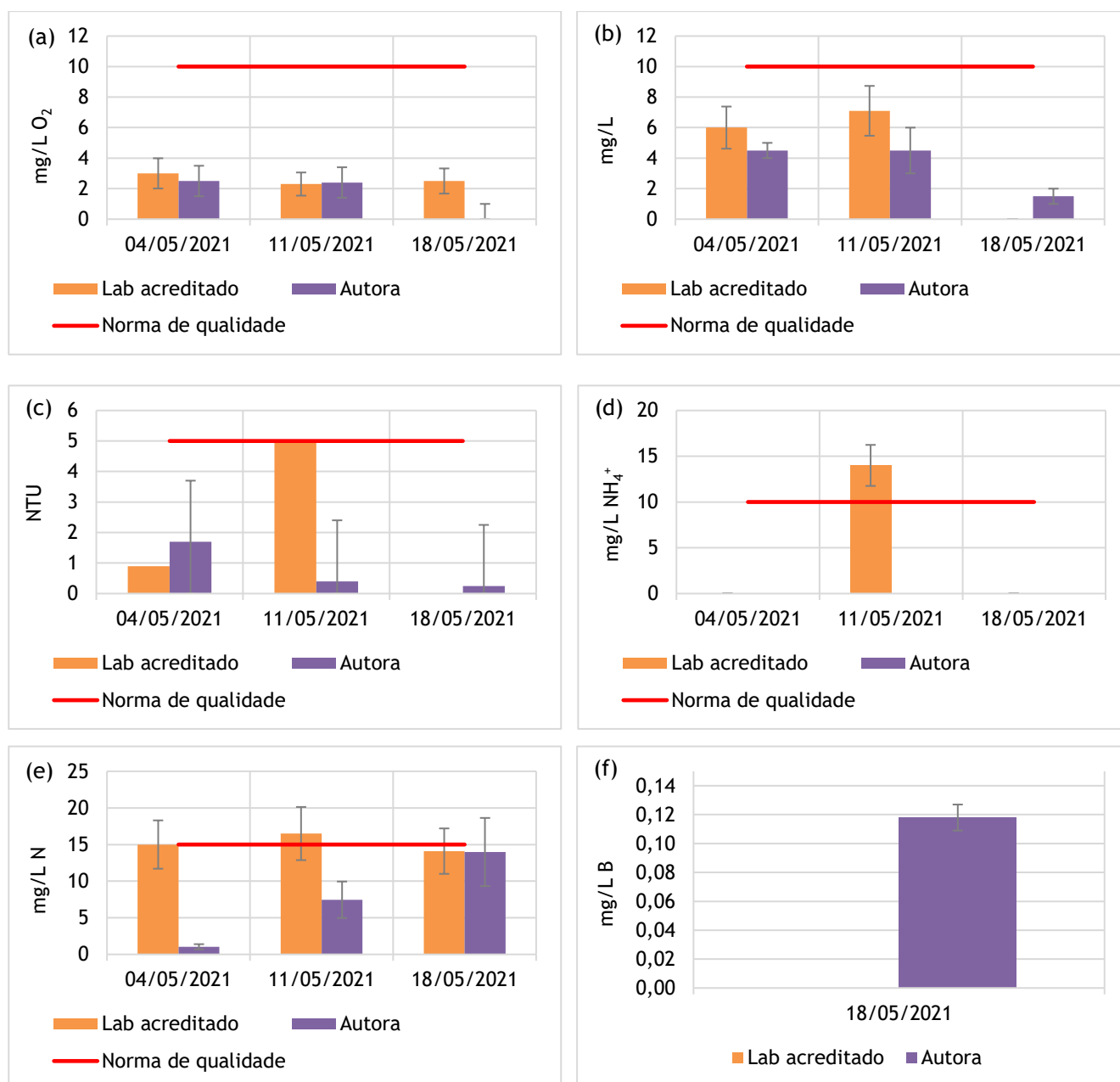


Figura 17 - Comparação entre os resultados obtidos pelo laboratório acreditado e pela autora relativamente aos parâmetros: a) CBO_5 , b) SST, c) turvação, d) azoto amoniacal, e) azoto total, nos dias 4, 11 e 18 de maio; e f) boro, no dia 4 de maio.

As diferenças nas medições dos parâmetros indicados na Figura 17 podem ter diferentes origens. Primeiramente, é de notar que os tipos de amostra recolhida - pontual ou composta, os tempos que demoraram a ser feitas as análises e as condições de conservação variaram consideravelmente entre as amostras analisadas pela autora e pelo laboratório contratado. As amostras recolhidas pela autora foram pontuais, tendo sido refrigeradas durante 3 dias antes de serem analisadas, enquanto as amostras recolhidas pelo laboratório externo foram compostas e as condições de conservação variaram de parâmetro para parâmetro. Além destes

aspectos, o facto de nem sempre terem sido utilizados os mesmos métodos analíticos também introduz heterogeneidade nos resultados.

Relativamente à CBO₅, a diferença mais significativa entre um resultado e outro observou-se na colheita de dia 18, como se pode ver na Figura 17a. Esta diferença pode ter ocorrido devido às condições de conservação terem sido diferentes: no laboratório acreditado este parâmetro pode ser analisado usando amostras refrigeradas ou congeladas no período de 1 mês. Durante o tempo de armazenamento, a amostra pode degradar-se significativamente. Assim, as amostras devem ser refrigeradas e analisadas o mais próximo do momento da recolha possível. Além disso, no caso das amostras pontuais, a refrigeração só não é necessária se a análise for efetuada dentro de 2 h³⁹. As amostras recolhidas pela autora demoraram cerca de 4 h a serem colocadas no frigorífico devido ao tempo de viagem da ETAR até à faculdade, o que poderá ter reduzido a CBO. Ainda assim, considera-se que o método utilizado na análise, o método das diluições, em ambos os laboratórios, não é o mais adequado uma vez que se trata de um processo moroso e ainda devido ao facto deste método ser mais apropriado para amostras de água com uma elevada carga poluente (daí as diluições)⁴⁹, o que não é o caso. Outro método que pode ser utilizado é o Oxitop®, que serve para medir a CBO em amostras de águas residuais não altamente contaminadas e é bastante mais simples⁵².

Através da análise da Figura 17b, é possível constatar pequenos desvios entre as determinações de sólidos suspensos totais pela autora e pelo laboratório acreditado. As amostras recolhidas pela autora foram armazenadas em garrafas de plástico durante 3 dias, não sendo possível garantir que não houve adesão do material suspenso às paredes do recipiente. Para além disso, as amostras não deveriam ser conservadas durante mais de 24 h³⁹. Em relação aos resultados obtidos no dia 18 de maio, não há grandes conclusões a retirar uma vez que o valor obtido pela autora é inferior ao limite de quantificação do método usado pelo laboratório acreditado (5 mg/L).

A turvação, cujos resultados se representam graficamente na Figura 17c, também deve ser lida o mais cedo possível após a recolha da amostra, mantendo as condições originais (temperatura e pH). Além disso, deve ser refrigerada ou congelada (a 4 °C) para minimizar a decomposição microbológica dos sólidos³⁹. Mais uma vez, o tempo decorrido entre a recolha e a análise das amostras por parte da autora pode ter alterado o valor de turvação lido, em particular no dia 11 de maio.

Em relação ao azoto amoniacal, o resultado do laboratório externo obtido no dia 11 de maio foi considerado um erro, tal como já foi discutido. Além disso, os métodos de análise usados foram diferentes: a autora utilizou um eletrodo seletivo, enquanto o laboratório externo recorreu à destilação e titulação. Uma vez que este parâmetro não foi quantificável em nenhuma das situações e que os dois laboratórios apresentam limites de deteção e de

quantificação muito diferentes, não sendo possível tirar conclusões acerca da sua concordância. De facto, o primeiro método mede geralmente concentrações de NH_3 entre 0,03 e 1400 mg/L, enquanto o segundo é aplicável a amostras com uma concentração superior a 5 mg/L³⁹.

No que diz respeito ao azoto total, Figura 17e, também se observam alguns desvios consideráveis. No laboratório contratado, as amostras recolhidas para análise deste parâmetro podem demorar até 1 mês a serem analisadas, sendo conservadas a $\text{pH} < 2$ com H_2SO_4 . Este parâmetro foi determinado nos dois laboratórios através do analisador direto (TOC), que é um método simples e rápido. Contudo, a discrepância maior verifica-se na primeira análise representada. De facto, a análise realizada pela autora demorou cerca de uma semana, sem a adição de ácido sulfúrico, devido à falta de calibração do equipamento, o que pode ter permitido a conversão de nitratos/nitritos em azoto molecular (com alguma carga orgânica ainda presente). Além disso, verifica-se que o equipamento usado na faculdade apresenta um limite de deteção bastante inferior ao do laboratório acreditado, sendo assim mais preciso.

Por último, na Figura 17f, observa-se um elevado desvio entre o resultado obtido pela autora e pelo laboratório acreditado relativamente ao boro, no dia 18 de maio. Esta diferença pode estar relacionada com os métodos utilizados. A concentração de boro foi determinada através do ICP pela autora e por absorção molecular pelo laboratório externo. O ICP é um método mais sensível, mais rápido e permite a análise de vários elementos em simultâneo, sendo assim de esperar que seja mais preciso⁵³. Aliás, o valor lido pelo ICP é inferior ao limite de quantificação do método utilizado pelos Laboratórios Agroleico.

5.1.4 Análises Viroológicas

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos da pesquisa e quantificação do vírus da Hepatite A, do vírus JC e do SARS-CoV-2 nas amostras de entrada e de saída da ETAR da Murteira. Tendo em conta as limitações da técnica usada associadas ao volume de água que se analisou, a concentração mínima de vírus que se conseguiria detetar era de 193 cópias de genoma/litro. Assim, “não detetado” significa que a quantidade de vírus na amostra será inferior a este valor.

Tabela 8 - Resultados obtidos da pesquisa e quantificação de vírus nas amostras de entrada e de saída.

Vírus	Amostra de entrada	Amostra de saída
Vírus da Hepatite A	Não detetado	Não detetado
Vírus JC	$1,33 \times 10^5$ cópias de genoma/litro	Não detetado
SARS-CoV-2	Não detetado	Não detetado

Pela análise da tabela, pode verificar-se que o vírus da Hepatite A e o SARS-CoV-2 não foram detetados nem na amostra de entrada nem na de saída, o que era expectável. O vírus da

Hepatite A não é endémico nem existem muitas pessoas infetadas, pelo que apenas em situações de alguns surtos é que é encontrado nas águas residuais. Quanto ao SARS-CoV-2, na altura em que foi feita a colheita da amostra existiam relativamente poucos casos ativos em Portugal (21 997 no dia 18 de maio de 2021), o que justifica a sua ausência nas amostras testadas. Já o vírus JC foi encontrado numa quantidade significativa na amostra de entrada, enquanto a pesquisa na amostra de efluente tratado não revelou a sua presença, confirmando a eficácia de remoção do sistema MBR.

5.2 Análise Económica

A ETAR da Murteira foi reabilitada em 2017 devido à necessidade de aumentar a sua capacidade de tratamento, sendo instalado uma unidade MBR e executadas todas as alterações necessárias na instalação. A ETAR em estudo está ao encargo das Águas do Ribatejo (AR), ou seja, esta entidade tem a responsabilidade de suportar os custos relacionados com as obras necessárias, assim como os custos de tratamento da água residual afluente. Enquanto empresa pública, as AR não têm como objetivo ter lucro com os serviços que prestam. Porém, uma vez que o seu efluente final apresenta um elevado potencial de reutilização para diversos fins, vendê-lo poderá constituir uma fonte de retorno do investimento realizado em 2017, bem como dos custos de operação e manutenção anuais da ETAR. Por outro lado, para além dos benefícios ambientais em causa, incluindo os da reutilização da água e minerais, pode ser atrativo para o consumidor face à aquisição de água da rede pública. Deste modo, foi elaborado um balanço económico em que, considerando um período de recuperação do investimento de 20 anos (tempo médio para o qual se projeta uma ETAR) e uma taxa interna de rentabilidade (TIR) próxima de 0 % (visto que se trata de um serviço público e o objetivo não é obter rentabilidade), se estimou o preço de venda da água residual tratada.

5.2.1 Custo de Investimento

Primeiramente, considerou-se que o custo de investimento (CI) corresponde ao custo de reabilitação da ETAR, estimado em 441 264 €, cujas componentes se apresentam compiladas na Tabela 9.

Tabela 9 - Parcelas consideradas no cálculo do custo de investimento.

Construção civil (€)	91 192
Equipamento (€)	268 131
Instalação elétrica (€)	81 941
Custo total de investimento (€)	441 264

5.2.2 Custos de Operação e Manutenção

Os custos de operação e manutenção (O&M) são fatores importantes na avaliação da viabilidade de um processo de tratamento. Neste caso, os elementos principais dos custos de O&M são:

energia, recolha de lamas, mão-de-obra, produtos químicos e manutenção das infraestruturas. Em relação aos custos energéticos, considerou-se o consumo elétrico no ano de 2020, que foi de cerca de 195 924 kWh. Considerando um preço médio de 0,10 €/kWh (valor de referência dos encargos com energia para concursos das Águas de Portugal), calculou-se um custo total em energia de 19 592 €/ano.

No ano de 2020, a quantidade de lamas espessadas foi de 440 m³ (a 1,5 %). Tendo em conta que cada camião-cisterna tem uma capacidade de cerca de 6 m³, que cada carga demora cerca de 1 hora (as lamas são recolhidas e transportadas até à ETAR de Esteveira, que fica a cerca de 10 minutos) e que o preço médio de recolha de lamas de 65 €/h, são necessárias 73 cargas/ano, o que perfaz um total de 4767 €/ano.

No que diz respeito aos custos humanos, tendo por base uma remuneração ilíquida de 635 €/mês e contabilizando subsídios de férias e de alimentação, contribuição para a Segurança Social (23,75 %) e seguro de acidentes de trabalho, o custo de cada trabalhador é de cerca de 1016 €/mês para as AR. Considerando dois operadores a realizar meio horário, estimou-se um total de 12 192 €/ano.

Os reagentes utilizados para efetuar a limpeza química das membranas, cerca de 3 a 4 vezes por ano, são o hipoclorito de sódio e o ácido cítrico. Cada limpeza consiste na introdução, no tubo coletor de permeado, de 5,1 L de solução de hipoclorito de sódio (a 0,5 %) e de solução de ácido cítrico (a 1 %), por cartucho de membrana. Assim, as quantidades necessárias de hipoclorito de sódio e de ácido cítrico por ano são, respetivamente, 143 L e 286 L. Conforme se apresenta no Anexo C, o preço do hipoclorito de sódio (a 13 %) é de 0,66 €/L, enquanto o do ácido cítrico (a 40 %) é de 0,64 €/L. Deste modo, o custo médio em agentes de limpeza é de cerca de 277 €/ano.

Ainda foram contabilizados custos de manutenção das infraestruturas no valor de 5000 €/ano, que envolvem custos de óleos, de reparações, entre outros. Em suma, são indicados na Tabela 10 os custos de operação e manutenção obtidos.

Tabela 10 - Parcelas consideradas no cálculo dos custos de O&M.

Energia (€/ano)	19 592
Recolha de lamas (€/ano)	4767
Mão-de-obra (€/ano)	12 192
Agentes de limpeza (€/ano)	277
Manutenção (€/ano)	5000
Custo totais de O&M (€/ano)	41 828

Para além do valor apresentado de custos totais de O&M, deve ser tido em conta o valor das amortizações, que corresponde ao custo de investimento a dividir pelo número de anos de retorno, obtendo-se um valor de 44 126 €/ano.

5.2.3 Custo da Água Residual Tratada

Depois de apurados os custos de investimento e de operação e manutenção, e considerando uma taxa de imposto de 25 %, o fluxo de caixa (CF - *cash-flow*) pode ser calculado através da Equação (3):

$$CF = (RA - CA - A) \cdot (1 - t_{\text{imp}}) + A \quad (3)$$

onde RA corresponde às receitas anuais, CA aos custos de operação e manutenção anuais, A à amortização e t_{imp} à taxa de imposto.

Contudo, neste caso, as receitas são o alvo do estudo económico, cujo valor se pode obter introduzindo a expressão anterior na Equação (4) e variando a TIR (i) entre valores próximos de 0 %. Na Equação (4) o IA corresponde ao investimento adicional que é necessário fazer ao fim de 10 anos, que é o tempo de vida útil das membranas, no valor de 154 290 €.

$$CI + IA \cdot (1 + i)^{-10} = \sum_{t=1}^{20} CF \cdot (1 + i)^{-t} \quad (4)$$

Tendo em conta o volume de água tratado no ano de 2020 de 125 762 m³, foram estudados vários cenários, presentes na Tabela 11, onde todos os valores foram fixados à exceção da TIR e da fração de água residual tratada vendida:

- Cenário 1: TIR = 6 %, todo o volume de água residual tratada vendido;
- Cenário 2: TIR = 6 %, dois terços do volume de água residual tratada vendido;
- Cenário 3: TIR = 6 %, metade do volume de água residual tratada vendido;
- Cenário 4: TIR = 0 %, todo o volume de água residual tratada vendido;
- Cenário 5: TIR = 0 %, dois terços do volume de água residual tratada vendido;
- Cenário 6: TIR = 0 %, metade do volume de água residual tratada vendido.

Tabela 11 - Cenários estudados para a obtenção do preço da água residual tratada.

Parâmetros fixos		Receitas (€/ano)					
		Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
CI (€)	441 264	95 784			74 177		
IA (€)	154 290						
CA (€/ano)	41 828						
A (€/ano)	44 126						
t_{imp} (%)	25						
t (anos)	20						
Preço da água tratada (€/m ³)		0,76	1,14	1,52	0,59	0,88	1,18

Observando a Tabela 11, verifica-se que qualquer cenário onde todo o volume de água produzido anualmente é vendido (cenários 1 e 4), independentemente da TIR, é aliciante para o consumidor uma vez que o seu preço de venda é bastante inferior ao preço da água da rede

pública (Anexo C), quer para autarquias e domésticos a partir do 2.º escalão (0,93 €/m³) quer para comerciais e industriais (1.º escalão: 1,5471 €/m³). Contudo, nos meses de inverno a procura desta água pode ser afetada, daí se terem considerado os restantes cenários. Para uma TIR de 0 %, a venda de dois terços do volume de água produzido (cenário 5) ainda poderá ser vantajosa para o consumidor, já os restantes cenários nunca serão atrativos a não ser do ponto de vista ambiental, que é universal a todos.

6 Conclusões

O crescente consumo de água e as alterações climáticas provocam a escassez de água em locais de stress hídrico. Além disso, a descarga de efluentes residuais não tratados nos meios hídricos existentes provoca a sua degradação. Deste modo, as estações de tratamento de águas residuais são fundamentais não só do ponto de vista do tratamento, como também da reutilização de água, contribuindo para a economia circular.

A presente dissertação estuda o desempenho de um reator biológico com membranas enquanto sistema de tratamento para reutilização de águas residuais. Esta tecnologia combina o tratamento biológico por lamas ativadas, com separação física por membranas de ultrafiltração, produzindo um efluente final de qualidade superior. Foi utilizada a ETAR da Murteira, situada numa região com risco elevado de stress hídrico, no distrito de Santarém, para avaliação e demonstração desta tecnologia avançada de tratamento de águas residuais.

A legislação portuguesa define, através do Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, as normas de qualidade de água residual tratada consoante o tipo de reutilização pretendido. Tendo este decreto como base, foi desenvolvido um plano de monitorização da qualidade do efluente tratado na ETAR da Murteira. O controlo dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos necessários foi adjudicado aos Laboratórios Agroleico, tendo sido as amostras de água recolhidas durante os meses de abril e maio.

Todos os parâmetros analisados obedeceram às normas de qualidade requeridas, à exceção dos ovos de parasitas intestinais e do azoto total. Contudo, dado que os ovos de parasitas intestinais apresentam um tamanho bastante superior ao tamanho médio dos poros das membranas de ultrafiltração, suspeitou-se que o reservatório onde se armazena o efluente tratado já estaria contaminado. Após desinfecção do tanque, o resultado comprovou a ausência de ovos no efluente. A utilização do efluente tratado, que contém azoto bio disponível, pode ser benéfica na rega pois permite a reciclagem de nutrientes essenciais ao crescimento das plantas. Contudo, o azoto total é um parâmetro aplicável para minimização dos riscos de formação de biofilme e obstrução dos sistemas de rega, o que limita as aplicações do efluente em estudo. Para reduzir a concentração de azoto total no efluente final é sugerido a implementação na ETAR de um processo de desnitrificação pré-anóxica. Ainda assim, concluiu-se que o efluente recuperado pode ser utilizado para uso industrial, para usos urbanos em aplicações como lavagem de ruas, água de combate a incêndios e autoclismos, e ainda em agricultura.

As análises à água também foram realizadas pela autora, na FEUP/DEQ, o que permitiu a aprendizagem dos métodos utilizados, bem como a comparação de resultados. As diferenças verificadas entre os resultados obtidos pela autora e pelo laboratório certificado podem ser justificadas essencialmente pelos diferentes tipos de amostra recolhida (pontual e composta),

diferentes tempos de análise e condições de conservação e, em alguns casos, diferentes métodos utilizados.

A pesquisa e quantificação de alguns vírus no efluente de entrada e no de saída da ETAR permitiu confirmar a eficácia do tratamento MBR na sua remoção, nomeadamente no que diz respeito ao vírus JC, que foi encontrado numa quantidade significativa no efluente bruto ($1,33 \times 10^5$ cópias de genoma/litro), ao contrário da amostra de saída onde não foi detetado.

Apesar dos elevados custos de investimento e de exploração, a utilização do reator biológico com membranas de ultrafiltração também revelou ser rentável do ponto de vista económico. Ainda que o objetivo do projeto não seja obter lucro, a venda do efluente tratado pode ser atrativa quer para a entidade gestora da ETAR, quer para o consumidor final, em três dos seis cenários analisados, cujos preços obtidos foram de 0,59, 0,76 e 0,88 €/m³ de água residual tratada.

Concluindo, perspetiva-se que a aposta na tecnologia estudada seja cada vez mais significativa no território nacional e internacional, uma vez que esta se apresenta como uma estratégia promissora de sustentabilidade ambiental, social e económica. Por outro lado, espera-se que com a sua disseminação diminua os custos de investimento e de operação.

7 Avaliação do Trabalho Realizado

7.1 Objetivos Realizados

O plano de monitorização da qualidade da água foi concretizado quer por um laboratório acreditado quer pela autora no DEQ/FEUP. Contudo, a análise adicional dos ovos de parasitas intestinais foi pouco representativa para concluir se o reservatório já estaria efetivamente contaminado, por isso ficou a faltar um maior número de análises feitas após a desinfecção do mesmo. Além destas análises, foi feita uma pesquisa adicional de alguns vírus no laboratório de Microbiologia da Faculdade de Farmácia da Universidade de Coimbra, que corroborou a eficácia das membranas de ultrafiltração na remoção de alguns agentes infecciosos.

Por último, foi elaborado um estudo económico que permitiu obter a relação custo-benefício da aplicação de um sistema MBR enquanto unidade de tratamento e de reutilização de água potável quer para a entidade gestora da ETAR, quer para o consumidor.

7.2 Desenvolvimentos Futuros

No caso de se pretender implementar remoção de azoto na ETAR da Murteira, propõe-se a construção de um tanque anóxico junto ao tanque de homogeneização, onde uma corrente de recirculação de licor misto reaja com a carga orgânica presente no efluente bruto, permitindo a redução dos nitratos e/ou nitritos presentes a azoto gasoso.

7.3 Apreciação Final

Uma vez que os objetivos iniciais, bem como os definidos ao longo do projeto, foram concretizados, considero que o trabalho foi realizado com sucesso e que as suas conclusões são bastante interessantes. Além dos resultados terem sido bastante positivos, considero o estudo de extrema importância dada a temática em causa e dado que o mesmo pode servir de base para projetos idênticos noutras regiões do país ou mesmo do mundo.

A realização deste trabalho também me permitiu aprofundar conhecimentos sobre os processos de separação por membranas, dando-me a conhecer a tecnologia de reatores biológicos com membranas como unidade de tratamento de águas residuais. A nível laboratorial, desenvolvi as minhas competências desde a recolha das amostras até à análise dos vários parâmetros em estudo. Além do mais, o estágio curricular contribuiu para o meu desenvolvimento pessoal e profissional, sobretudo ao nível das relações humanas.

8 Referências

1. Seckler D, Barker R, Amarasinghe U. Water scarcity in the twenty-first century. *Water Resources Development*. 1999;15(1-2): 29-42. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07900629948916> [Acedido em 27/02/2021].
2. Englande AJ, Krenkel P, Shamas, J. *Wastewater Treatment & Water Reclamation*. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Elsevier Inc.; 2015. Disponível em: doi:10.1016/b978-0-12-409548-9.09508-7 [Acedido em 03/03/2021].
3. Toze S. Reuse of effluent water - benefits and risks. *Agricultural Water Management*. 2006;80: 147-159. Disponível em: doi:10.1016/j.agwat.2005.07.010 [Acedido em 26/02/2021].
4. Monte H, Albuquerque A. *Reutilização de Águas Residuais*. ERSAR. 2010.
5. Yamamoto K, Hiasa M, Mahmood T, Matsuo T. Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated sludge aeration tank. *Water Science and Technology*. 1989;21: 43-54. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-1-4832-8439-2.50009-2> [Acedido em 12/04/2021].
6. Ladewig B, Al-Shaeli MNZ. *Fundamentals of Membrane Reactors*. Materials, Systems and Membrane Fouling. Singapura: Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering; 2017. Disponível em: doi:10.1002/9781118672839.ch1 [Acedido em: 26/02/2021].
7. World Resources Institute. *Aqueduct Water Risk Atlas*. Disponível em: <https://www.wri.org/aqueduct> [Acedido em: 12/04/2021].
8. Grumbles BH, Gilman P, Schafer JE. *Guidelines for Water Reuse*. United States Environmental Protection Agency. 2012.
9. Drechsel P (ed.), Scott CA (ed.), Raschid-Sally L (ed.), Redwood M (ed.), Bahri A (ed.). *Wastewater Irrigation and Health*. Assessing and Mitigating Risk in Low-Income Countries. Londres: Earthscan; 2010. Disponível em: ISBN: 9781849774666 [Acedido em: 03/07/2021].
10. Rebelo A, Franco A. *Guia para a Reutilização de Água para Usos Não Potáveis*. Agência Portuguesa do Ambiente. 2019.
11. Water Reuse Europe. *History of water reuse*. Disponível em: <https://www.water-reuse-europe.org/history-of-water-reuse/> [Acedido em: 18/06/2021].
12. Oliveira P. *Considerações sobre o clima do Algarve*. Direção Regional de Agricultura e

- Pescas do Algarve. 2018.
13. ERSAR. *Relatório anual dos serviços de águas e resíduos em Portugal. 2020*
 14. Asano T, Burton F, Leverenz H, Tsuchihashi R, Tchobanoglous G. *Water Reuse. Issues, Technologies, and Applications*. EUA: The McGraw-Hill Companies; 2007. Disponível em: ISBN: 9780071459273 [Acedido em: 01/03/2021].
 15. Bruggen BV, Vandecasteele C, Gestel TV, Doyenb W, Leysenb R. A Review of Pressure-Driven Membrane Processes. *Environmental Progress*. 2003;22(1): 46-56. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ep.670220116> [Acedido em: 03/03/2021].
 16. Mulder M. *Basic principles of membrane technology*. 2.^a edição. Países Baixos: Kluwer Academic Publishers; 1996. Disponível em: doi:10.1524/zpch.1998.203.part_1_2.263 [Acedido em: 11/06/2021].
 17. Tchobanoglous G, Burton FL, Stensel HD. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse*. 4.^a edição. China: McGraw-Hill Companies; 2003. Disponível em: ISBN: 9780070418783 [Acedido em: 03/03/2021].
 18. Park HD, Chang IS, Lee KJ. *Principles of Membrane Bioreactors for Wastewater Treatment*. Londres: Taylor & Francis Group; 2015. Disponível em: doi:10.1201/b18368 [Acedido em: 14/03/2021].
 19. Fard AK, Mckay G, Buekenhoudt A, Sulaiti HA, Motmans F, Khraisheh M, Atieh M. Inorganic Membranes: Preparation and Application for Water Treatment and Desalination. *Materials*. 2018;11(1): 74. Disponível em: doi: 10.3390/ma11010074. [Acedido em: 22/03/2021].
 20. Tchobanoglous G, Stensel HD, Tsuchihashi R, Burton F, Abu-Orf M, Bowden G, Pfrang W. *Tratamento de Efluentes e Recuperação de Recursos*. 5.^a edição. São Paulo: AMGH Editora Lda; 2016.
 21. He Z, Lyu Z, Gu Q, Zhang L, Wang J. Ceramic-based membranes for water and wastewater treatment. *Colloids and Surfaces A*. 2019;578. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2019.05.074> [Acedido em: 22/03/2021].
 22. Hofs B, Ogier J, Vries D, Beerendonk, EF, Cornelissen ER. Comparison of ceramic and polymeric membrane permeability and fouling using surface water. *Separation and Purification Technology*. 2011;79: 365-374. Disponível em: doi:10.1016/j.seppur.2011.03.025 [Acedido em: 23/03/2021].
 23. Padaki M, Murali RS, Abdullah MS, Misdan N, Moslehyani A, Kassim MA, Hilal N, Ismail AF. Membrane technology enhancement in oil-water separation. A review. *Desalination*. 2015;257: 197-207. Disponível em:

- <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.11.023> [Acedido em: 23/03/2021]
24. Assembleia Geral. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. Organização das Nações Unidas. 2015.
 25. Judd S, Judd C. *The MBR book*. Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment. 2.^a edição. Elsevier, 2006. Disponível em: doi:10.1016/B978-1-85617-481-7.X5000-4 [Acedido em: 04/03/2021].
 26. Liao Y, Bokhary A, Maleki E, Liao B. A review of membrane fouling and its control in algal-related membrane processes. *Bioresour Technol*. 2018;264: 343-358. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.06.102> [Acedido em: 25/06/2021].
 27. Al-Asheh S, Bagheri M, Aidan A. Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 2021;4. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109> [Acedido em: 25/06/2021].
 28. Kubota Corporation. *Catálogo Técnico KUBOTA SMU*. 2009.
 29. Wong CH, Barton GW, Barfor JP. The nitrogen cycle and its application in wastewater treatment. *The Handbook of Water and Wastewater Microbiology*. 2003: 427-439. Disponível em: doi:10.1016/B978-012470100-7/50026-1 [Acedido em: 17/03/2021].
 30. Melin T, Jefferson B, Bixio D, Thoeye C, Wilde WD, Koning JD, Graaf JV, Wintgens T. Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse. *Desalination*. 2006;187: 271-282. Disponível em: doi:10.1016/j.desal.2005.04.086 [Acedido em: 15/03/2021].
 31. Meng F, Chae SR, Drews A, Kraume M, Shin HS, Yang F. Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material. *Water Research*. 2009; 43: 1489-1512. Disponível em: doi:10.1016/j.watres.2008.12.044 [Acedido em: 15/03/2021].
 32. Liao BQ, Bagley DM, Kraemer HE, Leppard GG, Niss SN. A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors. *Water Environment Research*. 2004;76(5): 425-436. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/25045804> [Acedido em: 15/03/2021].
 33. Huang X, Xiao K, Shen Y. Recent advances in membrane bioreactor technology for wastewater treatment in China. *Frontiers of Environmental Science and Engineering*. 2010;4:245-271. Disponível em: DOI 10.1007/s11783-010-0240-z [Acedido em: 15/03/2021].
 34. Cho BD, Fane AG. Fouling transients in nominally sub-critical flux operation of a

- membrane bioreactor. *Journal of Membrane Science*. 2002;209: 391-403. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(02\)00321-6](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(02)00321-6) [Acedido em: 15/03/2021].
35. Huang H, Schwab K, Jacangelo JG. Pretreatment for Low Pressure Membranes in Water Treatment: A Review. *Environmental Science and Technology*. 2009;43(9): 3011-3019. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es802473r> [Acedido em: 29/03/2021].
36. Reiss CR, Taylor JS, Robert C. Surface water treatment using nanofiltration - pilot testing results and design considerations. *Desalination*. 1999;125: 97-112. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(99\)00127-7](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(99)00127-7) [Acedido em: 19/03/2021].
37. Vrijenhoek EM, Hong S, Elimelech M. Influence of membrane surface properties on initial rate of colloidal fouling of reverse osmosis and nanofiltration membranes. *Journal of Membrane Science*. 2001;188: 115-128. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(01\)00376-3](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(01)00376-3) [Acedido em: 19/03/2021].
38. Hammer Ø, Harper DAT, Ryan PD. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. 2001.
39. Clesceri LS, Greenberg AE, Eaton AD. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20.^a edição. Washington DC: American Public Health Association; 1998.
40. Corpuz MVA, Buonerba A, Vigliotta G, Zarra T, Ballesteros F, Campiglia P, Belgiorno V, Korshin G, Naddeo V. Viruses in wastewater: occurrence, abundance and detection methods. *Science of the Total Environment*. 2020;745: 140910. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140910> [Acedido em: 14/04/2021].
41. Pietruchinski E, Benati F, Lauretti F, Kisieliu J, Ueda M, Volotão EM, Soares CC, Hoshino Y, Linhares REC, Nozawa C, Santos N. Rotavirus Diarrhea in Children and Adults in a Southern City of Brazil in 2003: Distribution of G/P Types and Finding of a Rare G12 Strain. *Journal of Medical Virology*. 2006;78: 1241-1249. Disponível em: DOI:10.1002/jmv.20686 [Acedido em: 01/06/2021].
42. Bishop RF, Kirkwood CD. Enteric Viruses. *Encyclopedia of Virology*. 2008; 441-449. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/rwvi.1999.0079>. [Acedido em: 01/06/2021].
43. Kocwa-Haluch R. Waterborne enteroviruses as a hazard for human health. *Polish Journal of Environmental Studies*. 2001;10(6): 485-487.
44. Matos A, Duque V, Beato S, Silva JP, Major E, Meliço-Silvestre A. Characterization of JC Human Polyomavirus Infection in a Portuguese Population. *Journal of Medical Virology*. 2010;82: 494-504. Disponível em: DOI 10.1002/jmv.21710 [Acedido em: 27/06/2021].
45. ACI Ciências ULisboa, AdP. *Águas residuais podem ser usadas para ajudar a melhorar a*

- resposta a novos surtos da COVID-19*. Disponível em:
<https://ciencias.ulisboa.pt/pt/noticia/26-05-2021/aguas-residuais-podem-ser-usadas-para-ajudar-a-melhorar-a-resposta-a-novos-surtos> [Acedido em: 01/06/2021].
46. Maginnis MS, Nelson CDS, Atwood WJ. JC Polyomavirus Attachment, Entry, and Trafficking: Unlocking the Keys to a Fatal Infection. *Journal of NeuroVirology*. 2014;21(6): 601-613. Disponível em: DOI: 10.1007/s13365-014-0272-4 [Acedido em: 27/06/2021]
 47. Bar-On Y M, Flamholz A, Phillips R, Milo R. SARS-CoV-2 (COVID-19) by the numbers. *eLife*. 2020;9. Disponível em: DOI: <https://doi.org/10.7554/eLife.57309> [Acedido em: 01/06/2021].
 48. Haque R. Human intestinal parasites. *Journal of Health, Population and Nutrition*. 2007;25(4): 387-391. Disponível em: PMID: 18402180 [Acedido em: 04/07/2021].
 49. Monte HM, Santos MT, Barreiros AM, Albuquerque A. *Tratamento de Águas Residuais. Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico*. ERSAR. 2016.
 50. Yamashita T, Yamamoto-Ikemoto R. Nitrogen and Phosphorus Removal from Wastewater Treatment Plant Effluent Via Bacterial Sulfate Reduction in an Anoxic Bioreactor Packed with Wood and Iron. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2014;11: 9835-9853. Disponível em: doi: 10.3390/ijerph110909835 [Acedido em: 04/07/2021].
 51. Odonkor ST, Ampofo JK. Escherichia coli as an indicator of bacteriological quality of water: an overview. *Microbiology Research*. 2013;4(2). Disponível em: <https://doi.org/10.4081/mr.2013.e2> [Acedido em: 04/07/2021].
 52. WTW Measurement Systems Inc. *Catalogue BOD Measurement, Oxitop IS6, IS12, IS12-6*. 2021.
 53. Wilschefski SC, Baxter MR. Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry: Introduction to Analytical Aspects. *The Clinical Biochemist Reviews*. 2019;40(3): 115-133. Disponível em: <https://doi.org/10.33176/AACB-19-00024> [Acedido em: 04/07/2021].

Anexo A - Normas de Qualidade de Água para Reutilização

Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto

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

⁽¹⁾ Descrição no Quadro 2.

⁽²⁾ Aplicável na rega de culturas agrícolas destinadas ao consumo animal.

⁽³⁾ Parâmetro facultativo. Poderá ser aplicável em alguns projetos de rega para minimização dos riscos de formação de biofilme e obstrução dos sistemas de rega.

⁽⁴⁾ Só aplicável a sistemas descentralizados ou descentralizados em simbiose.

Figura A.1 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega.

Parâmetro	Norma de Qualidade	Unidade
Alumínio.....	5,0	mg Al/L
Berílio.....	0,1	mg Be/L
Cobalto.....	0,05	mg Co/L
Fluoretos.....	2,0	mg F/L
Ferro.....	2,0	mg Fe/L
Lítio.....	2,5	mg Li/L
Manganês.....	0,2	mg Mn/L
Molibdénio.....	0,01	mg Mo/L
Selénio.....	0,02	mg Se/L
Vanádio.....	0,1	mg V/L
SAR.....	Variável em função da sensibilidade das culturas.	
Salinidade.....		
Boro.....		

Figura A.2 - Normas de qualidade de água para reutilização para rega para proteção das culturas agrícolas, florestais e solos.

Classe	Possíveis usos	Nível de tratamento
A	Rega sem restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru em que a parte consumível está em direto contacto com a água; rega de jardins públicos sem restrição de acesso; rega de jardins privados.	Mais avançado que secundário (desinfecção).
B	Rega com restrição de acesso (usos urbanos e agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos; rega de jardins com restrição de acesso, incluindo áreas de lazer e desportivas (e.g. campos de golfe).	Mais avançado que secundário (desinfecção).
C	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): rega de culturas consumidas em cru, que crescem acima do solo, e em que a parte consumível não está em direto contacto com a água; rega de culturas agrícolas destinadas a processamento e de culturas agrícolas não destinadas ao consumo humano, incluindo culturas destinadas ao consumo animal (produção de leite ou carne), exceto suínos.	Mais avançado que secundário (desinfecção).
D	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes, incluindo sementes para uso industrial ou produção de energia.	Mais avançado que secundário (desinfecção).
E	Rega com restrição de acesso (usos agrícolas): produção de sementes; rega de áreas de uso naturalmente restrito (e.g., sebes, áreas de contenção (prados em socacos)).	Mais avançado que secundário (desinfecção).

Figura A.3 - Descrição das classes de rega - usos e nível de tratamento adequado em função das várias classes de qualidade da água.

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

⁽¹⁾ As vias de exposição por ingestão (não intencionada) deverão ser consideradas de máxima importância nestes usos, pelo que a qualidade deverá ser similar à da classe A para rega.

⁽²⁾ Pode ocorrer crescimento microbiano a valores superiores ou inferiores a esta gama de pH.

⁽³⁾ Quando utilizado em locais sujeitos à ocorrência de eutrofização (e.g., lagos urbanos, fontes).

⁽⁴⁾ Em função das especificidades de aplicação das ApR poderão ser controlados alguns metais e compostos iónicos, tais como ferro, manganês, cloretos, sulfatos, alcalinidade e sílica, para minimização da ocorrência de calcificação ou corrosão dos sistemas de armazenagem e distribuição de água.

⁽⁵⁾ Em sistemas de lavagem manual a alta pressão, as vias de exposição por ingestão (não intencionada) deverão ser consideradas de máxima importância nestes usos, pelo que a qualidade deverá ser similar à da classe A para rega.

Figura A.4 - Normas de qualidade de água para usos urbanos e usos paisagísticos (fora do contexto urbano).

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

Figura A.5 - Normas de qualidade de água para reutilização em uso industrial (proteção para contacto humano).

Anexo B - Reatores Biológicos com Membranas

Tabela B.1 - Condições de operação típicas e qualidade do efluente de um MBR¹⁷.

Parâmetro	Unidade	Intervalo
Condições de operação		
CQO	kg/m ³ ·d	1,2 - 3,2
MLSS	mg/L	5 000 - 20 000
F/M	g CQO/g MLSS·d	0,1 - 0,4
SRT	d	5 - 20
HRT*	h	4 - 6
Fluxo	L/m ² ·d	600 - 1100
TMP	kPa	4 - 35
Oxigénio dissolvido (OD)	mg/L	0,5 - 1,0
Qualidade do efluente		
CBO	mg/L	< 5
CQO	mg/L	< 30
NH ₃	mg N/L	< 1
N _{total}	mg N/L	< 10
Turvação	NTU	< 1

*HRT (*hydraulic retention time*) é o tempo de permanência de um elemento de fluido no reator.

Anexo C - Análise Económica

Preços dos agentes de limpeza das membranas



an RNM company

QUIMITEJO PRODUTOS QUIMICOS, S.A.

Página 1 de 1

Cotação

Data 2020-08-10	Número 312000021
Código da Conta 101997	NIF / VAT Number PT506477940

Exmo(s) Senhor(es)

AMBIAGUA-GESTAO EQUIPAMENTOS AGUAS, SA
AV. DESCOBRIMENTOS, N.º63
EDIFICIO LAS VEGAS III
4760-011 VILA NOVA FAMALICAO
Portugal

SI Referência	Validade
EMAIL 10/08	31/12/2020

Condições de Pagamento
Data de vencimento em 30 dias

Artigo	Descrição	Preço	Quant.	UN	Total	Iva	Data
109120	BECHLOR 13% - BIL2SL TP	550,00 EUR por 1000KG	90	KG	49,50	23,00	10.08.2020
Outras Condições: Transporte: Em paletes Portes: Local de Entrega: Taxa: Taxa perdida							
104549	ACIDO CITRICO 40% - BIL2SL	790,00 EUR por 1000KG	75	KG	59,25	23,00	10.08.2020
Outras Condições: Transporte: Em paletes Portes: Local de Entrega: Taxa: A devolver							

Observações

Este documento não serve de fatura

Sede: Avenida das Searas, 132
geral@quimitejo.com
SAP-329 Landim - Famalicão

Correio: Apartado 1003 PC Delães T.+351 252 900 400
4766-908 Delães - Famalicão F.+351 252 900 409
www.quimitejo.com



Figura C.1 - Fatura relativa aos preços dos agentes de limpeza das membranas.

Tarifas de abastecimento de água para 2021 das Águas do Ribatejo

TARIFAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA

Tarifa variável (€/m³ para períodos de 30 dias)

Domésticos

1º escalão (0 a 5 m ³)	0,4076 €
2º escalão (> 5 a 15 m ³)	0,9300 €
3º escalão (> 15 a 25 m ³)	1,5471 €
4º escalão (> 25 m ³)	2,5180 €

Não Domésticos

Comerciais e Industriais

1º escalão (0 a 50 m ³)	1,5471 €
2º escalão (> 50 m ³)	2,5180 €

Estado

escalão único	2,5180 €
---------------	----------

Autarquias

escalão único	0,9300 €
---------------	----------

Instituições e agremiações privadas de beneficência, culturais, desportivas, sem fins lucrativos e outras de interesse público

escalão único	0,9300 €
---------------	----------

Consumos Temporários

escalão único	4,4802 €
---------------	----------

Figura C.2 - Extrato das tarifas de abastecimento de água para 2021 das AR.

Apêndice A - Materiais e Métodos

Tabela S.1.1 - Parâmetros, métodos analíticos e periodicidade de amostragem utilizados pela autora.

Parâmetro	Método analítico	Periodicidade de amostragem
Heterotróficos totais	Filtração por membranas	Semanal
CBO ₅ (mg/L O ₂)	Método das diluições	
SST (mg/L)	Gravimetria	
Turvação (NTU)	Turbidimetria	
Azoto amoniacal (mg/L NH ₄ ⁺)	Elétrodo seletivo	
Azoto total (mg/L N)	Analizador direto	
pH	Potenciometria	
Alumínio (mg/L Al)	ICP	
Cobalto (mg/L Co)	ICP	
Ferro (mg/L Fe)	ICP	
Lítio (mg/L Li)	ICP	
Manganês (mg/L Mn)	ICP	
SAR	Cálculo	
Salinidade: CE (dS/m) SDT (mg/L)	Electrometria Secagem e pesagem	
Boro (mg/L B)	ICP	

Apêndice B - Resultados e Discussão

Análises realizadas pelo laboratório acreditado

Tabela S.2.1 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas bissemanais, com as respectivas incertezas e limites de quantificação.

Parâmetro	Resultado Data da colheita										LQ
	16/04	20/04	23/04	27/04	30/04	04/05	07/05	11/05	18/05	21/05	
CBO ₅ (mg/L O ₂)	<LQ	3± 33%	<LQ	3± 33%	2± 33%	3± 33%	2,2± 33%	2,3± 33%	2,5± 33%	2,7± 33%	2
SST (mg/L)	<LQ	<LQ	5± 23%	6± 23%	<LQ	6± 23%	10± 23%	7,1± 23%	<LQ	5,2± 23%	5
Turvação (NTU)	1,5± 6%	1,7± 6%	3± 6%	1± 6%	1,3± 6%	0,9± 6%	4± 6%	5± 6%	<LQ	<LQ	0,7
<i>E. coli</i> (ufc/100 mL)	8	0	-	0	0	0	0	0	0	0	6
Ovos de parasitas intestinais (Nº/L)	0	0	0	0	2	0	2	0	3	2	5
Azoto amoniacal (mg /L NH ₄ ⁺)	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	14± 16%	<LQ	<LQ	1
Azoto total (mg/L N)	11± 22%	20± 22%	10± 22%	17± 22%	3± 22%	15± 22%	3± 22%	16,5± 22%	14,1± 22%	10,6± 22%	2
Fósforo total (mg/L P)	3± 16%	3± 16%	3± 16%	3± 16%	2± 16%	2± 16%	2,24± 16%	2,15± 16%	2,28± 16%	3,13± 16%	5
pH	7,7± 0,1	7,4± 0,1	7,7± 0,1	7,9± 0,1	7,6± 0,1	7,6± 0,1	7,8± 0,1	7,6± 0,1	7,6± 0,1	7,8± 0,1	-

LQ = Limite de quantificação

Tabela S.2.2 - Resultados obtidos pelo laboratório acreditado nas campanhas mensais, com as respectivas incertezas e limites de quantificação.

Parâmetro	Resultado Data da colheita		LQ
	16/04	18/05	
Alumínio (mg/L Al)	<LQ	<LQ	0,5
Berílio (mg/L Be)	<LQ	<LQ	0,03
Cobalto (mg/L Co)	<LQ	<LQ	0,05
Fluoretos (mg/L F ⁻)	0,31±18%	0,37±18%	0,20
Ferro (mg/L Fe)	<LQ	<LQ	0,10
Lítio (mg/L Li)	<LQ	<LQ	0,1
Manganês (mg/L Mn)	<LQ	<LQ	0,10
Molibdênio (mg/L Mo)	<LQ	<LQ	0,010
Selênio (mg/L Se)	<LQ	-*	0,02
Vanádio (mg/L V)	<LQ	<LQ	0,020
SAR	10±17%	8±17%	-
Salinidade: CE (dS/m)	1,24	1,25	30
SDT (mg/L)	800±12%	680±12%	-
Boro (mg/L B)	<LQ	<LQ	0,2

*Análise não concretizada devido a avaria num aparelho.

Análises Físico-químicas Realizadas pela Autora

Tabela S.2.3 - Resultados obtidos pela autora nas campanhas semanais, com as respetivas incertezas e limites de deteção.

Parâmetro	Resultado			LD
	Data da colheita			
	04/05	11/05	18/05	
CBO ₅ (mg/L O ₂)	2,5±1	2,4±1	<LD	2
SST (mg/L)	4,5±0,5	4,5±1,5	1,5±0,5	-
Turvação (NTU)	1,70±2	0,40±2	0,25±2	-
Azoto amoniacal (mg/L NH ₄ ⁺)	<LD	<LD	<LD	0,01
Azoto total (mg/L N)	1,047±0,349	7,462±2,487	13,975±4,658	-
pH	7,36±0,01	7,94±0,01	7,63±0,01	-
Alumínio (mg/L Al)	<LD	<LD	<LD	0,012
Cobalto (mg/L Co)	<LD	<LD	<LD	0,008
Ferro (mg/L Fe)	0,081	<LD	0,016	0,004
Lítio (mg/L Li)	0,030	0,033	0,024±0,002	-
Manganês (mg/L Mn)	0,011	0,022	0,0015	0,0010
SAR	10±0,4	9±0,4	6±0,2	-
Salinidade:				
CE (dS/m)	1,806±0,009	1,579±0,008	1,294±0,006	-
SDT (mg/L)	1141,5±0,5	1015±6	813,5±7,5	-
Boro (mg/L B)	0,070	0,071	0,118±0,009	-

LD = Limite de deteção

- **CBO₅**

Para cada frasco que cumpra um consumo de oxigénio dissolvido mínimo de 2,0 mg/L e um valor residual de oxigénio dissolvido de 1,0 mg/L³⁹, a CBO₅ é calculada da seguinte forma:

$$\text{CBO}_5 \text{ (mg/L)} = [(D_1 - D_2) - (B_1 - B_2)] P \quad (\text{S1})$$

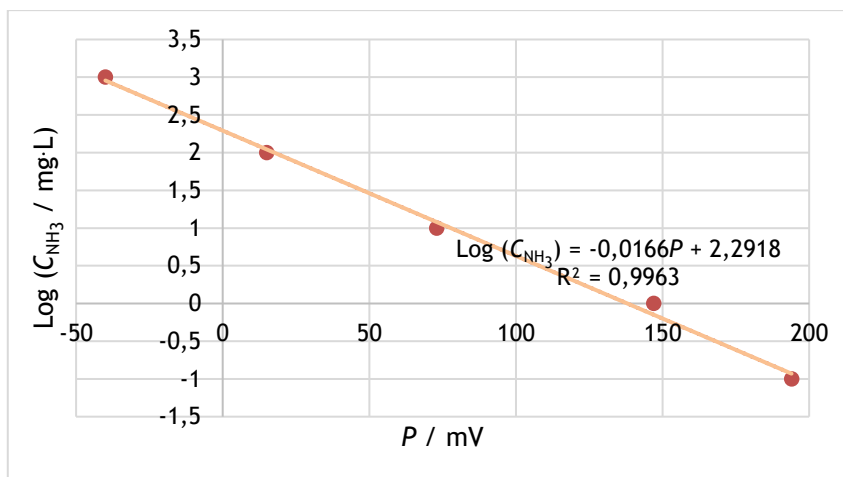
onde D₁ e D₂ são as medições de oxigénio dissolvido nas amostras, em mg/L, imediatamente após a preparação e após 5 dias de incubação a 20 °C, respetivamente; B₁ e B₂ são, respetivamente, as medições de oxigénio dissolvido na água de diluição, em mg/L, antes e depois de incubação; P é o fator de diluição e f=(P-1)/P.

- **SST e SDT**

O cálculo quer dos SST quer dos SDT é feito segundo a seguinte equação, sendo que no caso dos SST as massas se referem ao peso dos filtros utilizados para filtrar a amostra, enquanto no caso dos SDT se referem ao peso das cápsulas de porcelana antes e após evaporação da amostra.

$$\text{SST/SDT (mg/L)} = (m_{\text{final}} - m_{\text{inicial}}) \text{ g} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ mL}}{100 \text{ mL}} \quad (\text{S2})$$

- **Azoto amoniacal**



Reta de calibração para a determinação de azoto amoniacal.

- Alumínio, cobalto, ferro, lítio, manganês, SAR e boro

Tabela S.2.4 - Resultados obtidos no ICP.

Parâmetro	Data da colheita	Reta de calibração	Int _{lida}	Resultado
Alumínio (mg/L Al)	04/05/2021	Int = 732,86 C + 0,0948 ($R^2=0,999$)	3,224	<LD
	11/05/2021		2,799	<LD
	18/05/2021	Int = 410,86 C - 1,0039 ($R^2=0,9999$)	2,911	0,01
Boro (mg/ L B)	04/05/2021	Int = 18 288 C + 319,55 ($R^2=0,9997$)	1595	0,07
	11/05/2021		1613	0,07
	18/05/2021	Int = 15 811 C - 126,34 ($R^2=0,9998$)	1747	0,12
Cálcio (mg/L Ca)	04/05/2021	Int = 1353,1 C + 233,98 ($R^2=0,9989$)	3765 ^a	52,19
	11/05/2021		3831 ^a	53,17
	18/05/2021	Int = 1239,1 C + 97,969 ($R^2=0,9998$)	3640 ^a	57,17
Cobalto (mg/L Co)	04/05/2021	Int = 13 746 C - 20,195 ($R^2=0,9998$)	5,045	<LD
	11/05/2021		4,752	<LD
	18/05/2021	Int = 12 667 C - 0,0907 ($R^2=0,9998$)	6,420	<LD
Ferro (mg/L Fe)	04/05/2021	Int = 18 760 C + 57,334 ($R^2=0,9998$)	1579	0,081
	11/05/2021		97,9	<LD
	18/05/2021	Int = 19 262 C - 30,802 ($R^2=0,9999$)	273	0,016
Lítio (mg/L Li)	04/05/2021	Int = 3×10^6 C - 21938 ($R^2=0,9991$)	64 430	0,030
	11/05/2021		70 660	0,033
	18/05/2021	Int = 3×10^6 C - 4888,3 ($R^2=0,9998$)	57 095	0,024
Magnésio (mg/L Mg)	04/05/2021	Int = 2×10^{-6} C - 0,0091 ($R^2=0,9998$)	397 300	13,98
	11/05/2021		430 600	15,17
	18/05/2021	Int = 476 858 C + 19845 ($R^2=0,9989$)	426 350 ^a	17,05
Manganês (mg/L Mn)	04/05/2021	Int = 126 546 C - 40,758 ($R^2=0,9998$)	1385	0,011
	11/05/2021		2733	0,022
	18/05/2021	Int = 122 449 C + 67,444 ($R^2=1$)	246	0,0015
Sódio (mg/L Na)	04/05/2021	Int = 374 868 C + 26 721 ($R^2=0,9987$)	2 416 000 ^b	318,7
	11/05/2021		2 178 000 ^b	286,9
	18/05/2021	Int = 393 090 C + 16 836 ($R^2=0,9997$)	3 839 000 ^a	194,5

^a Valores lido na amostra diluída 20 vezes.

^b Valores lido na amostra diluída 50 vezes.

A relação de adsorção de sódio (SAR, *Sodium Adsorption Ratio*) é calculada pela seguinte expressão, onde as concentrações devem ser expressas em meq/L:

$$SAR = \frac{Na}{\left[\frac{Ca + Mg}{2}\right]^{1/2}} \quad (S3)$$

Tendo em conta os valores de concentração de Sódio, de Cálcio e de Magnésio apresentados na Tabela S.2.4, obtiveram-se valores de SAR de 10, 9 e 6, relativamente às amostras recolhidas nos dias 4, 11 e 18 de maio, respetivamente.

Análise económica

Tabela S.2.5 - Caudal de água tratada e energia elétrica ativa consumida ao longo do ano de 2020 na ETAR de Murteira.

Mês	Caudal água tratada (m ³)	Energia elétrica (kWh/mês)	kWh/m ³
janeiro	9 411	15 507	1,648
fevereiro	7 640	12 780	1,673
março	8 902	16 052	1,803
abril	7 132	13 917	1,951
maio	9 238	14 194	1,536
junho	9 543	15 574	1,632
julho	9 431	14 757	1,565
agosto	10 630	16 169	1,521
setembro	12 371	16 688	1,349
outubro	11 112	17 414	1,567
novembro	14 767	22 073	1,495
dezembro	15 585	20 799	1,335
Total	125 762	195 924	

Tabela S.2.6 - Custos pormenorizados envolvidos na reabilitação da ETAR da Murteira em 2017.

Designação	€
Estação elevatória	
Construção civil	7 749
Equipamento	20 794
Tamisação	
Equipamento	11 788
Tanque de homogeneização	
Construção civil	40 943
Equipamento	20 538
Tratamento biológico	
Construção civil	16 499
Equipamento	208 148
Edifício de exploração	
Construção civil	23 400

Equipamento	584
Sistema de aproveitamento de água tratada	
Construção civil	2 601
Equipamento	6 278
Instalação elétrica	81 941