



Desenvolvimento e implementação de um módulo de descargas sanitárias para casa de banho, com o reaproveitamento de águas residuais

PEDRO FILIPE CASTRO PEREIRA

outubro de 2025

**DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM
MÓDULO DE DESCARGAS SANITÁRIAS PARA CASA DE
BANHO, COM O REAPROVEITAMENTO DE ÁGUAS
RESIDUAIS**

Pedro Filipe Castro Pereira

Supervisor: Dr. Eng. Luís Miguel Cravegna Martins da Fonseca

Jury:

President: Hélio Cristiano Gomes Alves De Castro , ISEP

Vowels:

Pedro Domingues, U.Minho

2025

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

**DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF A SANITARY
FLUSH MODULE FOR BATHROOMS, WITH REUSE OF
WASTEWATER**

Pedro Filipe Castro Pereira

Estudante n.º 1212180

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação do Doutor Luís Miguel Ciravegna Martins da Fonseca e orientação na empresa ARCH Valadares pelo Engenheiro Jorge Borges

2025

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu profundo agradecimento ao Eng.º Luís Fonseca, meu orientador, pela orientação e disponibilidade ao longo de todo o processo de desenvolvimento desta dissertação. A sua atenção aos detalhes, bem como o apoio prestado nos momentos em que me senti menos confiante, foram fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Um especial agradecimento ao meu orientador na empresa, Eng.º Jorge Borges, pelo constante apoio prestado durante o projeto, pela partilha de conhecimentos técnicos e pela confiança demonstrada, que contribuíram de forma significativa para o meu crescimento profissional.

Quero também deixar uma palavra de gratidão aos amigos que fiz no ISEP, que tornaram este capítulo da minha vida muito mais feliz. As experiências partilhadas, os trabalhos desenvolvidos em conjunto e o companheirismo vivido foram parte essencial deste percurso académico.

Agradeço ainda à minha família, pelo apoio incondicional, compreensão e incentivo ao longo de toda a minha formação académica, estando sempre presente nos momentos mais desafiantes e celebrando cada conquista comigo.

Por fim, um agradecimento muito especial à Carolina, pelo apoio, incentivo e ajuda prestados ao longo de toda a tese, que foram imprescindíveis para ultrapassar os desafios deste caminho.

página propositadamente em branco

RESUMO

Este trabalho consiste no desenvolvimento e implementação de um módulo compacto de reaproveitamento de águas cinzentas, recolhidas de lavatórios e bases de duche, para utilização em descargas sanitárias que permite uma poupança de até 63% de água potável nas casas de banho, e até 97,8% do consumo de água potável nas descargas sanitárias.

O projeto foi realizado devido à crescente escassez de água potável e ao elevado desperdício associado às descargas sanitárias. Neste sentido, esta dissertação procura promover uma gestão mais sustentável dos recursos hídricos e contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Para tal, foi seguida a metodologia *Design Science Research*, que incluiu as etapas de conceção, seleção de fornecedores, desenvolvimento do protótipo e testes de validação.

O sistema integrou componentes como filtros de 90 µm e 25 µm, carvão ativado, unidade de radiação ultravioleta, bombas submersíveis, reservatório e um sistema automático de controlo de níveis. Os ensaios físico-químicos e hidráulicos confirmaram a viabilidade técnica do sistema, e os cálculos de desempenho evidenciaram reduções expressivas no consumo de água potável, tanto em habitações como no setor hoteleiro: uma poupança de 63% no consumo de água potável em habitações, de 45% em unidades hoteleiras e de até 97,8% do consumo de água potável nas descargas sanitárias.

Em contexto residencial, os resultados foram particularmente expressivos. A combinação da adoção de sanitas eficientes (redução média de 25% por descarga), torneiras de baixo caudal (poupança de 45%) e chuveiros otimizados permitiu diminuir o consumo diário de água na casa de banho em cerca de 62,7%, o que corresponde a aproximadamente 193 litros poupados por dia numa família de quatro pessoas. Dentro desta redução, destaca-se a substituição de até 97,8 % da água potável usada em descargas sanitárias por água cinzenta tratada, deixando apenas uma fração residual a cargo da rede pública.

No setor hoteleiro, onde o consumo médio é de 345 litros por quarto em cada noite, a aplicação da mesma lógica levou a uma redução global de 47,5 %, equivalente a 163,9 litros poupados por quarto em cada noite. Os maiores ganhos concentram-se na casa de banho: o consumo de duches e lavatórios foi reduzido em 45 %, enquanto as descargas sanitárias passaram de 103,5 para apenas 1,7 litros de água potável por quarto em cada noite, representando uma substituição de 98,4 % da água utilizada nesta função por água cinzenta tratada.

Estes resultados demonstram que o módulo desenvolvido não só é tecnicamente viável e ambientalmente sustentável, como também garante um impacto económico direto pela redução das faturas de água. A solução mostra-se escalável e adaptável a diferentes tipologias de edifícios, reforçando a economia circular e a resiliência hídrica, e contribuindo de forma clara para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.

PALAVRAS-CHAVE

Reaproveitamento de águas cinzentas; sustentabilidade; descargas sanitárias; gestão eficiente da água; economia circular.

página propositadamente em branco

ABSTRACT

This work consists of the development and implementation of a compact module for the reuse of greywater, collected from washbasins and showers, for use in toilet flushing. The system enables water savings of up to 63% of potable water in bathrooms, and up to 97.8% of potable water used in toilet flushing.

The project was carried out in response to the growing scarcity of potable water and the high levels of waste associated with toilet flushing. In this sense, it seeks to promote a more sustainable management of water resources and contribute to the Sustainable Development Goals. To achieve this, the Design Science Research methodology was followed, which included the stages of design, supplier selection, prototype development, and validation tests.

The system integrated components such as 90 μm and 25 μm filters, activated carbon, an ultraviolet radiation unit, submersible pumps, a storage tank, and an automatic level control system. Physicochemical and hydraulic tests confirmed the technical feasibility of the system, and performance calculations demonstrated savings of 63% in potable water consumption in households and 45% in hotel units, as well as up to 97.8% of potable water replaced in toilet flushing.

Performance calculations revealed significant reductions in potable water consumption in both households and the hotel sector. In the residential context, the combination of efficient toilets (average 25% reduction per flush), low-flow taps (45% savings), and optimized showers reduced daily bathroom water consumption by approximately 62.7%, equivalent to around 193 liters saved per day for a family of four. Within this reduction, the replacement of up to 97.8% of potable water used in toilet flushing with treated greywater stands out, leaving only a residual fraction supplied by the public network.

In the hotel sector, where the average consumption is 345 liters per guest per night, applying the same approach led to an overall reduction of 47.5%, equivalent to 163.9 liters saved per guest per night. The greatest savings occur in bathroom usage: water consumption in showers and washbasins was reduced by 45%, while potable water used in toilet flushing dropped from 103.5 liters to just 1.7 liters per guest per night, representing a 98.4% substitution of water in this function with treated greywater.

These results demonstrate that the developed module is not only technically feasible and environmentally sustainable, but also ensures a direct economic impact through reduced water bills. The solution is scalable and adaptable to different building typologies, reinforcing circular economy practices and water resilience, while clearly contributing to the Sustainable Development Goals.

KEYWORDS

Greywater reuse; sustainability; toilet flushing; efficient water management; circular economy.

página propositadamente em branco

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	5
RESUMO	I
ABSTRACT.....	III
ÍNDICE DE FIGURAS	XIII
ÍNDICE DE TABELAS	XV
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XVII
1. INTRODUÇÃO	19
1.1. Problema de investigação, enquadramento e pertinência.....	19
1.1.1. Alinhamento com os objetivos de desenvolvimento sustentável	20
1.2. Questão e objetivos de investigação.....	21
1.3. Opções metodológicas	21
1.4. Introdução à empresa	22
1.5. Estrutura.....	23
1.6. Cronograma.....	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	26
2.1. Desafios globais de sustentabilidade e escassez de recursos hídricos	26
2.2. Perda de água (mundial e nacional).....	28
2.2.1. Perda de água a nível global	28
2.2.2. Perda de água em Portugal.....	29
2.2.3. Causas da perda de água	29
2.3. Impactos de perda de água	30
2.3.1. Impacto na saúde humana.....	30
2.3.2. Impacto nos ecossistemas	30
2.3.3. Impacto económico	31
2.4. Iniciativas de redução do desperdício de água	31
2.4.1. Reutilização de águas residuais.....	31
2.4.2. Tecnologias inovadoras de tratamento	31
2.4.3. Reutilização de águas cinzas	31
2.4.4. Sistemas descentralizados de água e efluentes.....	32
2.4.5. Redução do desperdício alimentar	32
2.5. Tratamento de água: Métodos convencionais, tecnologias avançadas e a indústria 4.0...	32
2.5.1. Processos convencionais de tratamento de água.....	32
2.5.2. Métodos avançados de tratamento de água.....	33
2.5.3. Comparação internacional dos métodos de tratamento de água	34
2.5.4. Indústria 4.0 no tratamento de água	34
2.6. Reaproveitamento de água para descargas de sanita: diversas soluções sustentáveis	34

2.6.1. Sistema de reaproveitamento de água da chuva para descarga de sanita	35
2.6.2. Sistema de reaproveitamento de águas cinzentas para descarga de sanita	35
2.6.3. Sistema de reaproveitamento de água de ar condicionado para descarga de sanita 35	
2.6.4. Sistema <i>aqualoop greywater recycling system</i>	35
2.6.5. Sistema <i>DIY</i> de reciclagem de água para casa de banho	36
2.7. Desafios e barreiras à implementação	36
2.7.1. Falta de conscientização sobre a escassez de água	36
2.7.2. Percepções psicológicas e culturais	36
2.7.3. Resistência à mudança nos hábitos diários	36
2.7.4. Falta de apoio social e educacional.....	37
2.7.5. Impacto, aceitação e fatores de sucesso em sistemas de águas cinzentas	37
2.8. Metodologias para seleção de fornecedores.....	37
2.8.1. <i>Analytic Hierarchy Process (AHP)</i>	38
2.8.2. <i>Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)</i>	38
2.8.3. <i>Data Envelopment Analysis (DEA)</i>	39
2.9. Metodologias de avaliação.....	39
2.9.1. Avaliação multicritério (<i>Multi-Criteria Decision Making - MCDM</i>)	40
2.9.2. Análise de custo-benefício (<i>Cost-Benefit Analysis - CBA</i>)	40
2.9.3. Índice de pegada hídrica (<i>Water Footprint Assessment - WFA</i>)	40
2.10. Enquadramento legal da reutilização de águas cinzentas em Portugal.....	41
3. Conceção e Desenvolvimento do Módulo de Reaproveitamento de Águas Cinzentas.....	43
3.1. Requisitos do sistema.....	43
3.1.1. Requisitos funcionais	43
3.1.2. Requisitos técnicos.....	44
3.1.3. Requisitos de integração.....	44
3.1.4. Requisitos de manutenção e segurança	44
3.2. Introdução do sistema.....	44
3.3. Componentes do sistema.....	45
3.3.1. Pré-filtro de 90µm.....	46
3.3.2. Filtro de 25µm.....	46
3.3.3. Filtro de carvão ativado	47
3.3.4. Unidade de luz ultravioleta	48
3.3.5. Bomba submersível LSC1.4S-51	49
3.3.6. Adaptador de sucção	49
3.3.7. Electroválvula 5282 NA	50
3.3.8. Bomba TSURUMI - POMA5	50
3.3.9. Reservatório de armazenamento	51
3.3.10. Sistema de comutação automática e níveis digitais.....	52
3.3.11. Móvel	53

3.3.12.	Torneiras.....	55
3.3.13.	Sanita	55
3.3.14.	Manutenção do sistema	56
3.4.	Análise de fornecedores.....	56
3.4.1.	CrITÉrios de avaliação	57
3.4.2.	Ponderação dos critérios de seleção	57
3.4.3.	Avaliação de fornecedores.....	58
3.5.	Validação prática do sistema.....	62
3.5.1.	Procedimentos dos ensaios físico-químicos	62
3.5.2.	Testes de funcionamento e desempenho hidráulico.....	62
4.	Plano de marketing	65
4.1.	Enquadramento Geral	65
4.2.	Ambiente de Mercado e Sustentabilidade.....	66
4.2.1.	Forças competitivas	66
4.2.2.	Forças económicas	66
4.2.3.	Forças políticas.....	66
4.2.4.	Forças legais e regulatórias.....	66
4.2.5.	Forças socioculturais	66
4.3.	Mercado-Alvo	67
4.4.	Enquadramento dos Objetivos e Resultados Esperados.....	68
4.5.	Análise SWOT	68
4.5.1.	Forças	68
4.5.2.	Fraquezas	69
4.5.3.	Oportunidades	69
4.5.4.	Ameaças	69
4.6.	Estratégia de Marketing	70
4.6.1.	Mercado-Alvo.....	70
4.6.2.	<i>Marketing Mix</i>	70
4.7.	Implementação	71
5.	Poupança de água (resultados).....	73
5.1.	Poupança total habitacional.....	73
5.1.1.	<i>Consumos e poupança com torneiras e descargas eficientes</i>	73
5.1.2.	<i>Poupança com sistema de descargas</i>	74
5.1.3.	<i>Poupança total</i>	74
5.2.	Poupança total hotelaria	75
5.2.1.	<i>Consumo de água Hoteleira</i>	75
5.2.2.	<i>Poupança com torneiras e descargas eficientes</i>	76
5.2.3.	<i>Poupança com sistema de descargas</i>	77
5.2.4.	<i>Poupança total</i>	77
5.3.	Impactos ambientais indiretos do sistema	78

5.4. Linhas orientadoras e variantes de <i>design</i>	79
6. Conclusão	81
6.1. Conclusões finais	81
6.2. Limitações.....	83
6.3. Trabalhos futuros	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Cronograma.....	24
Figura 2 - Sistema	45
Figura 3 - Sistema de comutação	52
Figura 4 - Movei Explodido.....	54
Figura 5- Movei em uso.....	54
Figura 6 - Movei Fechado	Erro! Marcador não definido.
Figura 7 - 5 Forças de Porter	67
Figura 8 - Analise SWOT	70
Figura 9 - Marketing Mix	71

página propositadamente em branco

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação Bomba de Sucção	59
Tabela 2 - Classificação Bomba Normal	60
Tabela 3 - Classificação da Válvula	61
Tabela 4 - Poupança com torneiras e descargas eficientes	74
Tabela 5 - Poupança com sistema de descargas	74
Tabela 6 - Poupança Total	75
Tabela 7 - Poupança com torneiras e descargas eficientes em hotéis	77
Tabela 8 - Poupança com sistema de descargas em hotéis	77
Tabela 9 - Poupança total em hotéis.....	78

página propositadamente em branco

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

AHP	<i>Analytic hierarchy process</i>
APA	<i>American psychological association</i>
CBA	<i>Cost-benefit analysis</i>
DEA	<i>Data envelopment analysis</i>
DIY	<i>Do it yourself</i>
DSR	<i>Design science research</i>
ELECTRE	<i>Elimination and choice expressing reality</i>
ISEP	<i>Instituto superior de engenharia do porto</i>
MCDM	<i>Multi-criteria decision making</i>
NA	<i>Normalmente aberta</i>
ODS	<i>Objetivos de desenvolvimento sustentável</i>
PLA	<i>Ácido Polilático</i>
P. Porto	Instituto politécnico do porto
TOPSIS	<i>Technique for order of preference by similarity to ideal solution</i>
UNICEF	<i>Fundo das nações unidas para a infância</i>
UV	<i>Ultravioleta</i>
UVC	<i>UltraVioleta do tipo C</i>
VPL	Valor presente líquido
WFA	Water footprint assessment
WWF	<i>Fundo mundial para a natureza</i>

Lista de Símbolos

<i>mm</i>	milímetros	<i>mm</i>
m^3	metros cúbicos	m^3
μm	micrómetro	μm
nm	nanómetro	nm
L	litro	L
min	minuto	min
m	metro	m
W	watt	w
€/m ³	preço por metro cúbico	€/m ³
€	euro	€

página propositadamente em branco

1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será abordada a relevância do tema para a sociedade, destacando a sua importância e impacto no contexto atual. Seguidamente, será apresentada uma descrição detalhada do problema de investigação, acompanhada do respetivo enquadramento teórico e prático. Proceder-se-á também à análise dos objetivos definidos para a resolução do problema, de forma a esclarecer o propósito e as metas do estudo. Adicionalmente, serão exploradas as opções metodológicas adotadas, com uma justificação das abordagens selecionadas. Posteriormente far-se-á uma breve introdução à empresa onde o projeto foi desenvolvido seguida da apresentada da estrutura do projeto. Por fim, será incluído o cronograma do projeto

1.1. Problema de investigação, enquadramento e pertinência

A escassez de água potável e o aumento da pressão sobre os recursos hídricos representam hoje um dos maiores desafios globais, agravados pelo crescimento populacional, urbanização e alterações climáticas (de Morais et al., 2021) (Leal Filho et al., 2023). Entre os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) definidos pelas Nações Unidas, destaca-se o ODS 6, que visa garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos. A má gestão deste recurso finito compromete não apenas a saúde pública, mas também o equilíbrio dos ecossistemas e a sustentabilidade dos sistemas económico (— *SDG Indicators*, sem data)

É neste contexto que se insere o presente trabalho, que propõe o desenvolvimento de um módulo compacto para reaproveitamento de águas cinzentas, concebido para captar, tratar e reutilizar águas provenientes de lavatórios e bases de duche em descargas sanitárias. O aspeto diferenciador da solução reside na sua fácil integração em casas de banho já existentes e na relação custo-benefício superior face a sistemas convencionais, tornando-a uma alternativa prática e acessível para a redução do desperdício de água potável.

O desperdício associado à utilização de água potável em tarefas como as descargas sanitárias é um dos principais fatores que reforçam a pertinência desta investigação. Em muitos casos, a água utilizada poderia ser substituída por águas residuais previamente tratadas, sem comprometer a segurança ou a funcionalidade do sistema (M. Wang et al., 2021). Este cenário é particularmente relevante em áreas urbanas, onde o consumo doméstico de água representa uma parcela significativa da procura total, e em regiões afetadas por escassez hídrica, onde soluções inovadoras se tornam ainda mais urgentes (Milios, 2018).

A implementação de sistemas de reaproveitamento de águas cinzentas em contextos domésticos oferece benefícios multifacetados. Em termos ambientais, contribui para a preservação dos recursos hídricos, reduzindo a extração de água potável e o volume de águas residuais descartadas nos sistemas de saneamento (Ghisellini et al., 2016). Do ponto de vista económico, permite aos utilizadores domésticos diminuir os custos associados ao consumo de água e, simultaneamente, reduz a pressão sobre as infraestruturas municipais de abastecimento e tratamento (Oteng-Peprah et al., 2018a).

A viabilidade técnica do módulo assenta em avanços recentes no tratamento de águas residuais em pequena escala, que permitem garantir a qualidade e segurança da água reutilizada, assegurando

simultaneamente uma manutenção simples e acessível ao utilizador final (M. Wang et al., 2021). Para além disso, a adaptabilidade do sistema a diferentes contextos habitacionais — tanto em novas construções como em remodelações — aumenta o seu potencial de aplicação prática e aceitação social.

Assim, este enquadramento evidencia a necessidade urgente de soluções inovadoras que promovam uma gestão eficiente e sustentável dos recursos hídricos. O presente estudo pretende dar resposta a esse desafio, propondo uma solução tecnicamente viável, economicamente acessível e ambientalmente responsável, alinhada com os princípios do desenvolvimento sustentável e da economia circular (Commission on Environment, sem data), (Oteng-Pepurah et al., 2018a).

1.1.1. Alinhamento com os objetivos de desenvolvimento sustentável

O projeto desenvolvido apresenta um alinhamento direto com os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas, em especial com o ODS 6 – água potável e saneamento. Este objetivo tem como meta garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos, salientando, na sua meta 6.4, a necessidade de “aumentar substancialmente a eficiência do uso da água em todos os setores” (— *SDG Indicators*, sem data). O módulo proposto, ao permitir a substituição da água potável por águas cinzentas tratadas nas descargas sanitárias, responde diretamente a esta meta, contribuindo para a redução significativa do desperdício e para a promoção de práticas de consumo mais responsáveis. Esta ligação é particularmente relevante tendo em conta que a má gestão da água compromete a saúde pública, o equilíbrio dos ecossistemas e a sustentabilidade dos sistemas económicos (de Moraes et al., 2021), (Leal Filho et al., 2023).

Embora o ODS 6 constitua o foco principal, a proposta contribui também para outros objetivos da Agenda 2030. O ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis é contemplado pela substituição de água nova por água residual tratada, promovendo a utilização mais eficiente dos recursos e fomentando práticas alinhadas com os princípios da economia circular (Ghisellini et al., 2016), (Oteng-Pepurah et al., 2018a). De igual modo, o ODS 11 – Cidades e Comunidades Sustentáveis é reforçado, na medida em que o sistema foi concebido para ser compacto, adaptável e facilmente integrável em habitações existentes, o que facilita a sua implementação em contextos urbanos e contribui para a criação de infraestruturas mais sustentáveis.

Por fim, ainda que de forma indireta, o projeto apresenta impacto no ODS 13 – Ação Climática, uma vez que a conservação da água reduz a pressão sobre os sistemas de captação e tratamento, podendo igualmente diminuir o consumo energético associado ao ciclo urbano da água. Ao promover uma maior eficiência e resiliência hídrica, o sistema contribui para mitigar os efeitos das alterações climáticas, sobretudo em cenários de escassez de recursos (Milios, 2018).

Assim, a proposta insere-se de forma clara nos esforços internacionais para alcançar os objetivos da Agenda 2030, evidenciando não apenas a sua pertinência técnica, económica e ambiental, mas também o seu contributo social no caminho para uma gestão mais sustentável e integrada dos recursos hídricos.

1.2. Questão e objetivos de investigação

A relevância do problema e a proposta de solução levanta uma questão central para a investigação: Como pode o sistema de descargas sanitárias com reaproveitamento de águas cinzentas ser desenvolvido de forma a garantir eficiência técnica, económica e ambiental nas casas de banho? A presente investigação procurará responder a esta questão, fundamentando-se em dados técnicos e análises de viabilidade.

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um modelo tecnológico eficiente e sustentável para o reaproveitamento de águas cinzentas em sistemas de descargas sanitárias, assegurando a sua viabilidade técnica, económica e ambiental. A implementação desta solução visa reduzir o consumo de água potável nas habitações, promovendo uma utilização mais eficiente dos recursos hídricos e contribuindo para a sustentabilidade ambiental.

Para alcançar o objetivo geral definido, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- Análise dos processos de consumo de água nas casas de banho: identificar os principais desperdícios de água e as oportunidades para a reutilização de águas cinzentas, destacando as fontes mais viáveis para reaproveitamento, como lavatórios e bases de duche.
- Desenvolvimento do modelo tecnológico para reaproveitamento de águas cinzentas: criar uma solução técnica que permita a recolha, tratamento e armazenamento de águas cinzentas, com foco na integração eficiente com os sistemas de descargas existentes nas casas de banho.
- Prototipagem do sistema: desenvolver um protótipo do modelo proposto, permitindo testes práticos para validar a eficiência do processo de reutilização das águas cinzentas no sistema de descargas.
- Análise crítica e validação de resultados: realizar uma avaliação contínua da eficácia do sistema desenvolvido, analisando a viabilidade técnica, os custos envolvidos e o impacto ambiental da solução implementada.
- Seleção de fornecedores e avaliação de componentes tecnológicos: selecionar fornecedores para os componentes essenciais do sistema (bombas, filtros, reservatórios, etc.) e realizar uma análise de custo-benefício para a implementação da solução.

Estes objetivos não se limitam resolver o problema identificado de desperdício de água, mas também oferecem uma solução escalável e adaptável, que possa ser implementada em diferentes contextos habitacionais. A abordagem proposta procura promover uma gestão mais sustentável e eficiente dos recursos hídricos, contribuindo para a redução do consumo de água potável em ambientes domésticos.

1.3. Opções metodológicas

A metodologia adotada no presente trabalho baseia-se numa abordagem de *Design Science Research (DSR)*, adequada ao desenvolvimento de soluções tecnológicas inovadoras com aplicabilidade prática e contributo científico. Segundo o artigo (Hevner et al., 2004), o *DSR* é uma metodologia de investigação que visa a criação e avaliação de artefactos para resolver problemas identificados, equilibrando o rigor científico com a relevância prática. Este modelo é composto por

fases iterativas de identificação do problema, definição de objetivos, construção, demonstração, avaliação e comunicação dos resultados. Trata-se de um modelo amplamente reconhecido em áreas como engenharia e sistemas de informação, estruturando o processo de investigação em torno da construção, teste e validação de um artefacto – neste caso, um sistema de reaproveitamento de águas cinzentas para utilização em descargas sanitárias.

Inicialmente, procedeu-se à identificação do problema e justificação da sua relevância, com base numa análise teórica e empírica da escassez de recursos hídricos e do desperdício de água potável em contextos domésticos. Esta etapa envolveu uma revisão sistemática da literatura científica, bem como a análise de dados estatísticos nacionais e internacionais que evidenciam a necessidade urgente de soluções sustentáveis para o uso da água (Oteng-Pepurah et al., 2018b).

Definiram-se então os objetivos da solução, centrados no desenvolvimento de um módulo compacto e eficiente que permitisse recolher, tratar e armazenar águas residuais provenientes de lavatórios e bases de duche, a fim de serem reutilizadas nas descargas sanitárias. A solução proposta visa responder a critérios de viabilidade técnica, impacto ambiental positivo e custo acessível para o utilizador final.

A fase seguinte correspondeu ao desenho e desenvolvimento do artefacto, utilizando ferramentas de modelação tridimensional como o *SolidWorks* e o *AutoCAD*. Estas ferramentas permitiram a uma melhor perceção do projeto e um melhor nível de detalhe, respeitando os requisitos de compatibilidade com instalações sanitárias domésticas e incorporando parâmetros técnicos validados pela literatura e por normas de engenharia.

Para a seleção dos componentes e fornecedores, foi aplicado um modelo multicritério, com base nas metodologias *Analytic Hierarchy Process (AHP)* e *TOPSIS*. Estas técnicas permitem avaliar alternativas com base em critérios como custo, durabilidade, eficiência energética e facilidade de integração, atribuindo pesos relativos a cada fator de forma sistemática e fundamentada (Okwu & Tartibu, 2020a).

Todo o trabalho segue as normas da *American Psychological Association (APA)*, 7.^a edição, garantindo consistência na citação de fontes. As unidades técnicas e dimensionais utilizadas seguem o sistema métrico internacional, com referência em milímetros (mm), assegurando compatibilidade com os padrões de engenharia. Com esta abordagem metodológica, pretende-se não só desenvolver uma solução funcional e sustentável, mas também produzir conhecimento científico rigoroso e replicável, com potencial de contribuir para futuras investigações na área da gestão hídrica e sustentabilidade residencial.

1.4. Introdução à empresa

A Arch Valadares, fundada em 1921, tem uma longa trajetória na indústria cerâmica, marcada pela produção de sanitários e acessórios cerâmicos, com uma forte presença no mercado português. Em 2012, a empresa enfrentou dificuldades económicas, resultando em um período de insolvência. Todavia, a sua reabertura em 2014 com o apoio de antigos colaboradores da Cerâmica de Valadares, sinalizou o renascimento da marca e o seu compromisso com a continuidade e inovação.

Nos últimos anos, a empresa tem investido significativamente na modernização das suas instalações e processos produtivos, com o objetivo de otimizar a qualidade e eficiência. Estes

investimentos são acompanhados por uma forte preocupação com a sustentabilidade, com a implementação de tecnologias mais ecológicas e práticas de produção que visam a economia circular e a redução do impacto ambiental. Além disso, a Arch Valadares tem expandido a sua presença internacional, especialmente em mercados europeus e emergentes, consolidando a marca Valadares além-fronteiras.

A inovação tem sido um pilar essencial da empresa, que também tem procurado digitalizar os seus processos, adotando tecnologias que melhoram a gestão da produção e a logística. Este foco na transformação digital permite à Arch Valadares impulsionar a sua competitividade no cenário global, ao mesmo tempo em que preserva o seu legado de qualidade e *design*.

1.5. Estrutura

- Capítulo 1 - Introdução

Apresentar o problema de investigação, a sua relevância, os objetivos do trabalho, a metodologia a adotar e a estrutura geral da tese.

- Capítulo 2 – Revisão da Literatura

Reunir e analisar os principais contributos teóricos e empíricos sobre a reutilização de águas cinzentas, destacando boas práticas, desafios e lacunas existentes.

- Capítulo 3 – Metodologia

Detalhar o modelo metodológico utilizado (*Design Science Research*), as técnicas de recolha e análise de dados, e os critérios de avaliação da solução proposta.

- Capítulo 4 – Desenvolvimento do Sistema Proposto

Descrever o processo de conceção, modelação e construção do protótipo, incluindo os critérios de design, materiais utilizados e softwares aplicados.

- Capítulo 5 – Análise de Resultados e Discussão

Apresentar os dados obtidos com os testes ao protótipo e discutir a viabilidade técnica e ambiental da solução.

- Capítulo 6 – Conclusões e Trabalhos Futuro

Resumir os principais resultados alcançados, avaliar o contributo científico e prático do estudo, e propostas para investigação futura.

1.6. Cronograma

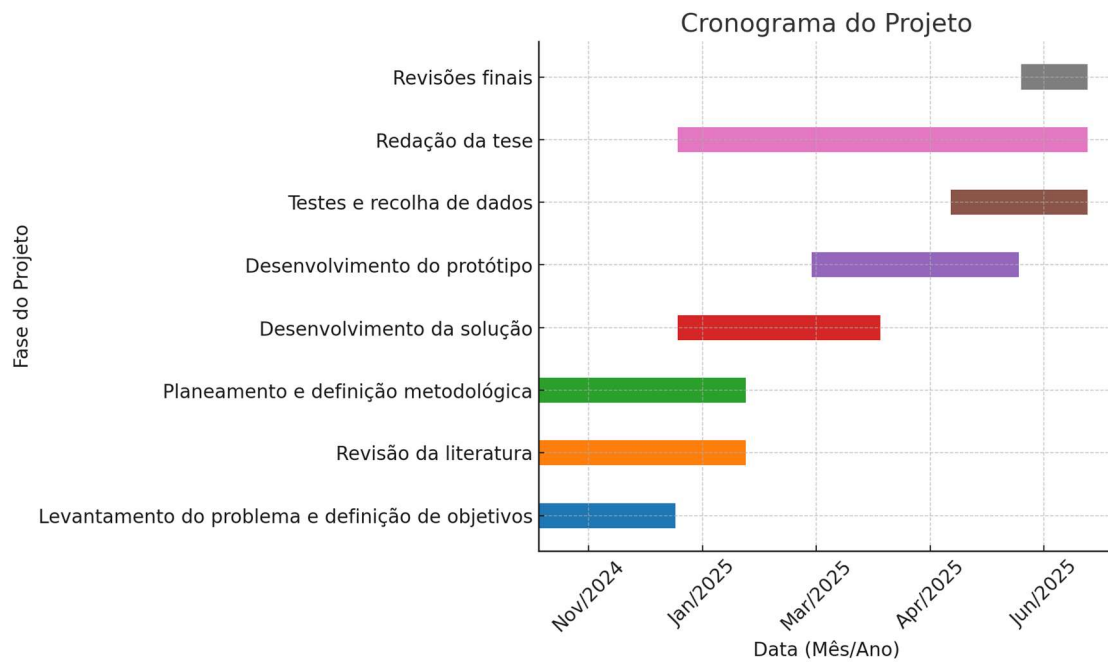


Figura 1 - Cronograma

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica constitui uma etapa essencial para enquadrar e fundamentar o presente estudo, permitindo uma análise aprofundada dos conceitos, metodologias e desenvolvimentos científicos relacionados com o reaproveitamento de águas cinzentas em sistemas de descargas sanitárias. Neste capítulo, serão exploradas as principais abordagens teóricas e práticas sobre a gestão sustentável da água, as tecnologias disponíveis para reutilização hídrica, os impactos ambientais e económicos da escassez de água, bem como as metodologias utilizadas na avaliação de projetos desta natureza. Através desta revisão, pretende-se estabelecer uma base sólida de conhecimento que suporte o desenvolvimento do modelo proposto, identificando desafios, oportunidades e boas práticas associadas à sua implementação.

Ao pesquisarmos palavras-chave como *greywater reuse*, *toilet flushing systems*, *domestic water recycling*, *DIY greywater systems*, *urban water management* e *water-saving technologies*, a literatura oferece diversas investigações e estudos desenvolvidos ao longo das últimas duas décadas. Neste projeto de investigação, foram selecionados artigos e relatórios que cobrem um período entre 2004 e 2024, com o objetivo de analisar a evolução das soluções técnicas e sociais associadas à reutilização de águas cinzentas. Esta seleção incluiu desde estudos mais antigos e pioneiros, como o de (March et al., 2004; Nolde, 2005) que documentaram as primeiras implementações em contextos residenciais e turísticos na Europa, até análises recentes como as de (Awasthi et al., 2024; Craig & Richman, 2018), que avaliam a eficácia, os fatores de adoção e os resultados mensuráveis de sistemas modernos.

Através desta revisão, pretende-se estabelecer uma base sólida de conhecimento que suporte o desenvolvimento do modelo proposto, identificando desafios, oportunidades e boas práticas associadas à sua implementação. São abordados não apenas os aspetos tecnológicos dos sistemas de reaproveitamento, mas também os impactos ambientais, económicos e sociais do seu uso, com especial atenção para os contextos residenciais urbanos — foco deste estudo. A revisão bibliográfica contribui ainda para a identificação de lacunas de investigação, com destaque para a escassa aplicação destas soluções em Portugal, e oferece uma visão crítica sobre as variáveis que influenciam o sucesso ou fracasso da sua adoção em diferentes regiões.

2.1. Desafios globais de sustentabilidade e escassez de recursos hídricos

Vivemos numa era em que a escassez de recursos naturais é uma questão crítica, com implicações profundas no desenvolvimento sustentável e na qualidade de vida das populações em todo o mundo. O uso excessivo desses recursos, muitas vezes impulsionado por práticas insustentáveis de consumo e produção, compromete a capacidade de regeneração do meio ambiente e gera desafios económicos e sociais complexos (UNEP, 2011). O aumento da procura por energia, água, alimentos e matérias-primas tem colocado uma pressão crescente sobre os recursos naturais, enquanto as alterações climáticas agravam a degradação ambiental, intensificando fenómenos como secas, inundações e a perda de biodiversidade (Fischer-Kowalski et al., sem data).

Segundo (Rockström et al., 2009), a água doce é um dos nove limites planetários já em risco de transgressão, colocando em causa a estabilidade do sistema terrestre. A gestão sustentável deste recurso é, portanto, considerada crítica para manter as condições que permitem o desenvolvimento humano. Neste enquadramento, a segurança hídrica torna-se um desafio transversal que interliga aspetos ambientais, sociais e económicos.

Complementarmente, (Wada et al., 2016) demonstraram que a utilização excessiva da água para irrigação agrícola, sobretudo em regiões áridas e semiáridas, representa cerca de 70% das retiradas globais de água doce, pressionando aquíferos e ecossistemas, e tornando o setor agrícola um dos principais alvos de estratégias de eficiência hídrica.

Em contraste com a análise setorial, (Hoekstra & Mekonnen, 2012) propuseram o conceito de pegada hídrica como uma forma de quantificar o consumo de água ao longo de cadeias de produção e consumo, revelando que as disparidades entre países são significativas: enquanto algumas nações têm uma pegada hídrica média inferior a 1000 m³/pessoa/ano, outras ultrapassam os 5000 m³/pessoa/ano. Estes dados evidenciam assimetrias profundas no acesso e uso da água, refletindo desigualdades económicas, tecnológicas e de gestão pública.

O corpo de literatura supramencionado sublinha a necessidade de soluções descentralizadas e adaptadas ao contexto local, capazes de promover o uso eficiente da água, especialmente em setores com elevado potencial de poupança como o uso doméstico não potável, onde se inserem os sistemas de reaproveitamento de águas cinzentas propostos neste trabalho.

O crescimento populacional, que alcançou os 8 mil milhões de pessoas em 2022, adiciona uma pressão sem precedentes sobre os recursos. Estima-se que, entre 1900 e 2020, a população mundial tenha quadruplicado, enquanto o uso de recursos naturais se multiplicou por dez (Krausmann et al., 2009). A exploração intensiva de recursos renováveis (como madeira e água), e não renováveis (como combustíveis fósseis e minerais), tem acelerado o esgotamento das reservas existentes (Xu & Zhao, 2023).

Este aumento populacional ocorre em paralelo ao crescimento das economias emergentes, onde a rápida expansão das classes médias resulta em padrões de consumo mais intensivos. A título de exemplo, o consumo de carne na China aumentou mais de cinco vezes desde os anos 1980, implicando um uso significativo de água e grãos para a alimentação animal (Shimokawa, 2015). A produção de carne é um dos setores agrícolas com maior impacto ambiental, devido ao elevado consumo de recursos e às emissões de gases com efeito de estufa, como o metano (Bai et al., 2018).

As alterações climáticas são um multiplicador de riscos, agravando a escassez de recursos. O aquecimento global intensifica eventos meteorológicos extremos, afetando diretamente a disponibilidade de água potável, a produtividade agrícola e a saúde dos ecossistemas. Na região do Mediterrâneo, onde Portugal se localiza, prevê-se um aumento da temperatura média, dependendo do cenário de emissões adotado, o que poderá levar à desertificação e impactar negativamente a agricultura e a disponibilidade de água. Globalmente, estima-se que grande parte da população possa enfrentar problemas relacionados com a escassez de água até 2050, especialmente em regiões vulneráveis, como a África e o sul da Ásia (Tramblay et al., 2020).

De acordo com Mohamed Yusoff et al. o desperdício e a ineficiência na utilização dos recursos agravam ainda mais a escassez. Cerca de um terço dos alimentos produzidos no mundo são

desperdiçados, o que equivale a aproximadamente 1,3 mil milhões de toneladas anuais de comida. Isto tem consequências profundas não só para a segurança alimentar, mas também para o impacto ambiental associado à produção e transporte (Mohamed Yusoff et al., 2024). A água também é desperdiçada em grande escala. 30% da água destinada aos sistemas públicos perde-se devido a fugas na rede de distribuição (Da & Simões, 2019). Melhorar a gestão e eficiência no uso dos recursos é essencial para a sustentabilidade global.

Em Portugal, os desafios relacionados com a escassez de água são significativos, especialmente no sul do país, onde os recursos hídricos são, naturalmente, mais limitados (*Gulbenkian Água – Fundação Calouste Gulbenkian*, sem data). Nos últimos 30 anos, a frequência e intensidade das secas aumentaram, com anos como 2017 e 2022 a registarem condições extremas que afetaram gravemente a agricultura e o abastecimento de água. Cerca de 75% da água utilizada em Portugal destina-se à agricultura, uma percentagem elevada face a outros países europeus. Isto, aliado à gestão inadequada, exerce pressão sobre os reservatórios e aquíferos (*Agriculture using 75% of water in Portugal - The Portugal News*, sem data).

2.2. Perda de água (mundial e nacional)

A água é um recurso essencial para a vida na Terra, desempenhando um papel crucial na saúde humana, agricultura, indústria e ecossistemas naturais. Contudo, a disponibilidade de água doce tem vindo a diminuir devido a uma combinação de fatores naturais e antropogénicos, resultando numa crescente preocupação com a perda de água a nível global e nacional, como será disposto no presente subcapítulo (Chandanpurkar et al., 2025).

2.2.1. Perda de água a nível global

A escassez de água é uma questão premente que afeta diversas regiões do mundo. Estudos indicam que, entre 2015 e 2023, o planeta perdeu aproximadamente 290 milhas cúbicas de água doce, o que equivale a 250% do volume do Lago Erie, sem sinais de recuperação. Esta diminuição significativa coincide com os anos mais quentes já registados, sugerindo uma forte ligação às alterações climáticas (Nigel Arnell, 2005). As elevadas temperaturas globais aumentam a evaporação e a capacidade de retenção de vapor de água na atmosfera, resultando em menor recarga de solos e aquíferos. Secas intensas têm exacerbado o problema, impedindo a reposição dos recursos hídricos (Zhao & Boll, 2022).

Além disso, um relatório das Nações Unidas alerta para o risco iminente de uma crise hídrica global, destacando que cerca de 4 mil milhões de pessoas enfrentam uma grave escassez de água potável durante, pelo menos, um mês do ano (UNICEF Ethiopia/Ayene, 2023). Tal representa sérios riscos para a subsistência, especialmente em termos de segurança alimentar e acesso à eletricidade. Prevê-se que a população urbana global enfrentando escassez de água duplique, passando de 933 milhões (um terço da população urbana global) em 2016 para entre 1,7 a 2,4 mil milhões de pessoas até 2050 (UNESCO, 2023).

De acordo com Zhao e Boll a crescente incidência de secas extremas e prolongadas também está a pressionar os ecossistemas, com consequências diretas para as espécies vegetais e animais. A expansão das terras áridas é também uma tendência preocupante. Nos últimos 30 anos, uma área

terrestre quase um terço maior que a Índia transformou-se de húmida para árida, agora cobrindo 40% de toda a terra no planeta, excluindo a Antártida. Este aumento da aridez, impulsionado pelas alterações climáticas e práticas inadequadas de gestão do solo, ameaça a segurança alimentar ao reduzir significativamente a produtividade agrícola (Zhao & Boll, 2022).

Apesar da crescente consciencialização sobre a necessidade de poupar água, (Willis et al., 2011) destaca que a aplicação prática de comportamentos sustentáveis ainda é limitada, especialmente em contexto urbano. Sublinha também que a ausência de incentivos económicos e de soluções acessíveis dificulta a transição entre conhecimento e prática.

Em Espanha, programas regionais de incentivo à reutilização de águas cinzentas — como subsídios e isenções fiscais — têm demonstrado efeitos positivos na adoção doméstica destas tecnologias (López-Ruiz et al., 2021). Esta experiência contrasta com a realidade portuguesa, onde as políticas públicas nesta área ainda são pontuais e pouco estruturadas, revelando uma oportunidade de evolução política e técnica em alinhamento com o ODS 6 – Água limpa e saneamento para todos.

2.2.2. Perda de água em Portugal

Portugal não está imune a estas tendências globais. Vários estudos avaliam os principais determinantes das perdas reais de água por unidade de comprimento da rede no setor de águas português, utilizando dados que cobrem um período de 10 anos. Estes estudos identificam fatores estatisticamente significativos, como o modelo de governação, tipologia da área, tipo de serviço, modelo de gestão, volume total de água transportada e comprimento total da rede, que influenciam as perdas de água (Meireles et al., 2023).

Além disso, um estudo recente avaliou a consciencialização da população portuguesa sobre práticas de uso sustentável da água, abrangendo tópicos como recursos hídricos, qualidade da água, disponibilidade, poupança e reutilização. Os resultados indicam altos níveis de consciencialização em áreas como recursos hídricos, qualidade e poupança de água. No entanto, revelou-se um desconhecimento considerável em relação a soluções de infraestruturas verdes, investigação e inovação em tecnologias de tratamento de água e métodos de monitorização, estratégias de planeamento urbano sustentável e uso de tecnologias e aparelhos eficientes em termos de água. No que diz respeito à reutilização da água, predominam respostas negativas ou de incerteza, indicando baixos níveis de consciencialização sobre este assunto (Figueiredo et al., 2024).

2.2.3. Causas da perda de água

As causas da perda de água são multifacetadas e interligadas. Entre as principais destacam-se:

- Alterações climáticas: o aumento das temperaturas globais intensifica a evaporação, reduzindo a disponibilidade de água doce. Eventos climáticos extremos, como secas e inundações, tornam-se mais frequentes e severos, afetando a distribuição e disponibilidade de água (Zhao & Boll, 2022).

- Crescimento populacional e urbanização: o aumento da população mundial e a expansão urbana elevam a procura por água, pressionando os recursos hídricos existentes e as infraestruturas de distribuição. Prevê-se que a população urbana global enfrentando escassez de água duplique até 2050 (UNICEF Ethiopia/Ayene, 2023).
- Práticas agrícolas insustentáveis: a agricultura intensiva, especialmente em áreas áridas, leva à sobre-exploração de aquíferos e à degradação do solo, contribuindo para a escassez de água. A expansão das terras áridas afeta negativamente a produtividade agrícola, ameaçando a segurança alimentar (*Latin America and the Caribbean Regional Overview of Food Security and Nutrition 2024*, 2025).
- Infraestruturas Obsoletas e Gestão Ineficiente: redes de distribuição de água envelhecidas e mal mantidas resultam em perdas significativas devido a fugas. Uma gestão ineficaz dos recursos hídricos agrava o problema, especialmente em países com infraestruturas antigas (Zhao & Boll, 2022).

2.3. Impactos de perda de água

A escassez de água doce é uma preocupação global crescente, com implicações significativas para a saúde humana, ecossistemas e economias. A redução da disponibilidade de água potável resulta de uma combinação de fatores, incluindo alterações climáticas, crescimento populacional e práticas de gestão inadequadas (World Wide Fund, 2023). Compreender os impactos desta perda é essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação.

2.3.1. Impacto na saúde humana

De acordo com Livingston a escassez de água potável está diretamente associada a riscos para a saúde pública. A falta de acesso a água segura pode levar à utilização de fontes contaminadas, aumentando a incidência de doenças transmitidas pela água, como cólera, disenteria e febre tifoide (Livingston, 2021). Além disso, a escassez de água compromete a higiene pessoal e o saneamento básico, facilitando a propagação de infecções. O Fundo das Nações Unidas para a Infância (UNICEF) destaca que, em situações de escassez hídrica, os sistemas de esgoto podem falhar, aumentando a ameaça de contrair doenças como a cólera (*Water scarcity | UNICEF*, sem data).

2.3.2. Impacto nos ecossistemas

Os ecossistemas aquáticos e terrestres dependem de um fornecimento estável de água doce para manter a biodiversidade e os serviços ecológicos. A redução dos recursos hídricos pode levar à degradação de habitats, perda de espécies e desequilíbrios nos ciclos biogeoquímicos. A diminuição do fluxo de água em rios e lagos afeta a qualidade da água, a disponibilidade de nutrientes e a capacidade de suporte dos ecossistemas (Tickner et al., 2020). O Fundo Mundial para a Natureza (WWF) alerta que a poluição da água, proveniente de várias fontes, incluindo pesticidas e fertilizantes agrícolas, resíduos humanos não tratados e resíduos industriais, pode ter efeitos imediatos, como a contaminação por bactérias nocivas, tornando a água imprópria para consumo ou recreação (M. Wang et al., 2024).

2.3.3. Impacto económico

A escassez de água tem consequências económicas significativas, afetando setores como a agricultura, indústria e produção de energia. Na agricultura, a falta de água reduz a produtividade das colheitas, ameaçando a segurança alimentar e aumentando os preços dos alimentos (Dolan et al., 2021a). Na indústria, a água é essencial para processos de produção, e a sua escassez pode levar à redução da produção e ao aumento dos custos operacionais (Leflaive, sem data-a). Além disso, a geração de energia hidroelétrica depende de reservas adequadas de água, e a sua diminuição pode comprometer a produção de energia e a estabilidade das redes elétricas (*Montel | Blog - How Do Droughts Affect Hydropower Generation?*, sem data). Um estudo publicado na *Nature Communications* avaliou o impacto económico da escassez de água em diferentes bacias hidrográficas, concluindo que, na maioria dos cenários, a escassez pode resultar em prejuízos económicos substanciais, agravando a crise em várias regiões e expondo as vulnerabilidades dos sistemas produtivos e das infraestruturas de energia (Dolan et al., 2021b).

2.4. Iniciativas de redução do desperdício de água

A redução do desperdício de água é uma preocupação global que tem levado ao desenvolvimento de diversas iniciativas sustentáveis. Estas iniciativas abrangem desde a reutilização de águas residuais até a implementação de tecnologias inovadoras para otimizar o uso da água. Seguidamente, são apresentadas algumas abordagens.

2.4.1. Reutilização de águas residuais

O tratamento e a reutilização de águas residuais estão a emergir como estratégias sustentáveis para a conservação dos recursos hídricos. Um estudo publicado na *Sustainability* destaca que o tratamento de águas residuais não apenas conserva água, mas também contribui para a produção de energia e aumenta a produtividade agrícola (Volf et al., 2022). A implementação de sistemas de tratamento adequados permite que a água tratada seja reutilizada para fins agrícolas, industriais ou mesmo potáveis, dependendo do nível de tratamento aplicado (Silva, 2023).

2.4.2. Tecnologias inovadoras de tratamento

Como menciona Mojiri et al. o desenvolvimento de tecnologias avançadas tem revolucionado a gestão de águas residuais. Uma pesquisa na *Frontiers in Water* explora abordagens inovadoras para purificação de fontes hídricas, contribuindo para um futuro mais sustentável. Essas tecnologias incluem processos avançados de oxidação, membranas de filtração de alta eficiência e sistemas biológicos aprimorados que aumentam a eficiência do tratamento e reduzem o desperdício de água (Mojiri et al., 2024).

2.4.3. Reutilização de águas cinzas

A reutilização de águas cinzas, provenientes de atividades domésticas como banho e lavagem de roupas, é uma prática eficaz na redução do consumo de água potável. Um artigo disponível no

PubMed Central discute como a segregação e o tratamento descentralizado de águas cinzas podem aumentar a resiliência dos sistemas hídricos urbanos, reduzir custos de transporte e fornecer água adequada para reutilização em fins não potáveis (Van de Walle et al., 2023).

2.4.4. Sistemas descentralizados de água e efluentes

A implementação de sistemas descentralizados de gestão de água e efluentes pode melhorar a eficiência no uso dos recursos e aumentar a resiliência das comunidades. Uma análise publicada na revista *Nature* sugere que esses sistemas podem servir como base para esforços que visam aprimorar a eficiência dos recursos e a resiliência das infraestruturas hídricas. Ao tratar e reutilizar a água localmente, é possível reduzir perdas no transporte e adaptar as soluções às necessidades específicas de cada comunidade (Garrido-Baserba et al., 2024).

2.4.5. Redução do desperdício alimentar

A diminuição do desperdício de alimentos está diretamente ligada à conservação da água, uma vez que a produção agrícola consome grandes volumes hídricos. Uma revisão na *Frontiers in Sustainable Food Systems* avalia o potencial de atenuar a escassez hídrica por meio da redução das perdas e desperdícios alimentares. Ao minimizar o desperdício de alimentos, reduz-se indiretamente o consumo de água utilizado na produção desses alimentos, contribuindo para a conservação dos recursos hídricos (Marston et al., 2021).

2.5. Tratamento de água: Métodos convencionais, tecnologias avançadas e a indústria 4.0

A crescente pressão sobre os recursos hídricos exige soluções eficazes para garantir a disponibilidade de água potável e a sustentabilidade ambiental. O tratamento de água desempenha um papel fundamental neste contexto, removendo contaminantes e assegurando a qualidade da água para consumo humano e uso industrial. Tradicionalmente, os métodos convencionais de tratamento têm sido amplamente utilizados, mas as exigências ambientais e a presença crescente de poluentes emergentes tornaram necessária a adoção de tecnologias mais avançadas (H. ; Wang et al., 2024).

Diferentes países têm adotado estratégias diversas para lidar com este desafio, desde a aplicação de métodos tradicionais até à integração de tecnologias inovadoras. Além disso, o avanço da Indústria 4.0 tem trazido novas oportunidades para otimizar os processos de tratamento, reduzindo custos e aumentando a eficiência. Este subcapítulo analisa os métodos convencionais e avançados de tratamento de água, comparando abordagens internacionais e explorando o impacto da digitalização na gestão dos sistemas hídricos (Gaskin et al., sem data).

2.5.1. Processos convencionais de tratamento de água

De acordo com (Matesun et al., 2024), os métodos convencionais de tratamento de água são amplamente utilizados pela sua eficiência comprovada e custos relativamente baixos. Estes

processos seguem uma sequência de etapas fundamentais que asseguram a remoção de impurezas e a conformidade da água com os padrões de qualidade para consumo, incluindo::

- **Coagulação e Floculação:** nesta fase inicial, adicionam-se coagulantes químicos, como sulfato de alumínio ou cloreto férrico, para promover a agregação de partículas suspensas. Isso facilita a formação de flocos que podem ser removidos posteriormente por sedimentação.
- **Filtração:** após a sedimentação, a água passa por filtros compostos por camadas de areia, carvão ativado ou membranas sintéticas. Este processo remove partículas restantes e certos compostos químicos que conferem gosto ou odor à água.
- **Desinfecção:** A fase final do tratamento convencional envolve a eliminação de microrganismos patogênicos. A cloração é o método mais comum, mas alternativas como a ozonização e a radiação ultravioleta (UV) têm sido cada vez mais utilizadas devido à sua eficácia e menor impacto ambiental.

Apesar de serem amplamente adotados, os métodos convencionais apresentam desafios, como a necessidade de grandes quantidades de produtos químicos e a produção de resíduos. Além disso, nem sempre são eficazes na remoção de contaminantes emergentes, como fármacos e micro poluentes industriais (Hofman-Caris et al., 2018).

2.5.2. Métodos avançados de tratamento de água

Para responder aos desafios atuais, têm sido desenvolvidas tecnologias mais eficientes e sustentáveis. Estes métodos avançados permitem um controle mais rigoroso da qualidade da água, garantindo a remoção de contaminantes que os sistemas convencionais não conseguem eliminar completamente (Islam, 2025).

- **Ultrafiltração (UF):** utiliza membranas microporosas para remover bactérias, vírus e partículas microscópicas. Esta tecnologia já é amplamente utilizada em países como o Japão e o Canadá, proporcionando uma barreira mais eficaz contra poluentes (Al-Ajmi et al., 2024).
- **Ozonização:** o ozônio é um agente oxidante poderoso, utilizado para eliminar microrganismos e degradar compostos orgânicos. Ao contrário do cloro, não deixa resíduos prejudiciais, sendo uma alternativa mais sustentável para a desinfecção da água (Al-Ajmi et al., 2024).
- **Carvão ativado biológico (BAC):** combina a adsorção do carvão ativado com a biodegradação de contaminantes, sendo especialmente eficaz na remoção de pesticidas, compostos orgânicos e produtos farmacêuticos (Al-Ajmi et al., 2024).
- **Filtração por membrana:** métodos como a osmose reversa e a nano filtração são amplamente utilizados para remover sais dissolvidos, metais pesados e micro poluentes. Estes processos são essenciais para a dessalinização da água do mar e o tratamento de águas subterrâneas contaminadas (Al-Ajmi et al., 2024).

Embora estas tecnologias avancem significativamente a qualidade do tratamento da água, a sua implementação enfrenta desafios, como elevados custos operacionais e a necessidade de manutenção especializada (Islam, 2025).

2.5.3. Comparação internacional dos métodos de tratamento de água

A adoção de diferentes tecnologias de tratamento de água varia consoante a disponibilidade de recursos, os requisitos ambientais e o nível de desenvolvimento tecnológico de cada país.

- Malásia: a abordagem predominante continua a ser baseada em métodos convencionais, mas há um esforço crescente para integrar tecnologias mais avançadas, como ultrafiltração e filtração por membranas (Pakharuddin et al., 2021).
- Canadá: o país destaca-se pelo uso extensivo de ozonização e radiação UV para desinfecção da água, reduzindo a dependência de produtos químicos como o cloro (Abdulghani et al., 2013).
- Japão: foca-se na utilização de carvão ativado biológico e ozonização para remover contaminantes emergentes, investindo fortemente na reciclagem e reutilização da água (Pakharuddin et al., 2021).
- Austrália: emprega métodos sustentáveis, incluindo a dessalinização e a reutilização de águas residuais tratadas para uso agrícola e urbano (Donovan, sem data).

A análise comparativa mostra que países com maior capacidade tecnológica e regulamentação ambiental mais rigorosa adotam métodos avançados para garantir a qualidade da água e a sustentabilidade dos recursos hídricos (Leflaive, sem data-b).

2.5.4. Indústria 4.0 no tratamento de água

O avanço das tecnologias digitais tem desempenhado um papel transformador no setor da água, permitindo otimizar processos, melhorar a monitorização da qualidade da água e reduzir custos operacionais tal como disposto infra:

- Sensores *IoT* (Internet das Coisas): permitem a monitorização em tempo real de parâmetros como turbidez, pH e níveis de contaminantes, facilitando a deteção precoce de falhas no sistema (Essamlali et al., 2024).
- *Big data* e inteligência artificial: o uso de algoritmos preditivos permite otimizar a gestão dos sistemas de tratamento de água, ajustando automaticamente a dosagem de produtos químicos e prevenindo falhas nos equipamentos (Capodaglio & Callegari, 2025).
- Drones e robôs: estão a ser utilizados para a inspeção de infraestruturas hídricas, identificando fugas e monitorizando a qualidade da água em reservatórios e rios (Awwad et al., 2024).

A integração destas tecnologias na gestão dos sistemas de tratamento de água representa um avanço significativo para a eficiência e sustentabilidade do setor.

2.6. Reaproveitamento de água para descargas de sanita: diversas soluções sustentáveis

Com a crescente escassez de recursos hídricos e a necessidade de soluções mais sustentáveis para o uso da água, várias alternativas inovadoras têm sido desenvolvidas para reutilizar a água em áreas como as descargas sanitárias. Além da reutilização de águas provenientes de chuveiros e lavatórios,

outras soluções também têm ganhado destaque, contribuindo para a redução do consumo de água potável e promovendo práticas mais ecológicas. A seguir, apresento algumas dessas soluções (Al-Jayyousi, 2003).

2.6.1. Sistema de reaproveitamento de água da chuva para descarga de sanita

Uma das soluções mais eficientes é o reaproveitamento da água da chuva. Este sistema recolhe a água das chuvas, armazena-a em reservatórios e utiliza-a para as descargas sanitárias. A água da chuva é filtrada antes de ser direcionada para a caixa de descarga, garantindo que não haja impurezas. Esse sistema é especialmente eficaz em regiões com boas condições climáticas para precipitação e pode reduzir significativamente a dependência de água potável para usos não potáveis (*Gravity Fed Rainwater Harvesting System For Flushing Toilets – Freeflush Water Management Ltd.*, sem data).

2.6.2. Sistema de reaproveitamento de águas cinzentas para descarga de sanita

As águas cinzentas, provenientes de processos como lavagem de roupas ou uso de máquinas de lavar louça, também podem ser reutilizadas para as descargas sanitárias. A água é recolhida, tratada e filtrada para remover impurezas antes de ser direcionada para a sanita. Este sistema exige a instalação de uma tubulação separada para as águas cinzas e garante que a água reaproveitada seja de boa qualidade para o uso. Além disso, a abordagem reduz o consumo de água potável em áreas residenciais e comerciais (*Água de reuso é opção para condomínio sustentável*, sem data).

2.6.3. Sistema de reaproveitamento de água de ar condicionado para descarga de sanita

Outra solução inovadora é o reaproveitamento da água gerada pelo condensado do ar condicionado. Este sistema recolhe a água do ar condicionado, filtra-a e direciona-a para a caixa de descarga da sanita. Esse método é especialmente útil em climas quentes, onde o uso de ar condicionado é mais frequente, gerando grandes quantidades de condensado. O uso dessa água não só reduz o consumo de água potável, mas também melhora a eficiência dos sistemas de climatização (*Bucking the cistern: using condensate for flushing toilets - CIBSE Journal*, sem data).

2.6.4. Sistema *aqualoop greywater recycling system*

O *Aqualoop* é um sistema que recicla águas cinzentas, como a água proveniente de chuveiros e lavatórios, e redireciona-as para as descargas de sanita. A água passa por um processo de filtragem avançado para garantir a sua qualidade, sendo adequada para uso em descargas. Este sistema é modular e pode ser adaptado a diferentes tipos de edifícios, tanto residenciais quanto comerciais. A escalabilidade e a filtragem de alta qualidade fazem do *Aqualoop* uma solução eficaz para a

reutilização de água em larga escala (*Reuse Shower Water with Aqualoop Greywater Recycling | Ecoviv, sem data*).

2.6.5. Sistema *DIY* de reciclagem de água para casa de banho

Por fim, uma solução mais simples e económica é o sistema *DIY* (*do it yourself*), que recolhe a água do lavatório e utiliza-a para as descargas sanitárias. O sistema envolve a criação de um reservatório sob a pia, onde a água é armazenada antes de ser redirecionada para a sanita. Embora seja um sistema de baixo custo e fácil de implementar, é necessário garantir que a água não desenvolva odores ou impurezas. Este sistema é ideal para residências que procuram uma solução prática e acessível (*DIY Greywater System, sem data*).

2.7. Desafios e barreiras à implementação

A implementação de sistemas de reaproveitamento de águas cinzentas enfrenta, além dos desafios técnicos e económicos, barreiras sociais significativas que dificultam a sua aceitação e adoção. A resistência social pode ser um dos maiores obstáculos, pois envolve questões culturais, psicológicas e educativas (Domnech & Saurí, 2010).

2.7.1. Falta de conscientização sobre a escassez de água

Um dos principais desafios sociais é a falta de compreensão do problema atual da escassez de água. Muitas comunidades não percebem a magnitude da crise hídrica, principalmente em regiões onde a água potável ainda parece abundante. A conscientização sobre o impacto do desperdício de água e a necessidade urgente de sua conservação ainda não é uma prioridade para muitos, o que resulta em resistência a soluções que envolvem mudanças no uso da água. Segundo estudos, a falta de percepção do problema da escassez de água pode ser atribuída à desconexão entre o comportamento diário e os impactos ambientais globais (Morris et al., 2021).

2.7.2. Percepções psicológicas e culturais

Apesar da eficácia ambiental, a reutilização de águas cinzentas pode ser vista com desconfiança e aversão por muitos indivíduos. Há uma percepção negativa em relação à água reciclada, especialmente em contextos culturais onde a água potável é associada a pureza e segurança. O "desgosto", como é denominado por psicólogos ambientais, é um dos maiores impedimentos à adoção de tecnologias de reaproveitamento de água. Esse estigma psicológico pode ser mais forte do que a compreensão dos benefícios ambientais ou económicos da solução (Al-Khatib et al., 2022).

2.7.3. Resistência à mudança nos hábitos diários

A mudança no comportamento diário é uma das barreiras mais difíceis de superar. Sistemas que exigem mudanças nos hábitos de consumo, como a recolha e reutilização de águas cinzentas, enfrentam resistência simplesmente por desafiar a rotina estabelecida. A introdução de novas práticas que envolvem o reaproveitamento de águas pode ser vista como inconveniente ou

complicada, o que dificulta sua aceitação no cotidiano. Além disso, a ideia de ter "água usada" que vão para o sistema de descargas sanitárias pode ser rejeitada por questões de percepção de higiene e conforto (Morris et al., 2021).

2.7.4. Falta de apoio social e educacional

A educação e o apoio social são cruciais para mudar mentalidades e comportamentos. A falta de programas educacionais focados na importância da conservação da água e na adoção de soluções sustentáveis pode ser um grande impedimento. Estudos mostram que o sucesso na adoção de tecnologias de reutilização de água está diretamente relacionado à educação e à conscientização pública sobre os benefícios e a necessidade da poupança de água. Sem o conhecimento adequado, a população tende a ver essas soluções como desnecessárias ou até mesmo incomodativas (Valenzuela-Morales et al., 2022).

2.7.5. Impacto, aceitação e fatores de sucesso em sistemas de águas cinzentas

Em termos de impacto real, testaram a implementação de sistemas de águas cinzentas em 50 residências no norte da Alemanha, registrando uma redução média de 28% no consumo de água potável (Rajski et al., 2024). Este estudo destaca não só a eficácia técnica destes sistemas, mas também a sua viabilidade em contextos urbanos de países desenvolvidos. Os autores salientam que a aceitação por parte dos residentes aumentou significativamente quando foram fornecidas informações claras sobre os benefícios ambientais e econômicos da reutilização de águas cinzentas.

Complementarmente, (Awasthi et al., 2024) conduziram uma meta-análise de 80 estudos de casos em contextos urbanos e rurais, demonstrando que os sistemas descentralizados são particularmente eficazes quando associados a campanhas de educação ambiental e incentivos econômicos. A análise revelou que a combinação de políticas públicas favoráveis, subsídios financeiros e programas de sensibilização comunitária resulta numa maior adoção e manutenção destes sistemas. Os autores enfatizam que, em regiões onde estas estratégias foram implementadas de forma integrada, observou-se uma melhoria significativa na gestão sustentável da água a nível doméstico.

Estes estudos reforçam a importância de abordagens holísticas que integrem tecnologia, políticas públicas e educação ambiental para promover a reutilização eficaz de águas cinzentas. A evidência empírica sugere que, para além da disponibilidade de tecnologias adequadas, o sucesso na implementação destes sistemas depende fortemente do envolvimento ativo das comunidades e do suporte institucional.

2.8. Metodologias para seleção de fornecedores

A escolha de fornecedores é um fator estratégico que influencia diretamente a eficiência operacional e a competitividade das organizações (Dickson, 1966). Dada a complexidade desse

processo, diversas metodologias têm sido desenvolvidas para auxiliar na tomada de decisão, permitindo a avaliação de múltiplos critérios simultaneamente. Métodos como o *Analytic Hierarchy Process* (AHP), o *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) e a *Data Envelopment Analysis* (DEA) destacam-se pela sua capacidade de estruturar comparações e otimizar a seleção dos parceiros comerciais. Este capítulo apresenta e discute essas metodologias, explorando suas aplicações e benefícios na gestão da cadeia de abastecimento.

2.8.1. Analytic Hierarchy Process (AHP)

O *AHP* é uma técnica de tomada de decisão multicritério que decompõe um problema complexo numa hierarquia de critérios e subcritérios, facilitando a comparação entre diferentes alternativas. No contexto da seleção de fornecedores, o *AHP* permite que os decisores avaliem os fornecedores com base em múltiplos critérios, tanto quantitativos quanto qualitativos (Ho et al., 2010a).

Aplicação Prática:

- Estruturação da hierarquia: definir o objetivo principal (seleção do melhor fornecedor), os critérios (por exemplo, custo, qualidade, tempo de entrega) e, se necessário, subcritérios.
- Comparações par a par: realizar comparações entre os critérios e entre os fornecedores em relação a cada critério, utilizando uma escala de importância relativa.
- Cálculo dos pesos: determinar os pesos dos critérios e a pontuação final de cada fornecedor, auxiliando a tomada de decisão.

Assim, o *AHP* destaca-se como uma metodologia estruturada e eficaz para a seleção de fornecedores, permitindo uma avaliação criteriosa baseada em múltiplos fatores. A sua capacidade de hierarquizar critérios e atribuir pesos de forma sistemática torna o processo decisório mais objetivo e alinhado às necessidades estratégicas da organização (Hruška et al., 2014).

2.8.2. Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)

O *TOPSIS* é um método que classifica as alternativas com base na proximidade a uma solução ideal positiva (a melhor possível) e na distância de uma solução ideal negativa (a pior possível). Na seleção de fornecedores, o *TOPSIS* ajuda a identificar o fornecedor que mais se aproxima do ideal desejado (Behzadian et al., 2012). As etapas desta técnica são:

- Construção da matriz de decisão: elaborar uma matriz que inclua os fornecedores e os critérios de avaliação.
- Normalização: normalizar a matriz para eliminar as unidades de medida.
- Ponderação: aplicar pesos aos critérios conforme sua importância relativa.
- Cálculo das distâncias: calcular as distâncias de cada fornecedor em relação às soluções ideais positiva e negativa.
- Classificação: classificar os fornecedores com base na proximidade relativa à solução ideal.

Desta forma, o *TOPSIS* oferece uma abordagem clara e quantitativa para a seleção de fornecedores, permitindo que a decisão seja baseada na proximidade das alternativas a um cenário ideal. A sua aplicação facilita a comparação objetiva entre diferentes fornecedores, tornando o processo mais transparente e eficiente. Ao considerar simultaneamente múltiplos critérios e as suas ponderações, o *TOPSIS* contribui para uma tomada de decisão mais estruturada e alinhada aos objetivos estratégicos da organização (Okwu & Tartibu, 2020b).

2.8.3. Data Envelopment Analysis (DEA)

A *DEA* é uma técnica de programação linear usada para avaliar a eficiência relativa de unidades tomadoras de decisão (como fornecedores) com múltiplos *inputs* e *outputs*. Na seleção de fornecedores, a *DEA* permite comparar a eficiência de fornecedores considerando diversos fatores simultaneamente (Charnes et al., 1978). Para tal devem ser efetuadas as seguintes etapas:

- Identificação de *Inputs* e *Outputs*: selecionar os fatores de *input* (como custo e tempo de entrega) e de *output* (nomeadamente, qualidade e capacidade de atendimento).
- Construção do modelo *DEA*: aplicar o modelo *DEA* para calcular a eficiência relativa de cada fornecedor.
- Análise dos resultados: identificar os fornecedores mais eficientes e os que apresentam ineficiências, fornecendo *insights* para melhorias ou decisões de seleção.

Assim, a *DEA* destaca-se como uma ferramenta poderosa para a seleção de fornecedores, permitindo avaliar a eficiência relativa com base em múltiplos critérios simultaneamente. Ao identificar os fornecedores mais eficientes e apontar oportunidades de melhoria para os menos eficientes, esta metodologia contribui para a otimização da cadeia de abastecimento (Dutta et al., 2022).

Estas metodologias fornecem abordagens estruturadas e baseadas em dados para a seleção de fornecedores, permitindo que as organizações tomem decisões mais informadas e alinhadas aos seus objetivos estratégicos.

2.9. Metodologias de avaliação

A avaliação de projetos é um processo fundamental para garantir a viabilidade, eficiência e impacto de uma iniciativa. Para projetos relacionados à gestão sustentável da água, como reutilização de águas cinzentas para descargas sanitárias, a escolha de uma metodologia adequada permite analisar fatores técnicos, económicos, ambientais e sociais. Diferentes metodologias são utilizadas para avaliar o desempenho do projeto, permitindo uma tomada de decisão mais informada e garantindo que os objetivos definidos sejam alcançados.

A seguir, são apresentadas algumas metodologias amplamente utilizadas na avaliação de projetos, com foco na análise de viabilidade, sustentabilidade e desempenho.

2.9.1. Avaliação multicritério (*Multi-Criteria Decision Making - MCDM*)

A avaliação multicritério é uma metodologia utilizada para comparar diferentes alternativas de um projeto, considerando múltiplos fatores simultaneamente. Este método é particularmente útil quando existem critérios de decisão conflitantes, como custo, eficiência e impacto ambiental (Lombardi & Todella, 2023). O funcionamento desta avaliação pode ser descrito como:

1. Definição dos critérios de avaliação: identificar os fatores mais relevantes para a decisão (como o custo, impacto ambiental, viabilidade técnica e aceitação social).
2. Atribuição de pesos aos critérios: determinar a importância relativa de cada fator.
3. Avaliação das alternativas: aplicação de um modelo matemático para classificar as opções.
4. Escolha da melhor alternativa: o método aponta a solução que melhor equilibra os critérios estabelecidos.

Os principais modelos encontrados no MCDM (Roy, 1991) são:

- *AHP*: organiza os critérios hierarquicamente e permite comparações par a par.
- *TOPSIS*: classifica alternativas com base na proximidade de uma solução ideal.
- *ELECTRE (Elimination and Choice Expressing Reality)*: método baseado em comparação de critérios para eliminar opções menos favoráveis.

2.9.2. Análise de custo-benefício (*Cost-Benefit Analysis - CBA*)

A *CBA* é uma metodologia econômica utilizada para determinar a viabilidade financeira de um projeto. No caso da reutilização de águas cinzentas, o objetivo da *CBA* é comparar os custos de implementação e operação com os benefícios financeiros esperados, como a redução da fatura da água (Gilboa et al., 2023). Para isto ser possível devem-se cumprir as seguintes etapas:

1. Identificação dos custos: inclui investimentos iniciais, manutenção e operação do sistema.
2. Identificação dos benefícios: inclui economia de água, redução de taxas e ganhos ambientais indiretos.
3. Cálculo do valor presente líquido (VPL): compara os benefícios futuros trazidos pelo projeto com os custos iniciais.
4. Determinação do tempo de retorno do investimento (*Payback Period*): calcula em quanto tempo o investimento será recuperado.

2.9.3. Índice de pegada hídrica (*Water Footprint Assessment - WFA*)

O *WFA* é uma metodologia utilizada para medir o impacto de um projeto no consumo de água, permitindo quantificar a redução do uso de água potável e a eficiência hídrica do sistema (Rodríguez et al., 2020). Esta metodologia prevê as seguintes etapas:

1. Definição do objetivo: determinar quais fontes de água que serão avaliadas (ex.: água potável, águas cinzentas reutilizadas).

2. Cálculo da pegada hídrica: medição do volume total de água economizado pelo projeto.
3. Comparação com o consumo convencional: avaliação da eficiência do sistema de reutilização.
4. Análise de sustentabilidade: verificação do impacto do projeto na disponibilidade hídrica da região.

2.10. Enquadramento legal da reutilização de águas cinzentas em Portugal

No contexto português, a reutilização de águas cinzentas não está associada ao consumo humano, mas sim a utilizações não potáveis, entre as quais se destaca a descarga de sanitários. Importa sublinhar que não existe qualquer diploma legal que proíba explicitamente esta prática. A legislação nacional em vigor, como o Decreto-Lei n.º 119/2019, centra-se sobretudo na produção de água para reutilização a partir de águas residuais tratadas em estações de tratamento, com foco nos usos agrícola e urbano em larga escala, não abordando de forma detalhada a reutilização doméstica de águas cinzentas. Da mesma forma, os diplomas que regulam a qualidade da água para consumo humano, como o Decreto-Lei n.º 69/2023, aplicam-se apenas à água potável, não impondo restrições à utilização de águas não destinadas a consumo humano, como é o caso da descarga de sanitários.

Assim, o enquadramento jurídico atual não representa um impedimento direto à adoção destes sistemas, embora a ausência de regulamentação específica e de normas técnicas harmonizadas constitua uma limitação prática, por não definir parâmetros de qualidade, exigências de manutenção ou responsabilidades associadas. Esta lacuna cria um espaço de incerteza, mas também uma oportunidade para inovação, incentivando a criação de diretrizes futuras que promovam a segurança sanitária e a confiança dos utilizadores.

3. CONCEÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO MÓDULO DE REAPROVEITAMENTO DE ÁGUAS CINZENTAS

Após a análise teórica e contextual desenvolvida nos capítulos anteriores, este capítulo descreve o processo de conceção, desenvolvimento e implementação do sistema de reaproveitamento de águas cinzentas para utilização em descargas sanitárias. A proposta assenta na criação de um módulo funcional, compacto e adaptável, capaz de captar, filtrar, armazenar e reutilizar águas provenientes de lavatórios e bases de duche.

O desenvolvimento deste sistema foi orientado pelos princípios da metodologia *Design Science Research (DSR)*, permitindo uma abordagem iterativa de construção e validação da solução. Com base nos requisitos identificados na literatura e nas necessidades práticas de aplicação doméstica, o projeto procurou equilibrar eficiência técnica, viabilidade económica e simplicidade de integração.

Neste capítulo serão apresentados os requisitos funcionais e técnicos do sistema, os critérios de *design* adotados, os métodos utilizados para seleção de componentes, bem como o processo de modelação e construção do protótipo. Serão ainda discutidas as opções de integração com instalações sanitárias existentes e consideradas as questões relacionadas com manutenção, durabilidade e experiência do utilizador.

O objetivo final deste capítulo é fornecer uma descrição clara e detalhada da solução tecnológica desenvolvida, como contributo prático para a redução do consumo de água potável em contexto habitacional.

3.1. Requisitos do sistema

Para garantir a eficácia do sistema de reaproveitamento de águas cinzentas proposto, foi necessário definir um conjunto de requisitos funcionais, técnicos e operacionais que orientassem o processo de conceção e desenvolvimento. Estes requisitos foram estabelecidos com base nas boas práticas identificadas na literatura, nas condições de aplicação residencial e nas limitações práticas de instalação e manutenção.

3.1.1. Requisitos funcionais

- O sistema deve recolher águas residuais provenientes de lavatórios e bases de duche.
- Deve realizar o pré-tratamento da água para remoção de impurezas visíveis como cabelos ou sabão.
- Deve realizar o pré-tratamento da água para remoção de impurezas invisíveis como Microrganismos
- Deve armazenar temporariamente a água tratada de forma segura.
- Deve fornecer automaticamente a água tratada ao sistema de descarga sempre que necessário.

3.1.2. Requisitos técnicos

- Volume de armazenamento com 80 litros ou cerca de 20 descargas compatível com uso diário de uma habitação típica composta por uma família de 4 pessoas.
- Sistema de filtragem 4 etapas, composto por um filtro de 90 µm, 25 µm, filtro de carbono ativado e filtro UV.
- Sistema de bombeamento com pressão adequada.
- Utilização de materiais resistentes à humidade e de fácil higienização (ex: PVC, inox, polietileno).
- Tensão de funcionamento compatível com instalações elétricas residenciais (230V AC ou 12V DC).

3.1.3. Requisitos de integração

- Compatibilidade com instalações sanitárias existentes (sem necessidade de obras estruturais).
- Design modular, de fácil instalação e substituição de componentes.
- Possibilidade de funcionamento alternado com a rede pública, caso o reservatório esgote ou falha na alimentação elétrica.

3.1.4. Requisitos de manutenção e segurança

- Fácil acesso a filtros e componentes para limpeza e substituição.
- Alarmes visuais em caso de avaria, entupimento ou falta de água.
- Sistema concebido para, em caso de falha de energia elétrica, continuar a permitir o funcionamento normal da descarga sanitária, recorrendo automaticamente à água da rede pública, sem necessidade de intervenção manual ou de componentes eletrónicos.
- Proteção contra refluxo para evitar contaminações da rede.

3.2. Introdução do sistema

Este projeto tem como objetivo a reutilização das águas provenientes do lavatório e do duche, após tratamento adequado, para serem utilizadas nas descargas sanitárias. Para além disso, serão instaladas torneiras com aeradores de redução de caudal, que permitirão uma poupança significativa de água face às torneiras convencionais.

A recolha da água será feita através de um sifão de pavimento instalado por baixo do reservatório central. Este sifão está equipado com duas entradas e duas saídas. As entradas destinam-se à receção das águas provenientes do lavatório e do chuveiro. Uma das saídas está ligada à bomba submersível, que aspira a água do sifão e a encaminha para o sistema de tratamento. A segunda

saída serve como linha de segurança, conduzindo a água diretamente para o esgoto em situações de emergência, nomeadamente quando a bomba estiver inoperacional, seja por avaria ou por incapacidade de escoamento.

Adicionalmente, o sifão inclui uma saída secundária que conduz a água para o esgoto em situações de emergência, nomeadamente quando a bomba estiver inoperacional, quer por avaria, quer por incapacidade momentânea de escoamento.

A água aspirada pela bomba segue então para a unidade de tratamento, composta por três etapas: filtragem mecânica com filtros de 90 e 25 *microns*, seguida de um filtro de carvão ativado e, por fim, uma unidade de desinfecção por radiação ultravioleta. Após este processo, a água tratada é armazenada no reservatório principal.

No momento de uma descarga sanitária, o sistema analisa as condições operacionais e decide a origem da água utilizada. Se houver água disponível no reservatório e todos os componentes do sistema estiverem a funcionar corretamente (sem falhas elétricas ou mecânicas), a descarga é alimentada com água recuperada, proveniente de uma entrada dedicada no autoclismo. No entanto, caso o sistema detete a ausência de água no reservatório ou ocorra alguma falha (como corte de energia ou avaria nas bombas), a válvula de rede permanece aberta, permitindo o funcionamento do autoclismo de forma convencional, com abastecimento direto da rede pública.

Podemos perceber melhor na figura apresentada a seguir

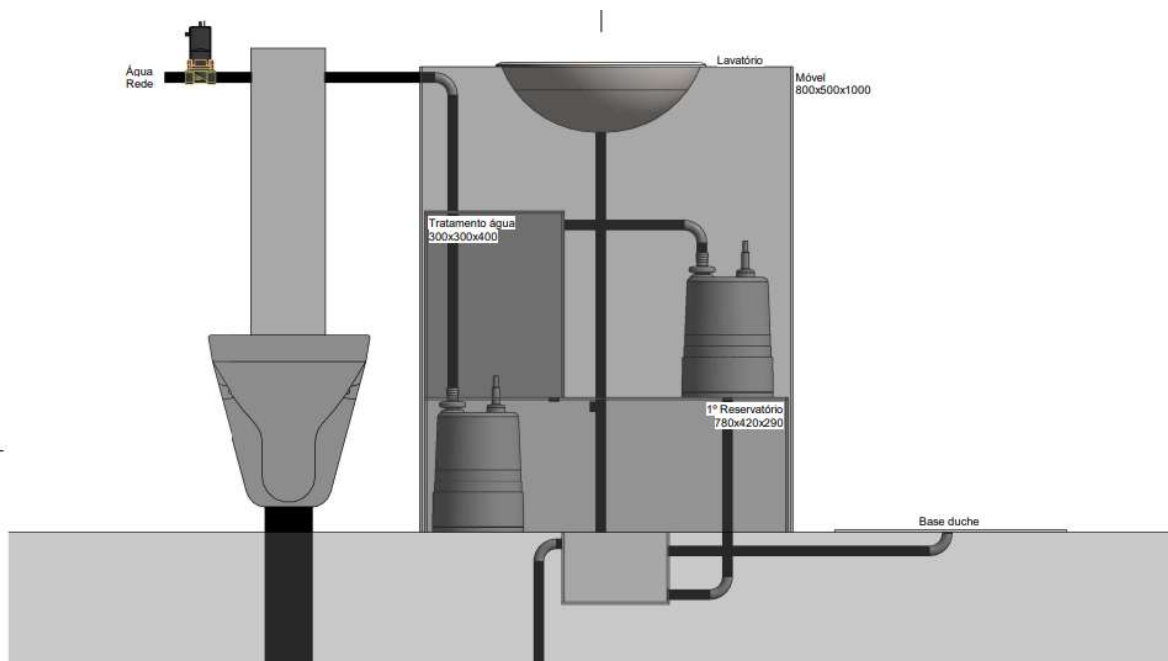


Figura 2 - Sistema

3.3. Componentes do sistema

O sistema proposto é composto por vários elementos que trabalham de forma integrada para garantir a recolha, filtragem, armazenamento e reutilização de águas cinzentas em descargas

sanitárias. Cada componente desempenha uma função específica, contribuindo para a eficiência técnica, fiabilidade e segurança sanitária do conjunto.

3.3.1. Pré-filtro de 90 μ m

O pré-filtro de 90 μ m constitui a primeira barreira física do sistema de tratamento de águas cinzentas, sendo projetado para reter partículas sólidas de maior dimensão presentes na água proveniente de lavatórios e bases de duche. Entre as partículas removidas destacam-se cabelos, fibras têxteis, areia grossa, fragmentos de sabão solidificado e outros resíduos visíveis a olho nu.

A função principal deste filtro é proteger os estágios seguintes do sistema, particularmente os filtros mais finos, evitando entupimentos e desgaste prematuro. O pré-filtro prolonga assim a vida útil dos componentes seguintes e reduz custos de manutenção, assegurando um funcionamento contínuo e fiável do sistema.

Do ponto de vista construtivo, o filtro de 90 μ m é geralmente constituído por malha metálica inoxidável ou polímero técnico, resistente à corrosão e ao uso prolongado em ambiente húmido. A escolha de materiais anticorrosivos visa garantir durabilidade, facilidade de limpeza e baixo risco de contaminação adicional da água. A malha de 90 μ m corresponde a aberturas de 0,09 mm, dimensão suficiente para capturar sólidos grandes, mas permitir um fluxo adequado sem perdas significativas de carga hidráulica.

Em termos de manutenção, este pré-filtro foi selecionado para permitir remoção e lavagem fácil, sendo projetado para operação sem ferramentas especializadas. Esta característica garante que o utilizador final possa limpar regularmente o filtro, prevenindo bloqueios e assegurando o caudal ideal. Em projetos residenciais, a manutenção recomendada varia entre 15 dias a um mês, dependendo da qualidade da água cinzenta e do uso diário.

A instalação do pré-filtro é realizada na entrada do sistema, imediatamente após a recolha da água cinzenta através da bomba, de modo a garantir que o primeiro tratamento ocorre antes de qualquer armazenamento. Esta posição estratégica maximiza a eficácia do sistema global e minimiza riscos de deposição de resíduos sólidos no reservatório.

A escolha de um pré-filtro de 90 μ m, em vez de alternativas com malha mais grossa ou mais fina, baseou-se num equilíbrio entre eficiência de retenção e manutenção do caudal. Filtros com aberturas maiores como por exemplo 15 μ m ou 200 μ m poderiam permitir a passagem de partículas suficientes para comprometer os filtros seguintes ou os tubos de pequena seção. Por outro lado, um filtro muito mais fino como de 50 μ m exigiria mais manutenção, apresentaria uma maior perda de carga hidráulica e poderia encarecer o sistema sem ganhos proporcionais para esta aplicação. Assim, a malha de 90 μ m foi selecionada como opção otimizada para reter os sólidos mais problemáticos presentes em águas cinzentas típicas, ao mesmo tempo garantindo simplicidade de manutenção, custo acessível e compatibilidade com o design compacto do módulo proposto.

3.3.2. Filtro de 25 μ m

O filtro de 25 μ m constitui a segunda etapa do sistema de filtração, atuando como um elemento de polimento que remove partículas finas que escaparam ao pré-filtro de 9 μ m. Entre os contaminantes

retidos estão sedimentos muito pequenos, resíduos de sabão parcialmente dissolvido, poeiras finas, fragmentos de fibras têxteis e matéria orgânica microscópica em suspensão.

A função principal deste filtro é deixar a água cinzenta mais limpa ao reter partículas muito pequenas eliminando o efeito que a água tem de ser turva, também melhorando a sua qualidade física antes de etapas mais avançadas como a filtração por carvão ativado e a desinfecção UV. Ao capturar partículas pequenas, mas persistentes, o filtro de 25 μ m evita o acúmulo de sedimentos no reservatório de armazenamento e protege os componentes a jusante de entupimentos ou desgaste prematuro.

Em termos construtivos, este filtro é geralmente produzido em polímeros técnicos ou fibras sintéticas enroladas, com elevada resistência mecânica e química. O elemento filtrante é projetado para oferecer uma grande área superficial de filtração, o que permite reter partículas finas mantendo um caudal adequado e uma baixa perda de carga. Essa característica é essencial para garantir que a bomba submersível opere sem esforço excessivo, prolongando a sua vida útil e mantendo o sistema eficiente mesmo em usos prolongados.

A manutenção do filtro de 25 μ m é simples e acessível, sendo o cartucho facilmente removível para substituição periódica. Embora não exija limpeza frequente como o pré-filtro grosseiro, recomenda-se verificar o seu estado a cada 2 a 3 meses em uso residencial normal, ajustando o intervalo conforme a qualidade da água cinzenta processada. A substituição atempada assegura um desempenho consistente e evita aumentos indesejados na perda de carga do sistema.

Em termos de instalação, o filtro de 25 μ m é colocado logo a seguir ao pré-filtro de 90 μ m. Esta ordem garante que as partículas maiores são removidas primeiro e as mais pequenas depois. Essa disposição em cascata é uma boa prática em sistemas de tratamento de água, assegurando máxima eficiência do conjunto filtrante com manutenção distribuída e previsível.

A escolha específica de um filtro de 25 μ m, em vez de alternativas mais finas ou mais grossas, resulta de uma análise de compromisso técnico-económico. Filtros mais grossos como por exemplo 50 μ m poderiam permitir a passagem de partículas demasiado finas, afetando os filtros posteriores e elevando a carga sobre o carvão ativado ou a unidade UV. Já filtros mais finos como 10 μ m ou menos apresentariam maior resistência hidráulica, exigiriam substituição mais frequente e aumentariam o custo de operação, sem oferecer benefícios significativos para o uso previsto. Assim, o filtro de 25 μ m representa uma solução otimizada para equilibrar qualidade da água, facilidade de manutenção e custo global do sistema.

3.3.3. Filtro de carvão ativado

O filtro de carvão ativado constitui a terceira etapa do sistema de filtragem, sendo responsável por remover compostos orgânicos dissolvidos na água cinzenta, melhorar o seu aspeto e reduzir odores desagradáveis. A sua principal função é absorver substâncias químicas residuais presentes na água usada em lavatórios e bases de duche, como detergentes, sabões líquidos, perfumes e outros compostos voláteis que possam causar maus odores ou contaminação química.

O carvão ativado possui uma estrutura microporosa altamente desenvolvida, que oferece uma grande área superficial para a adsorção de moléculas orgânicas e alguns contaminantes químicos. Este processo liga os contaminantes às superfícies internas do carvão, removendo-os eficazmente

da água mesmo em concentrações baixas. Para aplicações em águas cinzentas, esta etapa é fundamental para garantir que a água armazenada no reservatório mantenha características aceitáveis para a sua reutilização em descargas sanitárias, prevenindo odores e o desenvolvimento de biofilmes,

O cartucho usado neste sistema é do tipo *carbon block*, feito com carvão ativado moído e compactado num formato sólido. Esta forma garante uma filtração mais uniforme e eficiente do que os filtros granulares tradicionais. Além disso, o bloco compacto evita que pequenas partículas de carvão se soltem para a água, tornando o sistema mais fiável e limpo.

Em termos construtivos, o filtro de carvão ativado em bloco é encapsulado num cartucho selado para facilitar a substituição e garantir condições sanitárias durante a operação. A manutenção consiste essencialmente na substituição periódica do cartucho, com intervalos que dependem da carga contaminante da água e do uso diário. Em cenários residenciais típicos, recomenda-se a verificação ou substituição a cada 6 a 12 meses, equilibrando custo, desempenho e facilidade de operação.

Em termos de instalação, o filtro de carvão ativado fica depois dos filtros de 90µm e 25µm. Esta ordem é importante porque os pré-filtros removem os sólidos maiores que poderiam entupir ou desgastar o carvão ativado. Assim, o sistema filtra melhor, dura mais tempo e garante que a água armazenada tenha qualidade suficiente para ser reutilizada.

A escolha de um filtro de carvão ativado em bloco foi feita considerando as vantagens técnicas, económicas e operacionais face a outras opções disponíveis. Filtros granulares, embora mais baratos, apresentam maior risco de canais preferenciais e menor consistência de filtração. Já filtros químicos mais complexos seriam desnecessários para o nível de qualidade exigido para uso não potável. Assim, o filtro de carvão ativado em bloco representa uma solução eficaz, fiável e acessível, adaptada às exigências do projeto e fácil de integrar num módulo compacto para aplicação residencial.

3.3.4. Unidade de luz ultravioleta

A unidade de luz ultravioleta (*UV*) é a etapa final de desinfecção do sistema de tratamento de águas cinzentas, responsável por eliminar microrganismos presentes na água tratada antes do seu armazenamento. Esta etapa utiliza radiação UV do tipo C (*UVC*), com um comprimento de onda típico de cerca de 254nm, conhecida pela sua capacidade germicida.

A principal função da luz *UV* é inativar bactérias, vírus, fungos e outros microrganismos, danificando o seu material genético e impedindo a sua reprodução. Ao contrário de métodos químicos (como o cloro), a radiação *UV* não adiciona substâncias à água nem altera o seu sabor ou cheiro, sendo considerada uma tecnologia limpa e segura para aplicações não potáveis como descargas sanitárias.

Em termos construtivos, a unidade *UV* consiste numa lâmpada especial montada num invólucro estanque que permite o contacto controlado da água com a radiação. O design garante que toda a água tratada passe por esta câmara de desinfecção antes de chegar ao reservatório. Os materiais utilizados são resistentes à radiação e à humidade, assegurando durabilidade e segurança operacional.

A manutenção deste componente é relativamente simples, envolvendo a substituição periódica da lâmpada *UV*, já que a sua capacidade germicida diminui ao longo do tempo mesmo que ainda emita luz. Em aplicações residenciais, recomenda-se a substituição anual ou conforme as especificações do fabricante. Além disso, é importante manter o invólucro limpo para evitar depósitos que possam bloquear a radiação.

A unidade *UV* é instalada depois de todas as etapas de filtração (90 μ m, 25 μ m e carvão ativado). Esta ordem garante que a água já esteja limpa de partículas e substâncias que poderiam dificultar a ação da luz *UV* ao eliminar microrganismos.

A escolha desta tecnologia deve-se às suas vantagens em termos de eficácia, segurança e baixo impacto ambiental. Métodos químicos, embora eficazes, poderiam deixar resíduos indesejáveis ou exigir doses controladas para evitar riscos. A luz *UV*, por outro lado, oferece desinfecção eficiente, operação automática, baixa manutenção e compatibilidade total com o objetivo do sistema.

3.3.5. Bomba submersível LSC1.4S-51

A bomba submersível TSURUMI LSC1.4S-51 é o componente responsável por captar a água cinzenta proveniente dos lavatórios e bases de duche, assegurando o seu transporte através do circuito de filtração e desinfecção *UV* até ao reservatório de água tratada.

Esta bomba foi escolhida por garantir fiabilidade, robustez e capacidade de sucção suficientes para vencer as resistências dos filtros de 90 μ m, 25 μ m, carvão ativado e câmara *UV*. Ao forçar a água através destas etapas, assegura-se que todo o caudal recolhido seja devidamente tratado antes de ser armazenado.

A TSURUMI LSC1.4S-51 é uma bomba elétrica submersível, desenhada para funcionar totalmente imersa na água cinzenta recolhida. Esta configuração reduz o risco de cavitação, ocupa menos espaço, permite um funcionamento silencioso e, sobretudo, garante um arrefecimento eficiente do motor, uma vez que a própria água aspirada pela bomba envolve o corpo do equipamento e dissipa o calor gerado durante o funcionamento. Este mecanismo de auto arrefecimento hidráulico assegura maior durabilidade do motor e estabilidade térmica mesmo em funcionamento contínuo.

Em termos técnicos, oferece um caudal máximo de 190 L/min e uma altura até 5,7 m, sendo adequada para vencer as perdas de carga introduzidas pelos filtros em série e garantir um fluxo estável para o reservatório. O impulsor tipo vortex permite a passagem de partículas até 35 mm sem entupimentos, característica essencial ao bombear água cinzenta com resíduos leves.

A escolha desta bomba específica, em vez de modelos de superfície ou menos robustos, baseou-se em critérios de adequação técnica, resistência, facilidade de instalação submersa e integração num módulo compacto, permitindo uma solução fiável, silenciosa e de baixo consumo energético para uso doméstico.

3.3.6. Adaptador de sucção

O adaptador de sucção é um componente adicional instalado na bomba submersível TSURUMI LSC1.4S-51, tirando partido da compatibilidade deste equipamento com este tipo de acessório. A

sua principal função é otimizar a captação da água cinzenta proveniente da base de duche e do lavatório.

Este adaptador foi concebido para facilitar a recolha da água até à zona do sifão de pavimento (sifão de chão), que funciona como ponto de recolha comum das águas cinzentas. A bomba, equipada com o adaptador, aspira diretamente neste ponto e conduz a água para o circuito de filtragem e desinfecção UV, antes de ser armazenada no reservatório de água tratada.

Um dos principais benefícios desta configuração prende-se com o seu comportamento em situações de falha de energia ou avaria da bomba. Caso a bomba LSC1.4S-51 deixe de funcionar, a água acumulada no ralo de chão escoará naturalmente para a rede de esgotos, evitando inundações ou refluxos indesejados. Este princípio de redundância passiva aumenta a segurança e a fiabilidade do sistema, ao permitir que a drenagem ocorra por gravidade sempre que necessário.

3.3.7. Electroválvula 5282 NA

A Electroválvula 5282 NA é um componente de controlo automático que assegura o abastecimento de água da rede pública ao sistema de descarga sanitária em situações em que o reservatório de águas cinzentas esteja vazio ou caso falhe a energia. Esta válvula desempenha um papel crucial para garantir a fiabilidade e continuidade do serviço, evitando que o utilizador fique impossibilitado de utilizar a descarga sanitária em caso de falha do sistema de reaproveitamento ou de falta de água tratada.

Trata-se de uma válvula solenoide de tipo “normalmente aberta” (NA), o que significa que permanece aberta sem corrente elétrica, permitindo o fluxo de água da rede pública de forma direta para a sanita quando o sistema está inativo ou sem energia. Quando o sistema está em funcionamento normal e há energia disponível, a válvula recebe corrente elétrica e fecha-se, bloqueando o abastecimento da rede pública para que a descarga seja alimentada apenas com água cinzenta tratada.

Este funcionamento garante uma comutação automática entre a água cinzenta e a água da rede, sem necessidade de intervenção manual por parte do utilizador. Em caso de corte de energia elétrica ou falha do sistema, a válvula abre-se automaticamente, garantindo o fornecimento de água potável. Esta característica é especialmente importante para aplicações domésticas, onde a fiabilidade e a comodidade de uso são fatores essenciais.

3.3.8. Bomba TSURUMI - POMA5

A bomba submersível TSURUMI – POMA5 é o componente responsável por impulsionar a água já tratada desde o reservatório de água reutilizável até ao tanque da sanita, garantindo o correto abastecimento do sistema de descarga. Esta bomba foi selecionada por combinar baixa profundidade de operação com elevada fiabilidade e resistência, permitindo a extração quase total do volume útil de água tratada. A sua capacidade de funcionamento a partir de níveis muito reduzidos de água (cerca de 10 mm) torna-a ideal para este tipo de aplicação.

Construída com materiais resistentes à corrosão, como aço inoxidável e polímeros técnicos, esta bomba assegura durabilidade mesmo em contacto constante com água tratada. Em termos técnicos, o modelo apresenta um caudal adequado ao enchimento eficiente do tanque da sanita, com altura manométrica suficiente para superar pequenas perdas de carga no circuito entre o reservatório e o ponto de utilização.

Outro aspeto relevante é o seu baixo nível de ruído durante o funcionamento, característica que favorece a sua utilização em ambientes residenciais, contribuindo para o conforto do utilizador. A escolha deste equipamento prendeu-se com a sua capacidade de extração de fundo, essencial para maximizar a utilização da água armazenada e reduzir perdas. Além disso, a sua robustez, compacidade e fiabilidade comprovada tornam-na uma solução eficaz e duradoura para sistemas de reaproveitamento de águas cinzentas com aplicação em edifícios residenciais ou de pequena escala.

3.3.9. Reservatório de armazenamento

O reservatório de armazenamento é o componente central do sistema de reaproveitamento de águas cinzentas, concebido para acumular a água tratada proveniente do circuito de filtragem e desinfecção UV até à sua utilização na descarga sanitária. A sua função principal é garantir uma reserva suficiente de água reutilizável, assegurando o abastecimento regular mesmo em momentos de menor captação.

O reservatório proposto terá uma capacidade aproximada de 80 litros, volume selecionado para responder às necessidades diárias de uma habitação, oferecendo autonomia para múltiplos ciclos de descarga sanitária sem necessidade de reenchimento constante. Este dimensionamento permite, por exemplo, cerca de 20 descargas de 4 litros cada, valor suficiente para cobrir o uso diário típico de uma família de 4 pessoas. Desta forma, o sistema equilibra a eficiência e a economia de água com as limitações de espaço disponíveis em contextos residenciais. Em termos construtivos, o reservatório será fabricado em plástico PLA, um material leve, resistente e sustentável, conhecido pela sua durabilidade e resistência à corrosão em ambientes húmidos. O uso de PLA oferece vantagens ambientais ao ser um bioplástico derivado de fontes renováveis, alinhado com o objetivo do sistema de promover práticas mais sustentáveis.

Para garantir a estanqueidade e o conforto do utilizador, o reservatório será equipado com uma tampa especial concebida para impedir a libertação de odores e reduzir a propagação de ruído. Esta tampa assegura que o funcionamento interno do sistema, incluindo o enchimento, circulação ou ativação da bomba, ocorra de forma silenciosa e sem incomodar os ocupantes da habitação, além de evitar a saída de odores associados à água cinzenta armazenada.

Como medida de segurança adicional, o design do reservatório inclui uma saída de segurança de volume máximo, que atua como via de escoamento de emergência em caso de falha técnica do sistema de controlo de níveis. Esta abertura garante que, se o reservatório atingir um nível superior ao previsto, o excedente seja conduzido para um ponto de drenagem seguro, prevenindo transbordos indesejados e possíveis danos nas instalações.

A escolha deste tipo de reservatório teve em conta critérios de capacidade, durabilidade, sustentabilidade, facilidade de manutenção e integração em espaços residenciais existentes. Com

estas características, o reservatório assegura um armazenamento seguro, higiénico e eficiente da água cinzenta tratada, contribuindo para a adoção prática e fiável de soluções de reutilização de água em ambiente doméstico.

3.3.10. Sistema de comutação automática e níveis digitais

O sistema de comutação automática e níveis digitais é responsável por controlar o funcionamento coordenado das bombas, da electroválvula e da gestão de níveis de água nos diferentes depósitos do sistema. Esta lógica de controlo garante o abastecimento contínuo e fiável, alternando automaticamente entre água cinzenta tratada e água da rede pública conforme a disponibilidade, sem necessidade de intervenção manual por parte do utilizador.

O sistema utiliza sensores digitais de nível baseados em varetas condutivas, instalados nos diferentes tanques do circuito. Estes sensores são configurados para deteção de nível mínimo, nível máximo e nível de trabalho, permitindo uma gestão precisa dos volumes disponíveis e assegurando o correto arranque e paragem das bombas. Em algumas caixas, poderá existir um nível de trabalho adicional, por exemplo, 6 litros acima do mínimo, para refinar ainda mais a gestão do enchimento.

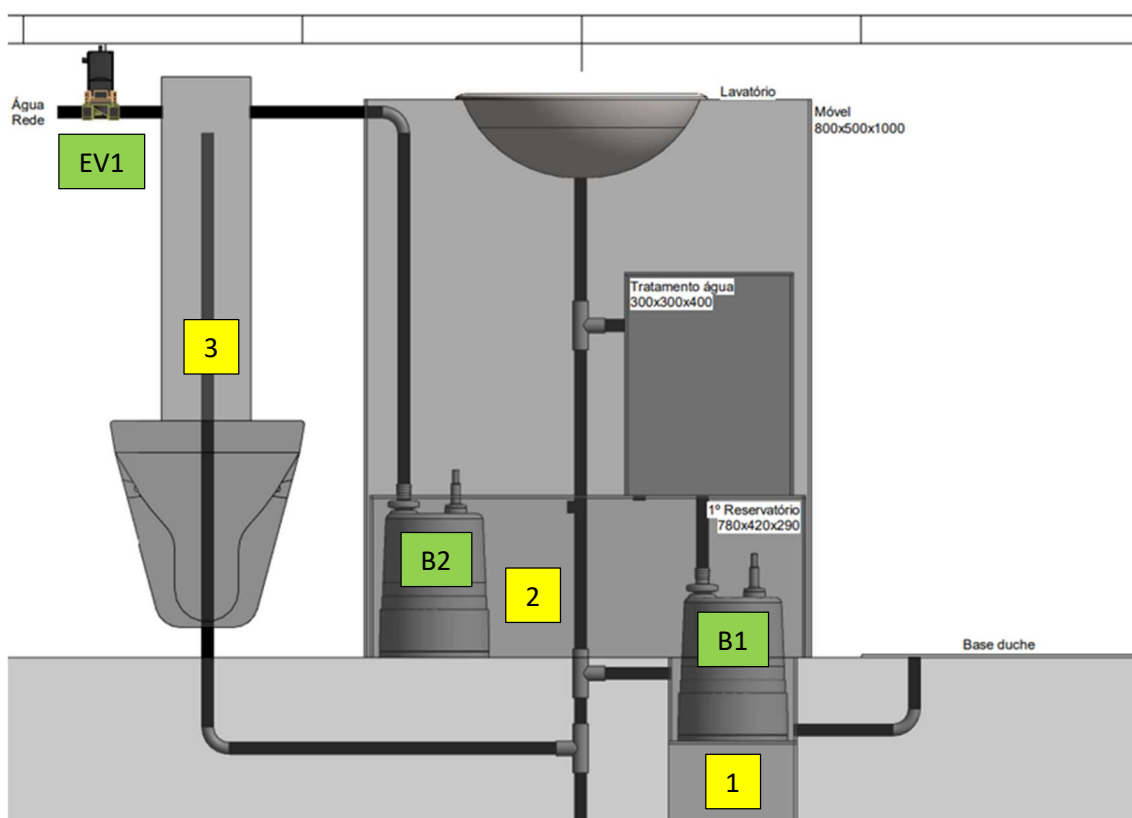


Figura 3 - Sistema de comutação

A lógica de funcionamento baseia-se em regras automáticas como:

- A bomba principal (B1) ativa-se sempre que exista pelo menos nível mínimo no depósito de origem e que o depósito de destino não atinja o nível máximo. Para quando o nível máximo é atingido ou se perder o nível mínimo na origem.

- A bomba secundária (B2) entra em funcionamento para transferência entre caixas intermédias, ativando-se quando o nível está abaixo do nível de trabalho e existindo pelo menos nível mínimo no tanque anterior. Para automaticamente ao atingir o nível de trabalho ou se faltar o nível mínimo.
- A electroválvula (EV1) abre-se automaticamente quando o tanque final atinge nível mínimo, permitindo a entrada de água da rede pública até se atingir o nível de trabalho, assegurando o abastecimento mesmo em caso de falha no sistema de águas cinzentas.

Esta arquitetura inclui ainda funções de segurança e alarme, como sinalização de falha se uma bomba trabalhar durante tempo excessivo sem conseguir transferir água (indicando possível entupimento dos filtros) ou se a electroválvula permanecer aberta por um período anormalmente longo (sugerindo problemas de estanquicidade ou fuga no autoclismo).

A programação inclui temporizadores e ciclos de espera, por exemplo:

A bomba ativa-se após um pequeno atraso (20–30 segundos) após uma descarga, para permitir estabilização do nível.

Em certos tanques, as bombas desligam-se por períodos programados após atingir o mínimo ou máximo, para prevenir arranques demasiado frequentes e proteger o equipamento.

Em conjunto, o sistema de comutação automática e níveis digitais garante um funcionamento fiável, autónomo e eficiente, alternando sem falhas entre água cinzenta tratada e água da rede pública, otimizando consumos e assegurando sempre o abastecimento adequado às descargas sanitárias, mesmo em cenários de falha técnica ou falta de energia.

3.3.11. Móvel

O móvel desenvolvido para este projeto constitui o componente central, desempenhando simultaneamente duas funções essenciais: alojar de forma discreta todo o equipamento técnico previamente descrito e atuar como um móvel funcional de casa de banho. O seu *design* foi concebido com uma abordagem estética apelativa e inovadora, fugindo ao padrão convencional, de forma a integrar-se harmoniosamente no espaço e, ao mesmo tempo, destacar-se como elemento diferenciador.

A estrutura principal será construída em Aço inox AISI304, garantindo robustez e resistência à corrosão, enquanto os painéis externos serão em madeira reforçada, incorporando um material fono absorvente (como espuma acústica de poliuretano) para reduzir a propagação de ruídos provenientes do funcionamento do sistema.

A madeira será fixada à estrutura através de encaixes específicos e ímanes, permitindo uma montagem firme, mas facilmente removível. Esta solução foi pensada para facilitar o acesso aos componentes internos para operações de manutenção. Por exemplo, para a substituição ou limpeza de filtros, bastará remover uma das placas laterais, aplicando força moderada, sem necessidade de ferramentas adicionais.

Na parte frontal, o móvel será dividido em duas secções. A inferior, protegida com material fono absorvente, albergará os principais componentes operacionais do sistema. Na parte superior,

ocupando aproximadamente os últimos 30 cm de altura, estará localizada um espaço de arrumação funcional para utilização quotidiana. Entre o reservatório de água e esta gaveta, será instalada uma placa adicional de isolamento acústico, com o objetivo de atenuar ao máximo o ruído gerado pelas bombas e pela água.

As figuras 4 e 5 infra permitem uma melhor percepção da explicação supra.



Figura 4 - Movel Explodido



Figura 5- Movel em uso

3.3.12. Torneiras

Foi garantida uma articulação estreita, de forma a assegurar a coerência entre o sistema de reaproveitamento de águas cinzentas e os equipamentos utilizados nos pontos de consumo.

Os equipamentos a instalar apresentarão os seguintes débitos:

- Torneira do lavatório: 1.9 litros por minuto
- Chuveiro de mão: 6 litros por minuto
- Chuveiro de teto: 8 litros por minuto

Estes valores representam uma redução significativa face às soluções convencionais, contribuindo para uma utilização mais eficiente dos recursos hídricos, com impactos diretos na redução do consumo de água potável e na diminuição do volume de águas residuais geradas.

No caso dos pontos de consumo, consideraram-se caudais convencionais de 3,5 L/min no lavatório, 11 L/min no chuveiro de mão e 15 L/min no chuveiro de teto. Tendo em conta a proporção de utilização de cada equipamento (25% no lavatório, 45% no chuveiro de mão e 30% no chuveiro de teto), verificou-se que o consumo médio ponderado passa de 10,14 L/min para 5,58 L/min. Aplicando a fórmula da redução percentual obtemos o seguinte resultado de 45%:

$$\text{Redução (\%)} = \left(1 - \frac{0.25 \times 1.9 + 0.45 \times 6 + 0.3 \times 8}{0.25 \times 3.5 + 0.45 \times 11 + 0.3 \times 15} \right) \times 100$$

3.3.13. Sanita

Foi desenvolvido um modelo sanitário capaz de realizar descargas eficazes com volumes de água significativamente reduzidos. Este modelo permite dois modos de descarga:

- Meia descarga: 2,5 litros
- Descarga completa: 4 litros

A possibilidade de operar com estes valores deve-se à conjugação de dois fatores: por um lado, o sifão que recolhe a água da descarga foi concebido com um diâmetro mais estreito do que o habitual, o que permite alcançar uma maior pressão e velocidade de escoamento; por outro lado, a forma como a água é direcionada após sair do tanque foi cuidadosamente otimizada, de modo a criar um fluxo mais concentrado e eficaz. Esta combinação permite realizar uma limpeza completa da sanita com apenas 2,5 litros no caso da meia descarga, mantendo a eficiência e o desempenho do sistema.

Apesar da redução do volume utilizado, o sistema garante um desempenho eficaz em ambas as opções, assegurando a eliminação adequada dos resíduos e a higienização da sanita.

Este modelo contribui diretamente para a redução do consumo de água potável e é especialmente vantajoso quando utilizado em conjunto com o sistema de reaproveitamento de águas cinzentas. A menor necessidade de volume por descarga permite uma maior autonomia do reservatório, reforçando a eficiência global do sistema.

Para o cálculo da poupança com esta sanita partiu-se de um modelo convencional de descarga dupla, que tipicamente apresenta consumos de 3 litros para a meia descarga e 6 litros para a descarga completa. Considerando um padrão médio de utilização com 2/3 de meias descargas (meter artigo) e 1/3 de descargas completas, obtém-se um consumo médio de 4,0 litros por descarga.

O modelo proposto apresenta valores de 2,5 litros na meia descarga e 4,0 litros na descarga completa, o que corresponde a um volume médio de 3,0 litros por descarga no mesmo cenário de utilização.

Aplicando a fórmula da redução percentual obtemos os 25%:

$$\text{Redução (\%)} = \left(1 - \frac{3}{4}\right) \times 100$$

3.3.14. Manutenção do sistema

A manutenção do sistema incide essencialmente na limpeza e substituição dos elementos de filtragem, bem como na purga periódica do reservatório e dos filtros, de forma a remover as impurezas acumuladas.

Os filtros mecânicos de 90 µm e 25 µm deverão ser limpos com uma periodicidade aproximada de 2 a 4 semanas, dependendo do volume de consumo de água e da carga de sólidos presente, sendo recomendada a sua substituição a cada 6 meses. O filtro de carvão ativado apresenta uma vida útil semelhante, devendo ser substituído igualmente de 6 em 6 meses, de modo a assegurar a eficácia na remoção de compostos orgânicos, odores e cor.

A lâmpada da unidade UV deverá ser substituída num intervalo de 9 a 12 meses, considerando que, apesar de se manter em funcionamento, a intensidade da radiação decresce progressivamente com o tempo, comprometendo a eficácia do processo de desinfeção.

Por fim, recomenda-se a purga do reservatório de armazenamento e do sistema de filtragem a cada 6 meses, operação que consiste apenas na abertura das válvulas de drenagem, permitindo a eliminação de resíduos sedimentados de forma simples e rápida.

3.4. Análise de fornecedores

A seleção dos fornecedores dos principais componentes do sistema constitui uma etapa decisiva no âmbito do projeto, uma vez que envolve múltiplos critérios relevantes — tais como custo, qualidade, durabilidade, confiabilidade técnica, prazos de entrega e impacto ambiental — que tornam a decisão complexa e multidimensional. Neste contexto, métodos de apoio à decisão multicritério (MCDA) revelam-se particularmente adequados, pois permitem estruturar os critérios de forma transparente e ponderada, minimizando a subjetividade. Entre as diversas metodologias disponíveis, o *Analytic Hierarchy Process (AHP)* destaca-se como uma abordagem amplamente reconhecida e aplicada em contextos de seleção de fornecedores, pela sua capacidade de decompor o problema em hierarquias (objetivo, critérios, alternativas), realizar comparações par a par e gerar pesos quantitativos que facilitam a priorização das opções (Ho et al., 2010b; Vaidya & Kumar, 2006). Por esse motivo, a metodologia AHP foi adotada neste estudo como ferramenta

estruturada e fundamentada para a escolha dos fornecedores, garantindo um processo decisório robusto e justificado.

3.4.1. Critérios de avaliação

Custo: Representa o valor monetário associado à aquisição do componente. É um critério essencial em qualquer processo de compra, sobretudo em projetos de prototipagem com orçamento limitado. No entanto, o custo deve ser analisado de forma equilibrada, evitando comprometer a qualidade ou a durabilidade do sistema. A inclusão deste critério visa assegurar a viabilidade económica do projeto, permitindo manter o investimento global dentro de limites sustentáveis.

Relação Comercial Prévia: Este critério avalia se o fornecedor já possui uma relação comercial estabelecida com a empresa. A existência de fornecedores previamente homologados ou com histórico positivo de fornecimento representa uma vantagem estratégica, reduzindo riscos associados a não conformidades, atrasos ou problemas administrativos. Além disso, fornecedores conhecidos permitem negociações mais rápidas e eficazes, assegurando melhores condições comerciais e logísticas.

Características Técnicas: Este critério avalia os parâmetros específicos de desempenho e adequação técnica dos componentes, como por exemplo o ruído gerado por uma bomba, o caudal de água debitado, a pressão de operação ou a qualidade dos materiais de construção. A inclusão deste critério assegura que a seleção dos fornecedores considera não apenas o preço ou a eficiência energética, mas também a compatibilidade e a eficácia funcional de cada componente no sistema, garantindo um desempenho adequado e uma experiência de utilização satisfatória.

Eficiência Energética: A eficiência energética mede o consumo de energia durante o funcionamento do componente, enquanto a eficiência operacional avalia o desempenho técnico global. Sistemas mais eficientes reduzem o consumo de eletricidade, contribuindo para a sustentabilidade ambiental e diminuindo os custos para o utilizador. Este critério está particularmente alinhado com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, em especial o ODS 12 (Consumo e produção responsáveis) e o ODS 6 (Água limpa e saneamento), que incentivam o uso racional dos recursos.

Vida Útil e Manutenção: Este critério avalia a durabilidade dos componentes e a frequência ou complexidade das operações de manutenção necessárias. Uma vida útil mais longa reduz custos operacionais a médio e longo prazo e minimiza o impacto ambiental associado a substituições frequentes. Simultaneamente, componentes que exigem menos manutenção aumentam a fiabilidade global do sistema e melhoram a experiência do utilizador.

3.4.2. Ponderação dos critérios de seleção

Após a definição dos critérios de avaliação, foi atribuída uma ponderação relativa a cada um deles, de modo a refletir as prioridades estratégicas do projeto e as exigências específicas do desenvolvimento do protótipo.

O critério custo foi considerado o mais relevante, com um peso de 30%, reconhecendo a necessidade de assegurar a viabilidade económica do projeto e a limitação orçamental típica de uma fase de prototipagem. Controlar o custo de aquisição dos componentes é essencial para permitir a replicação futura do sistema em escala comercial ou residencial. Esta ênfase no custo justifica-se ainda mais pelo facto de o sistema integrar tecnologias relativamente caras — como bombas, filtros multicamadas e unidades UV — sendo essencial encontrar opções economicamente viáveis para manter um preço final apelativo para o mercado.

A eficiência energética foi o segundo critério mais valorizado, com um peso de 25%, dado tratar-se de um projeto cujo objetivo principal é promover a poupança de energia e a utilização eficiente dos recursos. Garantir componentes energeticamente eficientes contribui não só para reduzir os custos de operação para o utilizador final, como também para atingir os objetivos de sustentabilidade ambiental, alinhando-se com boas práticas de consumo responsável e com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

O critério características técnicas, com um peso de 20%, destinado a contemplar aspetos específicos de desempenho e adequação dos componentes.

O critério vida útil e manutenção foi ponderado com 15%, assegurando que os componentes escolhidos apresentem durabilidade elevada e exigências mínimas de manutenção, reduzindo custos operacionais a médio e longo prazo e aumentando a fiabilidade do sistema.

Por fim, a relação comercial prévia foi incluída com um peso de 10%, valorizando fornecedores já homologados ou com histórico positivo junto da empresa, reduzindo riscos de não conformidade, atrasos ou dificuldades administrativas, e facilitando processos de negociação e aquisição.

3.4.3. Avaliação de fornecedores

Para analisar os possíveis fornecedores e comparar cada uma das opções, estabeleceram-se fatores relevantes para a tomada de decisão: custo, eficiência energética, características técnicas, vida útil e relação comercial prévia. Posteriormente ponderou-se a importância de cada um deles. Por fim atribuiu-se um valor numa escala de 0 a 10 sendo 0 a pior opção e 10 a escolha ideal. Esta análise foi conduzida para a bomba submersível de captação de águas cinzentas, para a bomba de sucção e para a válvula. Os resultados podem ser consultados nas tabelas Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 onde, para uma mais fácil interpretação visual, se destacaram os melhores resultados a verde, os intermédios a amarelo e piores a vermelho.

Relativamente à bomba submersível de captação de águas cinzentas foram comparadas três opções equivalentes em aplicação: Tsurumi LSC1.4S-51, Pedrollo TOP MULTI 2 e Grundfos Sololift2 D-2.

Em termos de custo, a Tsurumi apresentou o valor mais elevado, enquanto a Grundfos foi a mais acessível, com a Pedrollo em posição intermédia. Assim, neste critério, a Tsurumi obteve nota mais baixa, refletindo a maior dificuldade em manter o investimento dentro de limites mais reduzidos.

Para a eficiência energética, a Tsurumi destacou-se graças a um motor de menor potência (150 W) com desempenho adequado, resultando numa classificação elevada. A Pedrollo, com cerca de 550 W de potência, mesmo sendo eficiente para o caudal que oferece, ficou com nota inferior

devido ao maior consumo. A Grundfos apresentou valores de consumo moderado (280 W), ficando entre as duas.

No critério características técnicas, foi determinante o facto de a Tsurumi LSC1.4S-51 ser a única das três opções capaz de lidar eficazmente com cabelos e impurezas típicas das águas cinzentas sem obstruções significativas mesmo após uso prolongado. Este desempenho superior é crítico para garantir a fiabilidade do sistema numa instalação real. A Pedrollo e a Grundfos, embora de qualidade elevada, mostraram-se menos robustas neste aspeto.

Em relação à vida útil e manutenção, a Tsurumi obteve novamente uma nota superior devido à sua reconhecida robustez e construção em materiais duráveis que reduzem falhas e necessidade de manutenção. Pedrollo e Grundfos também apresentaram boas características de durabilidade, com notas apenas ligeiramente inferiores.

Finalmente, no critério relação comercial prévia, foi observado que a aquisição da Tsurumi ocorreu através da Klinger, um fornecedor de longa data que facilitou e agilizou significativamente o processo de compra e entrega. Em contraste, o fornecimento da Grundfos foi marcado por atrasos e menor flexibilidade na transação. A Pedrollo também apresentou um processo de compra mais demorado.

A análise ponderada dos critérios demonstra as diferenças de desempenho entre as alternativas, permitindo identificar as vantagens e limitações de cada uma. As classificações atribuídas a cada modelo em cada critério podem ser consultadas na tabela seguinte, onde se evidenciam os principais fatores que suportaram a decisão final.

Tabela 1 - Classificação Bomba de Sucção

Critério	Peso (%)	Tsurumi LSC1.4S-51	Grundfos Sololift2 D-2	Pedrollo TOP MULTI 2
Custo	30	4	8	7
Eficiência energética	25	9	7	5
Características técnicas	20	8	5	5
Vida útil e manutenção	15	8	7	7
Relação comercial prévia	10	9	5	7
Classificação final		7,15	6,7	6,1

Para a função de bombear a água tratada desde o reservatório até ao tanque da sanita, foram comparadas três alternativas de bombas submersíveis compactas com capacidade de operação em baixa profundidade e adequadas a caudais médios: Tsurumi POMA5, Pedrollo TOP-VORTEX GM e Grundfos Unilift KP 150-A1.

Tsurumi POMA5 apresenta um gasto de aproximadamente 150 W, caudal máximo de 80 l/min, altura manométrica máxima de 7 m e capacidade de funcionamento a partir de 10 mm de

profundidade. Tem a estrutura em aço inoxidável e polímeros técnicos, elevada resistência à corrosão e baixo nível de ruído.

Pedrollo TOP-VORTEX GM tem uma potência aproximada de 250 W, caudal máximo de 80 l/min, altura manométrica a rondar os 6,5 m e arranque a partir de 50 mm de profundidade. Adicionalmente a construção é em tecnopolímero reforçado.

Grundfos Unilift KP 150-A1 é a opção com o maior gasto das 3, a rondar os 300 W, caudal máximo de 100 l/min, altura manométrica de 7 m e funcionamento a partir de 35 mm de profundidade. A estrutura que apresenta é em aço inox e rotor semiaberto.

A avaliação foi conduzida com base em cinco critérios ponderados: custo, eficiência energética, características técnicas, vida útil/manutenção e relação comercial prévia.

No critério Custo, a Pedrollo apresentou o preço mais baixo, seguida da Grundfos. A Tsurumi revelou-se a opção mais dispendiosa, facto justificado pela sua maior durabilidade e especialização técnica.

Relativamente à Eficiência Energética, a Tsurumi destacou-se por apresentar o menor consumo (150 W), superando claramente as suas concorrentes.

No que respeita às Características Técnicas, a POMA5 evidenciou vantagem ao poder operar a partir de apenas 10 mm de profundidade, permitindo a extração quase total da água disponível — uma característica não atingida pelas restantes opções analisadas.

No critério de Vida Útil e Manutenção, a Tsurumi obteve a melhor classificação, resultado da sua construção com componentes de elevada resistência; a Grundfos ficou em segundo lugar neste parâmetro.

Por fim, quanto à Relação Comercial Prévia, a POMA5 foi adquirida através de um fornecedor habitual, o que garantiu maior agilidade no processo de fornecimento e um suporte técnico mais eficaz.

A análise sumária desta avaliação é visível na Tabela 2 onde Tsurumi POMA5 se destaca como a opção mais indicada

Tabela 2 - Classificação Bomba Normal

Critério	Peso (%)	Tsurumi POMA5	Pedrollo TOP-VORTEX GM	Grundfos Unilift KP 150-A1
Custo	30	7	9	8
Eficiência energética	25	10	7	6
Características técnicas	20	10	7	8
Vida útil e manutenção	15	9	7	8
Relação comercial prévia	10	9	7	7
Classificação Final		8,7	7,65	7,55

Para o controlo do fluxo da água tratada, foi realizada a análise comparativa de três válvulas solenoides do tipo “normalmente abertas”, com características técnicas e operacionais semelhantes, de forma a suportar a escolha final para o sistema. As opções analisadas foram: Burkert Type 5282 NA, ASCO 8210G35V e Everflow Series EFV-30 NO.

No critério Custo, verificou-se que a Everflow apresentou o valor mais elevado, seguida da ASCO. A Burkert, embora robusta e de elevada qualidade, mostrou-se relativamente mais acessível.

Relativamente à Eficiência Energética, a Burkert 5282 destacou-se por apresentar um consumo aproximado de 8 W em operação contínua, valor inferior ao da ASCO cerca de 12 W e da Everflow com 15 W, garantindo maior economia de funcionamento.

No que respeita às Características Técnicas, a Burkert evidenciou clara vantagem, sendo a única com sistema de isolamento completo entre o fluido e o conjunto magnético, função de *override* manual e possibilidade de ajuste do tempo de abertura e fecho. A ASCO, embora robusta e fiável, não dispõe de todos estes recursos, e a Everflow, apesar da construção integral em aço inoxidável, não integra sistema de assistência nem *override* manual.

No critério de Vida Útil e Manutenção, a Burkert e a Everflow apresentaram durabilidade superior devido à elevada qualidade dos materiais utilizados, sendo a ASCO classificada em terceiro lugar, apesar de possuir manutenção relativamente simples.

Por fim, no critério Relação Comercial Prévia, a Burkert foi adquirida através de fornecedor habitual, o que permitiu maior agilidade no fornecimento e um suporte técnico mais eficaz. A ASCO apresentou ligeiro atraso no processo de aquisição, enquanto a Everflow foi considerada um fornecedor novo, sem histórico prévio de colaboração.

Como disposto na Tabela 3 a análise ponderada destes critérios evidenciou que a Burkert Type 5282 NA apresenta o melhor desempenho global, com uma classificação final de 8,95, superando significativamente as alternativas analisadas. A sua combinação de eficiência energética, características técnicas avançadas, elevada durabilidade e boa relação comercial justificam a sua seleção para o projeto, mesmo perante alternativas mais dispendiosas.

Tabela 3 - Classificação da Válvula

Critério	Peso (%)	Burkert 5282 NA	ASCO 8210G35V	Everflow EFV-30 NO
Custo	30	8	6	5
Eficiência energética	25	9	7	6
Características técnicas	20	10	7	7
Vida útil e manutenção	15	9	7	8
Relação comercial prévia	10	9	7	6
Classificação Final		8,95	6,8	6,4

No caso da estação de tratamento de água, optou-se pelo único sistema identificado no mercado com dimensões suficientemente compactas para se ajustarem ao espaço disponível, garantindo simultaneamente a capacidade de filtragem e tratamento requerida.

Os restantes componentes do sistema, incluindo o reservatório de armazenamento também foram alvo de uma avaliação criteriosa e seguiram critérios homólogos aos supramencionados para seleção, tendo em consideração disponibilidade e integração no projeto. Estes componentes foram atribuídos a fornecedores com uma relação comercial já existente e consolidada, o que facilita todo o processo de conceção, fabrico e entrega, assegurando a conformidade com os requisitos técnicos e prazos estabelecidos.

3.5. Validação prática do sistema

Com o objetivo de garantir a fiabilidade técnica e a segurança da solução proposta, será conduzida uma fase de validação prática do módulo de reaproveitamento de águas cinzentas. Esta etapa permitirá confirmar se a água tratada cumpre os requisitos mínimos para utilização em descargas sanitárias, sem representar riscos para a saúde pública, e avaliar o desempenho operacional do sistema em condições próximas da utilização real.

A validação será realizada através de ensaios laboratoriais conduzidos por uma empresa externa acreditada, que efetuará análises físico-químicas e microbiológicas à água tratada. Paralelamente, serão testados aspetos de desempenho técnico, como o tempo de recarga do autoclismo, a vazão das bombas e a resposta do sistema perante diferentes cargas de impurezas.

Esta fase encontra-se calendarizada para ter início em outubro de 2025, constituindo uma etapa fundamental antes da conclusão do projeto.

3.5.1. Procedimentos dos ensaios físico-químicos

As análises laboratoriais incidirão sobre os principais parâmetros físico-químicos e microbiológicos da água tratada. Entre os indicadores físico-químicos a avaliar destacam-se a turbidez, pH, sólidos suspensos totais e presença de detergentes e sabões. Do ponto de vista microbiológico, serão analisados microrganismos indicadores de contaminação fecal, garantindo que a água tratada é segura para utilização em descargas não potáveis.

Estes ensaios permitirão verificar a eficácia dos diferentes estágios de tratamento (filtração, carvão ativado e desinfecção por luz ultravioleta) e confirmar se a água final cumpre critérios que evitem riscos de saúde pública.

3.5.2. Testes de funcionamento e desempenho hidráulico

Para além das análises laboratoriais, o sistema será submetido a ciclos repetidos de descarga, em condições que simulam a utilização real. A água de entrada será preparada com a adição de sabões, detergentes e partículas sólidas (como areia e terra), de forma a reproduzir a composição típica das águas cinzentas provenientes de lavatórios e duchas.

Durante os ensaios, será monitorizado o tempo de recarga do autoclismo, definido como inferior a 3 segundos por ciclo, de forma a garantir rapidez e conforto de utilização. As bombas instaladas estão dimensionadas para assegurar vazão suficiente, mesmo em cenários de uso simultâneo de lavatório e duche.

A remoção de impurezas será quantificada ao longo dos testes, permitindo avaliar a eficácia global do sistema e identificar eventuais necessidades de otimização. Adicionalmente, serão registados dados sobre a fiabilidade do funcionamento contínuo e o comportamento dos filtros, de modo a compreender as exigências de manutenção.

4. PLANO DE MARKETING

Para a introdução deste projeto no mercado é fundamental dispor de um plano de marketing estratégico, sólido e apelativo, capaz de garantir a sua aceitação e sustentabilidade. Neste capítulo será apresentado o enquadramento geral do projeto, seguido da análise das Cinco Forças de Porter, que permitirá compreender a competitividade e atratividade do setor.

Posteriormente, será identificado o mercado-alvo e estabelecida a relação do projeto com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, enquadrando-o numa perspetiva de responsabilidade social e sustentabilidade.

De seguida, será realizada uma análise SWOT, de forma a identificar os pontos fortes, fracos, oportunidades e ameaças do projeto. Por fim, será definida a estratégia de marketing e descrito o plano de implementação, com ações concretas orientadas para alcançar os resultados pretendidos.

4.1. Enquadramento Geral

O presente trabalho incide sobre o desenvolvimento e análise de um sistema de reaproveitamento de águas cinzentas, proveniente de lavatórios e bases de duche, para utilização nas descargas das sanitas. O projeto enquadra-se na necessidade de promover soluções sustentáveis e será, numa fase inicial, implementado no setor da hotelaria, um dos segmentos com maior consumo de água por hóspede e, simultaneamente, sob maior pressão para reduzir a sua pegada ambiental.

O público-alvo inicial são os hotéis, em particular aqueles que procuram certificações ambientais e que veem na sustentabilidade não apenas uma obrigação regulatória, mas também uma oportunidade de diferenciação no mercado.

A proposta apresentada aborda não só a componente técnica da solução, incluindo sistemas de filtragem, reservatórios de armazenamento, unidades UV e controlo automático de níveis, como também as barreiras culturais e psicológicas associadas à aceitação social da tecnologia.

Um dos principais desafios consiste em ultrapassar a perceção negativa que alguns utilizadores associam à reutilização de águas cinzentas. Para tal, o trabalho propõe estratégias de adoção social que incluem campanhas educativas, comunicação transparente com hóspedes, design amigável dos sistemas de monitorização e incentivos económicos direcionados aos hotéis.

A análise SWOT, sustenta este plano estratégico, cujo objetivo é promover a viabilidade técnica, económica e social da solução. Em última instância, o projeto pretende não só contribuir para a redução do consumo de água potável, mas também posicionar os hotéis aderentes como agentes de inovação sustentável, alinhados com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas.

4.2. Ambiente de Mercado e Sustentabilidade

4.2.1. Forças competitivas

O sistema de reaproveitamento de águas cinzentas enfrenta concorrência indireta de outras soluções de eficiência hídrica já amplamente implementadas no setor da hotelaria, como os redutores de caudal, os sensores automáticos de torneiras e a utilização de águas pluviais. Contudo, existem ainda poucas soluções integradas especificamente vocacionadas para a reutilização de águas cinzentas em hotéis, o que torna este um mercado emergente, mas fragmentado. A entrada futura de grandes empresas internacionais neste setor representa uma possibilidade concreta, podendo aumentar significativamente a pressão competitiva.

4.2.2. Forças económicas

Observa-se um aumento contínuo do custo da água e da energia, o que gera uma pressão acrescida sobre os hotéis para reduzirem as suas despesas operacionais. Este cenário económico cria uma oportunidade clara para soluções que permitam poupanças mensuráveis, como a reutilização de águas cinzentas. Paralelamente, existem incentivos fiscais e linhas de financiamento, nomeadamente através de fundos europeus, que podem tornar os investimentos em tecnologias verdes mais atrativos e acessíveis.

4.2.3. Forças políticas

Destacam-se as diretrizes europeias e nacionais que incentivam a eficiência hídrica e energética, bem como as estratégias governamentais que promovem a sustentabilidade no turismo. A Agenda 2030 para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) constitui um enquadramento internacional que favorece a implementação de tecnologias como esta, ao alinhar inovação tecnológica com compromissos ambientais e sociais.

4.2.4. Forças legais e regulatórias

Desempenham um papel relevante, uma vez que existem normas de qualidade e segurança que regulam a utilização de águas reutilizadas, com especial ênfase nos parâmetros de saúde pública. Além disso, muitos hotéis procuram obter certificações ambientais que valorizam práticas de eficiência hídrica. A possibilidade de maior regulação futura sobre o aproveitamento de águas cinzentas pode representar simultaneamente uma oportunidade de normalização e uma barreira acrescida para empresas que não se adaptem a tempo.

4.2.5. Forças socioculturais

Revelam um consumidor cada vez mais consciente das práticas ambientais dos hotéis que frequenta, valorizando de forma crescente marcas que assumem compromissos sustentáveis. Ainda assim, subsistem barreiras psicológicas e culturais relacionadas com a perceção de que a água reutilizada possa ser “suja” ou insegura, o que pode condicionar a aceitação da tecnologia. Apesar

deste desafio, a tendência global para a valorização de iniciativas de sustentabilidade posiciona a reutilização de águas cinzentas como uma resposta pertinente às expectativas sociais e às exigências ambientais.

Estas forças podem ser visualmente representadas na Figura 6 - 5 Forças de Porter

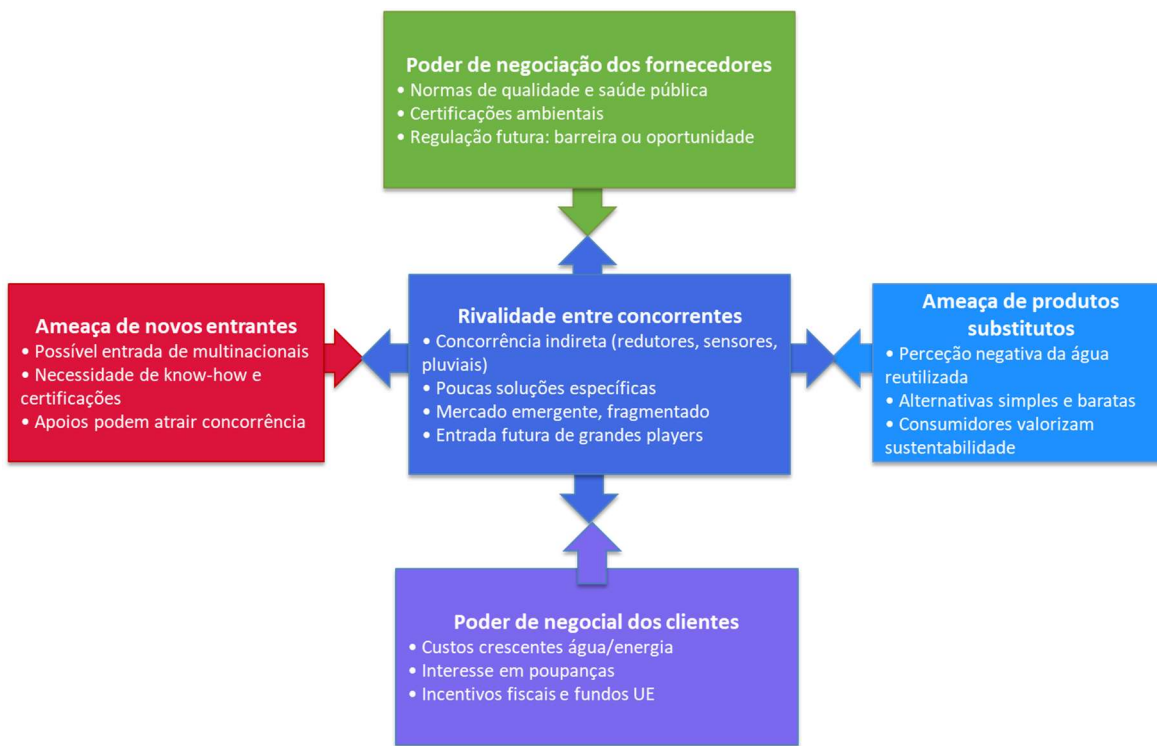


Figura 6 - 5 Forças de Porter

4.3. Mercado-Alvo

Ao focar-se no compromisso com a sustentabilidade e a eficiência no uso de recursos, o projeto propõe-se a atuar de forma diferenciada num mercado em transformação. A possibilidade de reduzir significativamente o consumo de água potável, mantendo elevados padrões de qualidade e segurança, constitui a base da sua proposta de valor, permitindo aos hotéis posicionarem-se de forma inovadora e ambientalmente responsável perante clientes e investidores.

O mercado-alvo inicial consiste em hotéis e empreendimentos turísticos de média e grande dimensão, em particular aqueles que procuram alinhar-se com certificações ambientais, e que comunicam ativamente as suas práticas sustentáveis como fator de diferenciação competitiva. Estes estabelecimentos, ao enfrentarem custos operacionais elevados e uma crescente pressão para reduzir a sua pegada ambiental, encontram na reutilização de águas cinzentas uma solução prática e com benefícios económicos mensuráveis.

Este projeto surge como resposta à necessidade de o setor hoteleiro adotar soluções que conciliem inovação tecnológica, retorno financeiro e impacto ambiental positivo. À semelhança do que ocorreu noutros setores, onde tecnologias inicialmente vistas como complementares se tornaram centrais, prevê-se que o reaproveitamento de águas cinzentas evolua de uma solução de nicho para uma prática cada vez mais comum no setor da hotelaria (*Greenview's 2024 Green Lodging Trends*

Report: A Deep Dive into Sustainable Practices in the Hospitality Industry, sem data). Numa fase posterior, esta tecnologia poderá ser escalada para outros contextos, como edifícios residenciais multifamiliares e unidades industriais, mas o foco inicial será o setor hoteleiro, dada a sua maior propensão e necessidade de adotar práticas sustentáveis.

4.4. Enquadramento dos Objetivos e Resultados Esperados

A proposta de reutilização de águas cinzentas será implementada de forma piloto em hotéis selecionados, com acompanhamento técnico e monitorização contínua dos resultados. O processo inclui a instalação de um sistema padronizado de filtragem, armazenamento e desinfecção, concebido para ser facilmente integrado nas infraestruturas existentes. O elemento diferenciador desta solução não se limita à tecnologia, mas sobretudo à sua aplicação prática no setor hoteleiro, garantindo simplicidade de operação, fiabilidade e comunicação clara dos resultados alcançados junto dos gestores e dos hóspedes.

Espera-se que a primeira fase de implementação exija um maior esforço em termos de adaptação técnica, sensibilização cultural e acompanhamento dos gestores hoteleiros. Tal como acontece com a adoção de qualquer tecnologia inovadora, o primeiro ano de utilização será mais exigente em termos de acompanhamento, manutenção e suporte, mas os anos subsequentes tenderão a ser mais eficientes e economicamente vantajosos para os hotéis.

O setor hoteleiro apresenta desafios específicos, como a sazonalidade do turismo, que influencia a taxa de ocupação e, por consequência, os volumes de consumo de água. Esta característica exige uma análise cuidada para equilibrar o retorno económico do sistema ao longo do ano. Adicionalmente, a necessidade de investimento inicial poderá representar uma barreira, sendo fundamental recorrer a incentivos económicos ou modelos de financiamento flexíveis que facilitem a adesão.

Os objetivos atuais passam por posicionar a solução como uma referência em sustentabilidade no setor hoteleiro, garantindo, numa primeira fase, reduções de pelo menos 97,8 % do consumo de água potável associada às descargas sanitárias nos hotéis aderentes. Paralelamente, pretende-se alcançar uma base inicial de adoção que permita criar casos de estudo sólidos, a serem utilizados em campanhas de divulgação e em futuras escalas do projeto.

4.5. Analise SWOT

4.5.1. Forças

- Solução padronizada, modular e de fácil integração em infraestruturas hoteleiras existentes.
- Elevado potencial de redução do consumo de água potável (até 97,8 % nas descargas sanitárias).
- Contribuição direta para certificações ambientais, reforçando a imagem sustentável dos hotéis.
- Alinhamento com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e políticas ambientais nacionais e europeias.

- Facilidade em demonstrar os benefícios da solução através da redução visível nas faturas de água, o que permite aos gestores hoteleiros avaliar de forma clara o retorno do investimento e comunicar os resultados a hóspedes e stakeholders.

4.5.2. Fraquezas

- Necessidade de investimento inicial significativo, que pode constituir barreira de entrada.
- Dependência de financiamento externo ou incentivos públicos para acelerar a adoção.
- Possível resistência inicial de gestores hoteleiros devido à percepção de complexidade técnica.
- Falta de historial prático em larga escala, dado tratar-se de um projeto inovador em fase inicial.

4.5.3. Oportunidades

- Crescente valorização da sustentabilidade no setor turístico, com hóspedes cada vez mais atentos às práticas ambientais.
- Disponibilidade de fundos europeus e nacionais para financiar projetos de eficiência hídrica e energética.
- Expansão futura da tecnologia para outros setores (edifícios residenciais multifamiliares, unidades industriais, hospitais).
- Possibilidade de parcerias com cadeias hoteleiras internacionais, potenciando escala e visibilidade.
- Tendência global para regulamentações ambientais mais exigentes, o que pode favorecer a adoção antecipada da tecnologia.

4.5.4. Ameaças

- Concorrência de soluções alternativas de poupança de água (redutores de caudal, sensores, águas pluviais), mais baratas e já difundidas.
- Barreiras culturais e psicológicas associadas à percepção de insegurança da água reutilizada.
- Entrada de grandes players internacionais no setor, com maior capacidade de investimento em marketing e distribuição.
- Eventuais alterações legislativas que imponham requisitos adicionais, aumentando custos de implementação.
- Risco de obsolescência tecnológica caso surjam soluções mais baratas ou disruptivas.
- Sazonalidade do setor hoteleiro, que pode afetar o cálculo do retorno económico em alguns períodos.

Esta análise pode está também mais visualmente representada na Figura 7



Figura 7 - Análise SWOT

4.6. Estratégia de Marketing

4.6.1. Mercado-Alvo

O mercado-alvo inicial são hotéis e empreendimentos turísticos de média e grande dimensão, com especial foco nos que procuram certificações ambientais ou que comunicam ativamente práticas de sustentabilidade como elemento diferenciador. Estes estabelecimentos enfrentam custos operacionais elevados e estão sob crescente pressão social e regulatória para reduzir a sua pegada ambiental, o que os torna mais recetivos a soluções inovadoras de eficiência hídrica.

Numa fase posterior, a tecnologia poderá ser expandida a outros segmentos com elevado consumo de água, como hospitais, spas, ginásios, residências multifamiliares e indústrias.

4.6.2. Marketing Mix

Produto: O sistema proposto consiste numa solução padronizada e modular de reaproveitamento de águas cinzentas provenientes de lavatórios e duchas, tratadas através de filtragem e desinfecção, para utilização nas descargas sanitárias. O valor acrescentado da solução não reside apenas na tecnologia, mas na sua contribuição para sustentabilidade, redução de custos operacionais e reforço da imagem ambiental dos hotéis.

Distribuição: A implementação será feita através de parcerias com instaladores da própria empresa certificados e fornecedores de equipamentos especializados. A solução é compacta e modular, podendo ser integrada em diferentes tipologias de hotéis com relativa facilidade. A distribuição pode ser acompanhada por empresas de manutenção que garantam suporte técnico e prolonguem a vida útil do sistema.

Promoção: A estratégia promocional assenta em quatro pilares:

- Educação e sensibilização: workshops e materiais de divulgação dirigidos a gestores hoteleiros e equipas técnicas.
- Marketing verde: comunicação transparente dos benefícios ambientais e económicos, destacando a poupança de água e a contribuição para certificações ambientais.
- Prova social: utilização de estudos de caso e testemunhos de hotéis piloto como ferramenta de credibilização.
- Reconhecimento do hóspede: sinalização em áreas comuns e comunicação digital que destaque o compromisso do hotel com a sustentabilidade, valorizando a experiência do cliente final.



Figura 8 - Marketing Mix

4.7. Implementação

O projeto de reaproveitamento de águas cinzentas encontra-se em fase de desenvolvimento, com conclusão prevista para o final de 2025. Após esta etapa, prevê-se a realização de projetos piloto

em hotéis selecionados, com o objetivo de validar a tecnologia em contexto real, recolher dados de desempenho e criar casos de estudo que possam sustentar a sua futura introdução no mercado.

Com o aumento progressivo da procura, será possível alcançar economias de escala que reduzirão os custos junto dos fornecedores, tornando a solução mais competitiva e acessível para diferentes tipologias de hotéis. Em paralelo, serão obtidas certificações verdes que reforçarão a legitimidade da solução e aumentarão o seu valor no mercado.

Numa fase seguinte, serão implementadas ações de comunicação pré mercado, recorrendo a redes sociais e a campanhas de sensibilização específicas para o setor da hotelaria, de forma a preparar os potenciais clientes e aumentar a notoriedade da tecnologia. Esta comunicação será complementada com contacto direto a hotéis-alvo, privilegiando unidades que já possuam políticas de sustentabilidade ou que ambicionem certificações ambientais.

Após a fase inicial de introdução no setor hoteleiro, está prevista uma expansão gradual para outros segmentos de mercado intensivos em consumo de água, como hospitais, ginásios e edifícios residenciais multifamiliares.

5. POUPANÇA DE ÁGUA (RESULTADOS)

5.1. Poupança total habitacional

5.1.1. Consumos e poupança com torneiras e descargas eficientes

A adoção de um sistema de reaproveitamento de águas cinzentas para descargas sanitárias, aliado a práticas de eficiência em duchas e lavatórios, permite uma redução significativa no consumo diário de água numa habitação. Para estimar o potencial de poupança deste projeto, foram realizadas contas baseadas em dados médios de consumo doméstico e percentagens de uso por atividade.

Em Portugal, o consumo médio diário por pessoa ronda os 128 litros, distribuídos por várias atividades domésticas (Costa et al., 2024). Neste modelo simplificado, consideraram-se as seguintes percentagens médias (*Comparing Diurnal Patterns of Domestic Water Consumption: An International Study*, sem data):

- 25 % do consumo diário é usado em descargas sanitárias.
- 35 % é consumido em duchas e lavatórios.

Assim, por pessoa, os consumos atuais são estimados em:

- Descargas sanitárias: $128 \text{ L/dia} \times 25 \% = 32 \text{ L/dia}$
- Duchas + lavatório: $128 \text{ L/dia} \times 35 \% = 44,8 \text{ L/dia}$

Para uma família de 4 pessoas, estes valores sobem para:

- Descargas sanitárias: $32 \text{ L/dia} \times 4 = 128 \text{ L/dia}$
- Duchas + lavatório: $44,8 \text{ L/dia} \times 4 = 179,2 \text{ L/dia}$

De acordo com a proposta desenvolvida nos capítulos 3.3.12 e 3.3.13, ao aplicar apenas a primeira parte da solução (sanitas e torneiras eficientes) os consumos passariam para:

- 25 % menos em descargas sanitárias $\rightarrow 128 \times 0,75 = 96 \text{ L/dia}$
- 45 % menos em duchas e lavatórios $\rightarrow 179,2 \times 0,55 = 98,56 \text{ L/dia}$

O consumo combinado destas duas atividades passaria, então, de 307,2 L/dia (128 + 179,2) para 194,56 L/dia (96 + 98,56).

A poupança diária total nestas componentes seria de cerca de 112,64 L/dia:

- $307,2 - 194,56 = 112,64 \text{ L/dia}$

Esta redução corresponde a aproximadamente 36,7 % do consumo associado apenas às descargas sanitárias, duchas e lavatórios:

- $(112,64 / 307,2) \times 100 \approx 36,7 \%$

Tabela 4 - Poupança com torneiras e descargas eficientes

	Consumo antigo (L/dia)	Consumo novo (L/dia)	Poupança (L/dia)	Redução (%)
Descargas sanitárias	128	96	32	25 %
Duches e lavatórios	179,2	98,56	80,64	45 %
Total (componentes alvo)	307,2	194,56	112,64	36,7 %

5.1.2. Poupança com sistema de descargas

Após considerar a instalação de sanitas e torneiras eficientes, estima-se já uma redução significativa do consumo diário. Para uma família de quatro pessoas, o consumo de água potável em descargas sanitárias baixa dos 128 L/dia iniciais para cerca de 96 L/dia, graças à redução média de 25 % associada à substituição das sanitas tradicionais por modelos de baixo consumo.

Em paralelo, os duches e lavatórios passam a consumir cerca de 98,56 L/dia, refletindo uma redução de 45 % face aos valores típicos, fruto da adoção de chuveiros e torneiras mais eficientes e de melhores práticas de utilização. Esta quantidade de água cinzenta gerada pode ser tratada e reaproveitada no sistema proposto.

O reservatório de 80 litros integrado no sistema permite armazenar e tratar diariamente até 80 litros de água cinzenta para reutilização nas descargas sanitárias. Apesar de o consumo diário de descargas ainda ser de 96 L/dia, o sistema consegue substituir 80 litros desse total por água cinzenta tratada, restando apenas 16 litros por dia a ser fornecidos pela rede pública.

Em termos práticos, isto traduz-se numa poupança efetiva de 80 litros por dia exclusivamente na componente de descargas sanitárias — o que corresponde a uma redução de aproximadamente 83 % face ao consumo de água potável nesta utilização, mesmo já contando com as melhorias associadas à substituição das sanitas tradicionais por modelos eficientes.

A tabela seguinte resume os valores:

Tabela 5 - Poupança com sistema de descargas

Componente	Consumo total (L/dia)	Consumo água da rede (L/dia)	Água cinzenta tratada (L/dia)	Redução (%)
Descargas sanitárias	96	16	80	83,3 %

5.1.3. Poupança total

A análise global do potencial de poupança de água na casa de banho combina os resultados obtidos nos subcapítulos anteriores, integrando tanto a redução no consumo para descargas sanitárias como a melhoria na eficiência de duches e lavatórios.

Num cenário inicial sem qualquer intervenção, o consumo diário médio de uma família de quatro pessoas na casa de banho é estimado em 307,2 litros por dia, resultantes da soma de 128 litros para descargas sanitárias e 179,2 litros para duches e lavatórios.

A introdução de sanitas eficientes reduz o consumo específico das descargas em 25 %, enquanto torneiras e chuveiros mais eficientes permitem uma redução média de 45 % nos consumos de duches e lavatórios. Além disso, o sistema de reaproveitamento de águas cinzentas com reservatório de 80 litros possibilita substituir parte significativa da água potável usada nas descargas, aproveitando até 80 litros diários de água tratada provenientes dos duches e lavatórios.

Com a combinação destas estratégias, o consumo diário destinado a descargas sanitárias é reduzido de 128 para apenas 16 litros por dia, enquanto o consumo de duches e lavatórios baixa de 179,2 para 98,56 litros por dia. No conjunto, o consumo total da casa de banho passa assim de 307,2 litros para 114,56 litros por dia.

Esta redução representa uma poupança efetiva de cerca de 193 litros diários, equivalente a uma redução percentual aproximada de 62,7 % no consumo de água potável destinado exclusivamente às utilizações da casa de banho.

A tabela seguinte resume os valores mencionados:

Tabela 6 - Poupança Total

Componente	Consumo antigo (L/dia)	Consumo novo (L/dia)	Poupança (L/dia)	Redução (%)
Descargas sanitárias	128	16	112	87,5 %
Duches e lavatórios	179,2	98,56	80,64	45 %
Total casa de banho	307,2	114,56	192,64	62,7 %

5.2. Poupança total hotelaria

5.2.1. Consumo de água Hoteleira

O setor hoteleiro é reconhecido como um dos maiores consumidores de água dentro do turismo, devido à elevada intensidade de uso em múltiplas atividades, como duches, lavatórios, sanitas, piscinas, lavandarias, cozinhas e áreas de manutenção.

Em Portugal, e segundo a Associação da Hotelaria de Portugal (*Consumo médio de água por hóspede/noite num hotel é de 345 litros — DNOTICIAS.PT*, sem data), o consumo médio de água situa-se em torno de 345 litros por quarto em cada noite, valor que se encontra alinhado com a média internacional do setor. No entanto, este indicador apresenta grande variabilidade consoante

a tipologia de unidade hoteleira, a categoria, os serviços prestados (por exemplo, presença de SPA ou piscina), bem como a localização.

Comparativamente, análises internacionais revelam igualmente amplitudes significativas: em destinos europeus como França, os consumos rondam os 169 litros por quarto em cada noite, enquanto em países como as Filipinas podem atingir cerca de 981 litros por quarto em cada noite. Já nas ilhas atlânticas, estudos reportam valores de 560 litros por quarto em cada noite na Madeira e 290 litros por quarto em cada noite em Tenerife, ambos bastante acima da meta definida pela Comissão Europeia para a sustentabilidade hoteleira (Do et al., sem data).

De forma geral, os principais usos da água em hotéis podem ser distribuídos da seguinte forma (*Consumo médio de água por hóspede/noite num hotel é de 345 litros — DNOTICIAS.PT*, sem data):

- Descargas sanitárias: 25–30%
- Duches e lavatórios: 35–40%
- Lavandaria e limpeza: 15–20%
- Cozinha e restauração: 10–15%
- Outros (piscinas, jardins, manutenção): até 10%

Esta repartição confirma que as áreas de maior potencial de poupança encontram-se associadas à casa de banho (descargas sanitárias, duches e lavatórios), que podem representar entre 60% e 70% do consumo total de um hotel.

5.2.2. Poupança com torneiras e descargas eficientes

A adoção de equipamentos mais eficientes em unidades hoteleiras representa uma estratégia fundamental para a redução do consumo de água, sobretudo nas áreas de maior impacto: descargas sanitárias, duches e lavatórios.

Num cenário inicial sem qualquer intervenção, o consumo médio por quarto em cada noite é estimado em 345 litros, dos quais cerca de 103,5 litros correspondem a descargas sanitárias e 138 litros a duches e lavatórios, perfazendo um total de 241,5 litros por quarto em cada noite apenas nestas utilizações.

A substituição de sanitas convencionais por modelos de baixo consumo permite uma redução média de 25 % neste tipo de utilização, passando de 103,5 litros para 77,6 litros por quarto em cada noite. Paralelamente, a implementação de chuveiros e torneiras mais eficientes conduz a uma redução de 45 % no consumo de duches e lavatórios, que diminuem de 138 litros para 75,9 litros por quarto em cada noite.

O consumo combinado destas duas atividades, que inicialmente era de 241,5 litros por quarto em cada noite, desce assim para 153,5 litros por quarto em cada noite após a adoção das medidas de eficiência. Esta alteração traduz-se numa poupança efetiva de 88 litros por quarto em cada noite, equivalente a uma redução de aproximadamente 36,4 % no consumo de água potável associado às principais utilizações da casa de banho.

Tabela 7 - Poupança com torneiras e descargas eficientes em hotéis

Componente	Consumo antigo (L/noite)	Consumo novo (L/noite)	Poupança (L/noite)	Redução (%)
Descargas sanitárias	103,5	77,6	25,9	25%
Duches e lavatórios	138,0	75,9	62,1	45%
Total (componentes alvo)	241,5	153,5	88,0	36,4%

5.2.3. Poupança com sistema de descargas

Para além da utilização de sanitas e torneiras eficientes, a adoção de um sistema de reaproveitamento de águas cinzentas em unidades hoteleiras permite obter reduções adicionais e significativas no consumo de água potável.

Após a substituição dos equipamentos, o consumo médio de água em descargas sanitárias reduz-se de 103,5 litros por quarto em cada noite para cerca de 77,6 litros por quarto em cada noite. Em paralelo, os duches e lavatórios passam a consumir 75,9 litros por quarto em cada noite, refletindo a poupança de 45 % já considerada nesta componente. Esta quantidade de água cinzenta gerada representa uma oportunidade de reaproveitamento direto no sistema proposto.

Assim, o volume de 75,9 litros de águas cinzentas provenientes de duches e lavatórios pode ser tratado e reutilizado para suprir praticamente a totalidade da necessidade de água destinada às descargas sanitárias. Deste modo, apenas cerca de 1,7 litros por quarto em cada noite continuam a ser fornecidos pela rede pública para esta finalidade, sendo os restantes 75,9 litros substituídos por água reaproveitada.

Tabela 8 - Poupança com sistema de descargas em hotéis

Componente	Consumo total (L/noite)	Consumo água da rede (L/noite)	Água cinzenta tratada (L/noite)	Redução (%)
Descargas sanitárias	77,6	1,7	75,9	97,8%

5.2.4. Poupança total

A análise global do potencial de poupança de água em hotéis resulta da integração das medidas de eficiência em equipamentos e do sistema de reaproveitamento de águas cinzentas.

Num cenário inicial sem qualquer intervenção, o consumo médio por quarto em cada noite é de 345 litros, dos quais cerca de 103,5 litros correspondem a descargas sanitárias, 138 litros a duches e lavatórios, e os restantes 103,5 litros a outros usos, como lavandaria, cozinha e limpeza.

Com a introdução de sanitas de baixo consumo e de torneiras e chuveiros eficientes, o consumo destinado a descargas sanitárias baixa para 77,6 litros por quarto em cada noite, enquanto os duches e lavatórios passam a consumir 75,9 litros por quarto em cada noite. Ao mesmo tempo, a implementação de um sistema de reaproveitamento de águas cinzentas permite substituir praticamente toda a água potável utilizada nas descargas, aproveitando 75,9 litros provenientes dos duches e lavatórios. Assim, o consumo efetivo de água potável para esta finalidade reduz-se para apenas 1,7 litros por quarto em cada noite.

No cenário combinado, o consumo diário médio de água potável por quarto em cada noite em contexto hoteleiro passa de 345 litros para cerca de 181,1 litros, mantendo-se inalterados os consumos associados a outros usos (103,5 litros).

Esta redução traduz-se numa poupança efetiva de 163,9 litros por quarto em cada noite, equivalente a uma redução percentual de 47,5 % no consumo global de água potável do hotel.

A tabela seguinte resume os valores:

Tabela 9 - Poupança total em hotéis

Componente	Consumo antigo (L/noite)	Consumo novo (L/noite)	Poupança (L/noite)	Redução (%)
Descargas sanitárias	103,5	1,7	101,8	98,4%
Duches e lavatórios	138,0	75,9	62,1	45%
Outros usos	103,5	103,5	–	–
Total hotel	345,0	181,1	163,9	47,5%

5.3. Impactos ambientais indiretos do sistema

Embora o módulo de reaproveitamento de águas cinzentas apresente benefícios claros na redução do consumo de água potável, é fundamental considerar os impactos ambientais indiretos associados ao seu funcionamento. Entre estes incluem-se a fabricação dos componentes, o consumo de energia elétrica das bombas e da unidade de desinfecção por luz ultravioleta (UV), bem como o fim de vida útil dos elementos filtrantes e da lâmpada UV.

No que respeita aos filtros mecânicos de 90 µm e 25 µm, estes são concebidos em materiais plásticos técnicos e apresentam carácter reutilizável, bastando proceder à sua lavagem periódica. Apesar de não serem biodegradáveis, a sua durabilidade reduz a necessidade de substituições frequentes, mitigando o impacto ambiental. O filtro de carvão ativado, por sua vez, não é reutilizável, mas pode ser sujeito a regeneração industrial ou encaminhado para reciclagem energética, o que contribui para a minimização de resíduos. Já a lâmpada UV, com uma vida útil típica de 8.000 a 10.000 horas, deve ser descartada como resíduo eletrónico, sendo recomendada a criação de parcerias com entidades de recolha e reciclagem para garantir uma gestão ambientalmente adequada.

Relativamente ao consumo energético, ainda não foram realizados testes quantitativos para medir a energia associada ao funcionamento da bomba e da unidade de luz ultravioleta (UV). No entanto, está previsto que essa análise seja efetuada numa fase posterior de ensaios experimentais, de forma a validar o desempenho energético do sistema em condições reais de utilização. Com base em estimativas preliminares, espera-se que o consumo represente apenas alguns kWh por mês, valor considerado marginal quando comparado com o consumo elétrico médio de uma habitação ou unidade hoteleira. A confirmar-se, este impacto será claramente compensado pela poupança de milhares de litros de água potável que o sistema proporcionará anualmente.

A sustentabilidade do sistema será reforçada numa fase posterior através da seleção de fornecedores que privilegiem materiais recicláveis e pela definição de estratégias que prolonguem a vida útil dos componentes. Paralelamente, está previsto o desenvolvimento de soluções para recolha e regeneração de consumíveis, de modo a reduzir o impacto ambiental associado ao seu descarte. Adicionalmente, será conduzida uma análise de ciclo de vida (*Life Cycle Assessment – LCA*) com o objetivo de quantificar o balanço líquido entre os impactos indiretos e os benefícios ambientais do sistema, assegurando que o contributo global da solução permanece claramente positivo.

5.4. Linhas orientadoras e variantes de *design*

A replicação do módulo de reaproveitamento de águas cinzentas em diferentes contextos de utilização requer a definição de orientações de instalação que assegurem a sua adaptação tanto a edifícios já existentes como a novas construções. Estas diretrizes permitem antecipar limitações e explorar variantes de *design* que maximizam a eficiência do sistema e a sua aceitação por parte dos utilizadores.

No caso dos apartamentos já existentes, a solução proposta mantém-se no formato atual, caracterizado por um *design* compacto, facilmente integrável em espaços reduzidos e com ocupação mínima de área útil. A instalação privilegia a simplicidade de ligação a lavatórios e bases de duche, reduzindo a necessidade de obras intrusivas.

Para novos apartamentos, a instalação pode beneficiar de um planeamento antecipado ainda em fase de projeto. Nestes casos, é viável a implementação de variantes de *design* que permitam a utilização de um único módulo centralizado para duas casas de banho, recorrendo a um reservatório de maior capacidade. Esta abordagem promove economia de escala, reduz custos de manutenção e aumenta a autonomia do sistema.

Nas moradias unifamiliares, dado tratar-se de um uso singular e com maior disponibilidade de espaço, abre-se a possibilidade de incorporar outras fontes de águas cinzentas, como as provenientes da cozinha ou de máquinas de lavar. No entanto, este cenário implica o desenvolvimento de soluções específicas de filtração mais avançadas, capazes de remover detergentes e compostos orgânicos em maior concentração, garantindo assim a qualidade e segurança da água reutilizada.

Por último, no setor da hotelaria, a solução inicialmente proposta pode ser implementada em casas de banho individuais, à semelhança do modelo doméstico. No entanto, a médio prazo, revela-se vantajosa a adoção de sistemas centralizados, onde a água proveniente de múltiplas unidades é

conduzida para uma estação de tratamento comum e, posteriormente, redistribuída para as descargas. Apesar de já existirem sistemas deste género, a inovação reside na redução da escala e na compatibilidade com diferentes tipologias de instalações, tornando o processo mais acessível e adaptável às realidades específicas de cada unidade hoteleira.

Assim, as variantes de design propostas demonstram que a solução pode ser ajustada de forma eficiente a diferentes cenários de instalação. Esta flexibilidade reforça não apenas a aplicabilidade prática do módulo, mas também a sua atratividade para um mercado diversificado, desde habitações individuais até empreendimentos de grande escala.

6. CONCLUSÃO

6.1. Conclusões finais

O presente trabalho teve como objetivo central o desenvolvimento de um modelo técnico eficiente e sustentável para o reaproveitamento de águas cinzentas, especificamente provenientes do lavatório e da base de duche, para a sua posterior utilização em descargas sanitárias. Esse objetivo foi alcançado, resultando não apenas na demonstração da viabilidade da solução, mas também na evidência do seu potencial para reduzir significativamente o consumo de água potável, alcançar ganhos de eficiência hídrica e contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, nomeadamente os ODS 6, 11, 12 e 13.

O Capítulo 1 permitiu contextualizar a problemática que serviu de base a este estudo. A crescente escassez de água potável, agravada por fatores como alterações climáticas, crescimento populacional e ineficiências de distribuição, justifica a procura de soluções descentralizadas de reutilização de recursos. Foi, também, sublinhada a pertinência da reutilização de águas cinzentas como via para mitigar a pressão sobre os sistemas de abastecimento. Neste enquadramento, foi definido o objetivo geral: a conceção de um modelo técnico para reaproveitamento de águas cinzentas. Foram também elencados os objetivos específicos que abrangeram desde a caracterização dos consumos domésticos até à definição de um plano de marketing para inserção no setor hoteleiro, passando pela prototipagem e validação. A opção metodológica escolhida, seguindo o modelo *Design Science Research*, mostrou-se adequada por combinar análise científica, desenvolvimento tecnológico e aplicação prática, garantindo rigor académico e relevância prática.

O Capítulo 2 consolidou o estado da arte sobre a reutilização de águas cinzentas e a gestão da eficiência hídrica. A literatura analisada confirmou a relevância crescente deste tipo de soluções face aos desafios ambientais e destacou a evolução tecnológica nos últimos vinte anos, desde sistemas rudimentares até abordagens avançadas de filtração por membranas, ozonização e carvão ativado biológico. Foi também evidenciada a importância de integrar conceitos da Indústria 4.0 para aumentar a fiabilidade e eficiência dos sistemas.

Adicionalmente, a revisão destacou que a aceitação social continua a ser um fator crítico. Barreiras culturais, como a perceção de risco, dificultam a adoção, mesmo quando os benefícios técnicos e económicos são claros. Também o enquadramento legal em Portugal, apesar de não proibir a reutilização para usos não potáveis, permanece pouco estruturado, criando incertezas que podem travar a implementação. Por fim, metodologias multicritério como *AHP*, *TOPSIS* e *DEA* foram identificadas como ferramentas essenciais para apoiar decisões técnicas e de seleção de fornecedores. Este capítulo, portanto, estabeleceu os pilares conceptuais e metodológicos que sustentaram o desenvolvimento do modelo.

O Capítulo 3 apresentou o processo de conceção do módulo, desde a definição de requisitos funcionais até à seleção dos componentes. O sistema foi projetado de forma compacta e modular, integrando quatro etapas de tratamento (filtração a 90 µm e 25 µm, carvão ativado e desinfecção por radiação ultravioleta), reservatório de 80 litros, bombas submersíveis e sensores de nível para controlo automático. O desenho incluiu ainda um sistema de comutação com válvula

“normalmente aberta”, garantindo continuidade de serviço através da rede pública em caso de falha.

Uma característica central foi a facilidade de integração em casas de banho de tipologias variadas, desde apartamentos compactos até unidades hoteleiras de maior escala. A inclusão de equipamentos complementares de eficiência (sanitas de 2,5 e 4 litros e torneiras de baixo caudal) aumentou ainda mais o impacto global. A seleção de fornecedores, baseada em *AHP*, conferiu rigor técnico e económico às escolhas, privilegiando critérios como custo, eficiência energética, durabilidade e histórico de relações comerciais. Assim, o módulo desenvolvido combina inovação tecnológica, viabilidade prática e simplicidade de operação pelo utilizador, fatores decisivos para a aceitação social.

O Capítulo 4 enquadrou a introdução da tecnologia no setor hoteleiro, um dos contextos de maior consumo de água e sob maior pressão para adotar práticas sustentáveis. A análise das Cinco Forças de Porter revelou um setor competitivo, mas ainda pouco explorado no que diz respeito à reutilização de águas cinzentas, constituindo um nicho de oportunidade. A análise *SWOT* reforçou esta perspetiva, evidenciando forças, como a elevada redução de consumo e o alinhamento com regulamentação ambiental, fraquezas, como a necessidade de investimento inicial, oportunidades de financiamento, através de fundos europeus, e ameaças, relacionadas com concorrência indireta e barreiras culturais.

Foi delineada uma estratégia de marketing baseada em quatro eixos: educação e sensibilização (para gestores hoteleiros e equipas técnicas), marketing verde (comunicação dos benefícios ambientais), prova social (demonstração através de projetos-piloto) e valorização da experiência do hóspede (reforço da imagem sustentável do hotel). O plano de implementação previu fases de validação, certificação e expansão para outros segmentos (residências multifamiliares, hospitais, ginásios), demonstrando visão de escalabilidade.

O Capítulo 5 apresentou os resultados quantitativos, confirmando o elevado impacto do sistema em diferentes cenários. Em contexto residencial, verificou-se uma redução de até 62,7% no consumo da casa de banho, o que representa cerca de 193 litros poupados por dia numa família de quatro pessoas. No caso específico das descargas sanitárias, o sistema substituiu até 97,8% da água potável por água cinzenta tratada, reduzindo o consumo da rede pública a apenas 16 litros/dia para uma família.

Em contexto hoteleiro, onde o consumo médio é de 345 litros por hóspede em cada noite, o sistema permitiu uma redução global de 47,5%, correspondente a 164 litros poupados por quarto em cada noite. As maiores poupanças verificaram-se na casa de banho: duches e lavatórios tiveram reduções médias de 45%, enquanto as descargas sanitárias passaram de 103,5 litros para apenas 1,7 litros de água potável por quarto em cada noite, assegurando uma substituição de 98,4% da água nesta função por água cinzenta tratada.

Para além dos benefícios diretos, a solução demonstrou vantagens indiretas: baixo consumo energético, durabilidade dos componentes e compatibilidade com diferentes tipologias de edifícios. Estes resultados confirmam o potencial de integração do sistema em estratégias de economia circular e reforçam a importância de análises de ciclo de vida para avaliar de forma holística o seu impacto ambiental.

Em síntese, a presente dissertação demonstrou que o reaproveitamento de águas cinzentas é uma solução tecnicamente viável, ambientalmente sustentável e economicamente atrativa para enfrentar os desafios da escassez hídrica. O modelo desenvolvido alcançou reduções significativas, até 63% em contextos residenciais e até 97,8% nas descargas sanitárias como uma proposta inovadora e indispensável para a sustentabilidade hídrica no século XXI.

6.2. Limitações

Apesar dos resultados promissores alcançados, este trabalho apresenta algumas limitações que devem ser destacadas, embora já exista um plano estruturado e cronograma definido para a sua superação nas fases seguintes do projeto.

A ausência de ensaios de campo, que permitiriam validar na prática os parâmetros de desempenho, constitui uma limitação deste trabalho. Apesar de já terem sido realizados testes teóricos e ensaios com protótipos funcionais em laboratório, os ensaios de campo, instalados em hotéis, encontram-se programados para outubro de 2025 (como abordado no capítulo 3.5).

Adicionalmente, apesar de já se ter realizado a seleção dos fornecedores, como disposto no capítulo 3.4, a análise económica detalhada não foi incluída na tese por questões de confidencialidade.

Relativamente às questões legais, verificou-se que atualmente não existe legislação em Portugal que proíba o uso de águas cinzentas tratadas para descargas sanitárias. Contudo, admite-se a possibilidade de que futuras regulamentações venham a enquadrar ou condicionar esta prática, pelo que o acompanhamento da evolução normativa será essencial para garantir a viabilidade da implementação. Este enquadramento legal é verificado periodicamente, em cada trimestre, pela equipa legal e qualidade, que acompanha constantemente a legislação.

6.3. Trabalhos futuros

Com base nos resultados alcançados, identificam-se várias linhas de desenvolvimento futuro que poderão consolidar e expandir o contributo deste trabalho.

Validação experimental – Implementar a solução em ambiente real, com ensaios de campo, avaliando a qualidade da água tratada, a eficiência dos filtros e do sistema UV, a durabilidade dos componentes e os custos de manutenção associados.

Otimização do modelo – Testar diferentes configurações técnicas (capacidade de reservatórios, tipos de filtros, sistemas de automação e monitorização), de modo a encontrar a solução mais eficiente em termos de desempenho, custo e facilidade de utilização.

Eficiência económica – Desenvolver as relações comerciais com fornecedores a fim de possibilitar a redução de preço ao longo dos anos (ex. atribuindo mais volume de negócio com outros projetos e ganhando, assim, mais poder de negociação).

Acompanhamento legal e normativo – Monitorizar a evolução das normas nacionais e europeias, identificando requisitos futuros que possam afetar a implementação, e contribuindo com recomendações técnicas para a criação de um enquadramento legal favorável. Este

acompanhamento proativo permitirá antecipar e preparar atempadamente eventuais alterações legislativas, evitando surpresas e garantindo a conformidade contínua.

Avaliação social e comportamental – Investigar a aceitação da solução junto de diferentes perfis de utilizadores, explorando fatores de resistência e mecanismos que incentivem a adoção (como benefícios económicos diretos ou sensibilização ambiental).

Integração tecnológica – Explorar a possibilidade de ligação do sistema a plataformas digitais de monitorização (ex.: IoT e *dashboards* de consumo), permitindo uma gestão inteligente e personalizada do recurso água (programada para último trimestre de 2026).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- *SDG Indicators*. (sem data). Obtido 14 de Julho de 2025, de <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/Goal-06/>
- Abdulghani, H. M., Al-Shaikh, G., Alhujayri, A. K., Alohaideb, N. S., Alsaeed, H. A., Alshohayeb, I. S., Alyahya, M. M., Alhaqwi, A. I., & Shaik, S. A. (2013). What determines the selection of undergraduate medical students to the specialty of their future careers? *Medical Teacher*, 35(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.3109/0142159X.2013.765548>
- Agriculture using 75% of water in Portugal - The Portugal News*. (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de https://www.theportugalnews.com/news/2021-03-26/agriculture-using-75-of-water-in-portugal/58953?utm_source=chatgpt.com
- Água de reuso é opção para condomínio sustentável*. (sem data). Obtido 2 de Fevereiro de 2025, de https://sinduscon-sf.org.br/agua-de-reuso-e-opcao-para-condominio-sustentavel/?utm_source=chatgpt.com
- Al-Ajmi, F., Al-Marri, M., Almomani, F., & AlNouss, A. (2024). A Comprehensive Review of Advanced Treatment Technologies for the Enhanced Reuse of Produced Water. *Water* 2024, Vol. 16, Page 3306, 16(22), 3306. <https://doi.org/10.3390/W16223306>
- Al-Jayyousi, O. R. (2003). Greywater reuse: towards sustainable water management. *Desalination*, 156(1–3), 181–192. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)00340-0](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)00340-0)
- Al-Khatib, I. A., Al Shami, A. A. H. U., Garcia, G. R., & Celik, I. (2022). Social Acceptance of Greywater Reuse in Rural Areas. *Journal of Environmental and Public Health*, 2022, 6603348. <https://doi.org/10.1155/2022/6603348>
- Awasthi, A., Gandhi, K., & Rayalu, S. (2024). Greywater treatment technologies: a comprehensive review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 21(1), 1053–1082. <https://doi.org/10.1007/S13762-023-04940-7>
- Awwad, A., Hussein, G. A., & Albasha, L. (2024). AI-Aided Robotic Wide-Range Water Quality Monitoring System. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 9499, 16(21), 9499. <https://doi.org/10.3390/SU16219499>
- Bai, Z., Ma, W., Ma, L., Velthof, G. L., Wei, Z., Havlík, P., Oenema, O., Lee, M. R. F., & Zhang, F. (2018). China's livestock transition: Driving forces, impacts, and consequences. *Science Advances*, 4(7). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.AAR8534>
- Behzadian, M., Khanmohammadi Otaghsara, S., Yazdani, M., & Ignatius, J. (2012). A state-of-the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051–13069. <https://doi.org/10.1016/J.ESWA.2012.05.056>
- Bucking the cistern: using condensate for flushing toilets - CIBSE Journal*. (sem data). Obtido 2 de Fevereiro de 2025, de https://www.cibsejournal.com/uncategorized/bucking-the-cistern-using-condensate-for-flushing-toilets/?utm_source=chatgpt.com
- Capodaglio, A. G., & Callegari, A. (2025). Use, Potential, Needs, and Limits of AI in Wastewater Treatment Applications. *Water* 2025, Vol. 17, Page 170, 17(2), 170. <https://doi.org/10.3390/W17020170>
- Chandanpurkar, H. A., Famiglietti, J. S., Gopalan, K., Wiese, D. N., Wada, Y., Kakinuma, K., Reager, J. T., & Zhang, F. (2025). Unprecedented continental drying, shrinking freshwater availability, and increasing land contributions to sea level rise. *Science Advances*, 11(30). <https://doi.org/10.1126/SCIADV.ADX0298>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring the efficiency of decision making units. *European Journal of Operational Research*, 2(6), 429–444. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(78\)90138-8](https://doi.org/10.1016/0377-2217(78)90138-8)

- Commission on Environment, W. (sem data). *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future Towards Sustainable Development 2. Part II. Common Challenges Population and Human Resources 4.*
- Comparing Diurnal Patterns of Domestic Water Consumption: An International Study.* (sem data). Obtido 8 de Julho de 2025, de https://www.researchgate.net/publication/308267273_Comparing_Diurnal_Patterns_of_Domestic_Water_Consumption_An_International_Study
- Consumo médio de água por hóspede/noite num hotel é de 345 litros — DNOTÍCIAS.PT.* (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de https://www.dnoticias.pt/2019/3/23/82409-consumo-medio-de-agua-por-hospedenoite-num-hotel-e-de-345-litros/?utm_source=chatgpt.com
- Costa, S., Meireles, I., & Sousa, V. (2024). Understanding residential water demand: insights from a survey in a Mediterranean city. *Urban Water Journal*, 21(4), 521–537. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2024.2312501;REQUESTEDJOURNAL:JOURNAL:NURW20;WGROU:STRING:PUBLICATION>
- Craig, M., & Richman, R. (2018). Towards development of a standard methodology for testing field performance of residential greywater reuse systems: Case study of a greywater reuse system installed in 22 homes in southern ontario (canada). *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(2), 135–152. <https://doi.org/10.2166/WRD.2017.020>
- Da, N. E., & Simões, C. (2019). Fugas e perdas em redes de distribuição de água: Estudo de Caso: ZMC - Carvalhosas/Palheiros. *Fugas e perdas em redes de distribuição de água: Estudo de Caso: ZMC - Carvalhosas/Palheiros.* <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/83204>
- de Morais, L. H. L., Pinto, D. C., & Cruz-Jesus, F. (2021). Circular economy engagement: Altruism, status, and cultural orientation as drivers for sustainable consumption. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 523–533. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2021.01.019>
- Dickson, G. W. (1966). An Analysis Of Vendor Selection Systems And Decisions. *Journal of Purchasing*, 2(1), 5–17. <https://doi.org/10.1111/J.1745-493X.1966.TB00818.X>
- DIY Greywater System.* (sem data). Obtido 2 de Fevereiro de 2025, de https://sustainablog.org/articles/how-to-flush-your-toilet-with-greywater-a-hillbilly-cheap-approach-video/?utm_source=chatgpt.com
- Do, M., Almeida, C., Jorge, C., & Loureiro, D. (sem data). *3.º Congresso da Água 1 USO DA ÁGUA EM EMPREENDIMENTOS TURÍSTICOS.*
- Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P., & Edmonds, J. (2021a). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/S41467-021-22194-0;TECHMETA=119,139;SUBJMETA=106,1108,242,694,704,843,844;KWRD=CLIMATE+AND+EA RTH+SYSTEM+MODELLING,ENVIRONMENTAL+ECONOMICS,HYDROLOGY>
- Dolan, F., Lamontagne, J., Link, R., Hejazi, M., Reed, P., & Edmonds, J. (2021b). Evaluating the economic impact of water scarcity in a changing world. *Nature Communications 2021 12:1*, 12(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22194-0>
- Domnech, L., & Saurí, D. (2010). Socio-technical transitions in water scarcity contexts: Public acceptance of greywater reuse technologies in the Metropolitan Area of Barcelona. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(1), 53–62. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2010.07.001>
- Donovan, M. (sem data). *Associate Water/Wastewater Treatment Business Group Leader.*
- Dutta, P., Jaikumar, B., & Arora, M. S. (2022). Applications of data envelopment analysis in supplier selection between 2000 and 2020: a literature review. *Annals of Operations Research*, 315(2), 1399–1454. <https://doi.org/10.1007/S10479-021-03931-6/METRICS>

- Essamlali, I., Nhaila, H., & El Khaili, M. (2024). Advances in machine learning and IoT for water quality monitoring: A comprehensive review. *Heliyon*, *10*(6), e27920. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2024.E27920>
- Figueiredo, M., Fernandes, A., Neves, J., & Vicente, H. (2024). Sustainable Water Use and Public Awareness in Portugal. *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 5444, *16*(13), 5444. <https://doi.org/10.3390/SU16135444>
- Fischer-Kowalski, M., Ren, Y., Moriguchi, Y., Crane, W., Krausmann, F., Eisenmenger, N., Giljum, S., Hennicke, P., Kemp, R., Romero Lankao, P., & Bella Siriban Manalang Jeff McNeely, A. (sem data). *Editor: International Resource Panel Working Group on Decoupling Lead authors.*
- Garrido-Baserba, M., Sedlak, D. L., Molinos-Senante, M., Barnosell, I., Schraa, O., Rosso, D., Verdaguer, M., & Poch, M. (2024). Using water and wastewater decentralization to enhance the resilience and sustainability of cities. *Nature Water* 2024 2:10, *2*(10), 953–974. <https://doi.org/10.1038/s44221-024-00303-9>
- Gaskin, C., Stockil, K., Track, T., Horan, W., Lucht, A., & Conheady, P. (sem data). *Industrial Water 4.0-A Framework for Catchment-based Digitally Integrated Industrial Water Stewardship.* Obtido 23 de Agosto de 2025, de www.epa.ie
- Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, *114*, 11–32. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.09.007>
- Gilboa, Y., Friedler, E., & Schütze, M. (2023). Assessing water use and reuse options - a holistic analysis of a Model City, coupling dynamic system modelling with Life Cycle Assessment. *Urban Water Journal*, *20*(7), 844–858. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2023.2211959>
- Gravity Fed Rainwater Harvesting System For Flushing Toilets – Freeflush Water Management Ltd. (sem data). Obtido 2 de Fevereiro de 2025, de https://www.freeflush.co.uk/pages/gravity-fed-rainwater-harvesting-system-for-flushing-toilets?srsId=AfmBOorY9LHlq4o-fK84DgtNk6OMeLjTU8ZEEqDrXpVAZa-ltcj-XBTZ&utm_source=chatgpt.com
- Greenview's 2024 Green Lodging Trends Report: A Deep Dive into Sustainable Practices in the Hospitality Industry. (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de <https://www.hotelnewsresource.com/article134810.html>
- Gulbenkian Água – Fundação Calouste Gulbenkian. (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de https://gulbenkian.pt/en/initiatives/sustainable-development-programme/gulbenkian-agua/?utm_source=chatgpt.com
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly: Management Information Systems*, *28*(1), 75–105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Ho, W., Xu, X., & Dey, P. K. (2010a). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: A literature review. *European Journal of Operational Research*, *202*(1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2009.05.009>
- Ho, W., Xu, X., & Dey, P. K. (2010b). Multi-criteria decision making approaches for supplier evaluation and selection: a literature review. *European Journal of Operational Research*, *202*(1), 16–24. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2009.05.009>
- Hoekstra, A. Y., & Mekonnen, M. M. (2012). The water footprint of humanity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(9), 3232–3237. https://doi.org/10.1073/PNAS.1109936109/SUPPL_FILE/PNAS.1109936109_SI.PDF
- Hofman-Caris, R., Hofman, J., Hofman-Caris, R., & Hofman, J. (2018). Limitations of conventional drinking water technologies in pollutant removal. *Handbook of Environmental Chemistry*, *67*, 21–51. https://doi.org/10.1007/698_2017_83
- Hruška, R., Průša, P., & Babić, D. (2014). The use of AHP method for selection of supplier. *Transport*, *29*(2), 195–203. <https://doi.org/10.3846/16484142.2014.930928>

- Islam, F. A. S. (2025). Advanced Wastewater Treatment Technologies in Addressing Future Water Scarcity through Resource Recovery and Reuse. *Journal of Engineering Research and Reports*, 27(5), 370–398. <https://doi.org/10.9734/JERR/2025/V27I51513>
- Krausmann, F., Gingrich, S., Eisenmenger, N., Erb, K. H., Haberl, H., & Fischer-Kowalski, M. (2009). Growth in global materials use, GDP and population during the 20th century. *Ecological Economics*, 68(10), 2696–2705. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2009.05.007>
- Latin America and the Caribbean Regional Overview of Food Security and Nutrition 2024. (2025). <https://doi.org/10.4060/CD3877EN>
- Leal Filho, W., Viera Trevisan, L., Simon Rampasso, I., Anholon, R., Pimenta Dinis, M. A., Londero Brandli, L., Sierra, J., Lange Salvia, A., Pretorius, R., Nicolau, M., Paulino Pires Eustachio, J. H., & Mazutti, J. (2023). When the alarm bells ring: Why the UN sustainable development goals may not be achieved by 2030. *Journal of Cleaner Production*, 407, 137108. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2023.137108>
- Leflaive, X. (sem data-a). *The economics of water scarcity*. <https://doi.org/10.1787/81d1bc0a-en>
- Leflaive, X. (sem data-b). *The economics of water scarcity*. <https://doi.org/10.1787/81d1bc0a-en>
- Livingston, J. (2021). Water Scarcity & Health in Urban Africa. *Daedalus*, 150(4), 85–102. https://doi.org/10.1162/DAED_A_01874
- López-Ruiz, S., Moya-Fernández, P. J., García-Rubio, M. A., & González-Gómez, F. (2021). Acceptance of direct potable water reuse for domestic purposes: evidence from southern Spain. *International Journal of Water Resources Development*, 37(5), 772–792. <https://doi.org/10.1080/07900627.2020.1799762>
- March, J. G., Gual, M., & Orozco, F. (2004). Experiences on greywater re-use for toilet flushing in a hotel (Mallorca Island, Spain). *Desalination*, 164(3), 241–247. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(04\)00192-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(04)00192-4)
- Marston, L. T., Read, Q. D., Brown, S. P., & Muth, M. K. (2021). Reducing Water Scarcity by Reducing Food Loss and Waste. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 5, 651476. <https://doi.org/10.3389/FSUFS.2021.651476/BIBTEX>
- Matesun, J., Petrik, L., Musvoto, E., Ayinde, W., & Ikumi, D. (2024). Limitations of wastewater treatment plants in removing trace anthropogenic biomarkers and future directions: A review. *Ecotoxicology and environmental safety*, 281. <https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2024.116610>
- Meireles, I., Sousa, V., Matos, J. P., & Cruz, C. O. (2023). Determinants of water loss in Portuguese utilities. *Utilities Policy*, 83, 101603. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2023.101603>
- Milios, L. (2018). Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. *Sustainability Science*, 13(3), 861–878. <https://doi.org/10.1007/S11625-017-0502-9/FIGURES/7>
- Mohamed Yusoff, N. I. Bin, Godsell, J., & Woolley, E. (2024). Towards zero waste: A comprehensive framework for categorizing household food waste. *Sustainable Production and Consumption*, 48, 1–13. <https://doi.org/10.1016/J.SPC.2024.05.002>
- Mojiri, A., Trzcinski, A. P., Bashir, M. J. K., & Abu Amr, S. S. (2024). Editorial: Innovative treatment technologies for sustainable water and wastewater management. *Frontiers in Water*, 6, 1388387. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2024.1388387/BIBTEX>
- Montel | Blog - How Do Droughts Affect Hydropower Generation? (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de https://montel.energy/resources/blog/how-do-droughts-affect-hydropower-generation?utm_source=chatgpt.com
- Morris, J. C., Georgiou, I., Guenther, E., & Caucci, S. (2021). Barriers in Implementation of Wastewater Reuse: Identifying the Way Forward in Closing the Loop. *Circular Economy and Sustainability*, 1(1), 413–433. <https://doi.org/10.1007/S43615-021-00018-Z/FIGURES/5>

- Nigel Arnell. (2005). Modeling the effects of pumping wells in spring management: The case of Scirca spring (central Apennines, Italy). *Journal of Hydrology*, 493, 115–123. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.032>
- Nolde, E. (2005). Greywater recycling systems in Germany - Results, experiences and guidelines. *Water Science and Technology*, 51(10), 203–210. <https://doi.org/10.2166/WST.2005.0368>
- Okwu, M. O., & Tartibu, L. K. (2020a). Sustainable supplier selection in the retail industry: A TOPSIS- and ANFIS-based evaluating methodology. *International Journal of Engineering Business Management*, 12. https://doi.org/10.1177/1847979019899542/ASSET/7FF547C3-EFD1-41A5-9E69-C1B7A5A843B6/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177_1847979019899542-FIG8.JPG
- Okwu, M. O., & Tartibu, L. K. (2020b). Sustainable supplier selection in the retail industry: A TOPSIS- and ANFIS-based evaluating methodology. *International Journal of Engineering Business Management*, 12. https://doi.org/10.1177/1847979019899542/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1177_1847979019899542-FIG8.JPG
- Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & deVries, N. K. (2018a). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(8), 255. <https://doi.org/10.1007/S11270-018-3909-8>
- Oteng-Peprah, M., Acheampong, M. A., & deVries, N. K. (2018b). Greywater Characteristics, Treatment Systems, Reuse Strategies and User Perception—a Review. *Water, Air, and Soil Pollution*, 229(8), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S11270-018-3909-8/TABLES/6>
- Pakharuddin, N. H., Fazly, M. N., Ahmad Sukari, S. H., Tho, K., & Zamri, W. F. H. (2021). Water treatment process using conventional and advanced methods: A comparative study of Malaysia and selected countries. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 880(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/880/1/012017>
- Rajski, K., Englart, S., & Sohani, A. (2024). Analysis of Greywater Recovery Systems in European Single-Family Buildings: Economic and Environmental Impacts. *Sustainability 2024, Vol. 16, Page 4912*, 16(12), 4912. <https://doi.org/10.3390/SU16124912>
- Reuse Shower Water with Aqualoop Greywater Recycling | Ecovivie*. (sem data). Obtido 2 de Fevereiro de 2025, de https://www.ecovivewater.com/reuse-shower-water/?utm_source=chatgpt.com
- Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, Å., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., De Wit, C. A., Hughes, T., Van Der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., ... Foley, J. A. (2009). A safe operating space for humanity. *Nature* 2009 461:7263, 461(7263), 472–475. <https://doi.org/10.1038/461472a>
- Rodríguez, C., Sánchez, R., Rebolledo, N., Schneider, N., Serrano, J., & Leiva, E. (2020). Cost–Benefit Evaluation of Decentralized Greywater Reuse Systems in Rural Public Schools in Chile. *Water* 2020, Vol. 12, Page 3468, 12(12), 3468. <https://doi.org/10.3390/W12123468>
- Roy, B. (1991). The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, 31(1), 49–73. <https://doi.org/10.1007/BF00134132/METRICS>
- Shimokawa, S. (2015). Sustainable meat consumption in China. *Journal of Integrative Agriculture*, 14(6), 1023–1032. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(14\)60986-2](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(14)60986-2)
- Silva, J. A. (2023). Wastewater Treatment and Reuse for Sustainable Water Resources Management: A Systematic Literature Review. *Sustainability (Switzerland)*, 15(14), 10940. <https://doi.org/10.3390/SU151410940/S1>
- Tickner, D., Opperman, J. J., Abell, R., Acreman, M., Arthington, A. H., Bunn, S. E., Cooke, S. J., Dalton, J., Darwall, W., Edwards, G., Harrison, I., Hughes, K., Jones, T., Leclère, D., Lynch, A. J., Leonard, P., McClain, M. E., Muruven, D., Olden, J. D., ... Young, L. (2020). Bending the

- Curve of Global Freshwater Biodiversity Loss: An Emergency Recovery Plan. *Bioscience*, 70(4), 330. <https://doi.org/10.1093/BIOSCI/BIAA002>
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S. M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M. C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Kalin, K. C., Davi, H., Dupuy, J. L., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-StPaul, N., ... Polcher, J. (2020). Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews*, 210, 103348. <https://doi.org/10.1016/J.EARSCIREV.2020.103348>
- (UNEP), U. N. E. P. (2011). *Decoupling Environmental Resource Use and Economic Growth Summary*. 1–58. https://www.researchgate.net/publication/289204141_United_Nations_Environment_Programme_2011_Decoupling_natural_resources_use_and_environmental_impacts_from_economic_growth
- UNESCO. (2023). *Parcerias e cooperação para a água: fatos, dados e exemplos de ação*. https://unesdoc.unesco.org/ark%3A/48223/pf0000384659_por?utm_source=chatgpt.com
- UNICEF Ethiopia/Ayene. (2023). Água: um bem cada vez mais escasso. *UNRIC*. https://unic.org/pt/agua-um-bem-cada-vez-mais-escasso/?utm_source=chatgpt.com
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169(1), 1–29. <https://doi.org/10.1016/J.EJOR.2004.04.028>
- Valenzuela-Morales, G. Y., Hernández-Téllez, M., Ruiz-Gómez, M. de L., Gómez-Albores, M. A., Arévalo-Mejía, R., & Mastachi-Loza, C. A. (2022). Water Conservation Education in Elementary Schools: The Case of the Nenetzingo River Catchment, Mexico. *Sustainability (Switzerland)*, 14(4), 2402. <https://doi.org/10.3390/SU14042402/S1>
- Van de Walle, A., Kim, M., Alam, M. K., Wang, X., Wu, D., Dash, S. R., Rabaey, K., & Kim, J. (2023). Greywater reuse as a key enabler for improving urban wastewater management. *Environmental Science and Ecotechnology*, 16, 100277. <https://doi.org/10.1016/J.ESE.2023.100277>
- Volf, G., Sušanjan Čule, I., Žic, E., & Zorko, S. (2022). Water Quality Index Prediction for Improvement of Treatment Processes on Drinking Water Treatment Plant. *Sustainability 2022, Vol. 14, Page 11481*, 14(18), 11481. <https://doi.org/10.3390/SU141811481>
- Wada, Y., Flörke, M., Hanasaki, N., Eisner, S., Fischer, G., Tramberend, S., Satoh, Y., Van Vliet, M. T. H., Yillia, P., Ringler, C., Burek, P., & Wiberg, D. (2016). Modeling global water use for the 21st century: The Water Futures and Solutions (WfS) initiative and its approaches. *Geoscientific Model Development*, 9(1), 175–222. <https://doi.org/10.5194/GMD-9-175-2016>
- Wang, H. ;, Gao, X. ;, Zuo, Y., Wang, H., Gao, X., & Zuo, Y. (2024). Research and Application of Water Treatment Technologies for Emerging Contaminants (ECs): A Pathway to Solving Water Environment Challenges. *Water 2024, Vol. 16, Page 1837*, 16(13), 1837. <https://doi.org/10.3390/W16131837>
- Wang, M., Bodirsky, B. L., Rijneveld, R., Beier, F., Bak, M. P., Batool, M., Droppers, B., Popp, A., van Vliet, M. T. H., & Stokal, M. (2024). A triple increase in global river basins with water scarcity due to future pollution. *Nature Communications 2024 15:1*, 15(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-44947-3>
- Wang, M., Zhu, J., & Mao, X. (2021). Removal of Pathogens in Onsite Wastewater Treatment Systems: A Review of Design Considerations and Influencing Factors. *Water 2021, Vol. 13, Page 1190*, 13(9), 1190. <https://doi.org/10.3390/W13091190>
- Water scarcity | UNICEF*. (sem data). Obtido 23 de Agosto de 2025, de https://www.unicef.org/wash/water-scarcity?utm_source=chatgpt.com
- Willis, R. M., Stewart, R. A., Panuwatwanich, K., Williams, P. R., & Hollingsworth, A. L. (2011). Quantifying the influence of environmental and water conservation attitudes on household

- end use water consumption. *Journal of Environmental Management*, 92(8), 1996–2009.
<https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.03.023>
- World Wide Fund. (2023). *Water Scarcity | Threats* .
https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity?utm_source=chatgpt.com
- Xu, Y., & Zhao, F. (2023). Impact of energy depletion, human development, and income distribution on natural resource sustainability. *Resources Policy*, 83, 103531.
<https://doi.org/10.1016/J.RESOURPOL.2023.103531>
- Zhao, M., & Boll, J. (2022). Adaptation of water resources management under climate change. *Frontiers in Water*, 4, 983228. <https://doi.org/10.3389/FRWA.2022.983228/BIBTEX>