



**Instituto Politécnico de Tomar**  
**Escola Superior de Tecnologia de Tomar**

**Dissertação**

**Monitorização do Desempenho de Zonas Húmidas Construídas:  
Validação de IdC**

Orientadores: Doutora Dina Mateus

e

Doutor Henrique Pinho

Trabalho realizado por: Joyce Carvalho Laranjeira de Sousa

**TOMAR**

**dezembro de 2023**



## Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por me dar sabedoria, força e resiliência para chegar até aqui.

Em segundo lugar agradeço à minha mãe Ivete por acreditar em mim, pelo incentivo, conselhos, insistência, positividade, determinação, carinho, amor e apoio de sempre. Ao meu pai Antônio Carlos, agradeço também *in memoriam* por todo o esforço de uma vida de nos proporcionar o melhor possível e por sempre nos incentivar a estudar, nos dando apoio, exemplo e amor. Ao meu irmão Iúri Carlos, por toda união nos pequenos e grandes detalhes da vida, apoio de sempre, carinho e compreensão que meu deu.

Aos meus orientadores, professor Doutor Henrique Pinho e professora Doutora Dina Mateus, a minha gratidão e reconhecimento por todo apoio, dedicação, paciência, conselhos, ensino e motivação.

A todos os professores do curso de Mestrado em Tecnologia Química pela dedicação, paciência e esforço ao ensino em todo o curso. E, principalmente pela extrema doação em tempo integral ao ensino em tempos de pandemia quer presencialmente quer à distância.

Agradeço também à senhora engenheira Isabel Silva, pelo carinho, amizade, dedicação e apoio nos laboratórios do IPT para o desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa.

Agradeço o apoio dos Laboratórios do Instituto Politécnico de Tomar (IPT), o financiamento atribuído pelo projeto EcoModZHC do Laboratório de Bioenergia e Biotecnologia Aplicada (BIOTEC.IPT), e o apoio do Centro de Investigação em Cidade Inteligentes do IPT (Ci2), financiado pela Fundação para Ciência e a Tecnologia (FCT, UID/05567/2020).

Agradeço o apoio recebido pelo Projeto EcoModZHC, do qual fui bolsista por quatro meses no laboratório (BIOTEC.IPT) o que me permitiu dedicação integral ao tema da dissertação.

Por último, mas não menos importante, agradeço também aos colegas de curso e a todos aqueles que me ajudaram e que estiveram presentes durante a realização desta difícil jornada. A todos os funcionários do IPT, como as trabalhadoras da limpeza e os senhores da manutenção que possibilitam que os trabalhos ocorram da melhor forma possível.



## Resumo

As Zonas Húmidas Construídas (ZHC) são sistemas semelhantes às Zonas Húmidas Naturais. As ZHC são projetadas para utilizar processos inerentes da natureza para tratar águas residuais (AR), sendo uma importante vertente biorremediadora executada por um sistema constituído por plantas, substratos e microrganismos. No presente estudo procedeu-se à monitorização de duas ZHC Piloto existentes no Instituto Politécnico de Tomar, ambas com cerca de 1m<sup>2</sup> de área e plantadas com caniço comum (*Phragmites australis*). Na ZHC E o substrato constitui em fragmentos de pedra calcária, enquanto na ZHC P é constituído por uma mistura de fragmentos dessa mesma pedra com escórias de carvão e aglomerado de cortiça. O objetivo geral do estudo consistiu em avaliar a possibilidade de usar tecnologia de Internet das Coisas (IdC) na monitorização de ZHC. O trabalho desenvolvido consistiu em monitorizar a eficiência de tratamento de águas residuais, avaliando a remoção de compostos de azoto, de fósforo e outros compostos oxidáveis. Para esse efeito, analisou-se o teor de azoto total (NT), de fósforo total (PT) e de carência química de oxigénio (CQO). Monitorizou-se, ainda, o pH, a condutividade elétrica (CE), e a concentração de nitratos, nitritos, amónia e fosfatos.

A capacidade de remoção de CQO em ambas as ZHC monitorizadas foram superiores a 50%. A média da eficiência neste parâmetro para ambas as ZHC rondaram os 80%. No caso da remoção de PT, a ZHC E apresentou resultados em grande parte abaixo dos 60% de remoção. Em contrapartida, na ZHC P, a maior parte dos resultados obtidos foram superiores a 60% de remoção de PT. A média de remoção de PT na ZHC P foi de 67% e na ZHC E cerca de 54%. Para o parâmetro NT ambas as ZHC mostraram eficiência elevada na remoção, apresentando uma média de 88% na ZHC E, e de 90% na ZHC P. Atingindo em alguns períodos cerca de 100% de eficiência na remoção de NT em ambas ZHC.

Verificou-se que existe correlação forte ( $p < 0.01$ ) entre a concentração de fosfatos e o teor de PT, e da mesma forma entre o teor de NT e amónia, e também entre o teor de NT com a soma da concentração de nitratos, nitritos e amónia. Apesar de estas correlações poderem ter de ser ajustadas para outros tipos de água residual, estes resultados permitem utilizar sensores eletroquímicos de fosfatos e de nitratos, nitritos e amónio para estimar, respetivamente os teores de PT e NT. Estes dois parâmetros são essenciais à monitorização das ZHC, mas requerem procedimentos de recolha de amostras e de análise química mais complexos e demorados que o uso de sensores baseados em redes de IdC.

**Palavras-chave:** Macrófitas; Remoção de nutrientes; Resíduos sólidos; Sensores eletroquímicos; Tratamento de águas residuais; Zonas húmidas construídas.



## Abstract

Constructed Wetlands (CW) are systems similar to Natural Wetlands. CW are designed to use natural processes to treat wastewater (RS), being an important bioremediation aspect carried out by a system made up of plants, substrates, and microorganisms. In the present study, two pilot CW existing at the Polytechnic Institute of Tomar were monitored, both with an area of approximately 1 m<sup>2</sup> and planted with common reed (*Phragmites australis*). In CW E the substrate consists of fragments of limestone, while in CW P it is made up of a mixture of fragments of this same stone with coal slag and cork agglomerate. The general objective of the study was to evaluate the possibility of using Internet of Things (IoT) technology to monitor CW. The work carried out consisted of monitoring the efficiency of wastewater treatment, evaluating the removal of nitrogen compounds, phosphorus and other oxidizable compounds. For this purpose, the content of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chemical oxygen demand (COD) were analyzed. The pH, electrical conductivity, and concentration of nitrates, nitrites, ammonia, and phosphates were also monitored.

The COD removal capacity in both monitored ZHCs was greater than 50%. The average efficiency in this parameter for both ZHC was around 80%. In the case of PT removal, ZHC E showed results largely below 60% removal. In contrast, in ZHC P, most of the results obtained were greater than 60% PT removal. The average PT removal in ZHC P was 67% and in ZHC E around 54%. For the NT parameter, both ZHCs showed high removal efficiency, presenting an average of 88% in ZHC E, and 90% in ZHC P. Reaching in some periods around 100% efficiency in NT removal in both ZHCs.

It was found that there is a strong correlation ( $p < 0.01$ ) between the concentration of phosphates and the TP content, and similarly between the TN content and ammonia so as the sum of the concentration of nitrates, nitrites, and ammonia. Although these correlations may have to be adjusted for other types of wastewater, these results allow the use of electrochemical sensors for phosphates and nitrates, nitrites and ammonium to estimate, respectively, the TP and NT contents. These two parameters are essential for monitoring CW, but require more complex and time-consuming sample collection and chemical analysis procedures than the use of sensors based on IoT networks.

**Keywords:** Macrophytes; Nutrient removal; Solid waste; Electrochemical sensors; Wastewater treatment; Constructed wetlands.



## Conteúdo

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Objetivo do Estudo .....	1
1.2	Questões-Chave da Investigação .....	1
1.3	Enquadramento do Tema .....	2
2	MONITORIZAÇÃO DE ZONAS HÚMIDAS CONSTRUÍDAS .....	9
2.1	Fundamentos e Parâmetros Monitorizados .....	9
2.2	Monitorização Remota de ZHC .....	16
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	19
3.1	ZHC Piloto .....	19
3.2	Determinação do Caudal à Entrada e à Saída das ZHC .....	21
3.3	Métodos de Análise da Água .....	22
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	25
4.1	Determinação do Caudal .....	25
4.2	Eficiência de Remoção de NT .....	27
4.3	Análise das Concentrações de Nitratos, Nitritos e Amónia .....	28
4.4	Correlação entre NT e a Concentração de Nitritos e de Amónia .....	32
4.5	Eficiência de Remoção da CQO .....	33
4.6	Análise de Remoção de PT .....	34
4.7	Análise de Fosfatos .....	36
4.8	Correlação entre PT e a Concentração Fosfatos .....	37
4.9	Monitorização do pH e da Condutividade Elétrica .....	38
4.10	Análise Comparativa da Eficiência dos Sistemas ZHC .....	40
5	CONCLUSÕES .....	43
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	45



## Índice de Figuras

FIGURA 1: ESQUEMA COM AS CARACTERÍSTICAS PRINCIPAIS DAS ZONAS HÚMIDAS CONSTRUÍDAS.....	6
FIGURA 2: ZHC MODELO SUBSUPERFICIAL HORIZONTAL. ....	6
FIGURA 3: ESQUEMA DE CAMADAS DE SUBSTRATOS DO SISTEMA ZHC UNIDADE P. . ....	19
FIGURA 4: SISTEMA ZHC P, COM ESTRUTURA MODULAR EM MADEIRA, PLANTADO COM MACRÓFITAS <i>PHRAGMITES AUSTRALIS</i> .. ....	20
FIGURA 5: ESQUEMA DE CAMADA ÚNICA DE FPM DO SISTEMA ZHC E. ....	20
FIGURA 6: SISTEMA ZHC E, EM ESTRUTURA DE PVC COM MACRÓFITAS PHRAGMITES AUSTRALIS. ....	21
FIGURA 7: SISTEMA ZHC E (A) E ZHC P (B), DETALHE DE COLETA À SAÍDA POR INUNDAÇÃO. ....	21
FIGURA 8: GRÁFICO DOS CAUDAIS DO SISTEMA ZHC P. ....	26
FIGURA 9: GRÁFICO DOS CAUDAIS DO SISTEMA ZHC E. ....	26
FIGURA 10: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE AZOTO TOTAL ZHC P. ....	28
FIGURA 11: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO DE AZOTO TOTAL NA ZHC E. ....	28
FIGURA 12: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO NITRITOS NA ZHC P. ....	29
FIGURA 13: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO NITRITOS NA ZHC E. ....	30
FIGURA 14: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO AMÓNIA NA ZHC E. ....	31
FIGURA 15: GRÁFICO DE EFICIÊNCIA NA REMOÇÃO AMÓNIA NA ZHC P. ....	31
FIGURA 16: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO DE NT x N(NH <sub>3</sub> +NO <sub>2</sub> +NO <sub>3</sub> ).....	32
FIGURA 17: GRÁFICO DE CORRELAÇÃO ENTRE NT E NH <sub>3</sub> . ....	33
FIGURA 18: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE CQO DA ZHC E. ....	33
FIGURA 19: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE CQO DA ZHC P. ....	34
FIGURA 20: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE PT NA ZHC E. ....	35
FIGURA 21: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE PT NA ZHC P. ....	35
FIGURA 22: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE FOSFATOS NA ZHC E. ....	36
FIGURA 23: GRÁFICO DE REMOÇÃO DE FOSFATOS NA ZHC P. ....	37
FIGURA 24: GRÁFICO DA CORRELAÇÃO DE PT E FOSFATOS EM AMBOS OS SISTEMAS ZHC. ....	37
FIGURA 25: GRÁFICO DA ANÁLISE DO PH NA ZHC E. ....	38
FIGURA 26: GRÁFICO DA ANÁLISE DO PH NA ZHC P. ....	39
FIGURA 27: GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA ZHC E. ....	39
FIGURA 28: GRÁFICO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA NA ZHC P. ....	40
FIGURA 29: EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE POLUENTES NA ZHC E. ....	41
FIGURA 30: EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DE POLUENTES NA ZHC P. ....	41



## **Índice de Tabelas**

TABELA I: FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM DE AR EM ZHC. ....	10
TABELA II: REVISÃO DA LITERATURA RELATIVA À MONITORIZAÇÃO DE SISTEMAS ZHC. ....	11
TABELA III: ESTUDOS RECENTES DE MONITORIZAÇÃO DE ZHC COM USO DE SENSORES IN SITU. ....	18
TABELA IV: FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM E CAUDAIS. ....	25



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo do Estudo

O presente estudo foi desenvolvido sob a orientação do Doutor Henrique Pinho e da Doutora Dina Mateus, na modalidade de dissertação científica, e faz parte integrante do ciclo de estudos do Curso de Mestrado em Tecnologia Química, da Escola Superior de Tecnologia Química de Tomar, do Instituto Politécnico de Tomar (IPT). A investigação científica decorreu entre o período de julho de 2022 e maio de 2023.

Pretende-se com a presente dissertação monitorizar a eficiência operacional nos sistemas piloto de Zona Húmida Construída (ZHC) P e ZHC E instalados no IPT, em termos de remoção de poluentes, contemplando a carência química de Oxigénio (CQO), o azoto total (NT) e o fósforo total (PT), entre outros parâmetros, e ainda a monitorizar o pH e a condutividade elétrica (CE) das amostras à entrada e à saída das duas ZHC. Pretende-se também verificar a possibilidade de otimizar a obtenção de dados destes sistemas através de sensores e de tecnologia de Internet das Coisas (IdC).

## 1.2 Questões-Chave da Investigação

A investigação realizada pretendeu dar resposta a duas questões-chave:

- (i) tentar perceber se é possível monitorizar o funcionamento de ZHC através de redes de sensores e dispositivos IdC;
- (ii) avaliar a possibilidade de estimar a concentração de compostos de fósforo, em termos da análise de PT, a partir da análise da concentração de fosfatos ( $\text{PO}_4^{3-}$ ), e a concentração de compostos de azoto, em termos da análise de NT, a partir da análise da concentração de nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), nitritos ( $\text{NO}_2^-$ ) e de amónia ( $\text{NH}_3$ ).

A primeira questão teve origem no conhecimento geral de que o desempenho das ZHC, tal como de outros sistemas de tratamento de águas residuais, depende da análise da composição das águas residuais e das águas tratadas, e que a maiorias das análises são efetuadas em laboratório após recolha de amostras de água.

A segunda questão está relacionada com a primeira, visto que a determinação das concentrações de PT e de NT exige uma etapa de oxidação extensa das amostras de água (digestão), o que dificulta e encarece a sua aplicação de modo automático e remoto, mas, por outro lado, começam a estar disponíveis sensores eletroquímicos capazes de avaliar a concentração de iões dissolvidos na água.

### **1.3 Enquadramento do Tema**

A água é o recurso natural mais importante da Terra, e é essencial para a existência de qualquer forma de vida. É um recurso mineral valioso, limitado e dotado de valor econômico, sendo um bem de domínio público, considerando a disponibilidade de água doce total do Planeta ser de 2.5% e destes apenas 0,3% estar disponível a todos os seres vivos, mensura em números a diminuta quantidade de água que possuímos (Chen & Han, 2018).

A preocupação com o uso adequado e consequente preservação deste recurso vital tornou-se tema amplamente discutido em todo Planeta, procurando-se meios de evitar a sua escassez (Alateeqi et al., 2023) e obter um desenvolvimento mais sustentável (Bilalova et al., 2023).

No ano de 1958 a Organização Mundial de Saúde (OMS) fez uma publicação direcionada à água, “Padrões Internacionais para água potável”, onde instituiu valores numéricos normalizados para a conformidade de água caracterizada como própria para consumo (WORLD HEALTH ORGANIZATION, 1958).

Em 2015, a Agenda 2030 foi adotada por todos os países membros da Organização das Nações Unidas (ONU), e constitui-se em um plano global de desenvolvimento sustentável até 2030. O objetivo consiste em mobilizar esforços globais para alcançar um conjunto de objetivos e metas comuns, tendo sido definidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS). Dos quais a valoração de Águas Residuais (AR) pode contribuir para alcançar a meta dos ODS 6 e 13. Sendo que o ODS 6 visa garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos (Pérez et al., 2023), o acesso ao saneamento e a condições de vida sanitária saudável é considerado um direito humano básico (Segovia-Hernández et al., 2023). Já o ODS 13, que discute medidas de combate às alterações climáticas, abrange o ciclo da água que está diretamente ligado ao clima (Xu et al., 2023). Assim, o reuso de AR é um ponto crucial na gestão hídrica, tendo em conta o aumento da população mundial, a melhoria dos padrões de vida e o maior consumo de água doce (Hassanshahi & Karimi-Jashni, 2018).

As AR englobam os efluentes domésticos, industriais, da agricultura, comerciais, farmacêuticos, hospitalares e qualquer que seja aquele em que a qualidade da água foi alterada por atividade antropogénica (Buelow et al., 2018). A gestão de águas desde a captação, tratamento e distribuição envolve diversas atividades de diferentes níveis, além de muitos recursos de capitais para dar respostas dentro dos padrões exigidos pelas Entidades Reguladoras dos Serviços de Águas e Resíduos (ERSAR).

Os tratamentos de AR são efetuados em Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETAR) que consistem em instalações que englobam uma sequência de operações e processos unitários de tratamento destinados a remover as substâncias poluentes, contaminantes e patógenos existentes nas AR, de modo a tratar o efluente e atingir a qualidade pretendida do tratamento de água. A sequência de tratamento de efluentes é

constituída por operações físicas, químicas e biológicas de tratamento da fase líquida da AR e da fase sólida eventualmente presente. Podem, ainda, incluir-se operações de tratamento e de valorização da fase gasosa, como é o caso de operações de desodorização e de aproveitamento energético de gases combustíveis como o biogás.

De acordo com o tipo de efluente e posterior reuso da AR, a fileira de tratamento pode ser mais ou menos complexa. As operações mais comuns são: Gradagem, tratamento primário, tratamento secundário, tratamento terciário (Também designado por tratamento avançado) (Helena Marecos do Monte et al., 2016).

O tratamento primário compreende o conjunto de operações e processos de tratamento que asseguram uma redução mínima de 20% da Carência Bioquímica de Oxigénio em 5 dias (CBO<sub>5</sub>) e de 50% das partículas Sólidas em Suspensão Total (SST) nas AR (Decreto-Lei n.º 152/97, 1997).

A etapa secundária é baseada em processos biológicos e posterior separação de fases por sedimentação (muitas vezes designada por decantação), usualmente após uma etapa de coagulação ou de flotação. Nesta etapa, a matéria orgânica é digerida por microrganismos, que consistem principalmente em bactérias aeróbicas, que a assimilam e, em parte, a decompõem em compostos mais simples, incluindo gases como o dióxido de carbono.

O tratamento terciário é complementar, consistindo usualmente em operações destinadas à remoção de contaminantes que persistiram ao tratamento secundário, designadamente os compostos de azoto e de fósforo, referidos como nutrientes, e organismos patogénicos. O objetivo desta etapa de tratamento consiste em proteger os corpos hídricos recetores de contaminação de microrganismos patogénicos e precaver o fenómeno de eutrofização. O tratamento terciário pode, também, incluir operações específicas de tratamento complementar das AR de modo a permitir a sua reutilização.

Assim, é de suma importância aprimorar o tratamento das águas residuais com novas tecnologias, aumentando a eficiência do tratamento, procurando a redução de custos e, mais importante, permitir a reutilização dessas águas em atividades permitidas pela lei (Pinho & Mateus, 2022, Pinho & Mateus, 2021). E, desta forma, contribuir para uma economia circular no de tratamento de águas residuais (Pinho & Mateus, 2023).

O reuso de AR tratadas reduz diretamente a pressão sobre as fontes de água potável, conservando os recursos hídricos principalmente em áreas de grande escassez de água. Nesse sentido, a valorização do efluente de AR é uma grande oportunidade de atenuar a demanda hídrica, se for gerido de forma adequada (Lahlou et al., 2022).

Os parâmetros avaliados nas AR para descarte direto nos corpos hídricos devem atender aos padrões físicos, químicos e microbiológicos estabelecidos na Lei (Decreto-Lei n.º 152/97, 1997). O Decreto-Lei n.º 152/97 transpõe a Diretiva n.º 91/271 da CEE (Directiva n.º 91/271/CEE, 1997). O reuso de AR com a minimização de riscos está expresso no

decreto-lei 119/2019, que determina operações adicionais de tratamento com o objetivo de minimizar os riscos envolvidos, impondo barreiras de segurança, reduzindo a possibilidade de contacto com recetores, diminuindo o risco de contacto direto por ingestão, lixiviação, percolação ou carregamento de contaminantes e poluentes por arrasto de massas de águas (Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, 2019).

Neste contexto, as Zonas Húmidas Construídas são uma tecnologia alternativa e promissora para o tratamento de AR e mitigação da poluição. Sendo concebidas para imitar, mas de forma controlada os processos encontrados em Zonas Húmidas Naturais (ZHN) para remediação de poluentes (David et al., 2022).

A designação ZHN ficou definida pela Convenção de Ramsar de 1975, como: Zonas de pântano ou charco, trufeira ou água, natural ou artificial, permanente ou temporária, com água estagnada ou corrente, doce, salobra ou salgada, incluindo águas marinhas cuja profundidade na maré baixa não exceda os seis metros. Podem incluir zonas ribeirinhas ou costeiras a elas adjacentes, assim como ilhéus ou massas de água marinha com uma profundidade superior a seis metros em maré baixa, integrando dentro dos limites da zona húmida. (Convenção Sobre Zonas Húmidas de Importância Internacional, Especialmente Como Habitat de Aves Aquáticas, 1971). As ZHN são, ainda, definidas como um ambiente de transição (Robert H. Kadlec & Robert L. Knight, 1996), e ecossistemas capazes de alterar as propriedades do solo em função de agentes físicos-químicos e biológicos (Peterson, 1998). As ZHN são dos mais importantes ecossistemas do Planeta, com grande valor biológico, ecológico e hidrológico, devido ao seu alto nível de biodiversidade, sendo um importante atuante na mitigação de alterações climáticas, absorvendo gases do efeito estufa e contribuindo para retenção de carbono (Zonas Húmidas Portuguesas de Importância Internacional, 2001).

A tecnologia das ZHC foi desenvolvida de modo a aproveitar as vantagens e as capacidades das ZHN, aplicando-as ao tratamento de águas residuais. A definição mais abrangente de ZHC é atribuída a Fonder e Headley, que apontam três condições primordiais: (i) presença de macrófitas, (ii) substrato encharcado por determinado período e (iii) águas contaminadas para remoção de poluentes (Vymazal, 2022). As ZHC pertencem à categoria mais ampla de sistemas de tratamento natural, combinam vegetação (emergente, flutuante ou submersa), substratos (rochas, solos, materiais sintéticos, entre outros) e comunidades microbianas. O princípio é explorar os processos e materiais naturais sob condições controladas para fins de tratamento de águas residuais (Zhou et al., 2020).

As ZHC têm sido caracterizados como uma tecnologia sustentável e amiga do ambiente, que proporciona múltiplos benefícios económicos, ecológicos, técnicos e sociais. É uma tecnologia em ascensão que pode ser efetivamente utilizada para tratamento de efluentes domésticos, municipais e industriais, bem como para desidratação e secagem de lodo. Essa técnica eco - tecnológica (Xu et al., 2023) é capaz de remover poluentes de forma

satisfatória, com a vantagem de baixa manutenção e gasto energético (H. Wang et al., 2021).

As plantas utilizadas nas ZHC devem possuir elevada adaptabilidade, tolerância ao clima, a pragas, doenças, poluentes e às condições de inundação. As plantas macrófitas são a vegetação mais utilizados nestes sistemas (Borin & Salvato, 2012, Vymazal, 2022, Hans Brix, 1997) pois são as que mais atendem aos requisitos citados, sendo de fácil implementação, manejo, propagação e estabelecimento. Elas apresentam também alto potencial de fitorremediação, e, dependendo da espécie, são tolerantes a uma gama ampla de poluentes sendo, porém, limitadas pela fitotoxicidade desses poluentes (Dubey et al., 2022, Devi & Swapna, 2022). Além da função de tratamento de águas residuais, as ZHC também podem oferecer uma variedade de funções ecológicas, como controle de cheias, coleta de lodo, habitat de vida selvagem, recarga de aquíferos, sequestro de carbono, melhoria de valor estético e valoração de resíduos (Savio et al., 2023).

As ZHC, baseiam-se num ecossistema formado geralmente por plantas macrófitas, substratos e microrganismos, operando-se a remediação de águas residuais através de um conjunto de mecanismos físicos, químicos e biológicos (Vymazal, 2010). Quanto à biodiversidade as macrófitas são classificadas como plantas emergentes, submersas e flutuantes (Biswal et al., 2022), sendo as macrófitas do tipo emergentes as mais usuais nos sistemas de ZHC (Kadlec & Wallace, 2008).

Os sistemas de ZHC são classificados de acordo com a hidrologia, direção do fluxo de água e diversidade de espécies e plantas utilizadas no sistema e tipo de alimentação do leito (Biswal & Balasubramanian, 2022, Kadlec & Wallace, 2008b). Podem ter fluxo de água de superfície livre ou fluxo subsuperficial. Os sistemas ZHC de fluxo subsuperficial são, ainda, divididos em fluxo subsuperficial horizontal e fluxo subsuperficial vertical, como pode ser observado na Figura 1. A classificação das ZHC pode ser de acordo com as características do escoamento hídrico dentro do leito, espécies de macrófitas implementadas no sistema, tipo de substrato de suporte das plantas, nível de tratamento de águas residuais e tipo de alimentação.

No presente trabalho será considerado o fluxo subsuperficial, sendo a configuração mais comum de ZHC. Será, ainda, considerado o fluxo horizontal e com a carga de inundação do leito com o preenchimento único. Nesse modelo de ZHC a deslocação do efluente ocorre ao longo do comprimento leito, atravessando o substrato granular, como pode ser observado na Figura 2.

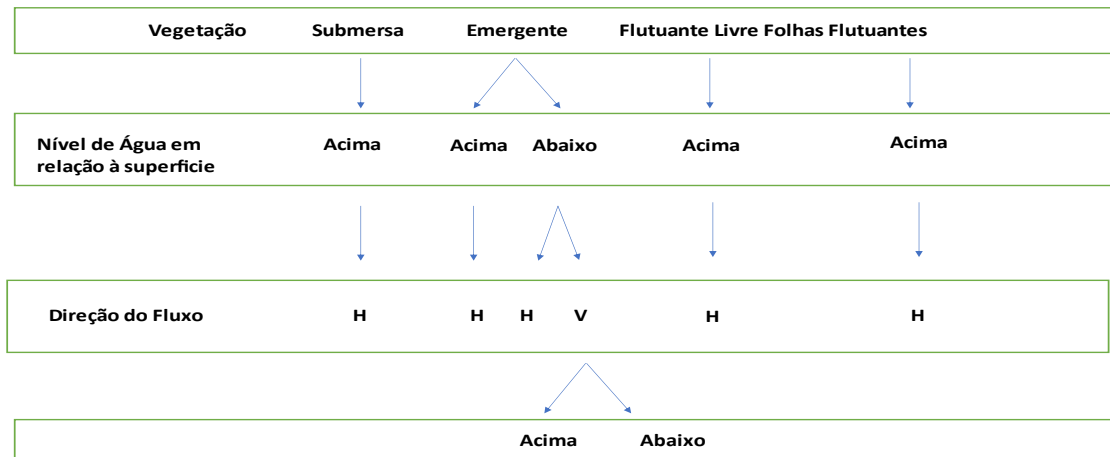


Figura 1: Esquema com as características principais das Zonas Húmidas Construídas. Adaptado de (Vymazal, 2010b).

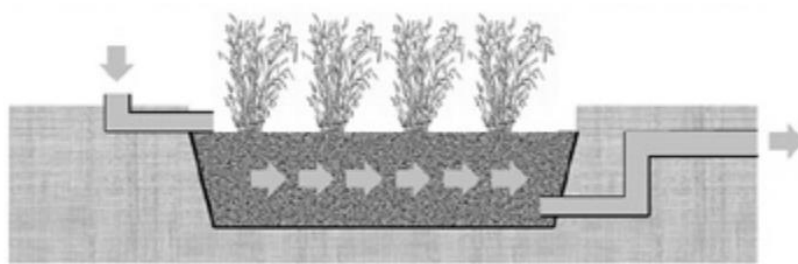


Figura 2: ZHC modelo subsuperficial horizontal. Reproduzido de (Mateus et al., 2020).

Durante o trajeto percorrido dentro da ZHC, as AR entram em contato com ambientes aeróbicos, anóxicos e anaeróbicos. O aeróbico ocorre nos rizomas das plantas macrófitas, que liberam oxigênio para o substrato (Vymazal & Kröpfelová, 2008).

A transferência de oxigênio pelas raízes das plantas macrófitas para a zona da rizosfera influencia os ciclos biogeoquímicos nos sedimentos através do efeito redox (Hans Brix, 1997). Inicialmente a transferência de oxigênio pelas plantas foi dado como mecanismo principal em ZHC. Entretanto pesquisas recentes demonstram que grande parte do oxigênio transferido para as raízes é usada na respiração da planta e apenas uma pequena quantidade é libertada para a rizosfera (Kadlec & Wallace, 2008). Sabe-se ainda que as plantas usadas em ZHC liberam exsudatos pelas raízes, que participam ativamente nas reações físico-químicas e nas atividades microbianas que ocorrem na rizosfera, influenciando o desempenho geral das ZHC (Ji et al., 2022), enquanto a parte área contribui para atenuar a incidência solar direta no leito ZHC, o que impede a proliferação de algas (Hans Brix, 1997b).

As espécies de macrófitas mais empregadas em ZHC são: *Phragmites australis* (Vymazal & Kröpfelová, 2008), *Canna indica*, *Typha latifolia* (Adarsh Singh et al., n.d.), *Juncus spp* e *Typha spp*, pois possuem alta taxa de crescimento (Paul Cooper, 1999, Pinho & Mateus, 2023). Essas plantas exercem importante papel na microbiota das ZHC, pois fornecem abrigo e alimento para a população de microrganismos, contribuindo para uma melhor oxigenação das águas.

A interação dos microrganismos presentes nas ZHC, com origem nas AR e na atmosfera envolvente, com as plantas, poluentes e substratos ocorre em biofilmes que se desenvolvem nas áreas radiculares das plantas e na superfície dos substratos. Os biofilmes são formados por uma grande biodiversidade de comunidades microbianas e alguns tipos de algas, que se mantém unidas pela adesão de substâncias poliméricas extracelulares (Bi et al., 2019). Os biofilmes contribuem de forma ativa na assimilação e transformação dos nutrientes, através de uma série de processos que vão desde a utilização desses nutrientes no seu próprio crescimento, até à transformação dos mesmos em substâncias biologicamente disponíveis para outros organismos (Geraldes & Crispim, 2009). Assim, essa comunidade complexa atua nos processos dentro de sistemas aquáticos, aumentando o desempenho no tratamento de vários tipos de AR (Verduzo Garibay et al., 2022b). A comunidade microbiana pode ser alterada por diversos fatores como pH, profundidade de raízes, qualidade dos substratos envolvidos, temperatura, carbono orgânico disponível, e incidência solar, entre outros.

Sabendo que os sistemas ZHC são uma tecnologia recente quando comparada com a metodologia tradicional de tratamento de AR, e que consistem em sistemas complexos e ainda não totalmente compreendidos, justifica a implementação de metodologias experimentais que permitam aprofundar o conhecimento do funcionamento das ZHC (Bi et al., 2019). Assim, a monitorização com uso de sensores e de tecnologias baseadas na Internet das Coisas (IdC) pode auxiliar na ampliação do conhecimento do funcionamento destes sistemas em tempo real.

O tema da presente tese consiste na monitorização da eficiência de tratamento das ZHC através da avaliação de parâmetros da qualidade da água residual e da água tratada, estabelecendo-se uma base de trabalho que permita utilizar no futuro um conjunto de sensores, e, assim, criar um caminho para melhorar o conhecimento sobre o funcionamento das ZHC.

A presente tese é constituída por cinco capítulos. Neste primeiro procedeu-se ao enquadramento do tema da tese, relevando-se a importância da gestão hídrica, descreveu-se o modelo tradicional de tratamento de AR, e procedeu-se a uma introdução à tecnologia das ZHC e ao seu funcionamento básico.

No segundo capítulo apresentam-se as formas de monitorização de ZHC, com os processos principais associados a remoção de matéria orgânica e nutrientes comuns de

AR nestes sistemas. Abordam-se, também, os meios possíveis de monitorização remota, e a possibilidade de uso de sensores *in loco* para obtenção de dados em tempo real

No capítulo terceiro, apresenta-se a metodologia utilizada para obtenção de dados nas análises realizadas no laboratório BIOTEC do IPT às amostras recolhidas em duas ZHC piloto existentes no IPT, durante dez meses.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos durante a monitorização, e a sua discussão, apresentando a análise do desempenho das duas ZHC.

Por fim, o capítulo quinto diz respeito às conclusões e sugestões para trabalhos futuros de monitorização das ZHC.

## 2 MONITORIZAÇÃO DE ZONAS HÚMIDAS CONSTRUÍDAS

### 2.1 Fundamentos e Parâmetros Monitorizados

A monitorização é uma ferramenta primordial na tarefa de recuperação de AR, e é necessária para uma avaliação detalhada da qualidade da água e da eficiência dos mecanismos existentes nos sistemas ZHC. Essa prática inclui a recolha de amostras de água e a análise da sua composição desde a entrada até à saída do sistema ZHC, permitindo calcular o teor e a eficiência de remoção de poluentes (Roberts et al., 2023).

Os métodos de monitorização incluem diversos parâmetros, entre eles, biogeoquímicas (N.-B. Chang et al., 2013), físico-químicos (Siriwardhana et al., 2023), microbiológicos (V. Kumar et al., 2023, Biswal & Balasubramanian, 2022b, Rajan et al., 2018), e biológicos (Cavalheri et al., 2023). Dada a complexidade da informação envolvida, é usual recorrer-se a análises estatísticas (Qi et al., 2024a) e a modelação matemática (Lin et al., 2024). A monitorização das ZHC pode também incluir os processos hidrológicos, meteorológicos, controle de caudais, tempo de residência hidráulica, cobertura vegetal, topografia e evapotranspiração. Esse conjunto de processos e avaliações visa garantir que o funcionamento esteja dentro do esperado e permitir identificar comportamentos indesejados, como vazamentos, obstruções por raízes ou entupimento das canalizações, densidade exagerada de plantas, entre outros. Com essas informações, a tomada de decisão para planeamento, aperfeiçoamento, operação e modelação dos sistemas ZHC torna-se mais precisa e facilitada.

Em geral, a determinação dos parâmetros de qualidade da água é efetuada por métodos laboratoriais após recolha e transporte das amostras de água. As análises de pH, condutividade elétrica e de oxigénio dissolvido (OD) podem ser realizadas no local por meio de aparelhos portáteis (Qi et al., 2024a), ou em laboratório através de metodologias padrão para análises de AR definidas, por exemplo, pela APHA (American Public Health Association), usadas internacionalmente como referência (Abedi & Mojiri, 2019, Obeng et al., 2023, Q. Li et al., 2023).

Uma das motivações para o uso de sensores e de tecnologias IdC na monitorização das ZHC resulta de a frequência da amostragem e conseqüente análise dos parâmetros de qualidade das águas das ZHC ser variável, mas, usualmente, com frequência reduzida. Conforme se verifica na Tabela I, a monitorização de ZHC, sejam laboratoriais, piloto ou de escala real, é quando muito diária. Ora, dessa forma não é possível avaliar o comportamento ao longo de um dia, tendo-se a noção que a atividade das plantas e da comunidade microbiológica deve depender da radiação solar e da temperatura, entre outros parâmetros ambientais.

*Tabela I: Frequência de amostragem de AR em ZHC.*

<b>Referência</b>	<b>Frequência</b>
Atieh Ebrahimi et al 2023	2 vezes na semana
Dominika Krzeminska et al 2023	De 14 em 14 dias
Jialiang Zuo et al 2023	3 vezes ao mês
Xinxin Peng et al 2023	3 vezes ao mês
Marek Petreje et al 2023	Pontual e automatizado
V. Pettigrove et al 2023	Mensal
Franciszek Bydalek et al 2023	Pontual
Xushun Gu et al 2023	Pontual
Xiaotong Shen et al 2020	A cada 3 dias
Fei Xu et al 2020	A cada 3 dias
Xiaotong Shen	A cada 3 dias
Changmiao Lai et al 2020	A cada 2 ou 3 dias
Jun Xiao et al 2020	A cada 3 dias
Barbro Ulén et al 2019	A cada 15 dias
Peter F. Schwammberger et al 2023	A cada 15 dias
Kushan D. Siriwardhana et al 2023	Diária
Musa Abubakar Tadda et al 2021	Diária
Aimilia Stefanatou et al 2023	A cada 15 dias
Chong Cao et al 2024	A cada 2 dias
Hoang Nhat Phong Vo et al 2019	A cada 5 dias
Dubey, D. et al 2022	Pontual
Kumar, V et al 2023	Pontual
Myung Sik Cho et al 2023	Semanal

O volume de pesquisas e informações publicadas acerca da gestão e operação de ZHC é vasto (Ingrao et al., 2020), no entanto ainda não se conseguiu determinar a melhor metodologia de monitorização destes sistemas. Portanto, é importante continuar a estudar os processos diversos e complexos que influenciam a eficiência de tratamento das AR pelas ZHC, incluindo a hidrodinâmica do escoamento da água através destas (Colares et al., 2020).

A Tabela II contém a listagem dos principais parâmetros de qualidade de água monitorizados em trabalhos recentemente publicados sobre ZHC, permitindo tirar-se uma ideia de quais os parâmetros mais comuns.

Tabela II: Revisão da literatura relativa à monitorização de Sistemas ZHC.

Referência	NT	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PT	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CBO <sub>5</sub>	OD	CQO	CE	pH	Mo	T	Q
Pinho and Mateus, 2021	X					X		X		X		X	X		
Yang et al. 2022	X				X	X		X		X					
Nyika and Dinka 2022	X	X		X	X	X		X		X					
Waly et al. 2022	X			X	X	X		X		X					
Jain et al. 2022	X					X		X		X			x		
Rosendo et al		X	X	X	X							X	X		X
Biswal, Balasubramanian 2022	X			X		X		X		X			X		
Singh et al. 2022	X	X		X		X		X		X			X		
David et al. 2022															
Ji et al. 2022		X	X	X		X	X								
Garibau 2022	X	X	X	X		X						X	X	X	
Kataki et al 2021	X	X			X	X		X		X			X		
Parde et al. 2021	X	X	X	X		X		X		X			X		
Vymazal et al 2021					X	X	X	X		X			X		
Varma et al. 2021	X				X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Shukla et al. 2021	X	X			X	X	X	X	X			X		X	X
Sanjrani et al. 2020	X					X		X		X					
Moreira and Dias 2020	X					X		X		X			X		X
Rizzo et al. 2020					X			X	X	X					
Kumar and Dutta 2019	X			X			X		X			X	X		
Wang et al. 2018	X	X	X		X	X	X	X	X	X		X	X	X	X
Kuno Kasak et al 2018	X					X	X								
Sara Pennellini 2023		X			X	X		X		X		X			
Verduzo Garibay et al 2022												X	X	X	
Haq Nawaz Abbasi 2019	X				X	X									
Tayebeh Abedi et al 2019				X						X	X				

*Tabela II (Continuação): Revisão da literatura relativa à monitorização de Sistemas ZHC.*

Referência	NT	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>3</sub>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	PT	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	CBO <sub>5</sub>	OD	CQO	CE	pH	Mo	T	Q
Ernest Obeng et al 2023	X									X		X	X	X	
Rajitha J. Rajan 1 2018													X		
Basanta Kumar Biswal et al 2022	X					X				X			X		
Li Wen et al 2023															X
Yarong Qia et al 2024	X			X		X			X	X	X	X			
Jinlan Lin et al 2024															
Peter F. Schwammberger el al 2023	X					X									
Hao Wang et al 2021	X	X		X	X					X		X	X		
Kushan D. Siriwardhana et al 2023		X					X		X	X	X	X		X	
Musa Abubakar Tadda		X	X	X	X					X		X			
Xinwen Zhang et al 2023	X	X	X		X				X			X			
Ula Rozman et al 2023		X	X		X		X		X			X			
Parque Jong et al 2017							X					X			
Munira Alateeqi et al 2023	X						X		X	X					
M. Sánchez et al 2021	X			X	X		X		X	X		X			
Aimilia Stefanatou et al 2023	X				X	X				X		X			

*NT (Azoto Total), NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Nitratos), Nitritos (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), Amónia (NH<sub>3</sub>), Amónio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>), PT (Fósforo Total), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (Fosfatos), CBO (Carência Bioquímica de Oxigênio), CQO (Carência Química de Oxigênio), CE (Condutividade Elétrica), pH (Potencial Hidrogeniônico), Mo (Microrganismos), T (Temperatura), Q (Caudal).*

Entre o conjunto de parâmetros de avaliação da qualidade da água listados na Tabela II, os mais comuns na monitorização das ZHC são os mesmos que se avaliam nas tecnologias convencionais de tratamento de AR (Vymazal, 2007, Vo et al., 2019, Vymazal, 2020, Sakurai et al., 2021, Owodunni et al., 2023, Pinho & Mateus, 2021, Qi et al., 2024b, Cao et al., 2024, Abbasi et al., 2019, B. Hu et al., 2023).

O NT e o PT consistem em parâmetros agregados, pois não identificam nenhum composto específico, e fazem parte de um conjunto de parâmetros usualmente designados por nutrientes.

O NT, cuja determinação implica um processo de digestão da amostra de modo a oxidar todas as formas de azoto (N), obtendo-se sais de nitratos e a quantificação destes, consiste na soma do N orgânico (N presente nas proteínas, ácidos nucleicos e outras moléculas orgânicas), N amoniacal ( $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ ), e N na forma de nitritos e de nitratos (Anna Cristina Lanna, 2002). O N é um dos macronutrientes essenciais para o crescimento das plantas, usado como fertilizante (usualmente na forma de nitratos) para promover o crescimento vegetativo (Francis et al., 2023). Essa prática, quando abusiva, disponibiliza em excesso o teor de nitratos e com a lixiviação esses compostos alcançam as águas superficiais e subterrâneas muitas vezes destinadas à captação de água para consumo humano (D. Wang et al., 2024), (Srivastav, 2020). Os nitratos são produtos da segunda etapa da oxidação do amoníaco, sendo a primeira fase a conversão em nitritos.

A amónia é produzida durante o processo de decomposição de matéria orgânica dissolvida, resultante da decomposição aeróbia e anaeróbia da parte nitrogenada da matéria orgânica por organismos heterotróficos (Francisco de Assis Esteves, 1998). A amónia é incolor (Bischoff, 2022), alcalina e provoca irritação em condições normais de pressão e temperatura. A oxidação da amónia aumenta a concentração de nitratos e nitritos e reduz a alcalinidade, tornando os valores de pH baixos (Thorarensen et al., 2023) sendo um composto muito solúvel em água. Existe na forma molecular, associada à água e também na forma ionizada na forma de amónio. Ocorre em AR domésticas, AR industriais.

No entanto, concentrações elevadas de amónio em corpos hídricos pode ser tóxico e provocar a morte de peixes, pois diminui os níveis de oxigênio dissolvido (Cláudia Bueno dos Reis Martinez et al., 2006). E, nas águas de consumo, pode causar graves danos à saúde humana e animal, visto que a amónia, ao sofrer nitrificação e desnitrificação, aumenta os níveis de nitratos e nitritos que interfere no transporte de oxigênio pela hemoglobina (Tadda et al., 2021), (Mugwili et al., 2023) podendo ser tóxica dependendo da sua concentração (Karri et al., 2018).

O nitrito, uma fração do NT, é gerado a partir da oxidação da amónia, processo denominado de nitrificação, onde se produz nitratos a partir do amoníaco ( $\text{NH}_3$  no estado gasoso), através da atuação de bactérias nitrificantes. É uma substância tóxica pois

interfere em diversas funções fisiológicas, como respiração, processos cardiovasculares, endócrinos e excretórios (Zhang et al., 2023).

Outra fração importante do NT total são os nitratos cuja presença é natural no meio ambiente em consequência do ciclo do nitrogênio. É a forma predominante de nitrogênio em fontes difusas, devido aos lixiviados agrícolas originados do uso de fertilizantes, sendo responsável por até dois terços da carga de N em Águas superficiais (J. Chang et al., 2013)

Outro elemento químico muito importante nessas análises é o fósforo (P), elemento químico não metálico, limitado e não renovável (D. Kumar & Kumar, 2023), sendo encontrado principalmente na forma de minerais fosfatados (X. Li et al., 2023). O fósforo é liberado por ações de intemperismo, erosão natural e ação humana. Na medida que é libertado no ecossistema, o fósforo encontra-se disponível para assimilação das plantas, e assim podem chegar aos corpos hídricos por infiltração ou lixiviação. É muito usado como parte integrante de compostos fertilizantes (Haynes & Naidu, 2024) para aumento da produtividade agrícola. Porém, quando lixiviados dos solos agrícolas, podem alcançar os corpos hídricos e aumentar a produção de algas reduzindo a disponibilidade de oxigênio, o que consiste no fenômeno designado por eutrofização de ecossistemas aquáticos (Gao et al., 2023). A eutrofização pode causar a morte de espécies da fauna aquática.

Os compostos de fósforo são removidos pelas ZHC principalmente por meio de adsorção e precipitação nos substratos, e por assimilação pelas plantas (Rozman et al., 2023). O fosfato é a única forma de fósforo que se acredita ser assimilado diretamente pelas macrófitas, representando um importante elo entre a ciclagem de fósforo orgânico e inorgânico nas ZHC.

O parâmetro CQO indica a quantidade de matéria suscetível de ser oxidada por meio de um oxidante forte, como por exemplo o dicromato de potássio, permitindo avaliar de forma agregada o conjunto de substâncias reativas presentes nas águas (Z. Hu & Grasso, 2005). É um parâmetro crítico em matéria de tratamento de AR e contaminação de corpos hídricos (Dhanjai et al., 2018). A CQO também representa a quantidade teórica de oxigênio necessária a tratar a AR apenas por oxidação dos poluentes a formas mais simples (como dióxido de carbono, nitratos, fosfatos, etc.), sendo um parâmetro amplamente utilizado para monitorização e acompanhamento do desempenho da depuração e da qualidade das águas em geral.

A condutividade elétrica é proporcional à concentração de íons presentes na água, sendo esse parâmetro também usado para medir a salinidade da água e verificar se atende as condições mínimas para reaproveitamento de AR para irrigação (Sakurai et al., 2021). De forma genérica, a CE permite uma simples avaliação do grau de mineralização da água, devido à relação existente entre a proporcionalidade do teor de minerais dissolvidos numa solução e a condutividade que a mesma apresenta. A CE também pode ser classificada

como um indicador agregado da qualidade das águas, pois depende da concentração total de sais ionizados na água e da sua valência, mas não permitindo determinar a composição da água (Lucília Maria Parron et al., 2011). Em todo o caso, trata-se de um dos principais parâmetros físico-químicos analisados nas ZHC (Siriwardhana et al., 2023b).

O pH (potencial hidrogeniônico) é uma escala numérica adimensional proporcional à concentração dos iões  $H^+$ . A determinação do pH permite verificar o nível de acidez ou basicidade da água, sendo possível avaliar, por exemplo, se as águas estudadas são prejudiciais ao tratamento biológico ou qualquer outro tratamento. É um fator importante pois afeta o desempenho das ZHC em termos de remoção de N e matéria orgânica (Robert H. Kadlec & Robert L. Knight, 1996, Sánchez et al., 2021). Alguns estudos mostraram que o pH ideal para o processo de desnitrificação é variável, mas situa-se entre 6 e 8 (Almuktar et al., 2018).

A temperatura é um fator que tem um impacto direto e significativo no desempenho de ZHC, sendo as baixas temperaturas um fator negativo na eficiência de remoção de nutrientes, visto que no inverno é uma fase de dormência do processo de crescimento das plantas, e baixa remoção de CQO, verificando-se um desempenho superior com as temperaturas mais altas de verão (Q. Wang et al., 2016).

Além do conhecimento dos principais parâmetros analisados em monitorização de ZHC, é de grande importância conhecer a origem do tipo de AR a ser tratada, pois podem ter diversos poluentes e são classificadas em termos de composição física, química e biológica, com matéria orgânica, P, N e sólidos suspensos (Matamoros et al., 2017). As fontes de carga de P, por exemplo, são diversas, podendo ter origem em atividades agrícolas e agropecuárias, AR domésticas e ARI (águas residuais industriais) sendo encontrado na forma orgânica e inorgânica (Di Luca et al., 2017).

No caso das ZHC, a remoção de nutrientes ocorre principalmente devido ao crescimento das plantas macrófitas, seguido de degradação microbiana e de filtração pelo substrato (Vymazal, 2020). Outros fatores, como taxa de retenção hidráulica, pH e temperatura são secundários e podem ser ajustados (Fahim et al., 2023).

A remoção dos compostos de fósforo presentes nas AR envolve processos bióticos (assimilação pela vegetação e pela comunidade microbiota, mineralização do P orgânico) e processos abióticos (sedimentação, precipitação, adsorção, e trocas entre o solo e a coluna de água superior) (Abbasi et al., 2019).

Existem diversos fatores que influenciam a remoção e retenção de N nas ZHC, devido à coexistência de diversos processos e mecanismos, como volatilização de  $NH_3$ , nitrificação, desnitrificação, fixação de nitrogénio, assimilação pelas macrófitas e comunidade microbiana, amonificação, nitrato-amonificação, e um mecanismo combinado designado anammox (de *ANAerobic AMMonium OXidation*) (J. Li et al., 2023, Verduzo Garibay et al., 2022b, Vymazal, 2007).

## 2.2 Monitorização Remota de ZHC

A monitorização remota é realizada por meio de processos dos quais é possível coletar dados de uma determinada local (objeto de estudo), por meio do uso de sensores, satélites, drones, aviões ou veículos terrestres sem a presença física de um observador.

A obtenção de dados por sensoriamento remoto já está a ser explorada por agências governamentais para monitorização e melhoria da precisão de dados para base de inventário das ZHN (Chasmer et al., 2020). Por exemplo, através da utilização de imagens obtidas através de satélites, como o sistema Landsat, com resolução de 30 m quando a cobertura de nuvens é inferior a 15% (Amani et al., 2022). Essas imagens são processadas em programas como o ArcGis, combinando dados geográficos da região e da ZHN a ser estudada. No entanto devido à interferência das nuvens e por estimativa a capacidade de obter ou estimar parâmetros de qualidade da água por esta via, esse modo de monitorização é muito limitado (Fu et al., 2023).

Por outro lado, a utilização de sensores (IdC), designadamente os que permitem a determinação ou estimativa da composição da água, consiste num modo mais efetivo de proceder à monitorização de ZHC (Xiaoying & Huanyan, 2011).

Além de os avanços tecnológicos na área da microeletrónica permitir o desenvolvimento de sensores com menor custo e abrangendo cada vez mais parâmetros, a proliferação de sistemas baseados em IdC e redes de comunicação de dados poderá potenciar a generalização da monitorização remota. A IdC representa um conjunto de estruturas e ferramentas tecnológicas baseadas em regras, probabilidades, estatística, multimídia e sistemas inteligentes, sendo vinculados por meio de protocolos de comunicação (M. Kumar et al., 2023).

As vantagens da monitorização remota, quando comparada ao método tradicional de observação, incluem a redução do custo com as análises laboratoriais, a rapidez na obtenção dos dados e a possibilidade de se aumentar a frequência de amostragem (Koskiaho & Puustinen, 2019).

A monitorização automática por uso de sensores de medição contínua para amostras de AR à entrada e às saídas de ZHC foram utilizados na Finlândia para registar o nível da água, a turbidez e a concentração de nitratos (Koskiaho & Puustinen, 2019). Assim como é relatado o uso de sensores para monitorização de entupimento das tubagens de sistemas de ZHC (Hughes-Riley et al., 2016). Em experimento realizado por (Razzaghmanesh & Borst, 2018), os autores relatam que os dados mensurados pelos sensores foram registados em sistema local programado para enviar os dados em tabelas com o conteúdo volumétrico de água, a CE e a temperatura em intervalos de 1 min e 10 min.

Existe outra forma de obter dados remotamente de ZHC e de ETAR convencionais, que se baseiam nas técnicas analíticas laboratoriais. Esses sistemas, que na prática consistem em laboratórios autónomos (amostradores e analisadores automáticos), possuem sistemas mecânicos de recolha automática de amostras de água e sistemas de aplicação dos procedimentos analíticos laboratoriais. Os relatos de uso destes equipamentos referem,

por exemplo, a coleta de amostras de volumes de 1 litro de AR a cada 4 horas (Page et al., 2010), ou de 1 litro a cada 8 horas (Djerf et al., 2023) à entrada e saída das ZHC. Há, ainda, amostradores automáticos em que os sensores funcionam baseados em absorbância na faixa UV visível (200-750 nm) e são usados para medições de nitratos e de turbidez (Ulén et al., 2019).

No que respeita ao uso de sensores, há estudos de mais de uma década sobre as suas possíveis aplicações à base de lantanídeos em diversos campos, incluindo os biológicos, ambientais e farmacêuticos. Existem também trabalhos em curso sobre a aplicação de lantanídeos em sensores para deteção de fosfatos em meio aquoso (Sahoo et al., 2022). A pesquisa cita algumas aplicabilidades, como a deteção de fosfatos em lagos e rios, o que leva a crer a possibilidade da sua aplicação em ZHC.

Outros autores utilizaram na monitorização das ZHC sensores óticos para a deteção de nitratos, baseados na absorção de radiação ultravioleta (UV), com uso de equipamento da fabricante Hach Nitratax SC Plus (Drake et al., 2018), (Khan et al., 2022). Na mesma publicação, Khan et al. (2022) utilizam sensores para monitorizar a concentração de oxigénio dissolvido, caudal (Q) e a temperatura.

Atualmente há estudos sobre o uso de biossensores eletroquímicos e sensores baseados em biocátodos na deteção de contaminantes emergentes em AR a fim de verificar a existência de toxicidade por perfluorocarbonetos (PFCs), subprodutos de desinfecção (Dibutilftalatos, DBPs) ou contaminação por microrganismos (Han et al., 2023, Liao et al., 2018). Refere-se, ainda, o uso de biossensores do tipo MFC (Células de Combustível Microbiana) in situ, para monitorização online de CQO de AR sintéticas, sendo, porém, necessário prosseguir com pesquisas de modo a diminuir o custo dos elétrodos (Corbella et al., 2019).

Na Tabela III, pode-se verificar os usos de sensores mais comuns. Observa-se que os sensores mais comuns são de oxigénio dissolvido, de condutividade elétrica, e de pH. Estes tratam de sensores usuais, há muito usados em laboratório. Também se verifica o uso de sensores de nitratos. Destaca-se ainda o uso de sensores para metanal e CQO.

Tabela III: Estudos recentes de monitorização de ZHC com uso de sensores in situ.

Referência	Parâmetros avaliados
Kushan D. Siriwardhana et al 2023	CE, pH, OD
Yilian Han et al 2023	CH <sub>2</sub> O
Cheng Mei Liao et al 2018	CH <sub>2</sub> O
HIUH Khan et al 2022	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Richard Agyemang Osei et al 2022	CE
Barbro Ulén et al 2019	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
CW Drake et al 2018	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Lei Xu et al 2021	M.O
C. Corbela et al 2019	CQO
Khaja Zillur Rahman et al 2023	CE
Ke Zhang et al 2022	OD, pH, T
TAH Nguyen et al 2022	T
Johannes Boog et al 2020	OD
Liam Doherty et al 2015	OD

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os principais métodos e materiais utilizados na realização das atividades experimentais.

A primeira etapa da investigação consistiu numa avaliação sucinta do “estado da arte” sobre os principais parâmetros analisados em ZHC, e da possibilidade em se proceder à determinação desses parâmetros de modo remoto, constituindo essa matéria o capítulo 2.

Na sequência, numa segunda etapa, procedeu-se à monitorização quinzenal de dois sistemas ZHC em escala piloto, localizados no pátio interno do Bloco J do IPT, denominados sistema ZHC P e sistema ZHC E.

A terceira etapa constituiu na análise e processamento dos dados obtidos, que incluiu a validação de correlações das análises efetuadas relativas aos teores de nutrientes para avaliação da possibilidade de no futuro se proceder à monitorização das ZHC através de uma rede de sensores.

#### 3.1 ZHC Piloto

Os estudos foram realizados com base em duas ZHC piloto, como já referido. A ZHC P foi instalada no pátio do IPT em 2017 no âmbito do projeto ValorBio, sendo construída com base numa estrutura modular em madeira, forrada por tela impermeável, com instalação de tubagens de entrada e saída para circulação da água. A tubagem de saída foi colocada no fundo do sistema ZHC P em posição oposta à alimentação do efluente (Mateus et al., 2020). Possui este sistema a dimensão de 1,2 m de comprimento × 0,98 m de largura × 0,60 m de altura, conforme Figura 3. O regime de escoamento aplicado foi o subsuperficial horizontal por meio de gotejamento.

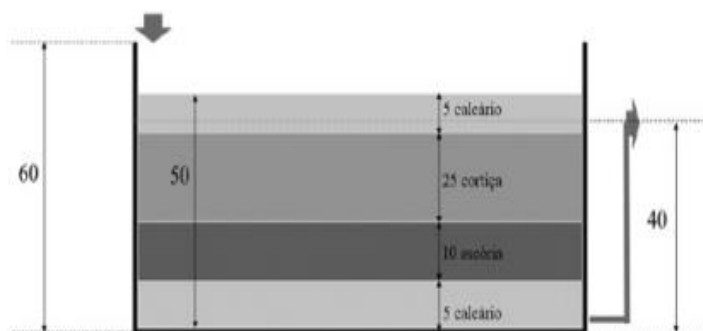


Figura 3: Esquema de camadas de substratos do sistema ZHC unidade P. Adaptado de (Mateus et al., 2020).

O leito (substrato) da ZHC P é constituído por quatro camadas intercaladas de resíduos. A primeira camada, a contar da parte inferior, é de 5 cm de fragmentos de pedras Moleanos (FPM), que consiste numa rocha calcária, 10 cm de escórias de carvão, 25 cm de aglomerado de resíduos de cortiça, e a última camada de 10 cm de FPM. O leito foi

plantado com macrófitas da espécie *Phragmites australis*, usualmente designado por caniço comum (Figura 4).

A AR usada no estudo é sintética e equivalente a uma água residual após tratamento secundário.



Figura 4: Sistema ZHC P, com estrutura modular em madeira, plantado com macrófitas *Phragmites australis*.

A ZHC E está em funcionamento desde outubro de 2009, e consiste numa estrutura retangular em PVC, com dimensão de 1,2 m de comprimento  $\times$  1 m de largura  $\times$  0,60 m de altura, localizada no mesmo pátio interior do IPT que a ZHC P.

No fundo da estrutura foi instalado um tubo coletor, à saída em frente à direção do tubo de alimentação de AR, de modo a manter o nível de água a 0,40 m. O leito foi preenchido com 779 Kg de FPM, com altura de 0,50 conforme Figura 5 (Mateus et al., 2012).

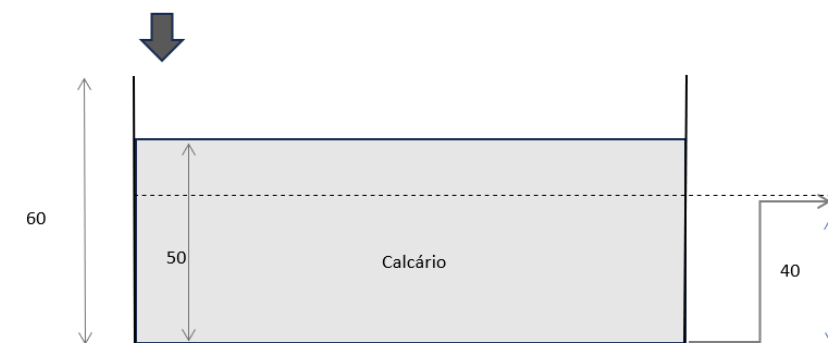


Figura 5: Esquema de camada única de FPM do sistema ZHC E.

A pedra de Moleanos é uma rocha calcária extraída do Maciço Calcário Estremenho, situado em povoação de mesmo nome na região central de Portugal. O FPM consiste em resíduos do corte da pedra de Moleanos, cujo principal uso é a sua aplicação na construção civil como pedra ornamental em soleiras, escadas, bancadas e outros acabamentos de edifícios.

Tal como na ZHC P, a vegetação da ZHC E consiste em caniço comum, como pode ser observado na Figura 6. À data da fotografia as plantas estavam em fase de início de crescimento, após a poda anual.



Figura 6: Sistema ZHC E, em estrutura de PVC com macrófitas *Phragmites australis*.

As atividades de I&D foram realizadas no período de 10 meses, iniciadas no mês de julho de 2022 e finalizadas em maio de 2023. A alimentação da ZHC E consiste numa AR sintética, semelhante à alimentada à ZHC P. A coleta de amostras foi efetuada à entrada e à saída da ZHC E, nas mesmas datas e horas em que se recolheram as amostras da entrada e saída da ZHC P.

### 3.2 Determinação do Caudal à Entrada e à Saída das ZHC

As coletas de amostras foram realizadas por recolha de água na saída dos tubos de circulação na alimentação e na saída de cada ZHC (Figura 7).

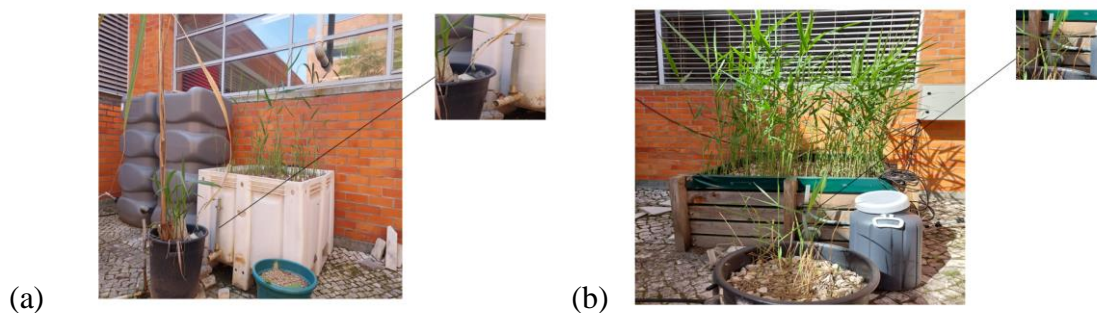


Figura 7: Sistema ZHC E (a) e ZHC P (b), detalhe de coleta à saída por inundação. Fonte: Autora

Os caudais de entrada e de saída de cada ZHC foram obtidos por quantificação do volume de água recolhido num determinado período. O volume de água foi determinado por pesagem, considerando-se a massa específica da água igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

O caudal foi calculado para cada amostra recolhida. As coletas foram realizadas maioritariamente pela manhã, e quando houve precipitações na noite anterior as amostras apresentavam-se muito turvas, sendo necessário proceder a uma filtração prévia. Os caudais foram calculados por meio da Equação (1).

$$Q_M = \frac{V}{T} \quad (1)$$

Onde:

- $Q_M$  = Caudal Médio;
- $V$  = Volume recolhido;
- $T$  = Tempo.

### 3.3 Métodos de Análise da Água

A metodologia utilizada para as análises laboratoriais, efetuadas no Laboratório BIOTEC.IPT do IPT.

O pH e condutividade elétrica foi utilizado um medidor multiparamétrico da Hanna Instruments (Alemanha) modelo Agroline Monitor, para a determinação daqueles parâmetros em todas as amostras coletadas das entradas e das saídas das ZHC

As análises de determinação da CQO e dos teores de nutrientes foram realizadas por meio de adaptação das metodologias convencionais através de *Kits* de reagentes da marca Hanna Instruments (Alemanha). Para o efeito, seguiram-se os procedimentos do fabricante dos *kits* de reagentes, abaixo descritos de forma resumida. A digestão das amostras foi efetuada num termo-reator modelo HI839800, e a quantificação por fotometria num fotómetro modelo HI83399, ambos da Hanna Instruments (Alemanha).

As análises de NT foram realizadas por meio do método do ácido cromotrópico, após digestão da amostra com persulfato de potássio e metabissulfito de sódio, seguida de quantificação por fotometria (420 nm). A concentração de amónia foi avaliada através de adaptação do método de Nessler, e fotometria a 420 nm. Os nitratos foram analisados por meio de adaptação do método de redução com cádmio, seguida de fotometria (525 nm), e os nitritos por adaptação do método EPA 354.1 e fotometria (466 nm). O PT e os fosfatos foram determinados por meio do método do ácido ascórbico, após digestão com persulfato de potássio no caso do PT, e fotometria (610 nm). No caso da determinação da CQO, as análises foram realizadas por método adaptado do procedimento EPA 410.4, incluindo digestão com dicromato, e fotometria (420 nm).

As eficiências de remoção de NT, PT e CQO pelas ZHC P e ZHC E foram calculadas por meio do uso da Equação (2).

$$\%R = \frac{C_E * Q_E - C_S * Q_S}{C_E * Q_E} * 100 \quad (2)$$

Onde:

- $\%R$  = Percentagem de remoção;

- $C_E$  = Concentração à entrada;
- $C_S$  = Concentração à saída;
- $Q_E$  = Caudal à entrada;
- $Q_S$  = Caudal à saída.

Os dados obtidos foram lançados em folha do programa Microsoft® Excel, onde se procedeu ao cálculo da eficiência de remoção dos poluentes, possível correlação, cálculos de incerteza e desvio padrão para as medias obtidas de cada parâmetro analisado, e onde se prepararam os gráficos com os resultados.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As amostras de AR foram analisadas no Laboratório BIOTEC do IPT, e com o apoio do Ci2, Centro de Investigação em Cidades Inteligentes do IPT. Os parâmetros avaliados foram, especificamente, pH, CE, NT,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_3$ , PT,  $\text{PO}_4^{3-}$  e CQO.

### 4.1 Determinação do Caudal

Os valores de caudal, à entrada e à saída das ZHC, obtidos através da Equação (1), são apresentados na Tabela IV.

Tabela IV: Frequência de amostragem e caudais.

Data/Estação de coleta	ZHC P		ZHC E		
	Entrada (L/d)	Saída (L/d)	Entrada (L/d)	Saída (L/d)	
Verão	12/07/2022	28,37	2,98	28,57	0
	22/07/2022	28,37	2,98	28,57	0
	04/08/2022	47,35	40,32	43,76	20,58
	06/09/2022	29,72	9,24	31,71	16,10
	27/09/2022	30,05	30,05	25,29	16,10
	11/10/2022	34,9	9,57	26,60	26,94
Outono	25/10/2022	32,88	88,37	31,33	32,40
	15/11/2022	32,69	41,84	29,34	29,29
	02/12/2022	25,27	29,77	29,55	31,49
	19/12/2022	25,27	29,78	25,27	29,78
	30/01/2023	15,02	18,57	14,30	14,36
	22/02/2023	9,93	14,48	8,77	13,43
Inverno	24/02/2023	17,12	16,4	15,82	10,98
	09/03/2023	15,01	23,6	14,08	14,13
	27/03/2023	14,51	8,43	13,89	11,55
Primavera	11/04/2023	22,78	5,78	21,99	2,73
	08/05/2023	20,48	4,8	27,39	8,35

Verificou-se que o caudal de saída de ambas as ZHC são menores durante o período do verão em comparação com o período de inverno. Isso pode ser explicado pelo possível aumento da taxa de evaporação da água e aumento da demanda hídrica das plantas durante a estação de calor (fenômeno designado por evapotranspiração).

Observou-se um pico de caudal de saída da ZHC P no dia 25 de outubro, como pode ser observado na Figura 8, que deve ter sido causado pela ocorrência de precipitação intensa antes da coleta da amostra, ou por acumulação de água no sistema antes da amostragem. Notou-se que o caudal da saída da ZHC P passa a ser maior que o caudal da entrada a partir do mês de outubro, e o caudal de entrada voltou a ser maior que o caudal da saída no final do mês de março. Este comportamento pode ser explicado pelas menores

taxas de evapotranspiração das plantas nas estações de outono e inverno, além de maior volume de precipitação, menor taxa de incidência solar, e diminuição da atividade foto sintetizadora das plantas.

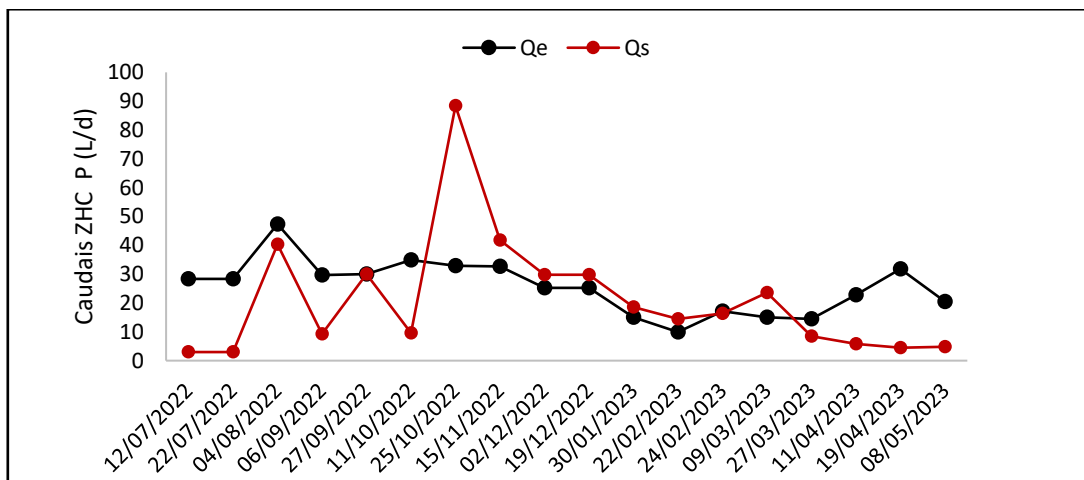


Figura 8: Gráfico dos caudais do sistema ZHC P.

O valor médio de caudais obtidos à entrada do sistema ZHC P é de  $25,6 \pm 4,6$  L/d, e na saída o valor médio obtido foi de  $21,2 \pm 10,4$  L/d.

No sistema ZHC E, o caudal da saída passou a ser maior que o caudal de entrada no mês de outubro, cujo comportamento é semelhante ao sistema ZHC P, como pode ser observado no gráfico da Figura 9, no entanto não ocorreu pico de aumento de caudal no dia 25 de outubro.

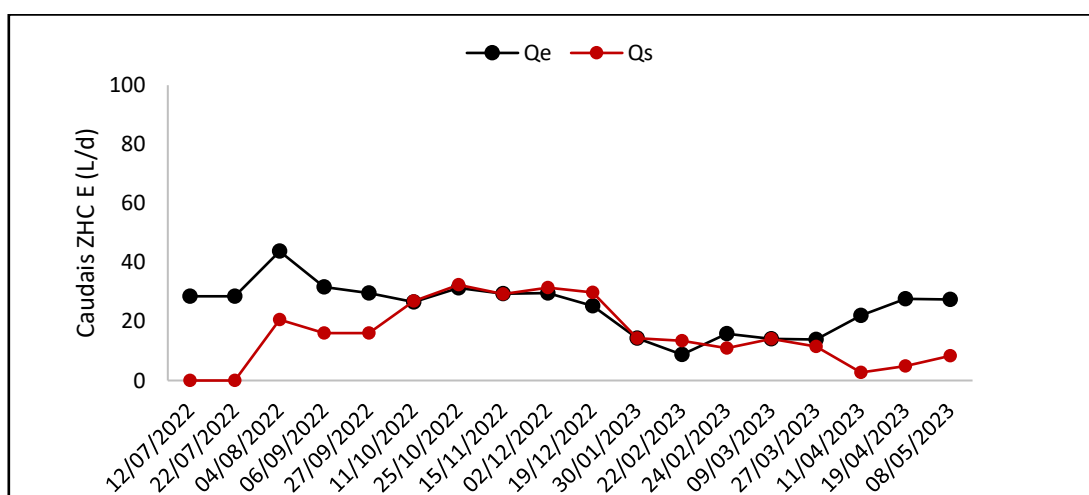


Figura 9: Gráfico com a monitorização dos caudais do sistema ZHC E.

Verifica-se que nos meses de julho, agosto e setembro o caudal de saída foi expressivamente baixo. Tal como referido no caso da ZHC P, a justificação pode ser a elevada demanda hídrica das plantas, pois estavam aparentemente em crescimento e a atingir um porte elevado. Ainda se observa que do mês de outubro até maio há uma tendência de inversão de caudais de entrada e saída, certamente devido ao período chuvoso.

O valor médio de caudais obtidos às entradas do sistema ZHC E é de  $24,9 \pm 4,3$  L/d, e na saída o valor médio obtido foi de  $15,7 \pm 5,1$  L/d.

## **4.2 Eficiência de Remoção de NT**

As análises de Azoto Total demonstram que ambos os sistemas ZHC são eficientes na remoção de NT, mas diferindo em desempenho entre eles.

A ZHC P apresentou menor valor de remoção, 59%, no dia 02 de dezembro de 2022, e maior valor em 12 de julho 2022, com remoção de 100%, o que pode ser observado no gráfico da Figura 10. Nesta ZHC um dos substratos consiste em resíduos de cortiça recozida, os quais possuem características lignocelulósicas (Bessadok et al., 2023) o que pode favorecer a formação de biofilme na rizosfera das macrófitas, e aumentar a interação dos microrganismos com as plantas, além da contribuição das escórias de carvão aumentando, assim, o índice de remoção de NT como observado em julho de 2022. Desta forma, em oposto ao mês de julho, e num período de queda de folhas em dezembro, houve redução da eficiência em remoção de NT. A justificação possível é que no estágio de médio porte das plantas, em julho, a demanda nutricional ainda é grande, fazendo com que o Nitrogénio disponível seja assimilável em grande parte pelas plantas. No entanto, já no estágio de planta adulta, que ocorre em dezembro, a remoção pelas plantas é diminuta. Neste período, a remoção de compostos de azoto deve resultar, provavelmente, apenas por adsorção ao substrato e pela ação dos microrganismos.

O valor médio obtido da AR de alimentação em teores de NT, à entrada do sistema ZHC P é de  $19,20 \pm 2,04$  mg/L, e valor médio obtido na AR tratada é de  $2,05 \pm 0,90$  mg/L.

No sistema ZHC E os dados obtidos mostraram o menor valor de remoção com 65% de NT no dia 22 de fevereiro de 2023 e maiores valores apresentados nos dias 12 e 22 de julho de 2022 com 100% de remoção de NT. Como pode ser observado na Figura 11.

O valor médio obtido na AR de alimentação em teores de NT à entrada do sistema ZHC E é de  $24,9 \pm 3,4$  mg/L, e o valor médio obtido na AR tratada é de  $3,2 \pm 0,9$  mg/L.

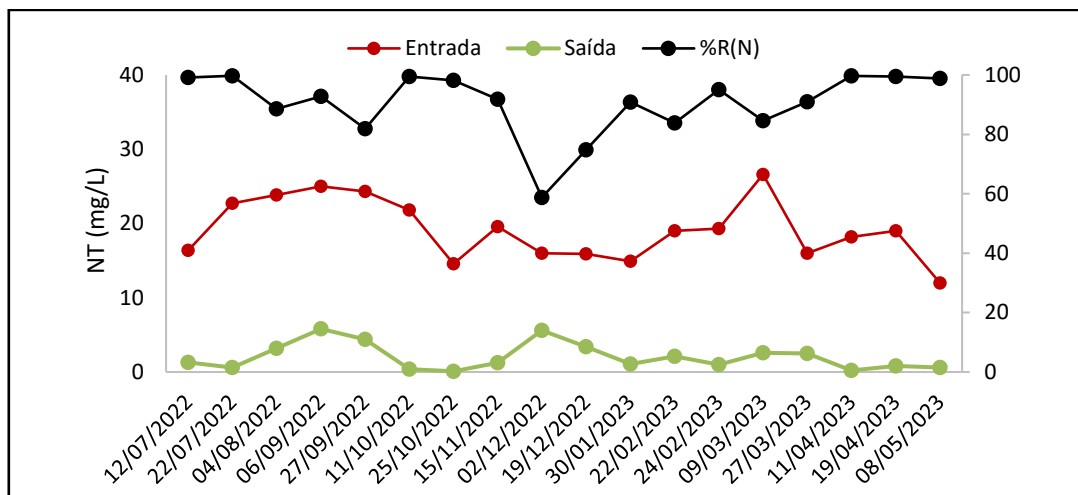


Figura 10: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção de Azoto Total na ZHC P.

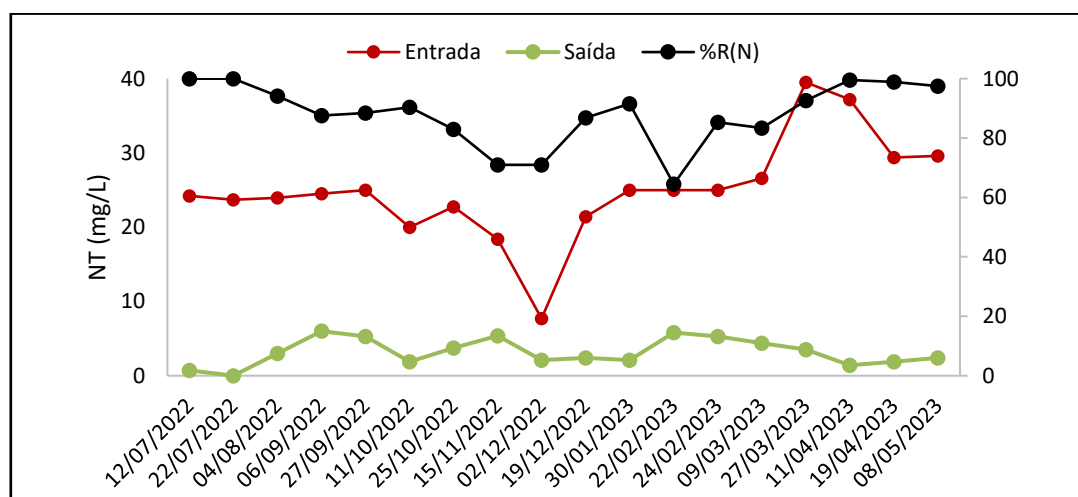


Figura 11: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção de Azoto Total na ZHC E.

### 4.3 Análise das Concentrações de Nitratos, Nitritos e Amónia

As análises realizadas para deteção de nitratos nos sistemas ZHC E e P apresentaram valores de 0%. Nas análises de nitritos os valores apresentados foram muito baixos, menores que 1 µg/L, em ambos os sistemas ZHC E e P. As análises às amostras recolhidas no sistema ZHC P apresentaram à entrada o menor valor de nitritos de 0,007 µg/L no dia 19/12/2022 e o maior valor obtido foi de 0,341 µg/L (Figura 12).

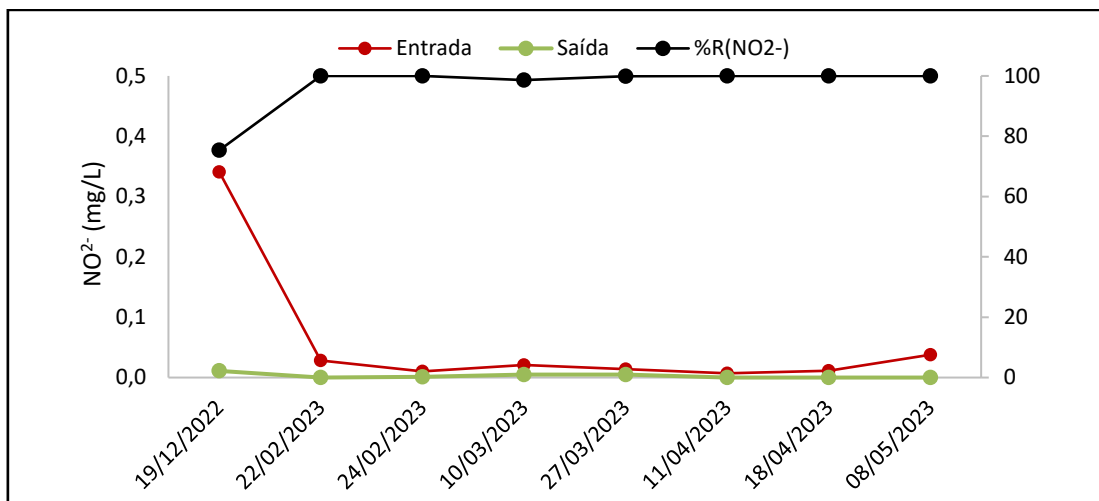


Figura 12: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção Nitritos na ZHC P.

Na água tratada, o menor valor apresentado na ZHC P foi de 0,001  $\mu\text{g/L}$  no dia 24 de fevereiro de 2023 e o maior valor em 19 de dezembro de 2012 com 0,011  $\mu\text{g/L}$ .

Quanto a remoção, o menor valor apresentado de remoção foi de 62,6% no dia 10 de março de 2023, e o maior valor de remoção foi de 100% nos dias 18 de abril e 05 de maio de 2023.

O valor médio obtido na AR de alimentação em teores de Nitritos, à entrada do sistema ZHC P é de  $4,8 \pm 0,1 \mu\text{g/L}$ . O valor médio obtido na AR tratada pelo sistema ZHC P é de  $0,006 \pm 0,006 \mu\text{g/L}$ .

As análises às amostras recolhidas no sistema ZHC E apresentaram à entrada o menor valor nitritos de 0,006  $\mu\text{g/L}$  no dia 27 de março de 2023, e o maior valor obtido foi de 0,016  $\mu\text{g/L}$  no dia 02 de dezembro de 2022. Já às saídas, o menor valor apresentado foi de 0,007  $\mu\text{g/L}$  no dia 19 de dezembro de 2022 e o maior valor em 10 de março de 2023 com 0,13  $\mu\text{g/L}$  (Figura 13). Os valores de eficiência dos dias 02 de dezembro e 30 de janeiro foram excluídos, dado terem apresentado valores negativos.

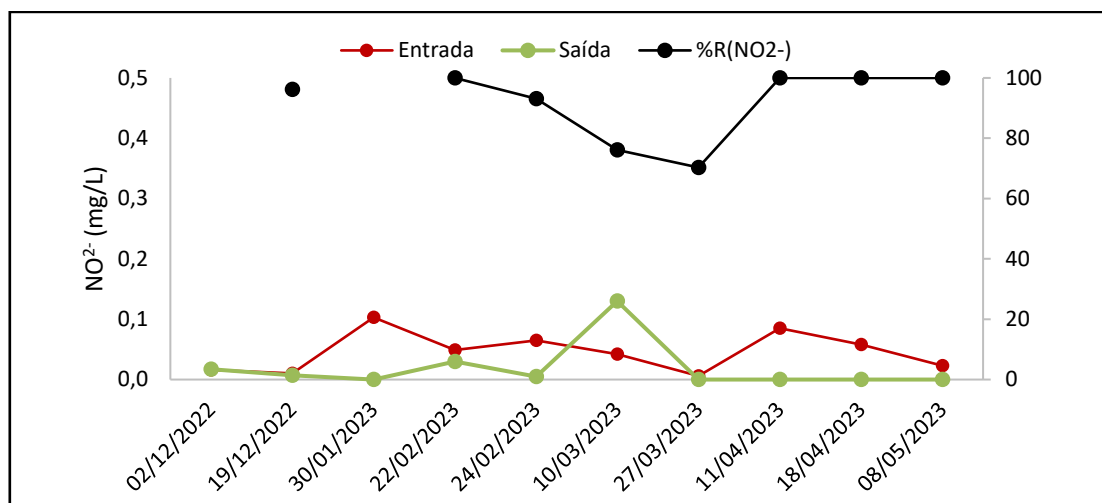


Figura 13: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção Nitritos na ZHC E.

Quanto à remoção de nitritos, o menor valor apresentado na ZHC E foi de 6,24% no dia 22 de março de 2023, e o maior valor de remoção foi de 100% nos dias 10 e 27 de março, 11 e 18 de abril e 08 de maio, ambos do ano de 2023.

O valor médio obtido na AR de alimentação, em teores de nitritos, à entrada do sistema ZHC E é de  $0,046 \pm 0,020 \mu\text{g/L}$ . O valor médio obtido na AR tratada pelo mesmo sistema é de  $0,019 \pm 0,030 \mu\text{g/L}$ .

Nesta ZHC um dos substratos consiste em resíduos de cortiça recozida, a qual possuem características lignocelulósicas (Bessadok et al., 2023) o que pode favorecer a formação de biofilme na rizosfera das macrófitas, e aumentar a interação dos microrganismos com as plantas, além da contribuição das escórias de carvão, que também poderão influenciar positivamente o índice de remoção de NT.

Pelas análises realizadas para deteção de amónia no sistema ZHC E, o menor valor no sistema à entrada foi de 6,50 mg/L no mês de dezembro de 2022, e o maior valor de 39 mg/L no dia 11 de abril de 2023. O maior valor obtido à saída foi de 3,06 mg/L no dia 24 de fevereiro de 2023, e o menor valor obtido de 0,01 mg/L no dia 08/05/2023, como pode ser observado na Figura 14.

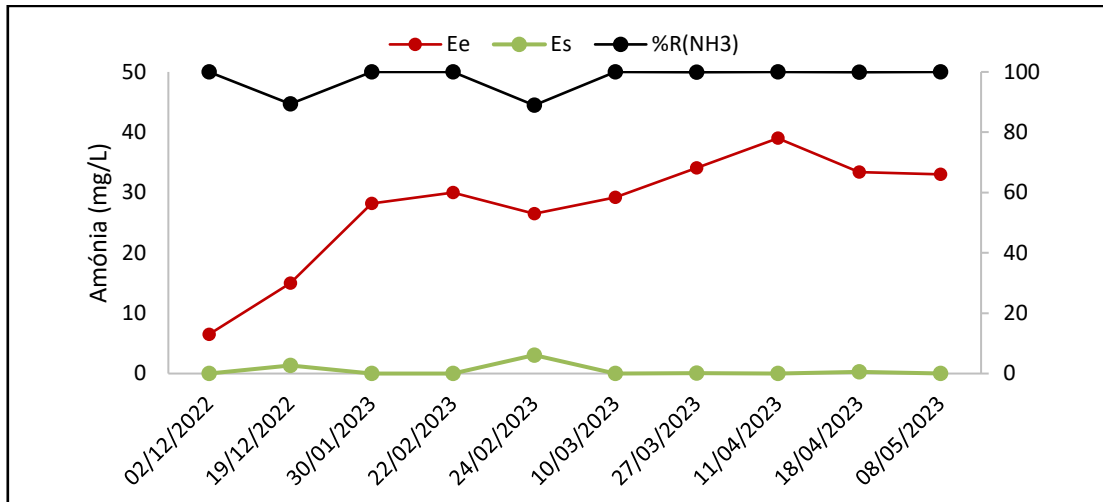


Figura 14: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção de Amónia na ZHC E.

O valor médio obtido na AR de alimentação à entrada do sistema ZHC E é de  $27,5 \pm 7$  mg/L de amónia, sendo o valor médio obtido na AR tratada pelo sistema de  $0,5 \pm 0,7$  mg/L.

Quanto à eficiência da ZHC E, o menor valor observado de remoção de amónia foi de 47% no dia 02 de dezembro de 2022, e o maior valor de remoção foi de 100% nos dias 30 de fevereiro, 11 e 18 de abril e 08 de maio, ambos do ano de 2023.

Os valores obtidos nas análises realizadas para deteção de amónia no sistema ZHC P apresentaram o menor valor de 11,95 mg/L no dia 19 de dezembro de 2022, e o maior valor apresentado de 24,80 mg/L foi no dia 18 de abril de 2023, como pode ser visto na Figura 15.

O valor médio obtido na AR de alimentação do sistema ZHC P é de  $17,10 \pm 2,75$  mg/L amónia. Sendo o valor médio obtido na AR tratada pelo sistema de  $0,8 \pm 1,3$  mg/L.

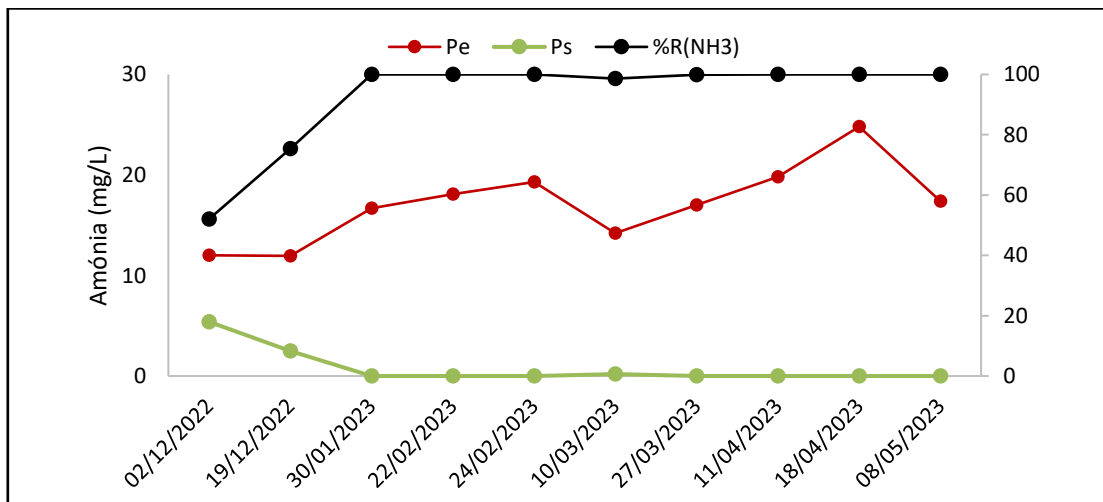


Figura 15: Gráfico de monitorização da concentração e eficiência na remoção de Amónia na ZHC P.

#### 4.4 Correlação entre NT e a Concentração de Nitritos e de Amónia

Com o objetivo de averiguar se é possível estimar o NT a partir da composição em nitritos e amónia, visto que os teores verificados de nitratos são desprezáveis, procedeu-se à representação do NT em função da soma da concentração de nitritos e de amónia (Figura 16).

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) da regressão linear (Equação 3) é de 0,9265 mostrando uma correlação forte entre o NT e a soma da concentração de nitritos e de amónia (Confirmado pelo teste de correlação de Pearson,  $p < 0,01$ ).

$$y = (0,8713 * x) + 2,32 \quad (3)$$

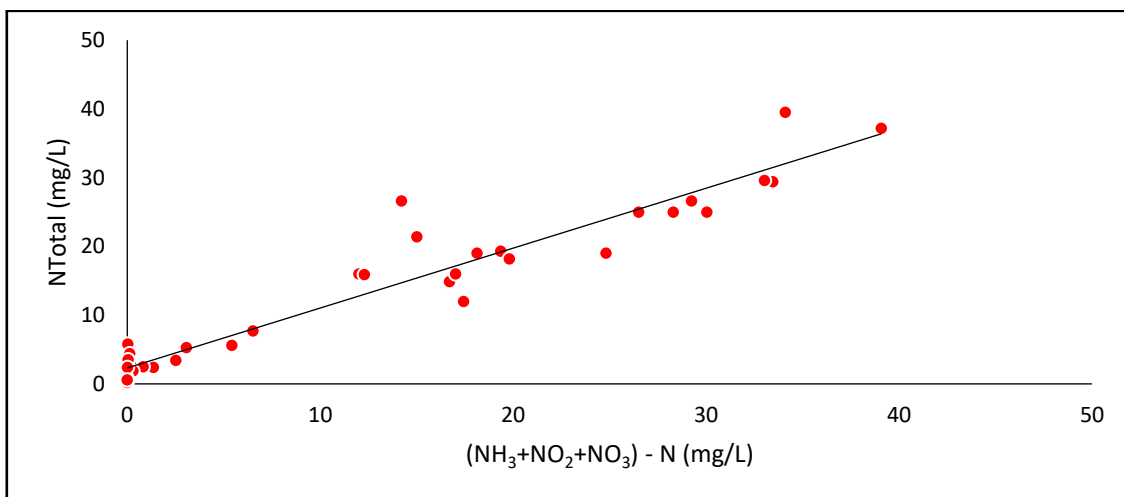


Figura 16: Gráfico de correlação de NT com a soma ( $NH_3+NO_2+NO_3$ ).

Também se testou a correlação entre o NT e a concentração de  $NH_3$ , como pode ser visto no gráfico da Figura 17. O valor do  $R^2$  obtido na regressão linear (Equação 4) foi de 0,9263, muito semelhante ao  $R^2$  obtido no ajuste anterior (Equação 3). Os declives são, também, semelhantes, pelo facto que a maior parte de NT está na forma de  $NH_3$ . A correlação também é estatisticamente significativa ( $p < 0,01$ ).

$$y = (0,8709 * x) + 2,3682 \quad (4)$$

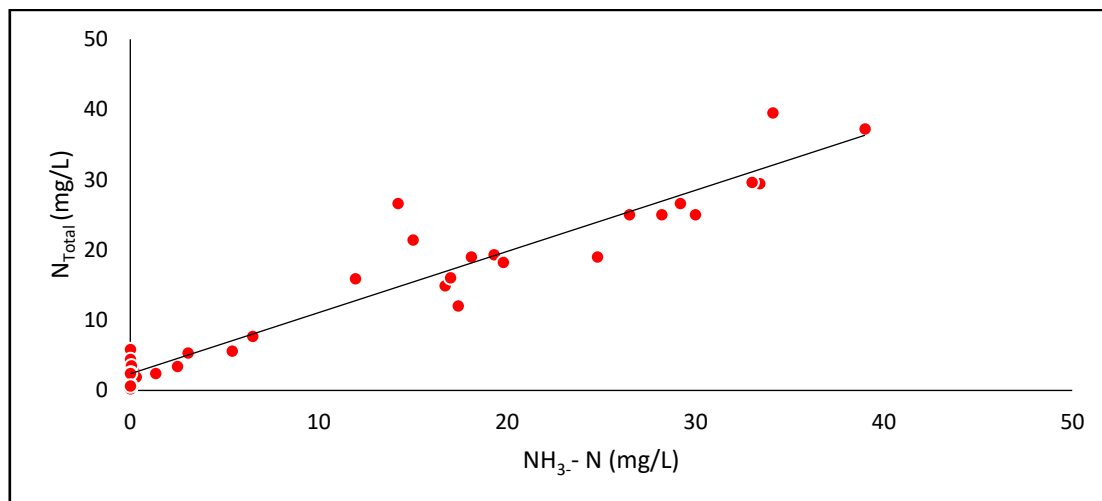


Figura 17: Gráfico de correlação entre NT e NH<sub>3</sub>.

#### 4.5 Eficiência de Remoção da CQO

As análises realizadas para determinação do teor em CQO no sistema ZHC E apresentaram valores mínimos na AR em julho e novembro, correspondendo a 10 mg/L, e observando-se o maior valor à entrada em outubro com 147 mg/L (Figura 18).

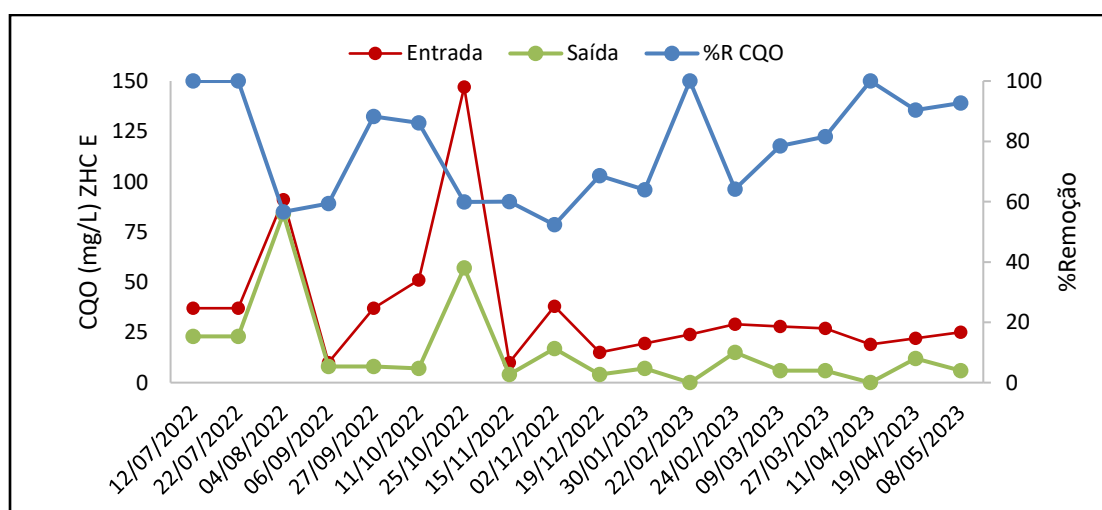


Figura 18: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de CQO da ZHC E.

O sistema ZHC E reduziu com eficiência a CQO, obtendo a maior percentagem de remoção em julho de 2022 e fevereiro de 2023 com valores de 100%, e o menor valor de remoção em dezembro de 2022 com 52%.

O valor médio obtido das amostras para a CQO à entrada do sistema ZHC E foi de  $37,0 \pm 16,4$  mg/L, e para a saída de  $15,9 \pm 10,6$  mg/L.

No sistema ZHC P é possível verificar, na remoção de CQO, o maior valor em maio com 97% e o menor valor em agosto com 16%. Houve variação na percentagem de remoção

ao longo da monitorização, sendo sua grande parte acima ou próxima de 90% de remoção de CQO (Figura 19).

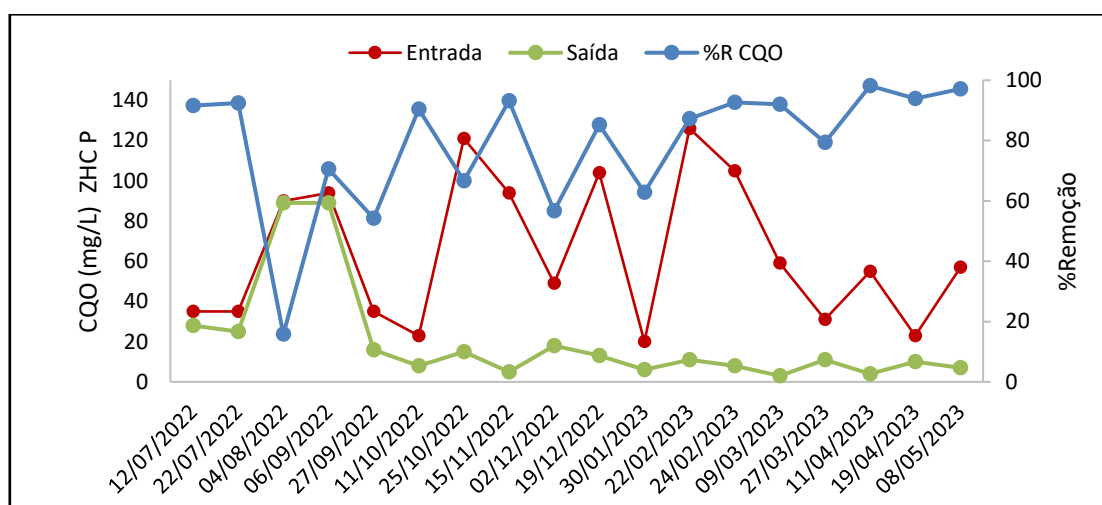


Figura 19: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de CQO da ZHC P.

O valor médio obtido das amostras para a CQO à entrada foi de  $64,2 \pm 17,9$  mg/L e na saída de  $20,3 \pm 12,9$  mg/L.

A eficiência desta ZHC na remoção de CQO pode ser devida ao conjunto de substrato incluir camadas de escórias de carvão mineral e resíduos de cortiça que podem estar relacionadas com a degradação anaeróbica e possivelmente maior camada de biofilme (Bessadok et al., 2023).

#### 4.6 Análise de Remoção de PT

As análises às amostras coletadas no sistema ZHC E para o parâmetro de PT apresentaram o menor valor de 1,85 mg/L na entrada de AR em dezembro de 2022 e o maior valor de cerca de 9 mg/L de PT em março de 2023. Quanto aos valores de saída, o menor valor apresentado foi de 1,0 mg/L e o maior de cerca de 6 mg/L.

A eficiência de remoção de PT em percentagem no sistema ZHC E pode ser vista na Figura 20, onde é possível observar que o menor desempenho ocorreu em outubro de 2022, com valor de 0,4% de remoção de PT, sendo o maior valor em julho de 2022 com 100% de remoção.

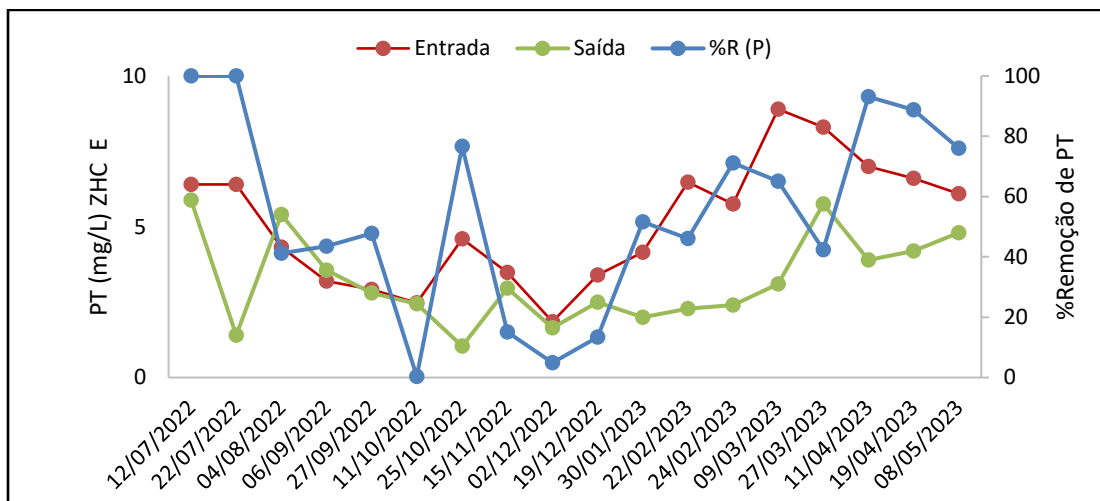


Figura 20: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de PT na ZHC E.

O valor médio obtido de PT à entrada foi de  $5,1 \pm 1,0$  mg/L e na saída de  $3,20 \pm 0,7$  mg/L.

Para o sistema ZHC P, a amostra que apresentou o menor valor de PT na entrada foi de 0,9 mg/L no mês de outubro de 2022 e o maior valor de 6,0 mg/L em julho de 2022. Quanto aos valores de saída, o menor valor apresentado foi de 0,5 mg/L no mês de fevereiro de 2023 e o maior de 2,0 mg/L em setembro de 2022, conforme Figura 21.

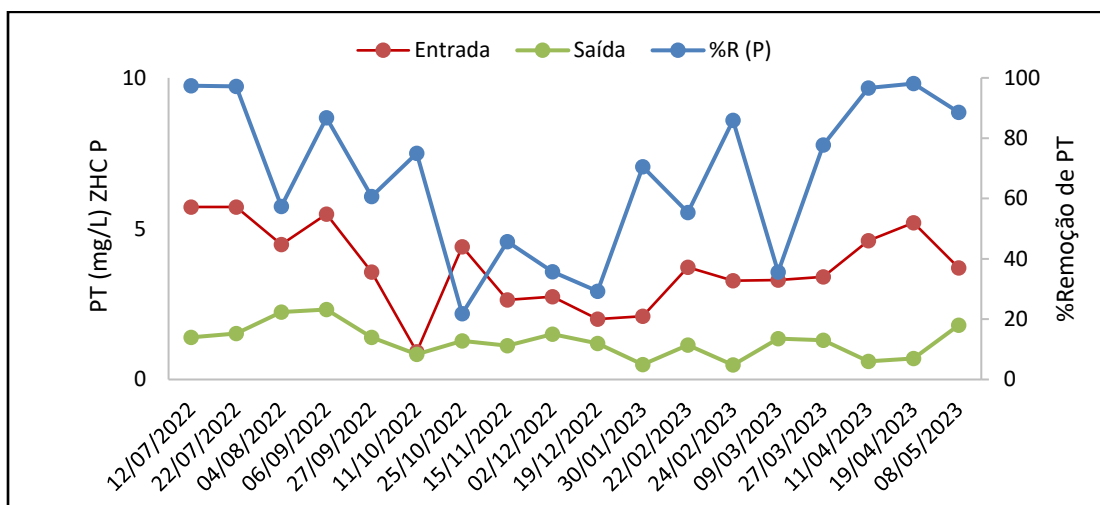


Figura 21: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de PT na ZHC P.

O valor médio obtido de PT nas amostras à entrada foi de  $3,7 \pm 0,7$  mg/L e na saída foi de  $1,3 \pm 0,3$  mg/L.

O sistema ZHC P mostrou-se mais eficiente na remoção de PT que o sistema ZHC E.

## 4.7 Análise de Fosfatos

Para as amostras de fosfatos da AR à entrada do sistema ZHC E o menor valor ocorreu em 02 de dezembro de 2022 com 2,2 mg/L e o maior valor foi de 8,4 mg/L no mês de março de 2022. Quanto aos valores de saída do sistema ZHC E o menor valor obtido foi de 1,2 mg/L no mês de março de 2022, e o maior de 4,6 mg/L em 27 de março de 2023, como pode ser visto na Figura 22.

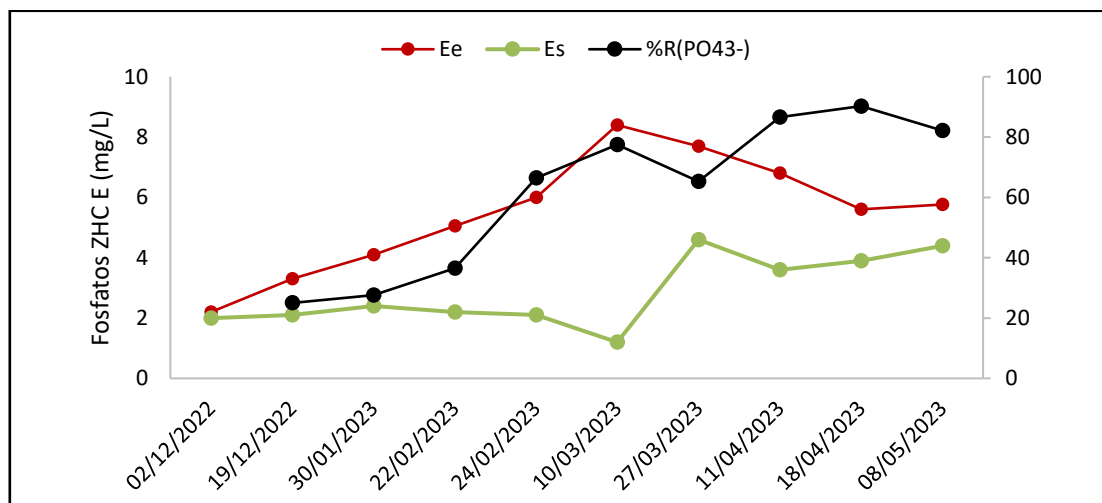


Figura 22: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de Fosfatos na ZHC E.

O valor médio obtido das amostras de fosfatos em termos de P à entrada foi de  $5,5 \pm 1,4$  mg/L, e na saída o valor médio obtido foi de  $2,8 \pm 0,8$  mg/L.

O menor valor de eficiência na remoção de fosfatos no sistema ZHC E foi de 25% no dia 19 de dezembro de 2022, e o maior valor foi de 100% de remoção nos dias 27 de março, 11 e 18 de abril e dia 08 de maio de 2023.

Para as amostras de fosfatos da AR à entrada do sistema ZHC P, o menor valor ocorreu em 19 de dezembro de 2022 com 1,8 mg/L, e o maior valor foi de 5,1 mg/L no dia 08 de maio de 2023. Quanto aos valores de saída do sistema ZHC P, o menor valor obtido foi de 0,2 mg/L no dia 18 de abril de 2023, e o maior de 2,3 mg/L em 02 de dezembro de 2022 (Figura 23).

O valor médio obtido das amostras de fosfatos em termos de P à entrada foi de  $3,2 \pm 0,7$  mg/L, e na saída o valor médio obtido foi de  $0,9 \pm 0,5$  mg/L.

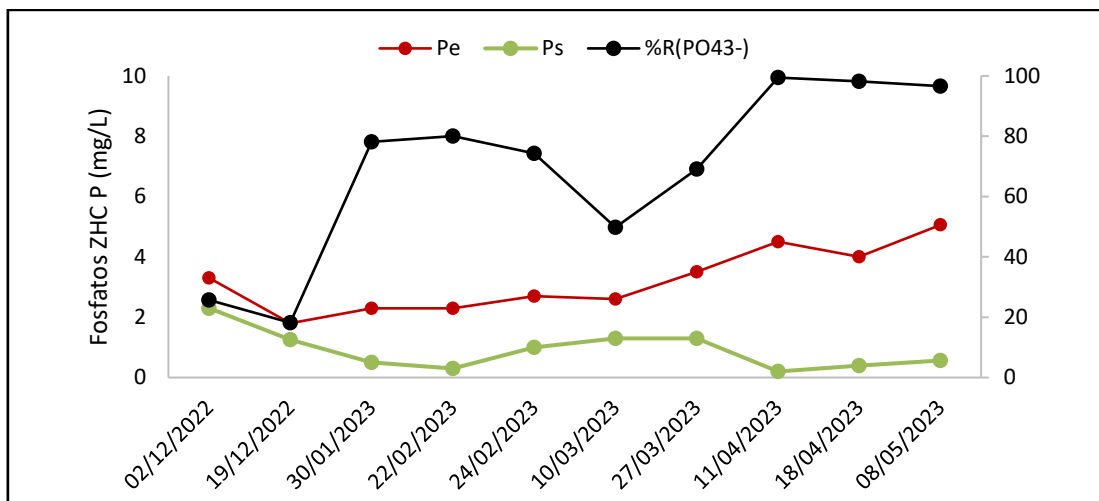


Figura 23: Gráfico de monitorização da concentração e remoção de Fosfatos na ZHC P

#### 4.8 Correlação entre PT e a Concentração Fosfatos

Procedeu-se à avaliação da correlação de PT com a concentração de  $\text{PO}_4^{3-}$  (convertida em termos de P) dos sistemas ZHC E e P, representada no gráfico da Figura 24. O valor do  $R^2$  obtido na regressão linear representada pela Equação 5 foi de 0,9102, mostrando uma correlação forte entre os teores de PT e fosfato nas amostras realizadas nos sistemas ZHC monitorizados. O teste de Pearson valida a correlação, com  $p < 0,01$ . Esta correlação indica a possibilidade de que o PT presente esteja em grande parte na forma de fosfatos, pois o declive é próximo de 1. Mas, a observação mais importante consiste na possibilidade de estimar o PT através da concentração de fosfatos. Não só o método analítico é mais simples, como já existem sensores eletroquímicos para a determinação de fosfatos.

$$y = (1,0099 * x) + 0,2481 \quad (5)$$

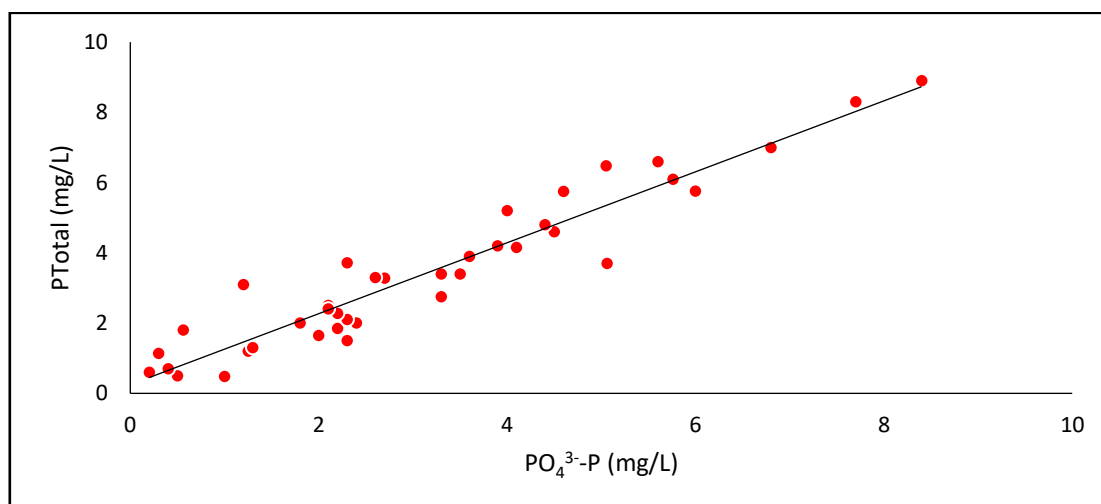


Figura 24: Gráfico da correlação de PT e fosfatos em ambos os sistemas ZHC.

## 4.9 Monitorização do pH e da Condutividade Elétrica

As análises de pH e condutividade foram realizadas no laboratório, imediatamente após a coleta das amostras, por meio de medidor da fabricante Hanna Instruments (Alemanha), o qual apresenta os resultados dos dois parâmetros em simultâneo.

Nas amostras analisadas à entrada do sistema ZHC E, o menor valor apresentado para o pH foi de 6,9 no mês de fevereiro de 2023, e o maior valor de pH com 7,9 no mês de julho de 2022. Para as saídas o menor valor apresentado do pH foi de 6,2 no mês de fevereiro de 2023, e maior valor foi de 7,6 no mês de outubro de 2022. Na Figura 25 é possível verificar que o pH permaneceu próximo de 7 na entrada e na saída do sistema ZHC E.

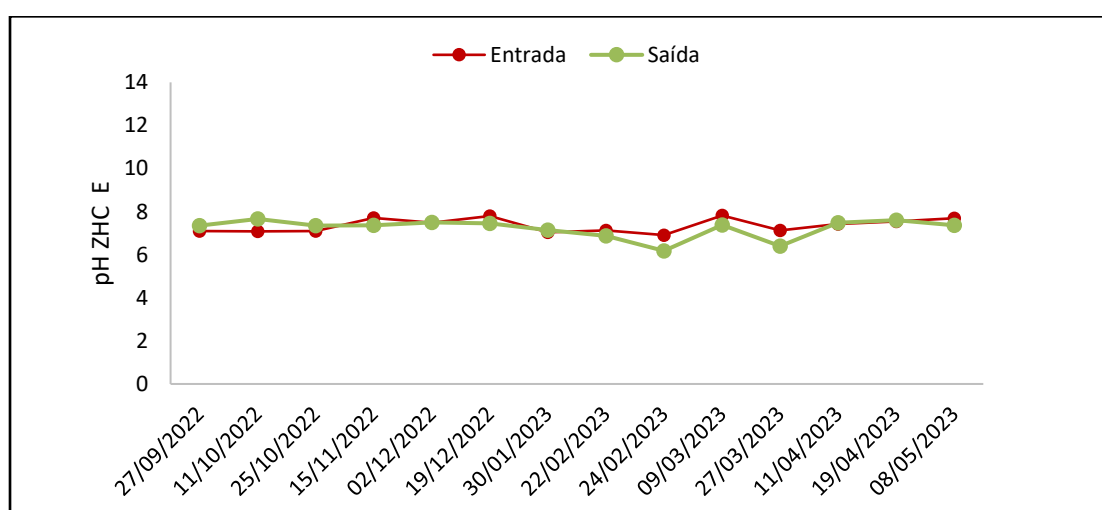


Figura 25: Gráfico da monitorização do pH na ZHC E.

O valor médio obtido das amostras para o pH à entrada do sistema ZHC E foi de  $7,3 \pm 0,2$  e para a saída de  $7,2 \pm 0,3$ .

O pH de saída no início da monitorização nos meses de setembro e outubro foram ligeiramente mais básicos que a entrada, mas a tendência inverteu-se após esse período, mantendo-se até o final da monitorização.

No sistema ZHC P, o menor valor apresentado para o pH na corrente de entrada foi de 6,1 no mês de março de 2023, e o maior valor foi de 8,3 no mês de dezembro de 2022. Para a saída o menor valor obtido foi de 4,0 no mês de setembro de 2022 e o maior valor foi de 8,0 em abril de 2023. Na Figura 26 é possível verificar o ponto de acidez referente ao valor de pH 4,0. De dezembro até início de fevereiro o sistema ZHC P apresentou valores de pH de saída menores que a entrada, invertendo na segunda amostragem de fevereiro até o final do experimento.

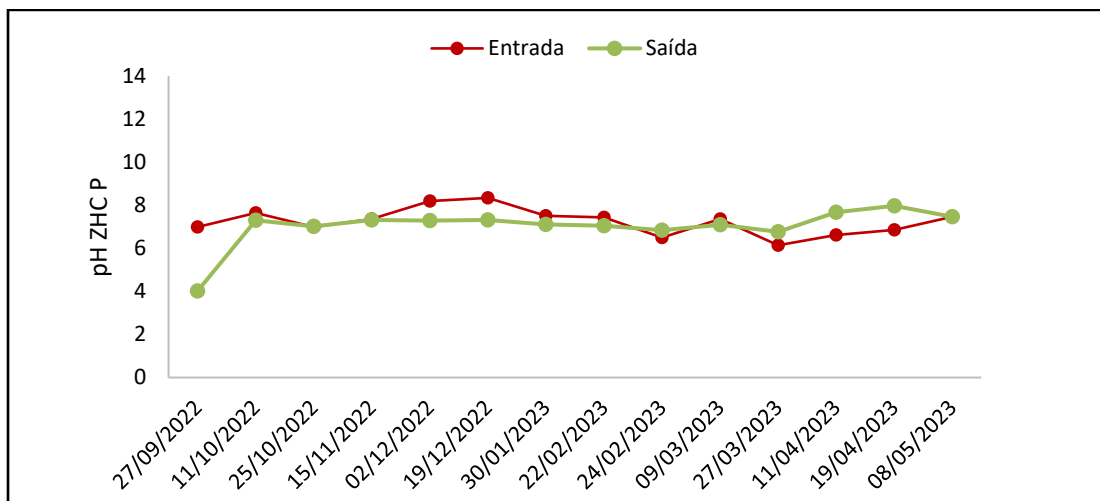


Figura 26: Gráfico da monitorização do pH na ZHC P.

O valor médio obtido das amostras à entrada do sistema ZHC P para o pH foi de  $7,2 \pm 0,3$  e para a saída de  $7,0 \pm 0,5$ .

O pH obtido no sistema ZHC E apresentou valores entre 6 e 8, e no sistema ZHC P também, com exceção da primeira amostra que se encontrava ácida. O pH recomendável da água é entre 6 e 9.

Para a condutividade elétrica, o sistema ZHC E apresentou o menor valor à entrada, igual a  $0,16$  mS/cm no mês de dezembro de 2022, sendo o maior valor de CE de  $0,56$  mS/cm em outubro de 2022. Para a saída, o menor valor de CE observado foi de  $0,37$  mS/cm no mês de dezembro de 2022 e o maior valor de  $0,54$  mS/cm em outubro de 2022. Na Figura 27 é possível verificar que as amostras da saída do sistema apresentam CE maior que às entradas, apresentando comportamento mais regular e baixa variação.

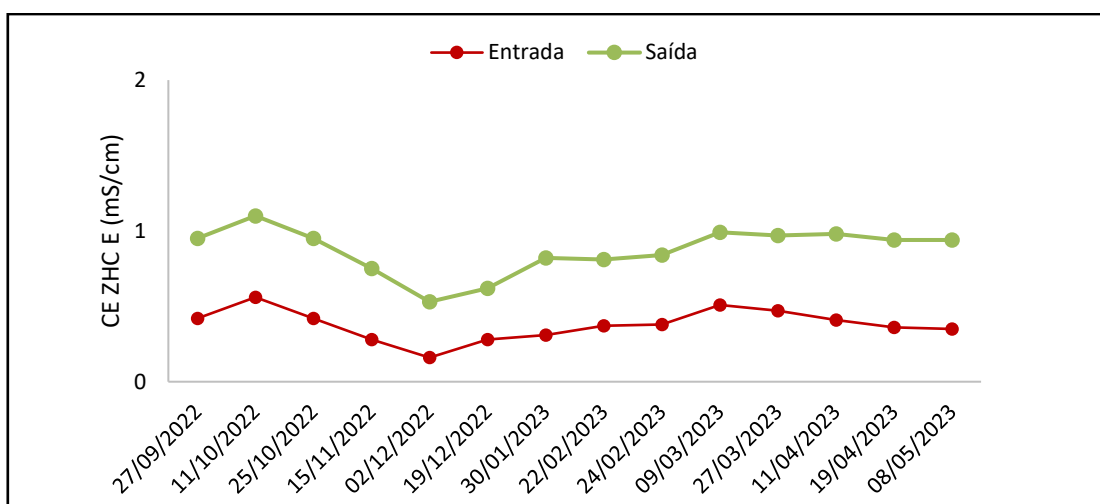


Figura 27: Gráfico de monitorização da Condutividade Elétrica na ZHC E.

O valor médio de CE nas amostras à entrada do sistema ZHC E foi de  $0,40 \pm 0,06$  mS/cm e à saída o valor médio obtido foi de  $0,50$  mS/cm  $\pm 0,04$ .

Para o sistema ZHC P, o menor valor apresentando à entrada foi de 0,20 mS/cm no mês de dezembro de 2022, e o maior valor foi de 0,41 mS/cm na amostra de 30 de janeiro de 2023. Já à saída o menor o menor valor de CE foi de 0,28 mS/cm no mês de dezembro de 2022, e o maior valor foi de 0,57 mS/cm na segunda amostra de janeiro 2023. Como pode ser observado na Figura 28, as amostras da entrada do sistema ZHC P apresentam CE maior que às saídas, apresentando um comportamento regular.

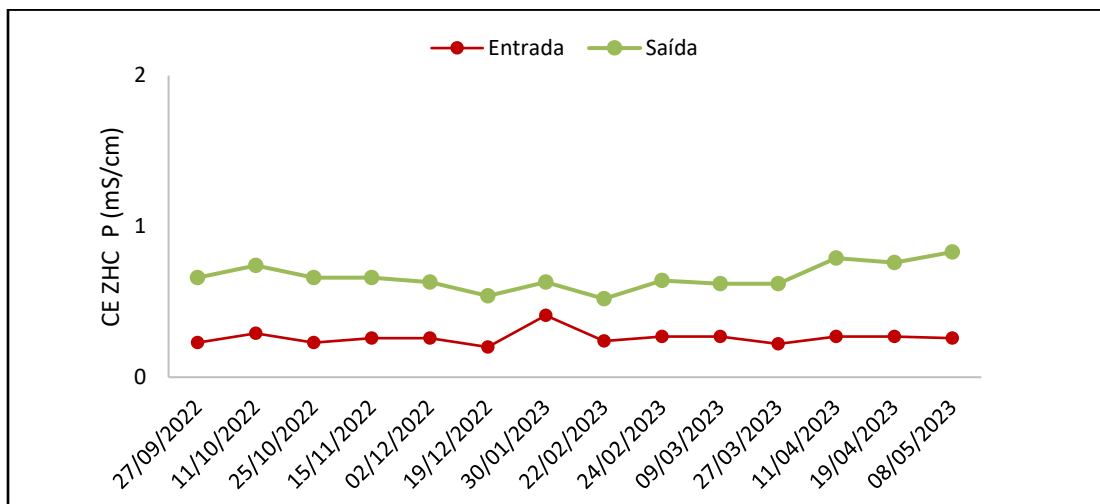


Figura 28: Gráfico da monitorização da Condutividade Elétrica na ZHC P.

O valor médio de CE observado nas amostras à entrada do sistema ZHC P foi de  $0,30 \pm 0,03$  mS/cm e à saída o valor médio obtido foi de  $0,40 \pm 0,05$  mS/cm.

#### 4.10 Análise Comparativa da Eficiência dos Sistemas ZHC

Nas seções anteriores procedeu-se à determinação da eficiência de remoção de NT, PT e CQO pelos sistemas ZHC E e P. Nesta seção apresenta-se uma análise comparativa.

No caso da ZHC E, a remoção de NT apresentou o menor valor de remoção em fevereiro de 2023 com 64%, e os valores mais altos de remoção ocorreram em julho de 2022 com 100%, e em abril de 2023 com 99%. Para o PT foi observado que a menor eficiência de remoção ocorreu no mês de outubro de 2022 com 0,4% e os valores de remoção mais elevados foram verificados em julho de 2022, com 100% de remoção e em abril de 2023 com 93%. Na monitorização da eficiência de remoção de CQO o menor valor obtido foi de 52% em dezembro de 2022 e o maior valor ocorreu nos meses de julho de 2022, fevereiro de 2023 e abril de 2023, todos com 100% de remoção. A Figura 29 resume as observações de remoção.

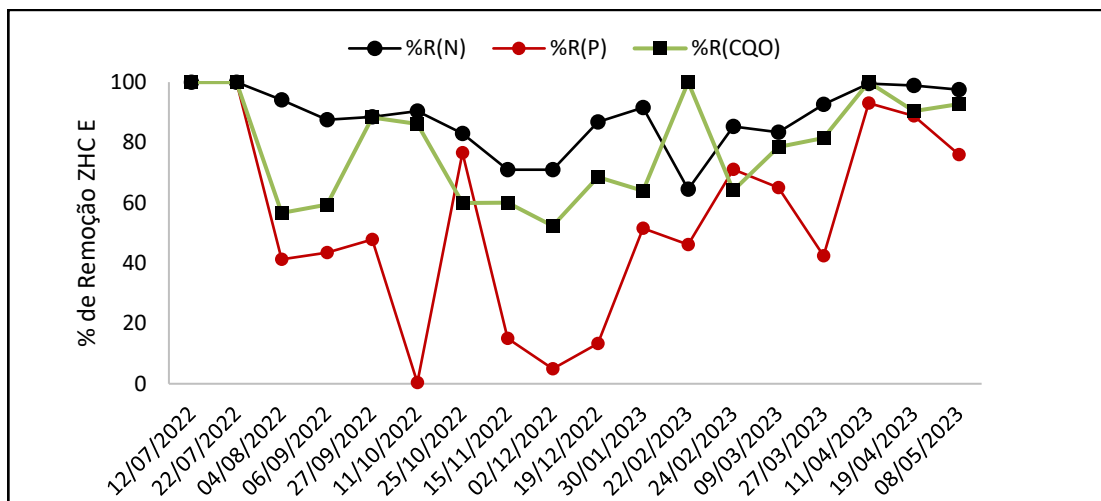


Figura 29: Eficiência de remoção de poluentes no sistema ZHC E.

Para o sistema ZHC P, conforme pode ser visto na Figura 30, a remoção de NT apresentou o menor valor na primeira quinzena de dezembro de 2022 com 59%, e os maiores valores de remoção foram obtidos na segunda quinzena de julho de 2022 e na primeira quinzena de abril de 2023, próximo de 100%. Na análise de PT, o menor valor de remoção obtido ocorreu no mês de outubro de 2022 com 22%, e os maiores valores de remoção ocorrerem em abril de 2023 com 98% e julho de 2022 com 97%. No caso da remoção de CQO, o menor valor obtido ocorreu em agosto de 2022 com 16% e os maiores valores de remoção ocorreram em abril de 2023 com 98% e em maio de 2023 com 97%.

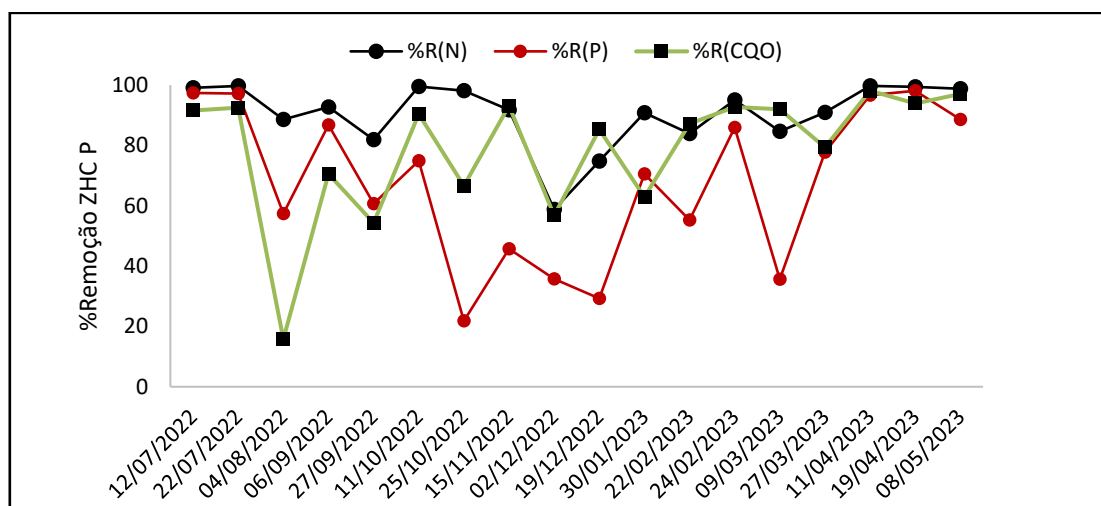


Figura 30: Eficiência de remoção de poluentes na ZHC P.

O valor médio em percentagem de remoção obtido para o sistema ZHC E no parâmetro de NT foi de  $88 \pm 5\%$ , para o PT de  $54 \pm 16\%$  e para a CQO  $78 \pm 9\%$ . Para o sistema ZHC P o valor médio obtido para o NT foi de  $90 \pm 5\%$ , para o PT foi de  $67 \pm 13\%$  e para o CQO  $79 \pm 10\%$ .

Em síntese, a ZHC P apresentou eficiências de remoção destes três indicadores agregados de composição da água residual ligeiramente superiores aos observados na ZHC E.

## 5 CONCLUSÕES

Na presente dissertação avaliaram-se e discutiram-se os resultados obtidos da monitorização de dois sistemas distintos de ZHC, relativos à remoção de poluentes de águas residuais do ponto de vista de desempenho e futura monitorização com uso de sensores *in loco* por recurso a tecnologias IdC.

Os sistemas ZHC E e P mostraram-se eficientes na remoção dos poluentes quantificáveis em termos dos teores de NT, PT e CQO. O poluente em que se observou a menor capacidade de remoção em ambos os sistemas de ZHC monitorizados é o PT, sendo que a grande parte de fósforo presente deverá estar na forma de fosfatos. Os resultados também indicam que o azoto total presente está em sua grande parte na forma de amónia. Quando ambos os sistemas são comparados em termos de garantia mínima de eficiência, o sistema ZHC P apresenta uma remoção mais alta em termos de PT e percentagem de remoção ligeiramente maior em NT e CQO, enquanto comparada a ZHC E.

Por fim, determinou-se que, para a água residual usada nos testes, é possível correlacionar o teor de azoto total com a soma das concentrações de nitritos e amónia e, designadamente, também se observa uma correlação forte do NT apenas com a concentração de amónia. Também se verificou uma forte correlação entre o teor de fósforo total e a concentração do ião fosfato. Visto que tanto o NT como o PT são indicadores comuns na avaliação do desempenho de ZHC, e que a sua determinação implica a recolha de amostras de água a que se segue um conjunto de procedimentos analíticos com a sucessiva adição de reagentes, a possibilidade de estimar estes indicadores a partir de espécies individuais, como a amónia e o fosfato para os quais existem sensores eletroquímicos, poderá permitir monitorizar o funcionamento das ZHC de modo remoto, contínuo e em tempo real com base em tecnologias de “Internet das Coisas”.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, H. N., Xie, J., Hussain, S. I., & Lu, X. (2019). Nutrient removal in hybrid constructed wetlands: spatial-seasonal variation and the effect of vegetation. *Water Science and Technology*, 79(10), 1985–1994. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.196>
- Abedi, T., & Mojiri, A. (2019). Constructed wetland modified by biochar/zeolite addition for enhanced wastewater treatment. *Environmental Technology & Innovation*, 16, 100472. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100472>
- Adarsh Singh, Surjit Singh Katoch, Mukul Bajpai, & Akash Rawat. (n.d.). *Constructed Wetlands: A sustainable way of Treating Wastewater in Cold Climate - A review*.
- Alateeqi, M., Khajah, M., Abu-Arabi, M., & AlMansour, H. (2023). Greywater treatment using vertical subsurface flow constructed wetland system. *Journal of Engineering Research*, 100052. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100052>
- Almuktar, S. A. A. A. N., Abed, S. N., & Scholz, M. (2018). Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(24), 23595–23623. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2629-3>
- Amani, M., Kakooei, M., Ghorbanian, A., Warren, R., Mahdavi, S., Brisco, B., Moghimi, A., Bourgeau-Chavez, L., Toure, S., Paudel, A., Sulaiman, A., & Post, R. (2022). Forty Years of Wetland Status and Trends Analyses in the Great Lakes Using Landsat Archive Imagery and Google Earth Engine. *Remote Sensing*, 14(15), 3778. <https://doi.org/10.3390/rs14153778>
- Anna Cristina Lanna. (2002). Impacto Ambiental de Tecnologias, Indicadores de Sustentabilidade e Metodologias de Aferição: Uma Revisão. In *EMBRAPA* (Issue 144, pp. 21–22). <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/211401/1/doc144.pdf>.
- Bessadok, S., Kraiem, K., Arous, F., Al Souki, K. S., Tabassi, D., El Toumi, S., & Jaouani, A. (2023). Efficient Wastewater Treatment and Removal of Bisphenol A and Diclofenac in Mesocosm Flow Constructed Wetlands Using Granulated Cork as Emerged Substrate. *Toxics*, 11(1), 81. <https://doi.org/10.3390/toxics11010081>
- Bi, R., Zhou, C., Jia, Y., Wang, S., Li, P., Reichwaldt, E. S., & Liu, W. (2019). Giving waterbodies the treatment they need: A critical review of the application of constructed floating wetlands. *Journal of Environmental Management*, 238, 484–498. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.064>
- Bilalova, S., Newig, J., Tremblay-Lévesque, L.-C., Roux, J., Herron, C., & Crane, S. (2023). Pathways to water sustainability? A global study assessing the benefits of

- integrated water resources management. *Journal of Environmental Management*, 343, 118179. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118179>
- Bischoff, C. (2022). Ammonia. In *Reference Module in Biomedical Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824315-2.00140-8>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022a). Constructed Wetlands for Reclamation and Reuse of Wastewater and Urban Stormwater: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Biswal, B. K., & Balasubramanian, R. (2022b). Constructed Wetlands for Reclamation and Reuse of Wastewater and Urban Stormwater: A Review. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.836289>
- Biswal, B. K., Bolan, N., Zhu, Y.-G., & Balasubramanian, R. (2022). Nature-based Systems (NbS) for mitigation of stormwater and air pollution in urban areas: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 186, 106578. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106578>
- Borin, M., & Salvato, M. (2012). Effects of five macrophytes on nitrogen remediation and mass balance in wetland mesocosms. *Ecological Engineering*, 46, 34–42. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.04.034>
- Buelow, E., Bayjanov, J. R., Majoor, E., Willems, R. J., Bonten, M. J., Schmitt, H., & van Schaik, W. (2018). Limited influence of hospital wastewater on the microbiome and resistome of wastewater in a community sewerage system. *FEMS Microbiology Ecology*, 94(7). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiy087>
- Cao, C., Ding, Z. H., Huang, J., & Yan, C. N. (2024). Comprehensive response of microbes to Ag and Ag<sub>2</sub>S nanoparticles and silver spatial distribution in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 906, 167683. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167683>
- Cavalheri, P. S., Machado, B. S., da Silva, T. F., Rodrigues, J. P. B. G., Gozzi, F., Filho, F. J. C. M., Cavalcante, R. P., de Oliveira, S. C., & Junior, A. M. (2023). Optimization of a combined system of vertical flow constructed wetland and solar photo-Fenton for ketoprofen removal in sewage and landfill leachate. *Chemical Engineering Journal*, 475, 146282. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.146282>
- Decreto-Lei n.º 152/97, [https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/152-1997-365343\\_2959](https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/152-1997-365343_2959) (1997).
- Directiva n.º 91/271/CEE, decreto-lei/152-1997- 2959 (1997).
- Chang, J., Wu, S., Dai, Y., Liang, W., & Wu, Z. (2013). Nitrogen removal from nitrate-laden wastewater by integrated vertical-flow constructed wetland systems.

- Ecological Engineering*, 58, 192–201.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.06.039>
- Chang, N.-B., Xuan, Z., Marimon, Z., Islam, K., & Wanielista, M. P. (2013). Exploring hydrobiogeochemical processes of floating treatment wetlands in a subtropical stormwater wet detention pond. *Ecological Engineering*, 54, 66–76.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2013.01.019>
- Chasmer, L., Cobbaert, D., Mahoney, C., Millard, K., Peters, D., Devito, K., Brisco, B., Hopkinson, C., Merchant, M., Montgomery, J., Nelson, K., & Niemann, O. (2020). Remote Sensing of Boreal Wetlands 1: Data Use for Policy and Management. *Remote Sensing*, 12(8), 1320. <https://doi.org/10.3390/rs12081320>
- Chen, Y., & Han, D. (2018). Water quality monitoring in smart city: A pilot project. *Automation in Construction*, 89, 307–316.  
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.008>
- Cláudia Bueno dos Reis Martinez, Fábio Azevedo, & Elissandra Ulbricht Winkaler. (2006). *Toxicidade e Efeitos da Amônia em Peixes Neotropicais* (DCF; U E Londrina, pp. 3–4). <https://pt.scribd.com/document/356011350/Capitulo-6-Toxicidade-e-Efeitos-Da-Amonia-Em-Peixes-Neotropicais-2006>.
- Colares, G. S., Dell’Osbel, N., Wiesel, P. G., Oliveira, G. A., Lemos, P. H. Z., da Silva, F. P., Lutterbeck, C. A., Kist, L. T., & Machado, Ê. L. (2020). Floating treatment wetlands: A review and bibliometric analysis. *Science of The Total Environment*, 714, 136776. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136776>
- Convenção sobre Zonas Húmidas de Importância Internacional, especialmente como Habitat de Aves Aquáticas, Convenção Internacional (1971).
- Corbella, C., Hartl, M., Fernandez-gatell, M., & Puigagut, J. (2019). MFC-based biosensor for domestic wastewater COD assessment in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 660, 218–226.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.347>
- David, G., Rana, M. S., Saxena, S., Sharma, S., Pant, D., & Prajapati, S. K. (2022). A review on design, operation, and maintenance of constructed wetlands for removal of nutrients and emerging contaminants. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04442-y>
- Devi, C. M., & Swapna, T. S. (2022). Weed plants: A boon for remediation of heavy metal contaminated soil. In *Phytoremediation Technology for the Removal of Heavy Metals and Other Contaminants from Soil and Water* (pp. 127–141). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85763-5.00010-6>

- Dhanjai, Sinha, A., Zhao, H., Chen, J., & Mugo, S. M. (2018). Determination of Chemical Oxygen Demand: An Analytical Approach. In *Reference Module in Chemistry, Molecular Sciences and Chemical Engineering*. Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409547-2.14517-2>
- Di Luca, G. A., Maine, M. A., Mufarrege, M. M., Hadad, H. R., Pedro, M. C., Sánchez, G. C., & Caffaratti, S. E. (2017). Phosphorus distribution pattern in sediments of natural and constructed wetlands. *Ecological Engineering*, *108*, 227–233.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.08.038>
- Djerf, H., Svensson, B.-M., Mårtensson, L., & Lacoursière, J. O. (2023). Evaluation of treatment performance for one constructed wetland in a Swedish forest – A case study with emphasis on brownification mitigation. *Ecological Engineering*, *194*, 107056. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107056>
- Drake, C. W., Jones, C. S., Schilling, K. E., Amado, A. A., & Weber, L. J. (2018). Estimating nitrate-nitrogen retention in a large constructed wetland using high-frequency, continuous monitoring and hydrologic modeling. *Ecological Engineering*, *117*, 69–83. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.03.014>
- Dubey, D., Kumar, S., & Dutta, V. (2022). In-situ anatomical and elemental response of aquatic macrophytes against nutrient enrichment in freshwater tropical lakes. *Applied Water Science*, *12*(7), 163. <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01681-9>
- Fahim, R., Cheng, L., & Mishra, S. (2023). Structural and functional perspectives of carbon filter media in constructed wetlands for pollutants abatement from wastewater. *Chemosphere*, 140514.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140514>
- Zonas húmidas portuguesas de importância internacional,  
<http://id.bnportugal.gov.pt/bib/bibnacional/1079663> (2001).
- Francis, B., Aravindakumar, C. T., Brewer, P. B., & Simon, S. (2023). Plant nutrient stress adaptation: A prospect for fertilizer limited agriculture. *Environmental and Experimental Botany*, *213*, 105431.  
<https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2023.105431>
- Francisco de Assis Esteves. (1998). *Fundamentos de Limnologia* (2nd ed., Vol. 1).
- Fu, B., Li, S., Lao, Z., Yuan, B., Liang, Y., He, W., Sun, W., & He, H. (2023). Multi-sensor and multi-platform retrieval of water chlorophyll a concentration in karst wetlands using transfer learning frameworks with ASD, UAV, and Planet CubeSat reflectance data. *Science of The Total Environment*, *901*, 165963.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165963>

- Gao, M., Sun, S., Qiu, Q., Zhou, W., & Qiu, L. (2023). Enrichment denitrifying phosphorus-accumulating organisms in alternating anoxic-anaerobic/aerobic biofilter for advanced nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104089. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104089>
- Geraldes, A. M., & Crispim, M. C. (2009). *Potencialidades da implementação da comunidade do biofilme na reabilitação de ambientes aquáticos* (UFPB, Joao Pessoa). <http://hdl.handle.net/10198/21124>.
- Hanna Instruments product. (n.d.). INSTRUCTION MANUAL - HI83399 Multiparameter Photometer with COD. In [https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2134380/product-manuals/MAN83399\\_05\\_19.pdf](https://cdn2.hubspot.net/hubfs/2134380/product-manuals/MAN83399_05_19.pdf).
- Hans Brix. (1997). *Do Macrophytes Play a Role in Constructed Treatment Wetlands*. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00047-4](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00047-4)
- Hassanshahi, N., & Karimi-Jashni, A. (2018). Comparison of photo-Fenton, O<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/UV and photocatalytic processes for the treatment of gray water. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 161, 683–690. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.06.039>
- Haynes, R. J., & Naidu, R. (2024). Phosphorus—An essential input for agriculture yet a key pollutant of surface waters. In *Inorganic Contaminants and Radionuclides* (pp. 405–426). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90400-1.00007-0>
- Helena Marecos do Monte, Maria Teresa Santos, Ana Maria Barreiros, & António Albuquerque. (2016). Tratamento de Águas Residuais Operações e Processos de Tratamento Físico e Químico. In <http://hdl.handle.net/10400.21/13925>.
- Hu, B., Hu, S., Vymazal, J., & Chen, Z. (2023). Do mycorrhizal symbiosis affect wastewater purification in constructed wetlands with different substrates? *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103498>
- Hu, Z., & Grasso, D. (2005). WATER ANALYSIS | Chemical Oxygen Demand. In *Encyclopedia of Analytical Science* (pp. 325–330). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-369397-7/00663-4>
- Hughes-Riley, T., Dye, E. R., Ortega Anderez, D., Hill-Casey, F., Newton, M. I., & Morris, R. H. (2016). Temperature dependence of magnetic resonance probes for use as embedded sensors in constructed wetlands. *Sensors and Actuators A: Physical*, 241, 19–26. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2016.01.050>
- Ingrao, C., Failla, S., & Arcidiacono, C. (2020). A comprehensive review of environmental and operational issues of constructed wetland systems. *Current*

- Opinion in Environmental Science & Health*, 13, 35–45.  
<https://doi.org/10.1016/j.coesh.2019.10.007>
- Ji, B., Zhao, Y., Li, Q., Yang, Y., Wei, T., Tang, C., Zhang, J., Ruan, W., & Tai, Y. (2022). Interrelation between macrophytes roots and cathode in constructed wetland-microbial fuel cells: Further evidence. *Science of The Total Environment*, 838, 156071. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156071>
- Kadlec, R. H., & Wallace, S. (2008). *Treatment Wetlands*. CRC Press.  
<https://doi.org/10.1201/9781420012514>
- Karri, R. R., Sahu, J. N., & Chimmiri, V. (2018). Critical review of abatement of ammonia from wastewater. *Journal of Molecular Liquids*, 261, 21–31.  
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2018.03.120>
- Khan, H. I. U. H., Groot, C. K., Schepers, O., van Oirschot, D., Martens, M., Ronsse, F., & Rousseau, D. P. L. (2022). Effect of controlled aeration on COD and nitrogen removal in aerated constructed wetlands used for effluent polishing. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 108043.  
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108043>
- Koskiaho, J., & Puustinen, M. (2019). Suspended solids and nutrient retention in two constructed wetlands as determined from continuous data recorded with sensors. *Ecological Engineering*, 137, 65–75. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.04.006>
- Kumar, D., & Kumar, D. (2023). Introduction. In *Phosphate Rock* (pp. 1–15). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95984-1.00004-4>
- Kumar, M., Singh, P. K., Maurya, M. K., & Shivhare, A. (2023). A survey on event detection approaches for sensor based IoT. *Internet of Things*, 22, 100720.  
<https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100720>
- Kumar, V., Bera, T., Roy, S., Vuong, P., Jana, C., Sarkar, D. J., Devi, M. S., Jana, A. K., Rout, A. K., Kaur, P., Das, B. K., & Behera, B. K. (2023). Investigating bio-remediation capabilities of a constructed wetland through spatial successional study of the sediment microbiome. *Npj Clean Water*, 6(1), 8.  
<https://doi.org/10.1038/s41545-023-00225-1>
- Lahlou, F.-Z., Mackey, H. R., & Al-Ansari, T. (2022). Role of wastewater in achieving carbon and water neutral agricultural production. *Journal of Cleaner Production*, 339, 130706. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130706>
- Li, Q., Guo, Y., Yu, J., Yao, L., Liu, S., Li, Y., Chen, D., Peng, F., Xu, D., Wu, Z., & Zhou, Q. (2023). Construction of hybrid constructed wetlands for phosphorus chemical industry tailwater treatment in the middle Yangtze river basin: Responses

- of plant growth and root-associated microbial communities. *Water Biology and Security*, 2(3), 100144. <https://doi.org/10.1016/j.watbs.2023.100144>
- Li, X., Nan, H., Jiang, H., Wang, H., & Wang, C. (2023). Research trends on phosphorus removal from wastewater: A review and bibliometric analysis from 2000 to 2022. *Journal of Water Process Engineering*, 55, 104201. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104201>
- Liao, C., Wu, J., Zhou, L., Li, T., Du, Q., An, J., Li, N., & Wang, X. (2018). Optimal set of electrode potential enhances the toxicity response of biocathode to formaldehyde. *Science of The Total Environment*, 644, 1485–1492. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.114>
- Lin, J., He, S., Liu, X., Huang, Z., Li, M., Chen, B., & Hu, W. (2024). Identifying conservation and restoration priorities for degraded coastal wetland vegetations: Integrating species distribution model and GeoDetector. *Science of The Total Environment*, 906, 167491. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167491>
- Lucília Maria Parron, Daphne Heloisa de Freitas Muniz, & Claudia Mara Pereira. (2011). Manual de Procedimentos de Análise Físico-Química da Água. In <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/57612/1/Doc232ultima-versao.pdf> (Vol. 1). EMBRAPA .
- Matamoros, V., Rodríguez, Y., & Bayona, J. M. (2017). Mitigation of emerging contaminants by full-scale horizontal flow constructed wetlands fed with secondary treated wastewater. *Ecological Engineering*, 99, 222–227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2016.11.054>
- Mateus, D. M. R., Pinho, H. J. O., Nogueira, I. M. D. P., Rosa, M. A. N. H., Cartaxo, M. A. M., & Nunes, V. M. B. (2020). Participation of students in the project Valorbio. *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 21(2), 244–263. <https://doi.org/10.1108/IJSHE-09-2019-0254>
- Mateus, D. M. R., Vaz, M. M. N., & Pinho, H. J. O. (2012). Fragmented limestone wastes as a constructed wetland substrate for phosphorus removal. *Ecological Engineering*, 41, 65–69. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2012.01.014>
- Mugwili, M. E., Waanders, F. B., Masindi, V., & Fosso-Kankeu, E. (2023). An update on sustainabilities and challenges on the removal of ammonia from aqueous solutions: A state-of-the-art review. *Journal of Environmental Management*, 347, 119172. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119172>
- Obeng, E., Essandoh, H. M. K., Akodwaa-Boadi, K., Taylor, T. S., Kusi, I., & Appiah-Effah, E. (2023). Recycled clay bricks and palm kernel shell as constructed wetland substrate for wastewater treatment: An engineered closed circuit circular

- economy approach. *Environmental Technology & Innovation*, 32, 103324. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103324>
- Owodunni, A. A., Ismail, S., Kurniawan, S. B., Ahmad, A., Imron, M. F., & Abdullah, S. R. S. (2023). A review on revolutionary technique for phosphate removal in wastewater using green coagulant. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103573. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103573>
- Page, D., Dillon, P., Mueller, J., & Bartkow, M. (2010). Quantification of herbicide removal in a constructed wetland using passive samplers and composite water quality monitoring. *Chemosphere*, 81(3), 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.07.002>
- Pérez, Y., Vargas, E., García-Cortés, D., Hernández, W., Checo, H., & Jáuregui-Haza, U. (2023). Efficiency and effectiveness of systems for the treatment of domestic wastewater based on subsurface flow constructed wetlands in Jarabacoa, Dominican Republic. *Water Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2023.08.004>
- Peterson, H. G. (1998). Use of constructed wetlands to process agricultural wastewater. *Canadian Journal of Plant Science*, 78(2), 199–210. <https://doi.org/10.4141/P97-142>
- Pinho, H. J. O., & Mateus, D. M. R. (2021). Sustainable Production of Reclaimed Water by Constructed Wetlands for Combined Irrigation and Microalgae Cultivation Applications. *Hydrology*, 8(1), 30. <https://doi.org/10.3390/hydrology8010030>
- Pinho, H. J. O., & Mateus, D. M. R. (2022). Contribution of Constructed Wetlands for Reclaimed Water Production: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1006(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1006/1/012008>
- Pinho, H. J. O., & Mateus, D. M. R. (2023). Bioenergy routes for valorizing constructed wetland vegetation: An overview. *Ecological Engineering*, 187, 106867. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106867>
- Decreto-Lei n.º 119/2019, de 21 de agosto, <https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/119-2019-124097549> (2019).
- Qi, Y., Zhong, Y., Luo, L., He, J., Feng, B., Wei, Q., Zhang, K., & Ren, H. (2024a). Subsurface constructed wetlands with modified biochar added for advanced treatment of tailwater: Performance and microbial communities. *Science of The Total Environment*, 906, 167533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167533>
- Qi, Y., Zhong, Y., Luo, L., He, J., Feng, B., Wei, Q., Zhang, K., & Ren, H. (2024b). Subsurface constructed wetlands with modified biochar added for advanced

- treatment of tailwater: Performance and microbial communities. *Science of The Total Environment*, 906, 167533. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167533>
- Rajan, R. J., Sudarsan, J. S., & Nithiyantham, S. (2018). Microbial population dynamics in constructed wetlands: Review of recent advancements for wastewater treatment. *Environmental Engineering Research*, 24(2), 181–190. <https://doi.org/10.4491/eer.2018.127>
- Razzaghmanesh, M., & Borst, M. (2018). Investigation clogging dynamic of permeable pavement systems using embedded sensors. *Journal of Hydrology*, 557, 887–896. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.01.012>
- Robert H. Kadlec, & Robert L. Knight. (1996). *Treatment Wetlands: Vol. I* (Lewis Publishers is an imprint of CRC Press LLC, Ed.; D).
- Roberts, K., Grace, M., Cook, P., Erler, D., & Wong, W. W. (2023). Stable isotopes of nitrate ( $\delta^{15}\text{N}$  and  $\delta^{18}\text{O}$ ) as functional indicators of nitrogen processing in constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 899, 165246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165246>
- Rozman, U., Klun, B., & Kalčíková, G. (2023). Distribution and removal of microplastics in a horizontal sub-surface flow laboratory constructed wetland and their effects on the treatment efficiency. *Chemical Engineering Journal*, 461, 142076. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.142076>
- Sahoo, J., Krishnaraj, C., Sun, J., Bihari Panda, B., Subramanian, P. S., & Sekhar Jena, H. (2022). Lanthanide based inorganic phosphates and biological nucleotides sensor. *Coordination Chemistry Reviews*, 466, 214583. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2022.214583>
- Sakurai, K. S. I., Pompei, C. M. E., Tomita, I. N., Santos-Neto, Á. J., & Silva, G. H. R. (2021). Hybrid constructed wetlands as post-treatment of blackwater: An assessment of the removal of antibiotics. *Journal of Environmental Management*, 278, 111552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111552>
- Sánchez, M., Gonzalo, O. G., Yáñez, S., Ruiz, I., & Soto, M. (2021). Influence of nutrients and pH on the efficiency of vertical flow constructed wetlands treating winery wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 42, 102103. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102103>
- Savio, N., Pandey, D., & Srivastava, R. K. (2023). Potentialities of plant based hybrid wetland systems for the treatment of household waste water using *Canna indica*, *Agave americana*, *Pistia stratiotes* and *Tagetes erecta*. *Materials Today: Proceedings*, 77, 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.264>

- Segovia-Hernández, J. G., Hernández, S., Cossío-Vargas, E., & Sánchez-Ramírez, E. (2023). Challenges and opportunities in process intensification to achieve the UN's 2030 agenda: Goals 6, 7, 9, 12 and 13. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, *192*, 109507. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2023.109507>
- Siriwardhana, K. D., Miguntanna, N., Jayaneththi, D. I., Kantamaneni, K., & Rathnayake, U. (2023). Vertically constructed wetlands for greywater reuse: Performance analysis of plants. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, *20*, 100881. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100881>
- Srivastav, A. L. (2020). Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation* (pp. 143–159). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00006-4>
- Tadda, M. A., Li, C., Gouda, M., Abomohra, A. E.-F., Shitu, A., Ahsan, A., Zhu, S., & Liu, D. (2021). Enhancement of nitrite/ammonia removal from saline recirculating aquaculture wastewater system using moving bed bioreactor. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *9*(5), 105947. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105947>
- Thorarensen, H., Imsland, A. K. D., & Monroe, A. C. (2023). The effect of CO<sub>2</sub>, total ammonia nitrogen and pH on growth of juvenile lumpfish (*Cyclopterus lumpus*). *Aquaculture*, *577*, 739986. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2023.739986>
- Ulén, B., Geranmayeh, P., Blomberg, M., & Bieroza, M. (2019). Seasonal variation in nutrient retention in a free water surface constructed wetland monitored with flow-proportional sampling and optical sensors. *Ecological Engineering*, *139*, 105588. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.105588>
- Verduzo Garibay, M., Fernández del Castillo, A., de Anda, J., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022a). Structure and activity of microbial communities in response to environmental, operational, and design factors in constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(11), 11587–11612. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03719-y>
- Verduzo Garibay, M., Fernández del Castillo, A., de Anda, J., Senés-Guerrero, C., & Gradilla-Hernández, M. S. (2022b). Structure and activity of microbial communities in response to environmental, operational, and design factors in constructed wetlands. *International Journal of Environmental Science and Technology*, *19*(11), 11587–11612. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03719-y>
- Vo, H. N. P., Koottatep, T., Chapagain, S. K., Panuvatvanich, A., Polprasert, C., Nguyen, T. M. H., Chaiwong, C., & Nguyen, N. L. (2019). Removal and monitoring acetaminophen-contaminated hospital wastewater by vertical flow constructed wetland and peroxidase enzymes. *Journal of Environmental Management*, *250*, 109526. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109526>

- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of The Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2010a). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J. (2010b). Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Water*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>
- Vymazal, J. (2020). Removal of nutrients in constructed wetlands for wastewater treatment through plant harvesting – Biomass and load matter the most. *Ecological Engineering*, 155, 105962. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105962>
- Vymazal, J. (2022). The Historical Development of Constructed Wetlands for Wastewater Treatment. *Land*, 11(2), 174. <https://doi.org/10.3390/land11020174>
- Vymazal, J., & Kröpfelová, L. (2008). *Wastewater Treatment in Constructed Wetlands with Horizontal Sub-Surface Flow* (Vol. 14). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8580-2>
- Wang, D., Li, P., Mu, D., Liu, W., Chen, Y., & Fida, M. (2024). Unveiling the biogeochemical mechanism of nitrate in the vadose zone-groundwater system: Insights from integrated microbiology, isotope techniques, and hydrogeochemistry. *Science of The Total Environment*, 906, 167481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167481>
- Wang, H., Xu, D., Han, J., Xu, R., & Han, D. (2021). Reshaped structure of microbial community within a subsurface flow constructed wetland response to the increased water temperature: Improving low-temperature performance by coupling of water-source heat pump. *Science of The Total Environment*, 781, 146798. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146798>
- Wang, Q., Xie, H., Ngo, H. H., Guo, W., Zhang, J., Liu, C., Liang, S., Hu, Z., Yang, Z., & Zhao, C. (2016). Microbial abundance and community in subsurface flow constructed wetland microcosms: role of plant presence. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(5), 4036–4045. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-4286-0>
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. (1958). *INTERNATIONAL STANDARDS FOR DRINKING-WATER*. [https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39989/9241540249\\_eng.pdf;sequence=1](https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/39989/9241540249_eng.pdf;sequence=1).

- Xiaoying, S., & Huanyan, Q. (2011). Design of Wetland Monitoring System Based on the Internet of Things. *Procedia Environmental Sciences*, *10*, 1046–1051. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2011.09.167>
- Xu, D., Sun, H., Wang, J., Wang, N., Zuo, Y., Mosa, A. A., & Yin, X. (2023). Global trends and current advances regarding greenhouse gases in constructed wetlands: A bibliometric-based quantitative review over the last 40 years. *Ecological Engineering*, *193*, 107018. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.107018>
- Zhang, X., Feng, C., Xu, Z., Yang, W., Tong, K., Wang, Y., & Liu, X. (2023). Coupling of partial nitrification and aerated vertical flow constructed wetland for enhancing nitrite removal and reducing nitrous oxide. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(1), 109114. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109114>
- Zhou, X., Chen, Z., Li, Z., & Wu, H. (2020). Impacts of aeration and biochar addition on extracellular polymeric substances and microbial communities in constructed wetlands for low C/N wastewater treatment: Implications for clogging. *Chemical Engineering Journal*, *396*, 125349. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125349>