



# **Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente**

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Damariz Yessenia Santillán Ushiña

Leiria, março de 2024



# **Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente**

Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente

Damariz Yessenia Santillán Ushiña

Dissertação realizada sob a orientação da Professora Doutora Judite dos Santos Vieira, do Professor Doutor Sérgio Manuel Maciel de Faria e do Professor Doutor Telmo Rui Cunha Fernandes.

Leiria, março de 2024

# **Originalidade e Direitos de Autor**

A presente dissertação é original, elaborada unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionada a Autora e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual a mesma foi realizada, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia da Energia e do Ambiente, no ano letivo 2023/2024, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

# Dedicatória

A minha família, que tem sido meu apoio constante e minha motivação para continuar a evoluir como pessoa e como profissional. A minha avó, Gloria, quem sempre teve confiança em mim e nas minhas capacidades. A minha mãe, Damariz que com as suas palavras e força, me motivou a ser quem sou hoje. A minha tia/irmã Lore quem tem sido minha melhor amiga desde sempre, e em quem sempre pude confiar para tudo. E finalmente a meus tios, Santiago e Carlos, que me ajudaram a estar hoje em Portugal e me apoiaram nesta nova etapa da minha vida. A meu tio Patrício, e meus primos pequenos Javi e Gabo por sempre torcer por mim.

# Agradecimentos

Gostaria de agradecer às seguintes pessoas, que me ajudaram e apoiaram ao longo dessa fase académica e de quem me lembrarei para sempre no meu futuro profissional.

À professora Judite dos Santos Vieira, pela dedicação e paciência, sem seus conselhos, palavras de ânimo e correções precisas, não teria conseguido finalizar meu projeto de dissertação.

Aos professores Telmo Rui Cunha Fernandes e Sérgio Manuel Maciel de Faria, pelo seu apoio e sugestões na área de eletrónica, e ao longo do desenvolvimento e aplicação do sistema inteligente.

Ao professor Fernando José do Nascimento Sebastião, por me transmitir novos conhecimentos sobre estatística aplicada, que foi fundamental na minha tese, pela sua paciência e sempre boa disposição para aclarar as minhas dúvidas.

À Maria Carlos Loureiro David Rodrigues, técnica do laboratório, por sempre ter boa disposição e paciência para me ajudar nos procedimentos efetuados no laboratório.

À Ounisia Delgado Dos Santos, estudante de doutoramento da UI LSRE-LCM polo IPLeiria, quem me ajudou sempre para eu obter os conhecimentos necessários sobre o funcionamento do Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI).

E finalmente agradeço a meus melhores amigos Dani Vivas e Aaron e os amigos que tive a oportunidade de conhecer ao longo deste caminho, e que foram um grande apoio para eu conseguir terminar essa dissertação, principalmente a: Danielle, Raquel, Tomás, Tiago, Laize, Yvna, Diego e David.

Este trabalho foi suportado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC): LSRE-LCM, UIDB/50020/2020 (DOI: 10.54499/UIDB/50020/2020) e ALiCE, LA/P/0045/2020 (DOI: 10.54499/LA/P/0045/2020) e o protótipo de medição elaborado no âmbito do projeto Embalagem do Futuro®, Agenda Verde para a Inovação Empresarial, projeto de investimento n.º: 59, financiado pelo PRR, NextGenerationEU.

# Resumo

Os problemas ambientais relacionados com poluição do solo, diminuição de fontes de água, alterações climáticas e aumento da necessidade de produção de alimentos, tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias para obter maior eficiência produtiva com menos recursos, particularmente água e energia.

A aquaponia é uma tecnologia que combina o cultivo de peixes e o cultivo de plantas sem solo de forma integrada. Nesse sistema, os resíduos produzidos pelos peixes são absorvidos pelas plantas e as plantas recebem os nutrientes de que precisam para crescer e filtram a água, tornando-a segura para os peixes. Esta abordagem em ciclo fechado torna a aquaponia ambientalmente amigável e altamente eficiente para produção de alimentos, no entanto é fundamental garantir o seu funcionamento adequado, exigindo um controlo permanente.

A aplicação da Internet das Coisas (IoT) em sistemas de aquaponia tem revolucionado a forma como este tipo de sistemas são monitorizados e geridos. Ao integrar sensores inteligentes, é possível ter dados em tempo real sobre parâmetros de qualidade da água como pH, temperatura, humidade, entre outros. Esses dados são enviados para uma plataforma centralizada, e posteriormente descarregados para serem analisados e interpretados. Com controlo IoT, os sistemas de aquaponia tornam-se mais eficientes, sustentáveis e resilientes.

Este trabalho teve como objetivo testar um sistema inteligente (sensores) de monitorização aplicado à linha 3 do Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI). A análise da qualidade da água foi efetuada com base nos parâmetros: pH, temperatura (T), condutividade elétrica (CE), oxigénio dissolvido (OD), temperatura (T), sólidos dissolvidos totais (SDT) e potencial de oxidação-redução (ORP). Para o efeito, foram realizadas, medições diárias cada 10 min aproximadamente ao longo dos meses de abril, junho e agosto de 2023. Verificou-se que os valores obtidos pelo sistema inteligente, após procedimentos de calibração, estiveram nas faixas recomendadas ao funcionamento adequado do sistema de aquaponia, comparando com a informação obtida por monitorização manual. No entanto, ocorreram certas limitações técnicas para os sensores de pH, OD e ORP que impossibilitaram a obtenção de dados em contínuo.

Os valores médios de pH obtidos nos meses de junho e agosto variaram entre 5 e 8; os de CE em abril, junho e agosto, variaram entre 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SDT entre 700 mg/L

e 1000 mg/L e temperatura com valores médios entre 18 °C e 30 °C. Para o mês de agosto o sensor de ORP apresentou valores entre 20 mV e 300 mV. Foi ainda possível estabelecer relações de correlação entre os parâmetros. Em abril, verificou-se uma correlação negativa entre T e SDT. Em junho, observou-se uma correlação negativa entre pH e SDT e no mês de agosto, verificou-se uma correlação positiva entre CE e SDT e correlação negativa entre pH e ORP.

Dentro do sistema inteligente foram ainda colocados sensores de imagem (câmaras inteligentes) para monitorizar o crescimento das plantas, 16 alfaces, ao longo de um mês (outubro de 2023), e detetar a presença de insetos, e desta forma comparar com os resultados da monitorização manual.

A monitorização inteligente em contínuo apesar de alguns desafios revelou ser uma mais-valia no controlo do sistema, permitindo implementar ações corretivas precocemente.

**Palavras-chave:** Aquaponia, monitorização, qualidade da água, IoT, sensores, calibração.

# Abstract

Environmental problems related to soil pollution, dwindling water sources, climate change and increased need for food production have led to the development of new technologies to achieve greater production efficiency with fewer resources, particularly water and energy.

Aquaponics is a technology that combines the cultivation of fish and soil-less plants in an integrated way. In this system, the waste produced by the fish is absorbed by the plants, which receive the nutrients they need to grow and filter the water, making it safe for the fish. This closed-loop approach makes aquaponics environmentally friendly and highly efficient for food production. However, it is essential to ensure its proper functioning, requiring permanent monitoring.

The application of the Internet of Things (IoT) in aquaponics systems has revolutionized the way this type of system is monitored and managed. By integrating intelligent sensors, it is possible to have real-time data on water quality parameters such as pH, temperature, humidity, among others. These data are sent to a centralized platform and then downloaded for analysis and interpretation. With IoT control, aquaponics systems have become more efficient, sustainable and resilient.

The aim of this study was to test an intelligent monitoring system (sensors) applied to line 3 of the Integrated Multitrophic Systems Laboratory (LSMI). Water quality was analysed using the following parameters: pH, temperature (T), electrical conductivity (EC), dissolved oxygen (DO), temperature (T), total dissolved solids (TDS) and oxidation-reduction potential (ORP). To this end, daily measurements were taken approximately every 10 minutes over the months of April, June and August 2023. It was found that the values obtained by the intelligent system, after calibration procedures, were within the recommended ranges for the proper functioning of the aquaponics system, compared to the information obtained by manual monitoring. However, there were certain technical limitations to the pH, DO and ORP sensors that made it impossible to obtain continuous data.

The average pH values obtained in June and August measurements were between 5 and 8; the EC values in April, June and August ranged from 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  to 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , SDT values between 700 mg/L and 1000 mg/L and average temperature values between 18 °C

and 30 °C. For August, the ORP sensor showed average values between 20 mV and 300 mV. It was also possible to establish correlations between these parameters. In April, there was a negative correlation between T and SDT. In June, there was a negative correlation between pH and SDT and in August, there was a positive correlation between EC and SDT and negative correlation between pH and ORP.

Within the intelligent system, image sensor (smart cameras) were also placed to monitor the growth of the plants, 16 lettuces, over one month (October 2023), and detect the presence of insects, thus comparing them with the results of manual monitoring.

Continuous intelligent monitoring, despite some challenges, proved to be an asset in controlling the system, allowing corrective actions to be implemented early.

**Keywords:** Aquaponics, monitoring, water quality, IoT, sensors, calibration.

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor</b> .....	<b>iii</b>
<b>Dedicatória</b> .....	<b>iv</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>v</b>
<b>Resumo</b> .....	<b>vi</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>xiii</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>xv</b>
<b>Lista de siglas e acrónimos</b> .....	<b>xvi</b>
<b>1. Introdução</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. Contextualização</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Motivação</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3. Objetivos</b> .....	<b>2</b>
<b>1.4. Organização do Relatório</b> .....	<b>3</b>
<b>1.5. Sistemas de Aquaponia</b> .....	<b>3</b>
1.5.1. Aspeto Biológico do Sistema.....	4
1.5.2. Importância socioeconómica e ambiental.....	7
1.5.3. Limitações dos Sistemas de Aquaponia .....	9
<b>2. Qualidade da Água no Sistema de Aquaponia</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1. Parâmetros de Qualidade da Água</b> .....	<b>12</b>
2.1.1. pH.....	12
2.1.2. Temperatura.....	14
2.1.3. Oxigénio Dissolvido.....	14
2.1.4. Condutividade Elétrica (CE).....	16
2.1.5. Potencial Oxidação-Redução (ORP).....	17
2.1.6. Sólidos Dissolvidos Totais (SDT).....	18
<b>3. Protótipo do Sistema Inteligente</b> .....	<b>20</b>
<b>3.1. Monitorização Inteligente</b> .....	<b>20</b>
<b>3.2. Sistemas Inteligentes em Aquaponia</b> .....	<b>21</b>
3.2.1. Implementação de IoT na monitorização de qualidade de água .....	23

<b>3.3.</b>	<b>Calibração de sistemas inteligentes (sensores)</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4.</b>	<b>Elementos Estruturais do Sistema</b> .....	<b>25</b>
3.4.1.	<i>Base de Dados Firebase</i> .....	25
3.4.2.	Microcontrolador ESP32.....	26
3.4.3.	Condicionadores de sinal .....	27
3.4.4.	Sensores .....	27
3.4.5.	Câmara fotográfica .....	28
<b>3.5.</b>	<b>Descrição do microcontrolador ESP32</b> .....	<b>28</b>
<b>3.6.</b>	<b>CrITÉrios de análise das câmaras inteligentes</b> .....	<b>29</b>
3.6.1.	Características das câmaras utilizadas .....	31
<b>4.</b>	<b>Materiais e MéTODos</b> .....	<b>33</b>
<b>4.1.</b>	<b>-Descrição do Sistema de Aquaponia</b> .....	<b>33</b>
4.1.1.	Tanque dos peixes .....	34
4.1.2.	Filtro Mecânico e Sedimentador .....	35
4.1.3.	Biofiltro .....	36
4.1.4.	Cama das plantas .....	37
4.1.5.	Sump e bomba de água circulante .....	38
<b>4.2.</b>	<b>Equipamento de Monitorização</b> .....	<b>39</b>
4.2.1.	Sensor: pH.....	39
4.2.2.	Sensor: Temperatura (T) .....	40
4.2.3.	Sensor de Condutividade EléTrica (CE) .....	41
4.2.4.	Sensor de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) .....	42
4.2.5.	Sensor de Oxigénio Dissolvido (OD) .....	43
4.2.6.	Sensor de Potencial Oxidação-Redução (ORP) .....	44
<b>4.3.</b>	<b>Observações e Limitações</b> .....	<b>45</b>
<b>4.4.</b>	<b>Cálculo e validação dos resultados</b> .....	<b>46</b>
<b>5.</b>	<b>Resultados e Discussão</b> .....	<b>47</b>
<b>5.1.</b>	<b>Comparação com a monitorização manual</b> .....	<b>47</b>
<b>5.2.</b>	<b>Cartas de Controlo dos Sensores Calibrados</b> .....	<b>48</b>
<b>5.3.</b>	<b>Análise dos Resultados Experimentais</b> .....	<b>53</b>
5.3.1.	Monitorização Inteligente – Análise Mensal .....	53
5.3.2.	Resultados da monitorização temporal .....	57
<b>5.4.</b>	<b>Correlação entre Parâmetros</b> .....	<b>61</b>
<b>5.5.</b>	<b>Monitorização do crescimento das plantas com recurso a análise de imagem</b> .....	<b>65</b>

<b>5.6. Estimativa de Custo para o Desenvolvimento do Protótipo .....</b>	<b>68</b>
<b>6. Conclusões.....</b>	<b>71</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>80</b>
<b>Anexo A-Especificações Sistema Inteligente.....</b>	<b>80</b>

# Lista de Figuras

Figura 1- Protótipo Eletrônico.....	25
Figura 2- Elementos Estruturais do Sistema Inteligente, <i>elaborado por Pereira (2023)</i> .....	26
Figura 3- Câmara OV2640 na Linha 3.....	28
Figura 4- Estrutura Geral do Sistema de aquaponia, <i>adaptado de Wei et al. (2019)</i> .....	33
Figura 5- Tanque dos Peixes Linha 3 .....	34
Figura 6- Espécie de Peixe na Linha 3.....	35
Figura 7- Filtro Mecânico e Sedimentador no Sistema de Aquaponia.....	36
Figura 8- Tanque de Bio-bolas no Sistema de Aquaponia .....	37
Figura 9- Cama das Plantas Linha 3 (volume total 2250L).....	38
Figura 10- Estrutura Geral do Sump.....	38
Figura 11- Sensor de pH Analógico V2. (Referência: SEN17004) .....	40
Figura 12- Sensor de temperatura a prova de água DS18B20. (Referência: SEN06005).....	41
Figura 13- Sensor Analógico para Condutividade Elétrica. (Referência: SEN08024).....	42
Figura 14- Sensor Analógico para Sólidos Dissolvidos Totais. (Referência: SEN08030).....	43
Figura 15- Sensor Analógico de oxigênio dissolvido. (Referência: SEN08043).....	43
Figura 16- Sensor Analógico Potencial Oxidação- Redução (Referência: SEN08052) .....	44
Figura 17- Carta de Controlo de Calibração do Sensor de pH (solução padrão 4) .....	49
Figura - 18 Carta de Controlo de Calibração do Sensor de pH (solução padrão 7) .....	50
Figura 19- Carta de Controlo de Calibração do Sensor de CE (solução padrão 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	51
Figura 20 - Carta de Controlo de Calibração do Sensor de CE (solução padrão 12880 $\mu\text{S}/\text{cm}$ ).....	51
Figura 21 - Carta de Controlo de Calibração do Sensor de OD 9,47 mg/L.....	52
Figura 22 - Carta de Controlo de Calibração do Sensor de OD 7,17 mg/L.....	53
Figura 23- pH: Valores médios diários e respetivo desvio padrão dos meses junho e agosto de 2023 .....	57
Figura 24- CE: Valores médios e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	58
Figura 25- SDT: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	59
Figura 26- T: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023.....	60
Figura 27- ORP: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, mês agosto de 2023.....	61

Figura 28- Regressão Linear entre os parâmetros T e SDT .....	62
Figura 29- Regressão Linear entre os parâmetros pH e SDT .....	63
Figura 30- Regressão Linear entre os parâmetros CE e SDT .....	64
Figura 31- Regressão Linear entre os parâmetros pH e ORP .....	65
Figura 32- Comparação Crescimento das Alfaces: 20/09/2023 e 02/11/2023, respetivamente. ....	65
Figura 33- Crescimento das Alfaces em 3 semanas e Observação de Insetos .....	66
Figura 34- Crescimento das Alfaces em 4 semanas e Observação de Insetos .....	66
Figura 35- Resultados da Monitorização Manual da Altura das Alfaces.....	67
Figura 36- Resultado da Monitorização Manual do Diâmetro das Alfaces .....	68

# Lista de tabelas

Tabela 1 - Especificações ESP32-CAM, <i>adaptado de Santos &amp; Santos (2023)</i> .....	32
Tabela 2- Soluções Padrão e de Calibração para o Sensor de pH.....	40
Tabela 3- Soluções Padrão e de Calibração para o Sensor de CE.....	42
Tabela 4- Solução de Enchimento para sensor OD.....	44
Tabela 5- Solução Padrão KCl 3,5 mol/L para sensor ORP (100 mL) .....	45
Tabela 6- Valores referência para calibração sensor ORP, adaptado de: DF Robot (2023).....	45
Tabela 7- Valores Médios dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água, 2020-2022 (n>200) .....	47
Tabela 8- Resultados da comparação entre a Sonda multiparamétrica e o Sensor de pH .....	48
Tabela 9- Resultados da comparação entre a Sonda multiparamétrica e Sensor de CE .....	48
Tabela 10- Resultados da comparação Sonda LSM1 e Sensor OD .....	48
Tabela 11- Valores de pH registrados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	54
Tabela 12- Valores de Condutividade Elétrica registrados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	55
Tabela 13- Valores dos Sólidos Dissolvidos Totais registrados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	55
Tabela 14- Valores da Temperatura registrados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023.....	56
Tabela 15- Valores do ORP registrados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023 .....	57
Tabela 16- Correlação entre os vários Parâmetros nos meses de estudo.....	61
Tabela 17 - Custos Estimados do Equipamento .....	69
Tabela 18 - Custos Estimados dos Reagentes .....	69
Tabela 19 - Custos Estimados das Soluções de Calibração de pH.....	70

# Lista de siglas e acrónimos

ADC	Captura automática de dados
API	<i>Application Programming Interface</i>
Arduino	Plataforma programável de prototipagem eletrónica
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
EDR	<i>Endpoint Detection and Response</i>
ESTG	Escola Superior de Tecnologia e Gestão
Fire Base	Plataforma de desenvolvimento de aplicativos
GNU/Linux	Sistema Operacional Unix-like baseado no GNU
GPIO	<i>General Purpose Input/Output</i>
Hardware	Componentes físicos de um sistema de um dispositivo eletrónico
IoT	Internet das Coisas ( <i>Internet of Things</i> )
LE	<i>Low Energy</i>
Macintosh OSX	<i>Macintosh Operating System</i>
MCU	Unidade de Microcontrolador ( <i>Microcontroller Unit</i> )
Offline	Não conectado a uma rede
Open-source	Código Aberto
OneWire	Protocolo de Comunicações
PWM	<i>Pulse With Modulation</i>
Processing	Linguagem de Programação
RAS	Sistemas de Recirculação em Aquaponia
Restful	Transferência de Estado Representacional
SAR	<i>Specific Absorption Rate</i>
SoC	<i>System on a Chip</i>
Software	Programas, aplicativos e dados utilizados em dispositivos eletrónicos
SRAM	<i>Static Random Access Memory</i>
TSMC	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver-Transmitter</i>
Web	<i>World Wide Web</i>
Windows	Principal Sistema Operativo da Microsoft

# 1. Introdução

Este capítulo inicia com a contextualização do tema da tese, descreve os objetivos do trabalho, princípios básicos de um sistema de aquaponia, importância e limitações da monitorização, a base do protótipo de monitorização recorrendo a vários sensores e apresenta ainda uma breve abordagem da estrutura da tese.

## 1.1. Contextualização

Nos últimos anos, face à poluição do solo, escassez de água e alterações climáticas, os sistemas de aquaponia têm atraído uma atenção crescente por apresentarem uma elevada eficiência produtiva e baixo consumo de recursos, nomeadamente água e energia, sendo uma alternativa nos sistemas de produção atuais de precisão. Aquaponia é um sistema de produção de alimentos que combina a aquacultura convencional com a hidroponia num ambiente de simbiose, integrando o cultivo e produção em cativeiro de peixes (ou outros organismos aquáticos) em condições controladas, com o cultivo de diferentes espécies de plantas sem necessidade de solo.

Neste tipo de sistemas, as raízes das plantas contactam diretamente com as soluções nutritivas (concentração de nutrientes conhecida e precisa), absorvem os nutrientes necessários no processo de crescimento, e evitam muitos fatores desfavoráveis que ocorrem no processo de cultivo do solo, como por exemplo o uso de pesticidas.

É importante definir os procedimentos de manutenção e controlo do sistema de aquaponia, nomeadamente no que se refere aos parâmetros físico-químicos de qualidade da água, que podem afetar o bem-estar dos peixes, o crescimento das plantas, e o uso eficiente de nutrientes. Por tanto, de acordo com a bibliografia consultada, pode dizer-se que uma boa opção para controlar a qualidade da água é a monitorização remota recorrendo ao uso de sensores, ligados à Internet, de modo a facilitar a recolha de dados, a elaboração de estratégias de controlo do sistema e a otimização para um baixo consumo de energia para facilitar o funcionamento fora da rede.

O objetivo do trabalho é desenvolver um protótipo de monitorização demonstrativo de que a tecnologia de sensores pode ser implementada em sistemas de produção sem solo,

substituindo os mecanismos tradicionais de controlo, e dessa forma permitir uma otimização do sistema o mais precocemente possível (acerto de pH, adição de nutrientes, etc.)

Neste sentido, o sistema desenvolvido para monitorizar os parâmetros de qualidade da água numa das linhas de produção do Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados (LSMI), é constituído por um dispositivo que contém 6 sensores, temperatura, pH, oxigénio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), potencial de oxidação redução (ORP) e sólidos dissolvidos totais (SDT). Os valores recolhidos são enviados para uma base de dados que está ligada à plataforma que processa os valores recebidos e os disponibiliza aos utilizadores ligados à rede.

## **1.2.Motivação**

A principal motivação é a aplicação de conhecimento de diferentes áreas, em particular a de Biologia que foi sendo obtida ao longo do percurso académico, na otimização de um sistema multitrófico integrado como é um sistema de aquaponia. Além disso, o facto de o Instituto Politécnico de Leiria possuir uma área de investigação em processos de produção sustentável e de dispor de instalações de produção com condições monitorizadas manualmente, permitiu definir o recurso a monitorização contínua como uma prioridade para uma melhor gestão das tarefas diárias a realizar no LSMI. A implementação do sistema proposto permite desenvolver novas competências académicas e científicas que posteriormente podem ser utilizadas na concretização de outros projetos na área do controlo e monitorização de sistemas aquáticos.

## **1.3.Objetivos**

- Caracterizar os diferentes sensores para seleção da melhor opção (disponibilidade, tempo de vida e preço).
- Avaliar e calibrar os sensores integrados no sistema inteligente de monitorização (gama de valores de pH, temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade, ORP e SDT).
- Efetuar testes colocando em funcionamento os sensores de controlo inteligente numa das linhas do sistema de aquaponia para validar o protótipo.
- Interpretar os dados dos parâmetros de controlo comunicados pelo equipamento de monitorização.

- Considerar os valores de CE e SDT como indicadores da quantidade de nutrientes necessária para o crescimento das plantas e que não comprometa o bem-estar dos peixes, bem como as condições adequadas para a atividade microbiológica associada à conversão da matéria orgânica e dos nutrientes.

#### **1.4. Organização do Relatório**

Este trabalho está organizado em seis capítulos: No capítulo 1, a introdução que para além do anteriormente descrito, apresenta também as características gerais dos sistemas de aquaponia e a sua importância social, ambiental e económica. O capítulo 2 apresenta o estado de arte da monitorização de qualidade de água em sistemas de aquaponia, e são detalhados e justificados os diferentes parâmetros físico-químicos selecionados. No capítulo 3 é abordado o tema da aplicação de tecnologia IoT em sistemas de aquaponia e ainda é explicada a funcionalidade dos principais elementos eletrónicos que fazem parte do protótipo desenvolvido. O capítulo 4 apresenta a metodologia a seguir para o processo de calibração dos sensores; detalha os procedimentos para elaboração de soluções padrão, assim como os passos a seguir para a calibração dos sensores de OD, pH, EC e ORP. No capítulo 5 são demonstrados os resultados obtidos a partir da aplicação do sistema inteligente de monitorização, e a discussão dos mesmos, para obter um conhecimento mais profundo sobre a viabilidade do protótipo. E finalmente o capítulo 6 indica os desafios em relação ao desenvolvimento do protótipo e descreve as conclusões do trabalho.

#### **1.5. Sistemas de Aquaponia**

Um sistema de aquaponia integra a piscicultura combinada com o crescimento das plantas, num ecossistema de recirculação. Os peixes são alimentados e excretam compostos químicos, que com base nos ciclos naturais das bactérias, os convertem em nutrientes, os quais são absorvidos pelas plantas durante o seu processo de crescimento, sendo retirados da água que é recirculada no sistema.

A aquaponia pode enquadrar-se na definição de agricultura sustentável, porque combina a produção de plantas e animais, e no processo integra o fluxo de nutrientes através de ciclos biológicos naturais e faz o uso mais eficiente dos recursos não renováveis. Os principais constituintes de um sistema de aquaponia passam pelo tanque dos peixes, filtro mecânico, biofiltro, cama das plantas e sump. Dentro do sistema, a água rica em nutrientes flui do

tanque dos peixes para o filtro de sólidos, onde a maioria das partículas suspensas são removidas. Após a ação do filtro de sólidos, a água passa pelo biofiltro onde decorre o processo de nitrificação (Tyson et al., 2011). Posteriormente, a água passa na cama das plantas, onde os nutrientes dissolvidos são absorvidos pelo sistema radicular das plantas. De seguida, a água tratada vai para um tanque de recolha (sump), onde finalmente retorna ao tanque dos peixes a partir de um sistema de bombagem (Zhang et al., 2022).

Todos estes componentes estão interligados de forma de garantir o funcionamento correto do sistema, mas também há outros parâmetros a considerar, que estão diretamente relacionados com a qualidade de água no sistema, tais como: temperatura, pH, oxigénio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (SDT), potencial de oxidação redução (ORP), Azoto amoniacal (N-NH<sub>4</sub>), Nitratos (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), Fosfatos (P-PO<sub>4</sub>). Estes parâmetros não são apenas a base para a sobrevivência dos animais aquáticos, são também fatores-chave para o crescimento adequado das plantas e, por conseguinte, para a produção eficaz de frutos e legumes (Huan et al., 2020).

### **1.5.1. Aspeto Biológico do Sistema**

Um dos maiores impactos ambientais de um sistema de aquaponia está relacionado com a quantidade de azoto presente no sistema, especificamente nos resíduos de produtos azotados que são excretados pelos peixes, por difusão e troca iónica através das guelras, da urina e das fezes. A biodegradação destes compostos azotados é essencial em sistemas de aquacultura em recirculação devido à toxicidade para os peixes do amoníaco, do nitrito e, em certa medida do nitrato (Krastanova et al., 2022).

A forma não ionizada do amoníaco (NH<sub>3</sub>) prevalece aumentando o potencial tóxico para os peixes, quando o pH e a temperatura são elevadas e o oxigénio dissolvido é baixo. Idealmente, os níveis de amoníaco devem ser mantidos abaixo dos 0,5 mg/L, níveis que excedam esse valor já são considerados tóxicos para os peixes, e a exposição prolongada pode causar danos nos órgãos vitais. Nessas condições, os peixes são incapazes de extrair a energia necessária dos alimentos e, por conseguinte, tornam-se lentos e letárgicos, o que causa problemas de crescimento, maior vulnerabilidade a doenças e até levar à morte (Maulini et al., 2021).

Os animais aquáticos apresentam um grande risco de envenenamento por causa do nitrito, este pode ser absorvido através do epitélio braquial e acumular-se em concentrações

elevadas nos fluidos corporais. O problema aparece quando o nitrito causa uma mudança na fisiologia do sangue, formando o que se denomina como metahemoglobina, que resulta na perda da capacidade de transporte de oxigénio no sangue. Concentrações superiores a 50% de metahemoglobina, são mortais para os peixes. Na água concentrações de nitritos superiores a 0,75 mg/L causam stress nos peixes e superiores a 5 mg/L provocam efeito tóxico (Xu, et al., 2021).

O excesso de nitratos pode levar a uma diminuição da capacidade de resistência dos peixes às doenças, resultando numa redução da sobrevivência. Níveis de nitratos entre 0-40 mg/L são admissíveis para os peixes, e valores superiores a 80 mg/L podem provocar efeito tóxico (Yu et al., 2019).

Além disso, os nitratos em conjunto, com outros nutrientes podem afetar diretamente o ecossistema aquático. Concentrações excessivas de nitratos e fosfatos podem acelerar o processo de eutrofização, provocando um crescimento acelerado do fitoplâncton e de outra flora aquática, causando perturbações no equilíbrio do ecossistema. É importante limitar a eutrofização pelo que, é prudente manter os níveis de fosfatos entre 0,6 e 1,5 mg/L (geralmente o nutriente limitante). Num sistema equilibrado, os níveis de fosfatos são em geral mais baixos do que os de nitratos, 0,5 mg/L de fosfatos e 10 mg/L de nitratos (Atique et al., 2022).

O azoto (N) é o nutriente inorgânico mais importante para todas as plantas e praticamente um bloco de construção para todas as formas de vida. Este elemento está presente na atmosfera como azoto molecular ( $N_2$ ), composto muito estável que é inacessível para as plantas. Isto significa que, o azoto na forma  $N_2$  tem de ser alterado antes de as plantas o poderem utilizar. A fixação do azoto é facilitada por bactérias que alteram quimicamente o  $N_2$  adicionando outros elementos como hidrogénio ou oxigénio, criando assim novos compostos químicos tais como amoníaco ( $NH_3$ ) e nitrato ( $NO_3^-$ ) que as plantas podem facilmente utilizar no seus processos de crescimento, sendo os nitratos mais facilmente assimilados pelas suas raízes (Van Rooyen & Nicol, 2022).

No sistema de aquaponia, a remoção de azoto amoniacal é feita num filtro biológico, que fornece um habitat adequado para o desenvolvimento de bactérias que convertem os compostos excretados pelos peixes em nutrientes acessíveis para as plantas. Este processo é denominado nitrificação, que consiste basicamente na oxidação sucessiva do amoníaco que

é produto final do catabolismo proteico dos peixes, a nitratos, via nitritos, por ação das bactérias nitrificantes (Krastanova et al., 2022).

A composição dos resíduos (fezes e urina) produzidos pelos animais (peixes) é em grande parte, amoníaco, que é convertido em nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) através da nitrificação biológica por bactérias oxidantes de amoníaco (AOB) como os *Nitrosococcus*, *Nitrosospira* e *Nitrosomonas*. Por sua vez, as bactérias oxidantes de nitritos (NOB), tais como *Nitrobacter*, *Nitrospira*, *Nitrococcus* e *Nitrospina*, transformam o nitrito em nitrato. Os géneros *Nitrosomas* spp. e *Nitrobacter* spp., são respetivamente o AOB e NOB mais comuns na aquaponia (Wu et al., 2022).

As bactérias nitrificantes são principalmente autotróficas obrigatórias, consomem dióxido de carbono, e aeróbias obrigatórias, que necessitam de oxigénio para crescer. As bactérias heterotróficas, por sua vez, crescem significativamente mais depressa do que as bactérias nitrificantes e prevalecem sobre estas, competindo por espaço e oxigénio nos biofiltros quando as concentrações de matéria orgânica dissolvida e particulada são elevadas. Por esta razão, é imperativo que a água de origem dos biofiltros seja mantida tão limpa quanto possível, com a menor concentração possível de sólidos totais (Ajijah et al., 2021).

Outro dos elementos essenciais para o funcionamento adequado de um sistema de aquaponia, é o fósforo (P), faz parte da estrutura do ácido nucleico das plantas, responsável pela regulação da síntese proteica, influenciado o crescimento das plantas. Participa ainda nos processos de fotossíntese, respiração, transferência de energia entre outros (Jung et al., 2019).

O fósforo é adicionado através da alimentação e é posteriormente excretado pelos peixes, 30-65% na forma de ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) dissolvido. As formas solúveis de iões fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) são facilmente absorvidas pelas raízes das plantas, pelo que a concentração disponível na água depende da solubilização dos fosfatos minerais e da degradação ou mineralização do fósforo orgânico (Xu, et al., 2021).

Concentrações elevadas de fosfatos resultantes da mineralização do fósforo orgânico, têm uma grande influencia na sobrevivência dos peixes, uma vez que requer oxigénio, e dessa forma poderá haver uma diminuição da concentração de OD. A mineralização do fósforo orgânico contribui para a carência bioquímica de oxigénio (CBO) na água. A CBO representa uma medida da quantidade de oxigénio necessária para o processo de

decomposição da matéria orgânica. Portanto, quanto maior a taxa de mineralização, maior a CBO e como consequência, o consumo de oxigénio aumenta significativamente. Situação que afeta negativamente aos organismos aquáticos, deixando-os sem suficiente oxigénio para sua sobrevivência (Xu, et al., 2021).

Os níveis ótimos de oxigénio dissolvido para o bem estar animal deverão estar entre 4 e 8 mg/L, e acima dos 2,0 mg/L para o processo de nitrificação (Somerville et al., 2014).

Em resumo, o ecossistema de aquaponia é totalmente dependente dos processos de transformação biológica, ou seja, da ação das bactérias, considerando que estes processos de remoção de nutrientes contribuem para a melhoria da qualidade da água, evitam que a água se torne tóxica para os peixes, podendo ser recirculada e desta forma peixes, plantas e bactérias possam coexistir simbioticamente. Assim, todos os organismos trabalham em conjunto para criar um ambiente de crescimento saudável uns para os outros, desde que o sistema esteja devidamente equilibrado.

### **1.5.2. Importância socioeconómica e ambiental**

No século XXI, a agricultura enfrenta múltiplos desafios que se relacionam diretamente com o constante crescimento da população humana a nível mundial. Este fenómeno obriga os países a implementarem políticas diferentes para o desenvolvimento de novas técnicas para produzir mais alimentos de forma mais sustentável e eficiente, recorrendo a menor quantidade de recursos, água e energia.

A nível mundial, a agricultura experimenta um grande desafio, relacionado com a escassez de água, incluindo as fontes de águas subterrâneas, devido à incapacidade de recarga, especialmente em zonas semi-áridas e áridas com volumes de precipitação e de águas superficiais limitado. De acordo com Pointet (2022), 70% das captações globais de água subterrânea são utilizadas na produção agrícola de alimentos, fibras, gado e culturas industriais, e estima-se que 38% das terras preparadas para irrigação sejam servidas por este recurso.

Por outro lado, o impacto ambiental induzido pelas alterações introduzidas pelas práticas agrícolas e, posteriormente, o tipo de ambiente que é produzido pela incorporação da produção alimentar numa dada região está fortemente associado ao esgotamento de águas subterrâneas por apresentar taxas de captação insustentavelmente elevadas, principalmente em zonas áridas e semi-áridas, onde o crescimento demográfico e a expansão das zonas

irrigadas conduzem a um rápido aumento da procura de água. Além disso, os processos agrícolas, contribuem para a poluição destas águas subterrâneas, devido ao uso de fertilizantes, inseticidas, herbicidas e fungicidas, afetando todo o ecossistema (Bierkens & Wada, 2019).

O cultivo agrícola provoca ainda outros problemas ambientais emergentes, incluindo a perda de florestas, emissões de gases com efeito de estufa e alterações climáticas (Yuan et al., 2022). Além disso, será cada vez menor, porque o solo, que é a matriz de suporte mais favorável e disponível na agricultura, é afetado devido ao aumento da erosão, compactação, degradação, declínio das condições topográficas, etc.

Em consequência, nos últimos anos têm-se desenvolvido várias tecnologias e métodos para produção alimentar, sendo a aquaponia uma delas, a qual permite a obtenção simultânea de dois produtos agrícolas (vegetais e peixe) utilizando uma única fonte de azoto. Em comparação com a agricultura convencional, estes sistemas oferecem outros benefícios, tais como: possibilidade de aplicação a várias escalas, desde uma pequena unidade, uma estufa, até uma lagoa em grande escala, permite minimizar a produção de resíduos (solução nutritiva de precisão) e não requer a utilização de fertilizantes ou pesticidas químicos (Zainal Alam et al., 2022).

Os sistemas de aquaponia também contribuem para os objetivos de desenvolvimento sustentável, onde os pequenos agricultores podem ter a oportunidade de crescimento sustentável e emprego decente. Locais com um número significativo de habitantes e em que os recursos (água e terra cultivável) são limitados, têm a possibilidade de produzir os seus próprios alimentos através da implementação de instalações de aquaponia de grande escala, e os agricultores comerciais têm a opção de iniciar ou diversificar negócio viável na produção de alimentos (Gumisiriza et al., 2022).

Na vertente ambiental, os sistemas de aquaponia e de hidroponia apresentam grandes benefícios, em comparação com a agricultura convencional. De acordo com Martinez-Mate et al. (2018), as necessidades de terreno (área) deste tipo de sistemas podem ser dez vezes menores e os rendimentos podem ser cerca de onze vezes superiores, e além disso têm baixas emissões de gases (0,11 kg de CO<sub>2</sub> equivalente).

Um dos aspetos mais importante relativamente aos benefícios da aquaponia, é a diminuição das necessidades de água. Será necessário utilizar 1/6 da água para produzir até 8 vezes mais

alimentos por hectare, em comparação com a agricultura convencional. Isto é benéfico numa escala maior especificamente em zonas áridas, uma vez que a água é recirculada e apenas necessita de substituições pontuais (Greenfeld et al., 2022).

Como é possível constatar, um sistema de aquaponia bem gerido, minimiza as necessidades de uso da água, e de descarga de águas residuais com sais nutritivos, tendo menor impacto nas linhas de água recetoras e no meio envolvente. Ao mesmo tempo pode aumentar a eficiência da retenção de nutrientes e é possível obter produtos de melhor qualidade, tanto no que se refere aos peixes que são criados sem o uso de hormonas de crescimento e antibióticos, como os vegetais que não são afetados pela utilização indiscriminada de produtos químicos (Love et al., 2015).

A reposição de água é apenas necessária para compensar o que foi evaporado ou absorvido pelas plantas. De forma geral, num sistema de recirculação convencional, é utilizada uma taxa de troca de água de 5 a 10% por dia para evitar acumulação de resíduos metabólicos, e nos sistemas de aquaponia, de 1 e 3% por dia (Love et al., 2015).

Há ainda a mencionar outro aspeto dentro da vertente ambiental. Os sistemas de aquaponia, não representam um perigo para a biodiversidade, uma vez que o risco é reduzido ou nulo para as populações selvagens, se os organismos aquáticos cultivados estiverem separados do meio aquático natural (Fruscella et al., 2021).

### **1.5.3. Limitações dos Sistemas de Aquaponia**

A integração da aquacultura em recirculação com a produção de plantas hidropónicas aumenta a complexidade, o que exige maior especialização para o conhecimento dos processos do sistema, compromete a otimização do sistema para qualquer um dos produtos, e restringe as respostas de gestão, especialmente em relação ao combate a eventuais pragas, por limitação no uso de substâncias químicas, em particular pesticidas e antibióticos (Bhakar et al., 2021).

Apresenta como requisito a utilização de energia, devido principalmente à necessidade de arejamento e bombagem na maioria dos componentes do sistema. Os sistemas mais sustentáveis têm custos de instalação elevados em comparação com a produção no solo ou a hidroponia convencional, porque exigem um investimento elevado, principalmente os de grande escala, e quando recorrem a sistemas solares ou eólicos como fonte de energia (Bhakar et al., 2021).

Em sistemas orientados para a produção de plantas, outra questão do ponto de vista da sustentabilidade, prende-se com a necessidade de utilização de alimentos de alta qualidade para os peixes, aumentando o custo associado. Aspeto também relacionado com a limitação ao nível de legislação, no que se refere ao tipo de licença para as instalações de aquaponia e à possibilidade de venda dos peixes para consumo, e também ao nível de certificação biológica (Albers et al., 2021).

Por último, mesmo que represente uma oportunidade para os pequenos agricultores, ainda existe falta de apoio e investimento para este tipo de produção agrícola. Em específico, para os agricultores dos países em desenvolvimento, é mais complicado comprar ou operar sistemas de aquaponia de alta tecnologia e elevado custo, que dependem da eletricidade 24 horas por dia, 7 dias por semana. Além disso, a aquaponia requer um acesso fiável aos fatores de produção, especificamente às sementes e aos alimentos para peixes, o que constitui um desafio nas zonas menos desenvolvidas (Kumar et al., 2021).

Adicionalmente, também é importante indicar as limitações regulamentares atuais da aquacultura de pequena escala que são um entrave à sua expansão. Na legislação de alguns países, os regulamentos ambientais, de pragas e sanitários são muito restritivos e os pequenos agricultores não conseguem cumprir, o que restringe a sua capacidade de aceder a mercados, patentes e também limitam o acesso direto a fontes de créditos formais (Albers et al., 2021).

Na União Europeia, os regulamentos em vigor tornam difícil a comercialização dos produtos, e isto impede o crescimento da aquaponia dentro da indústria agrícola, ainda que haja forte pressão para a possibilidade de obtenção da certificação biológica dos produtos aquapónicos.

Um dos obstáculos que impedem a obtenção da certificação; é o facto de integrar dois modos de produção distintos, aquacultura e produção de plantas que apresentam regulamentações diferentes sendo geridas por duas Direcções-Gerais diferentes dentro da Comissão Europeia. Outro razão, é que dentro dos regulamentos relacionados com os processos de certificação para agricultura biológica, a hidroponia não é permitida. Por tanto, sendo que a aquaponia é considerada como um tipo de tecnologia hidropónica e agro-ecológica não cumpre os requisitos para ser considerada para a certificação (Fruscella et al., 2021).

Além disso, desde janeiro de 2022, existe um pré-requisito para a produção agrícola biológica, que tem como regra geral, que os cultivos sejam em solos que tenham uma ligação

Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente

---

direta com o subsolo e a rocha. Também, para a certificação de produtos biológicos, a utilização de sistemas de aquacultura em recirculação e os resíduos de peixe crus, são excluídos para o uso como fertilizantes para as diferentes culturas (Fruscella et al., 2021).

## 2. Qualidade da Água no Sistema de Aquaponia

Num sistema de aquaponia, é essencial ter um ambiente apropriado para a sobrevivência das plantas e dos peixes. Por tanto, é importante garantir os padrões de qualidade da água, porque além de ser o meio de circulação de nutrientes em todo o sistema, também permite o surgimento das bactérias que são necessárias para desenvolver o processo de nitrificação, fator chave para o sucesso do sistema. Face à relevância da qualidade da água num sistema de aquaponia, neste capítulo são apresentados os parâmetros essenciais para o seu controlo. Apesar da relevância da monitorização dos nutrientes no sistema de aquaponia, a escolha dos parâmetros de qualidade da água e a respetiva descrição, foi realizada em função dos sensores disponíveis para a construção de um protótipo de monitorização inteligente.

### 2.1. Parâmetros de Qualidade da Água

A qualidade das águas é representada por um conjunto de características, geralmente mensuráveis, de natureza física, química e biológica, que tornam a água adequada para um uso específico. A água contém compostos químicos que podem tornar-se tóxicos ou perigosos, quando presentes em concentrações elevadas, para os organismos que interagem nesse ambiente. Por outro lado, a ausência de certos compostos, pode representar um perigo para todo o ecossistema, nomeadamente para a sobrevivência dos microrganismos e para o crescimento das plantas. Esta é a principal razão para uma monitorização contínua dos parâmetros de qualidade da água no sistema de aquaponia, contribuindo dessa forma para um melhor funcionamento do sistema.

#### 2.1.1. pH

O pH representa a concentração de iões de hidrogénio numa solução e é definido como uma variável fundamental, influenciando muitos outros parâmetros. A variação dos valores de pH no sistema de aquaponia afeta diretamente a disponibilidade de nutrientes para as plantas e a taxa de nitrificação. Os valores de pH variam numa escala de 0 a 14. Um valor baixo de pH 0 - 7,0 indica carácter ácido, concentração elevada de iões  $H_3O^+$ ; valor próximo de 7,0 indica carácter neutro e um valor de pH elevado 7,0 - 14,0 indica carácter básico ou alcalino, baixa concentração de iões  $H_3O^+$  (Yanes et al., 2020).

O pH da água tem um grande impacto em todos os aspetos da aquaponia, especialmente para as plantas e bactérias. Para as plantas, quando o pH é demasiado baixo ( $< 6,0$ ), os nutrientes são dissolvidos rapidamente o que resulta num excesso de nutrientes para a planta; e para pH elevado ( $> 6,5$ ) ocorre o efeito contrário, baixa dissolução de nutrientes (fenómenos de precipitação), e isto pode levar a deficiências de nutrientes, o que impacta no crescimento (Somerville et al., 2014).

As plantas necessitam de nutrientes, essenciais para as enzimas, fotossíntese, crescimento e reprodução. Existem duas categorias de nutrientes: os macronutrientes e os micronutrientes. Os primeiros, são necessários em maior quantidade em comparação com os micronutrientes, os quais desempenham um papel fundamental no processo de transferência de energia e como compostos de proteínas e clorofila. Há seis macronutrientes fundamentais para as plantas: azoto, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre. Os micronutrientes são necessários apenas em quantidades vestigiais, que atuam como elementos complementares nas funções de crescimento e desenvolvimento das plantas, são: ferro, manganês, molibdénio e zinco (Somerville et al., 2014).

As plantas removem os iões da solução nutritiva, alterando o pH. Os iões positivos como os  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , são removidos e posteriormente os iões de hidrogénio são libertados para igualar a proporção de aniões para catiões na zona radicular, e isto reduz o pH da solução. Por outro lado, quando o cultivo se encontra em fase de crescimento ativo, aniões como  $\text{NO}_3$  são absorvidos, o que aumenta o pH através da libertação de iões hidróxido ( $\text{OH}^-$ ) na solução (Gillespie et al., 2020).

Geralmente, neste tipo de sistemas o pH tende a baixar com o tempo devido a nitrificação. A não diminuição poderá dever-se ao facto do cálcio e do potássio não estarem a ser suplementados em quantidades adequadas ao funcionamento do sistema, o que afeta diretamente a saúde e a produtividade das plantas, ou que a desnitrificação está a ocorrer em zonas anaeróbias (depende da quantidade de oxigénio dissolvido na água) e o nitrato está a ser convertido em azoto gasoso (Yanes et al., 2020).

No caso das bactérias nitrificantes, o pH ótimo de funcionamento é de 6,0 a 8,5 e apenas algumas espécies preferem pH 8,5 ou superior. Quando a concentração de pH diminui ( $< 6,0$ ), o crescimento das bactérias é inibido e pode ocorrer alteração no processo de nitrificação, o

que causa um aumento da concentração de amoníaco, bastante tóxico para os outros organismos dentro do sistema (Daffa Fadillah et al., 2021).

No caso dos peixes, a gama de valores de pH recomendada é 6,0 - 8,5, podendo variar ligeiramente consoante a espécie de peixe. Em suma, valores de pH de 6,0-7,0 são os adequados para os três componentes do sistema de aquaponia (plantas, peixes e bactérias) (Cerozi & Fitzsimmons, 2016).

### **2.1.2. Temperatura**

Em aquaponia a temperatura da água é mais importante do que a temperatura do ar para a produção vegetal. A gama de temperatura indicada para hidroponia é entre 18 °C e 30 °C, acima desse valor pode ser restringida a absorção de cálcio pelas plantas. No caso dos peixes, a temperatura da água tolerada depende muito do clima local e da espécie de peixe. Por exemplo, os peixes tropicais, toleram temperaturas entre 22 °C e 31 °C, os peixes de água fria entre 10 °C e 18 °C e algumas outras espécies toleram gamas mais alargadas (Krastanova et al., 2022).

Este parâmetro também tem uma grande influência sobre o desempenho das bactérias nitrificantes. O intervalo de temperatura adequada para o crescimento e produtividade das bactérias é 17-34 °C. As baixas temperaturas (< 17 °C) têm o maior impacto sobre estes microrganismos, reduzindo a sua produtividade (Cáceres et al., 2018).

A temperatura também tem uma influência direta sobre o desenvolvimento das plantas, uma vez que temperaturas muito elevadas (acima de 35 °C) ou muito baixas (menos de 16 °C), representam um fator limitante, associado à deficiência de oxigénio nas raízes, o que poderá causar problemas significativos no metabolismo da planta. O cenário mais preocupante ocorre quando a temperaturas mais elevadas, a solubilidade de oxigénio diminui, afetando significativamente o processo de respiração celular, processo em que as plantas através das raízes obtêm energia necessária para extrair água e nutrientes (Ragaveena et al., 2021).

### **2.1.3. Oxigénio Dissolvido**

O oxigénio dissolvido é um parâmetro bastante sensível dentro de um sistema de aquaponia, influencia o crescimento dos peixes, e é crítico para a proliferação das bactérias nitrificantes benéficas e para o crescimento das plantas.

Os níveis de oxigénio necessários podem variar em função da biologia e fisiologia dos peixes. Para os peixes de água quente, por exemplo o peixe-gato Africano (*Clarias gariepinus*) ou o robalo (*Dicentrarchus labrax*), o valor mínimo é de 5 ppm. Concentrações de oxigénio dissolvido (OD) menores a 3 ppm provocam stress nos peixes e morte. No caso dos peixes de água fria, por exemplo o peixinho dourado (*Carassius auratus*) ou a truta-arco-íris (*Oncorhynchus mykiss*), o valor mínimo de OD é de 6,5 ppm para manter uma boa saúde e um crescimento normal (Ragaveena et al., 2021). Em relação às bactérias, os resultados de alguns estudos realizados, demonstram que existe uma taxa de crescimento mais elevada para concentrações próximas de 4 mg/L, e pelo contrário a taxa de crescimento diminui significativamente para concentrações elevadas de OD. Atendendo ao referido, os níveis recomendados variam entre 4 a 8 mg/L; valores fora dessa gama podem provocar um desequilíbrio no sistema de aquaponia, condicionando o processo de nitrificação, o que aumenta os riscos para a saúde dos dois ecossistemas, peixes e plantas (Roots et al., 2019).

No caso das plantas, as suas raízes estão imersas na solução aquosa da qual retiram grande parte do oxigénio de que necessitam. A disponibilidade de oxigénio é essencial para vários processos metabólicos prioritários, tais como: metabolismo dos hidratos de carbono, redução dos nitratos, fixação simbiótica do azoto, renovação das proteínas, manutenção do gradiente de protões e absorção de nutrientes pelas raízes. Face ao descrito, os níveis de oxigénio dissolvido têm influência direta sobre o crescimento das plantas. Uma diminuição na concentração de oxigénio dissolvido provoca a deficiência de oxigénio nas raízes, resultando na síntese anormal de fito-hormonas e na diminuição das atividades metabólicas (Ikeura et al., 2018).

Para os peixes, o nível de oxigénio dissolvido nos tanques de aquacultura é um dos elementos mais importantes para a sua sobrevivência e fator essencial no equilíbrio do sistema. Uma concentração adequada de OD permite mitigar doenças, parasitas, mortes e melhora a receção dos alimentos (Ren et al., 2018).

O oxigénio dissolvido é essencial para os peixes em processos básicos como respiração, tendo em conta que os peixes bombeiam a água através das guelras para absorver oxigénio molecular. E isto também representa um gasto energético, que ao mesmo tempo, influi no metabolismo do peixe. A alteração da quantidade de oxigénio dissolvido dentro do sistema de aquaponia, pode produzir a redução do ritmo de ingestão de alimentos, uma vez que os peixes gastam mais energia para obter oxigénio, diminuindo o gasto de energia para outras

atividades, como a alimentação, e como resultado a taxa de crescimento é menor. Adicionalmente, o crescimento é notavelmente afetado pelo aumento do stress, hipoxia de tecidos, diminuição de atividades de natação e redução da imunidade às doenças (Nodo et al., 2023).

Além disso, as necessidades de oxigénio dissolvido dependem da conversão de matéria orgânica presente na água realizada por organismos aeróbios. Nos tanques de aquacultura que recebem alimentos para os peixes, há grandes quantidades de azoto e fósforo, resultantes da decomposição dos alimentos não consumidos, e da excreção metabólica realizada pelos animais, podendo ocorrer produção de fitoplâncton. Tal produção poderá contribuir para a produção de oxigénio por fotossíntese, no entanto a quantidade produzida por essa via é normalmente inferior ao ganho de oxigénio por difusão. Do mesmo modo, grandes quantidades de oxigénio são consumidas na respiração do plâncton e dos peixes e na decomposição microbiana dos alimentos não consumidos e das águas residuais produzidas (Boyde, Torrans , & Tucker, 2018).

Em suma, o oxigénio dissolvido suporta todo o processo metabólico dos organismos aquáticos. Um valor de oxigénio muito baixo resulta num número significativo de substâncias tóxicas na água, causando doenças graves nos peixes e conseqüentemente maior taxa de mortalidade (Ren et al., 2018). Há a referir, os efeitos nocivos causados por concentrações elevadas de metabolitos como dióxido de carbono, amoníaco, nitrito e sulfureto de hidrogénio. Na presença destas substâncias e dependendo da concentração, os animais apresentarão alterações comportamentais, lesões nas brânquias ou outras partes do corpo e lesões internas, que conseqüentemente poderão levar à sua morte (Boyde, Torrans , & Tucker, 2018). O baixo teor de OD poderá resultar também da relação direta com a temperatura da água, uma vez que quanto maior a temperatura, menor é o teor de OD dissolvido na água. Por conseguinte, para aumentar a produção do sistema de aquaponia, é importante compreender a dinâmica do oxigénio dissolvido na água, sendo fundamental assegurar a sua monitorização frequente.

#### **2.1.4. Condutividade Elétrica (CE)**

A condutividade elétrica é uma medida da capacidade de um meio para conduzir corrente elétrica através dos iões dissolvidos e, no caso dos sistemas de aquaponia, está altamente correlacionada com a salinidade (concentração de sais dissolvidos na água), valores normalmente apresentados em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Os sais dissolvidos na água dividem-se em iões com carga positiva (catiões) e negativa (aniões). Os iões positivos mais frequentes são sódio ( $\text{Na}^+$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), potássio ( $\text{K}^+$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ). Os iões negativos mais comuns são cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) e bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ). Por conseguinte, a condutividade e salinidade estão relacionadas, considerando que a quantidade de iões dissolvidos aumenta os valores de ambas (Yanes et al., 2020).

Os valores recomendados para condutividade elétrica para sistemas de aquaponia, estão na gama de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 3000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . É de referir que esses valores dependem de cada cultura e das condições ambientais. Além disso, a condutividade elétrica tem influência sobre o desenvolvimento das plantas. Valores altos ( $>3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ ), indicam um excesso de sais dissolvidos, impedindo a absorção dos nutrientes necessários para o crescimento das plantas, reduzindo significativamente a percentagem de matéria seca total da parte aérea e da raiz e os teores de clorofila 'a', 'b' e carotenóides. Em geral, uma CE elevada dificulta a absorção de nutrientes, ao aumentar a pressão osmótica da solução nutritiva e uma CE baixa pode afetar gravemente a saúde e rendimento das plantas por ausência de nutrientes (Ding et al., 2018).

Nos peixes é necessário um teor mínimo de cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ) para se manter o equilíbrio osmótico, tal como nas plantas, a CE depende da espécie e das condições específicas do habitat, no entanto a gama ótima para a maioria das espécies de água doce varia entre 50  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em águas muito limpas e 2000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em águas mais poluídas (Shetye et al., 2023). Quando os valores de condutividade elétrica aumentam podem causar stress osmótico nos peixes; desequilibrando a concentração interna de sais e outros eletrólitos presentes nos seus corpos. O aumento da condutividade aumenta a probabilidade de haver excesso de iões metálicos tóxicos para os peixes, podendo também interferir na capacidade da água para transportar oxigénio dissolvido. Por outro lado, valores baixos de CE podem causar desequilíbrio iónico nos peixes, interferindo nas funções fisiológicas e metabólicas, dificuldade na regulação osmótica, maior suscetibilidade a doenças e limitação no crescimento (Mohamed et al., 2021).

### **2.1.5. Potencial Oxidação-Redução (ORP)**

O processo de oxidação-redução é conhecido como redox, fundamental na biodegradação da matéria excretada. O potencial redox refere-se ao processo de medição da energia química envolvida nas reações de oxidação-redução, convertendo-a em energia elétrica. O

valor do ORP mede a atividade dos eletrões em comparação com a atividade de um eletrodo de referência. Este valor é geralmente medido em milivolts (mV). O potencial redox é positivo quando prevalece a oxidação e negativo quando prevalece a redução (Huang et al., 2021). O potencial de oxidação-redução e o pH estão interligados porque afetam e são afetados pelas mesmas variáveis no sistema de aquaponia. No caso específico da água, o processo de oxidação acidifica o meio (são produzidos iões  $H^+$ ), enquanto a redução alcaliniza o meio (são gerados iões  $OH^-$ ). Ambos os parâmetros variam no meio, uma vez que o pH mede a atividade dos prótons e o potencial redox mede a atividade dos eletrões (Saalidong et al., 2022).

O ORP é definido como o parâmetro mais importante no processo de depuração da água, representa a capacidade do meio aquático para oxidar a matéria orgânica presente. No caso da aquacultura, a matéria orgânica presente provém das fezes dos organismos e alimentos não consumidos, a qual entra em decomposição na presença de oxigénio (McGehee & Raudales, 2023). No sistema de aquaponia, para quantidades baixas de matéria orgânica, maior é o poder oxidante, pelo contrário quanto mais matéria orgânica houver, menor o poder oxidante. Os valores de ORP variam em função da atividade ou das características do meio aquático. Para aquacultura é requerido um valor de ORP de aproximadamente 250 mV (Nghí et al., 2018). Além disso, o potencial de oxidação-redução da água tem uma estreita relação com a concentração de ozono dissolvido (ppm), elemento eficaz para a desinfeção do meio aquático (Liu et al., 2019). Quanto mais elevado for o nível de ORP, maior é a capacidade da água para destruir contaminantes estranhos, como por exemplo, microrganismos ou contaminantes à base de carbono (Spiliotopoulou et al., 2018).

#### **2.1.6. Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)**

Os sólidos dissolvidos totais representam a quantidade de sais inorgânicos, matéria orgânica e outros materiais dissolvidos num determinado volume de água, medido em miligramas por litro (mg/L) ou partes por milhão (ppm).

Valores inferiores a 1000 mg/L de SDT são considerados adequados para um sistema de aquaponia. Valores superiores podem causar toxicidade para a maioria das espécies de peixes (Medina et al., 2016). Para as plantas, os valores de SDT requeridos são inferiores aos requeridos em sistemas hidropónicos, valores entre 200 e 400 mg/L, considerando que a ciclagem de nutrientes em sistemas de aquaponia ocorre todos os dias (Luis Lenz et al., 2021).

O valor de SDT da água num sistema de aquaponia, está diretamente relacionado com a condutividade elétrica. Por tanto, quanto maior for a quantidade de sólidos dissolvidos na água, maior será o valor da condutividade elétrica. A água que apresenta uma elevada pureza, tem uma condutividade elétrica muito baixa (Siswanto et al., 2023).

A correlação desses dois parâmetros pode ser estimada pela equação 1:

**Equação 1 - Fórmula de Correlação entre CE e SDT**

$$\text{SDT (mg/L)} = k * \text{CE (\mu S/cm)}$$

O valor de k depende da salinidade da água e apresenta variações com o aumento de iões na água. Para água doce, o valor definido para k varia entre 0,55 – 0,75. Rusysi, (2018), conclui que a relação SDT/CE na água doce é de 0,65 (valor de k).

## 3. Protótipo do Sistema Inteligente

### 3.1. Monitorização Inteligente

A monitorização inteligente é uma abordagem avançada para o acompanhamento e gestão de sistemas, processos ou dispositivos, que envolve o uso de tecnologias de ponta, como a inteligência artificial (IA), a aprendizagem computacional, sensores avançados e conectividade em rede para recolher, analisar e interpretar dados em tempo real. Os dados podem ser adquiridos por diversos dispositivos ou sistemas, isso pode incluir dados de dispositivos conectados à IoT (*Internet of Things* em inglês), registos de sistemas de informação, entre outros. Uma vez recolhidos, os dados são analisados usando algoritmos avançados de inteligência artificial e aprendizagem computacional. Essa análise permite obter informação sobre padrões, tendências e anomalias que podem não ser facilmente identificados por métodos tradicionais (Rosero-Montalvo et al., 2020).

Um elemento fundamental na monitorização inteligente é a capacidade de aprender e de se adaptar ao longo do tempo. Isto é feito através da realimentação contínua dos resultados obtidos e das decisões tomadas. Portanto, os dados realimentados são incorporados nos algoritmos de análise, melhorando de forma constante a precisão e eficácia do sistema. Outro benefício da monitorização inteligente é que estes sistemas podem ser projetados para ser integrados com sistemas e processos existentes. Isso inclui a integração com sistemas de automação industrial, sistemas de gestão empresarial, sistemas de controlo de qualidade, entre outros (Finogeev et al., 2019).

Esta tecnologia, tem aplicações numa vasta gama de setores, incluindo a indústria, a saúde, a energia, o transporte ou a agricultura, entre outros. Por exemplo, na indústria, pode ser utilizada para monitorizar o desempenho dos diferentes equipamentos dentro da linha de produção. Na saúde, pode ser empregue para a monitorização de pacientes em tempo real e prever complicações médicas. Em centrais fotovoltaicas, para monitorizar em tempo real a produção de energia, e quando aplicada a processos agrícolas, permite uma gestão mais eficiente dos recursos e uma produção agrícola mais sustentável (Chen & Yang, 2019).

Apesar de, nas últimas décadas, a produção agrícola se ter tornado tecnologicamente mais eficiente, a crescente procura de alimentos e a significativa alteração nos padrões de consumo alimentar conduziram a um acréscimo significativo na concorrência pelos recursos

de terra e água, da qual resultou a degradação dos solos, a desflorestação e a escassez de água. Com o objetivo de ultrapassar as limitações da agricultura convencional, tem sido justamente promovida a agricultura automatizada onde se incluem sistemas de produção alternativos como a aquaponia.

### **3.2.Sistemas Inteligentes em Aquaponia**

Tendo em consideração que a aquaponia constitui uma técnica de agricultura inovadora, é importante que se desenvolvam e apliquem novas tecnologias para melhorar o seu controlo. O controlo da qualidade de água é fundamental para o funcionamento adequado dos sistemas, independentemente da escala de aplicação, especificamente o controlo e monitorização em tempo real dos vários parâmetros indicadores, que em conjunto desempenham um papel fundamental na vida dos organismos aquáticos e das plantas (Lafont et al., 2019).

Nos últimos anos, foram desenvolvidos vários projetos de sistemas de monitorização para aquaponia e hidroponia baseados em IoT, usando plataformas programáveis como o *Arduino* ou outras placas de desenvolvimento como o Node MCU. Estas plataformas em conjunto com os sensores obtêm dados relativos a nutrientes, pH, temperatura, entre outros. O acesso aos dados efetua-se através de uma plataforma web ou até em aplicações para telemóveis. Assa et al. (2022), desenvolveu um sistema de monitorização a partir da utilização de um microcontrolador, o ESP32, que fornece informações sobre pH, temperatura, humidade do ar e concentração de nutrientes e a informação obtida, foi armazenada numa plataforma web.

Harikrishna et al. (2021), desenvolveu um sistema de sensores e atuadores ligados à nuvem UBIDOTS, com o objetivo de criar uma iluminação artificial para proporcionar fotossíntese eficiente, mesmo em condições de pouca luz. O sistema monitoriza temperatura e humidade no interior de uma estufa, e todo o projeto é automatizado utilizando a IoT e o microcontrolador ESP32.

Noutro estudo, Haryanto et al. (2019), propõem um sistema baseado em IoT para monitorização e controlo de sistemas de aquaponia. Especificamente são monitorizados os parâmetros seguintes: grau de acidez, nível de água, temperatura da água e a alimentação dos peixes. Nesta investigação ainda se aborda a integração de sensores e comunicações sem fio, onde os dados recolhidos são transmitidos para o servidor.

A partir da pesquisa realizada e a informação recolhida, é de salientar que a aplicação de IoT na aquaponia apresenta grandes benefícios para a agricultura moderna. É extremamente útil em atividades como a alimentação de peixes, dosagem de nutrientes, controlo de sistemas de circulação de água e monitorização precisa dos sistemas, pois permite um controlo automático integrado com recurso a redes de sensores (vários parâmetros). Os sensores são os componentes de hardware que permitem adquirir valores de grandezas físicas ou químicas gerando, por conseguinte, os dados que alimentam a tecnologia da Internet das coisas. Tendo em conta a quantidade de dados gerados e o acesso a vários utilizadores do sistema, são uma ferramenta de apoio fundamental na tomada de decisão, permitindo uma intervenção mais rápida e precisa sobre o sistema (Dutta et al., 2018).

Neste contexto, o uso da IoT não só ajuda a automatizar várias tarefas, mas também pode contribuir para a sustentabilidade na agricultura ao reduzir o uso desnecessário de recursos, minimizar o desperdício e permitir práticas agrícolas mais eficientes e responsáveis, e isso, permite aos agricultores reduzir os custos operacionais, economizando tempo e mão de obra. Além disso, é possível integrar sistemas IoT com sistemas de gestão, permitindo análises mais avançadas, tomadas de decisão baseadas em dados e um planeamento estratégico a longo prazo (Ragaveena et al., 2021).

Tendo em conta o objetivo deste trabalho, é proposto um sistema de monitorização e controlo automático dos parâmetros físicos e químicos de qualidade da água com os seguintes requisitos:

1. Visualização de informação de forma clara e precisa para cada sensor, em tempo real, de forma remota e via web (e.g., a base de dados na *Fire Base*).
2. Os dados obtidos pelos sensores devem ser atualizados em intervalos de, aproximadamente 10 minutos.
3. O sistema deve permitir descarregar os dados para que possam ser analisados facilmente *offline*.
4. O sistema deve detetar anomalias durante a aquisição dos dados, criando alertas ou, eventualmente, corrigindo o problema.

O desenvolvimento do protótipo foi realizado pelo estudante Fernando Pereira no âmbito de curso Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, e será validado com os resultados experimentais descritos no presente trabalho. Para o efeito é descrito o protótipo de monitorização e controlo da qualidade da água (Figuras 1 e 2).

### **3.2.1. Implementação de IoT na monitorização de qualidade de água**

As tecnologias de comunicação da IoT conectam objetos heterogéneos para fornecer serviços inteligentes específicos. Os componentes principais são sensores e atuadores, que juntamente com outros componentes de hardware (e.g., microcontroladores) permitem converter um objeto físico convencional num objeto inteligente (*smart object*). Um objeto inteligente é um objeto que consegue receber, armazenar, processar dados e interagir com pessoas e/ou outros objetos, através da rede, responsável por toda a infraestrutura necessária para troca de dados entre entidades da plataforma IoT através de tecnologias de redes sem fios (e.g., BLE e Wi-Fi). Além disso, a rede realiza outras tarefas como armazenamento de dados. Com a arquitetura referida, é possível fornecer serviços específicos aos utilizadores, através da análise dos dados recolhidos e implementar uma automatização de processos através de algoritmos, uma interface com utilizador e análises complexas de dados (Krcic et al., 2014).

Esta tecnologia tem vindo a ser aplicada a sistemas de aquaponia, contribuindo para a resolução de vários problemas como por exemplo: maior número de locais monitorizados no sistema, permitindo detetar mais rapidamente alterações dentro do sistema, maior número de parâmetros monitorizados, permitindo a comparação com os valores de referência, obter dados para análise de locais pouco acessíveis no sistema, grande quantidade de dados e permitir o acesso aos dados dos diferentes parâmetros (Skarga-Bandurova et al., 2020). Permite obter monitorização em tempo real e gestão de dados em circuito fechado. Deste modo, o desenvolvimento de um sistema baseado em IoT, permite um conhecimento mais detalhado das condições internas do sistema de aquaponia, facilitando a tarefa dos investigadores, agricultores e produtores, dado que é claramente difícil para um só utilizador fazer a monitorização do sistema durante 24 horas, todos os dias da semana, para obter informação sobre as possíveis alterações nos parâmetros ambientais (Pasha et al., 2018).

Para o desenvolvimento das estruturas de monitorização da qualidade de água através da tecnologia IoT, existem algumas abordagens, uma das mais simples é baseada em três camadas: a camada de sensores, a camada de rede/comunicação e a camada de aplicação. Dessa forma, a primeira camada é constituída pelos equipamentos de deteção e aquisição de dados (neste caso os sensores), a camada de rede, efetua a transmissão de dados, e a camada final é formada pelas aplicações que fazem a manipulação e análise de dados (Dutta et al., 2018).

### **3.3. Calibração de sistemas inteligentes (sensores)**

Para o funcionamento correto do sistema, o primeiro passo é a calibração do equipamento de medição, garantindo dessa forma a fiabilidade necessária das medidas ao longo do tempo e conseguir atingir os objetivos da qualidade das leituras gerindo o risco de medições incorretas. Por tanto, a calibração é um procedimento que permite verificar essencialmente a precisão, a exatidão e linearidade dos instrumentos de medição; consiste na comparação entre o valor medido por um padrão previamente estabelecido e conhecido e o do sensor de medição, garantindo a rastreabilidade metrológica a uma norma reconhecida (Okafor & Delaney, 2021).

Existem outros critérios que podem ser tomados em conta no momento de calibração, mas em termos de atividade de medição, a exatidão é o principal fator que influencia o desempenho de um dispositivo de medição, possibilitando a comparação entre o valor de saída do sensor com o valor de saída do instrumento normalizado. No caso da precisão, esse critério permite saber como o sensor regista um determinado valor de forma consistente em vários momentos (repetibilidade). E a linearidade, refere-se à capacidade de um sensor de produzir uma resposta proporcional à mudança na quantidade que está sendo medida. Pode-se definir que quanto mais elevado for o valor de linearidade, as alterações no valor recebido pelo sensor, produzirão uma saída muito mais exata (Megantoro et al., 2022). Por tanto é importante ter em conta estes critérios no momento de calibração e programação dos sistemas, para assim, também confirmar que a consistência das leituras e a fiabilidade do sistema de monitorização.

A metodologia de calibração está basada no método de medição de um ou mais pontos ao longo da gama de medição, que podem ser soluções de concentrações específicas. Particularmente, os sensores eletroquímicos contém um ou mais elétrodos e são colocados numa estrutura que contém um eletrólito que ajuda no transporte da corrente elétrica entre os vários elétrodos, medindo desta forma as alterações quando o sensor se encontra em contato com as diferentes soluções (Lin et al., 2021).

Além do anteriormente mencionado, dentro do processo de calibração, também é importante definir os intervalos de tempo entre cada calibração, e este deve ser estabelecido em relação ao tempo de trabalho do sensor e a capacidade de enviar dados considerados corretos, dentro da gama aceitável. É importante também que estes intervalos sejam revistos e ajustados

sempre que seja necessário, para assegurar a conformidade com os requisitos metrológicos especificados (Singh et al., 2021).

### 3.4. Elementos Estruturais do Sistema

O sistema eletrónico do protótipo (Figura 1 e Figura 2) é constituído por: (i) sensores para análise dos diferentes parâmetros ambientais e respetivos circuitos de condicionamento de sinal, que trabalham em conjunto com (ii) um microcontrolador para realizar a leitura dos parâmetros ambientais monitorizados e (iii) um sistema de comunicação para envio de dados. Neste caso, é usado o microcontrolador ESP32, que é programado através do ambiente de desenvolvimento *Arduino*. Esta programação, permite o envio da informação recolhida pelos diversos sensores para a base de dados na Internet (*Fire Base*). Foram também implementados um circuito de amplificação e condicionamento para cada sensor. A Figura 2 mostra uma fotografia com a disposição dos vários elementos do sistema.

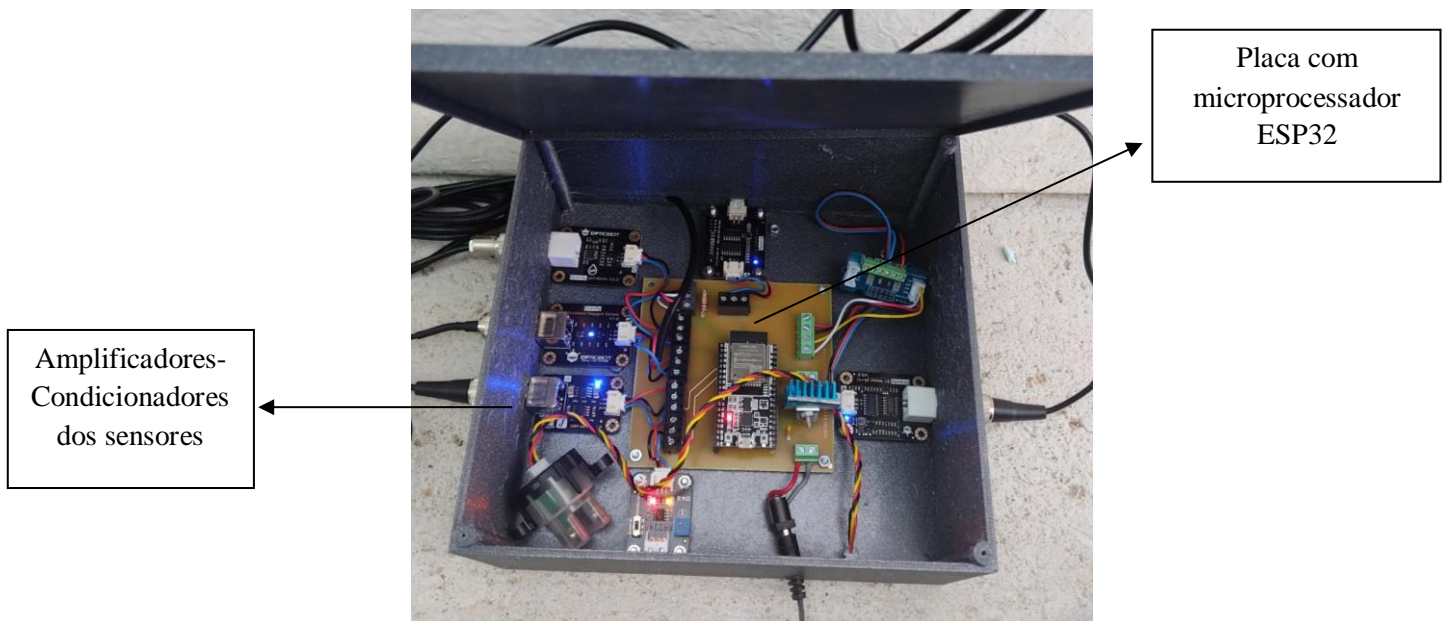


Figura 1- Protótipo Eletrónico

O protótipo de sistema inteligente é baseado no uso de sensores analógicos que são calibrados a partir da medição de amostras das quais são conhecidos os valores das grandezas que se pretendem medir:

#### 3.4.1. Base de Dados Firebase

A *firebase* refere-se a uma plataforma na nuvem para o desenvolvimento de aplicações *Web* e móveis, que permite ter acesso a uma base de dados alojada na internet, sendo possível

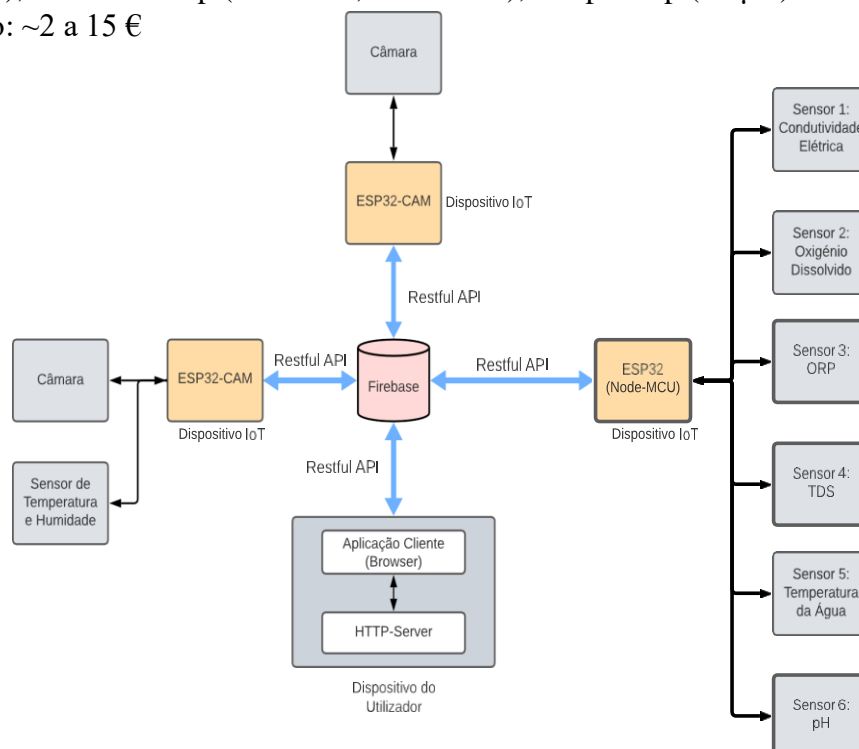
armazenar e sincronizar os dados entre os usuários em tempo real. A *firebase* obtém a informação desde o dispositivo IoT, neste caso se utilizando uma técnica de “*Restful API*” que é um método de comunicação dos sistemas informáticos, e este método é utilizado para trocar informações de forma segura através da Internet.

### 3.4.2. Microcontrolador ESP32

Neste caso, para o protótipo desenvolvido, é usado um microcontrolador ESP32, que é o nome de uma família de chips SoC (*System on a chip*), de baixo custo e baixa potência, com tecnologia Wi-Fi integrada e Bluetooth de modo duplo que lhe permite controlar muitos tipos de sensores, módulos e atuadores.

Principais características do microcontrolador ESP32 (criado e desenvolvido pela Espressif Systems e fabricado pela TSMC):

- Processador: Xtensa® single-/dual-core 32-bit LX6, 2 cores a 240 MHz
- Memória: 520 KB SRAM
- Wi-Fi: 802,11b/g/n
- Bluetooth: v4.2 BR/EDR e Bluetooth LE
- Conversor ADC: 12-bit SAR ADC - 18 canais
- Comunicações série: 4xSPI, 2xI2C e 3xUART
- PWM (16 canais)
- Tensão de alimentação: 3,3V
- Corrente na alimentação: Working (240mA, transmissão Wi-Fi e 100mA, recepção Wi-Fi), Modem-Sleep (10-68mA, sem Wi-Fi), Deep Sleep (10 µA)
- Custo: ~2 a 15 €



Este tipo de microcontrolador é utilizado devido a seu baixo custo, versatilidade das comunicações, consumo de energia, múltiplos ambientes de desenvolvimento de código aberto e às bibliotecas existentes, sendo bastante acessível a sua programação.

### **3.4.3. Condicionadores de sinal**

Para o protótipo proposto, é necessário o uso de amplificadores e condicionadores de sinal, para amplificar e tratar os sinais provenientes dos sensores, mitigando desta forma, imprecisões que poderiam advir das amplitudes extremamente baixas dos sinais gerados pelos mesmos. Estes amplificadores devem apresentar uma alta impedância de entrada, por forma a não influenciarem os valores lidos pelos sensores, melhorando dessa forma a sensibilidade e a precisão das medições efetuadas.

Os amplificadores associados aos sensores tornam a saída bruta do sensor mais útil, transformando o sinal adquirido para uma gama de tensões compatível com o conversor analógico/digital do ESP32.

### **3.4.4. Sensores**

Os sensores são dispositivos eletrónicos que permitem ler os valores da concentração de parâmetros de qualidade da água e armazenam os dados como ficheiros em diferentes formatos ou com diferente notação. Neste estudo, os dados são descarregados da *FireBase* em formato JSON, que é um formato que se utiliza para a transferência de dados estruturados entre um servidor Web (*HTTP-Server*) e uma aplicação Web (*Browser*). Os sensores são definidos como conversores, que permitem transformar uma variável física numa variável mais avaliável, esta última pode ser um sinal elétrico. É de referir que os sinais de saída dos sensores selecionados são compatíveis com o sistema de conversão do microcontrolador e com fonte de alimentação, além de que apresentam gamas de medição e precisão aceitáveis.

Estes sensores têm a capacidade de recolher os dados em tempo real nos pontos de medição, mediante uma prévia fase de calibração. Dessa forma estabelecem-se os pontos de medição, para adquirir os dados das condições do meio aquático e que serão posteriormente processados pelo sistema. Estas fases têm como finalidade a eliminação de erros de leitura e estabelecer a gama de trabalho adequada para o sistema.

No protótipo proposto são usados 6 sensores analógicos específicos para avaliação da qualidade da água no sistema de aquaponia. Os sensores utilizados obtêm dados dos

seguintes parâmetros: pH, temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade elétrica, potencial oxidação-redução e sólidos totais dissolvidos, permitindo estabelecer relação entre alguns dos parâmetros, nomeadamente temperatura.

### 3.4.5. Câmara fotográfica

O protótipo integra também duas câmaras (Figura 3) que, através da aquisição de imagem, permitem a observação de insetos e a observação de biomassa vegetal. Os dados técnicos destas câmaras são mostrados em detalhe na secção 3.6.1.



Figura 3- Câmara OV2640 na Linha 3

## 3.5. Descrição do microcontrolador ESP32

O ESP32 tem a capacidade de ser programado usando várias linguagens e ambientes de desenvolvimento. A linguagem de programação mais usada é C++ e pode ser programada usando a plataforma Arduino, bem como ferramentas baseadas em Python, MicroPython e o ambiente de desenvolvimento Espressif IoT Development Framework (ESP-IDF). Isso oferece uma ampla gama de opções para desenvolvedores de diferentes níveis de habilidade e preferências de programação.

A plataforma de *Arduino*, é a mais usada, devido a que tem várias vantagens, como por exemplo: o software funciona nos sistemas operativos *Windows*, *Macintosh OSX* e *GNU/Linux*, linguagem de programação fácil e permite o desenvolvimento de diferentes microprocessadores que podem ser usados para diferentes tarefas. E além disso, como é uma plataforma de *hardware* e *software* livre, permite que qualquer outra pessoa possa criar as suas próprias placas. (Tupac-Yupanqui et al., 2022).

O microcontrolador ESP32, tem uma grande capacidade de processamento e facilita a execução de múltiplas tarefas e a execução eficiente de tarefas complexas. Este equipamento, fornece vários pinos GPIO que facilitam a ligação e o controlo de dispositivos e sensores externos. Outras vantagens deste dispositivo é sua eficiência no desenvolvimento de aplicações IoT eficientes em termos energéticos. Oferece funcionalidades de gestão de energia que permitem reduzir o consumo de energia, tornando-o uma boa opção para projetos com restrições de energia.

### **3.6. Critérios de análise das câmaras inteligentes**

Nas técnicas agrícolas atuais, os grandes conjuntos de dados recolhidos através de diferentes dispositivos e tecnologias, envolvem imagens. Estas imagens constituem um quadro completo dos ambientes agrícolas e podem ser a resposta para vários desafios. Assim, a análise de imagens é uma área de investigação importante no domínio agrícola porque ao usar diferentes técnicas inteligentes de análise é possível realizar procedimentos de identificação/classificação da biomassa vegetal ou outros organismos, deteção de anomalias, entre outros procedimentos (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Por esta razão dentro do sistema inteligente proposto também são utilizadas câmaras inteligentes para monitorização do crescimento de plantas. Neste caso é analisado o crescimento de alfaces (*Lactuca sativa*) durante 30 dias.

Com a finalidade de comparar o funcionamento eficaz do sistema inteligente (câmaras), foi efetuada a comparação das imagens obtidas, com as medições manuais efetuadas da altura de cada planta e do diâmetro das plantas, que, por conseguinte, permitem a comparação do crescimento da planta ao longo do tempo. Foi ainda implementada uma segunda câmara inteligente para a observação de eventuais pragas, em particular de insetos, avaliando se durante o crescimento das alfaces houve tendência de aumento da sua presença e possível infestação das plantas.

Para a aplicação da técnica de captura de imagens é importante definir o que é biomassa, o peso total da matéria viva numa determinada área. É de notar que o peso da matéria vegetal tem uma relação direta com a distribuição adequada de nutrientes, pois se existir um défice de nutrientes, a planta não consegue crescer corretamente e o teor de biomassa diminui significativamente (Wang et al., 2019).

As câmaras são consideradas um tipo de sensor ótico, e existem vários tipos, como por exemplo: RGB (*red-green-blue*), *multispectral* ou *hiperespectral*, térmico, fluorescência da clorofila, entre outros (Ragaveena et al., 2021). A tecnologia de imagiologia tem sido aplicada para avaliar as condições de crescimento das plantas e níveis nutricionais, com base em características visuais ou em determinadas propriedades espectrais refletidas pelas plantas. No caso específico do protótipo, foram usadas câmaras do tipo RGB, devido a que tem um custo baixo e por permitir uma observação mais clara das alterações na fisiologia das plantas, reconhecendo sintomas visuais de doença e alterações metabólicas.

As imagens RGB, captam apenas uma fração do espectro visível de todo o espectro eletromagnético e são equivalentes às que podem ser captadas pelas câmaras dos telemóveis. A base deste tipo de imagens é o armazenamento de informação em três comprimentos de onda diferentes: vermelho (R; 650 nm), verde (G; 520 nm) e azul (B; 475 nm). E cada pixel de uma imagem digital apresenta um valor no espectro da cor vermelha, verde ou azul, que é um espaço de cor tridimensional utilizado para gerar a cor de um objeto, tal como acontece com o olho humano (Peng et al., 2022).

Nos processos fisiológicos das plantas, e em específico na fotossíntese, um dos elementos chave é a clorofila. Esta biomolécula faz parte de um grupo de pigmentos fotossintéticos de cor verde presente nas plantas, responsável pela captação adequada de luz para posteriormente produzir alimento. Atualmente, com os grandes avanços na tecnologia, é muito comum analisar os níveis de clorofila, para estimar a percentagem de tecido vegetal danificado. Tais danos podem ser devidos a infeção por fito-patogénicos ou carências nutricionais como deficiências de fosfatos, nitratos ou ferro.

Outro elemento que desempenha um papel importante no desenvolvimento correto das plantas dentro de um sistema de aquaponia é a capacidade de se controlar as possíveis pragas de insetos. Uma deteção precoce pode significar uma grande diferença entre uma simples reparação e uma infestação total. Habitualmente nas culturas hidropónicas, são as armadilhas amarelas ou azuis, que atuam como mata-moscas, prendem os insetos com uma substância muito parecida a cola. Estas armadilhas são penduradas sobre as plantas e podem ser retiradas a fim de observar os insetos ou pragas presentes. Esta forma de monitorização manual tem que ser feita frequentemente para poder identificar a magnitude do problema (Bjerge et al., 2023). Para evitar esse procedimento moroso, a câmara permite obter imagens de forma contínua, diariamente e podem ser visualizadas e descarregadas desde a *FireBase*,

facilitando assim o controlo da presença dos insetos nas plantas e atuar de forma mais precoce, evitando a propagação.

### **3.6.1. Características das câmaras utilizadas**

Para uma caracterização mais integrada e completa do sistema de aquaponia a informação obtida com os sensores ambientais é complementada com a recolha de imagem recorrendo a dispositivos inteligentes como ESP32-CAM, que é uma placa fornecida com uma câmara OV2640, que atua como um sensor de imagem para um sistema básico de visão por computador. Possui uma interface compatível com o ESP32, e efetua a compressão das imagens no formato JPEG, sendo um dispositivo de baixo custo e apresentando um baixo consumo de energia; razão pela qual este sensor é muito popular para aplicações de câmaras IoT.

O microcontrolador ESP32, possui bibliotecas com funções específicas para capturar imagens da câmara e esta pode ser programada para adquirir imagens num intervalo específico de tempo. A imagem captada é transmitida através da ligação Wi-Fi, com opção de ser enviada para um servidor remoto, guardar as imagens num cartão SD ou ser transmitidas para um dispositivo externo como Google Drive; que justamente é o caso do protótipo indicado neste documento. Na Tabela 1, são descritas as especificações gerais da placa ESP32-CAM:

**Tabela 1 - Especificações ESP32-CAM, adaptado de Santos & Santos (2023)**

ESP32-CAM	PARÂMETROS	ESPECIFICAÇÕES	VALORES
<b>OV2640 CÂMARA</b>	Estimativa da biomassa Estimativa de Número de Insetos	Resolução do sensor	1600 x 1200 (UXGA)
		Máxima transferência de imagens	1600 x 1200@15fps, SVGA@30fps, CIF@60fps.
		Sensibilidade	0,6 V/Lux-sec
		Consumo	Raw: 125 mV
			JPEG: 140 mV
			Standby: 600µA
		Formato de saída da imagem	JPEG, RAW (RGB, YUV)
		Tipo de sensor	¼"
		Gama de alimentação elétrica	3,3V
		<b>REFERÊNCIA:</b>	
<b>LAAF25690927XB</b>			

## 4. Materiais e Métodos

Neste capítulo descreve-se o sistema monitorizado, o protótipo de monitorização inteligente (sensores) e os procedimentos de validação das medições dos parâmetros: pH, temperatura, oxigénio dissolvido, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e potencial de oxidação-redução.

Os procedimentos descritos foram definidos tendo em consideração diferentes diretrizes para a validação de métodos para a calibração dos sensores utilizados dentro do sistema, a partir das características próprias de cada sensor e a funcionalidade dos mesmos.

### 4.1.-Descrição do Sistema de Aquaponia

Na Figura 4 é representada a estrutura geral que pode ser adaptada à linha 3 do sistema de aquaponia do LSMI, onde foi colocado o protótipo inteligente. De seguida são descritos cada um dos constituintes do sistema de aquaponia utilizada no estudo.

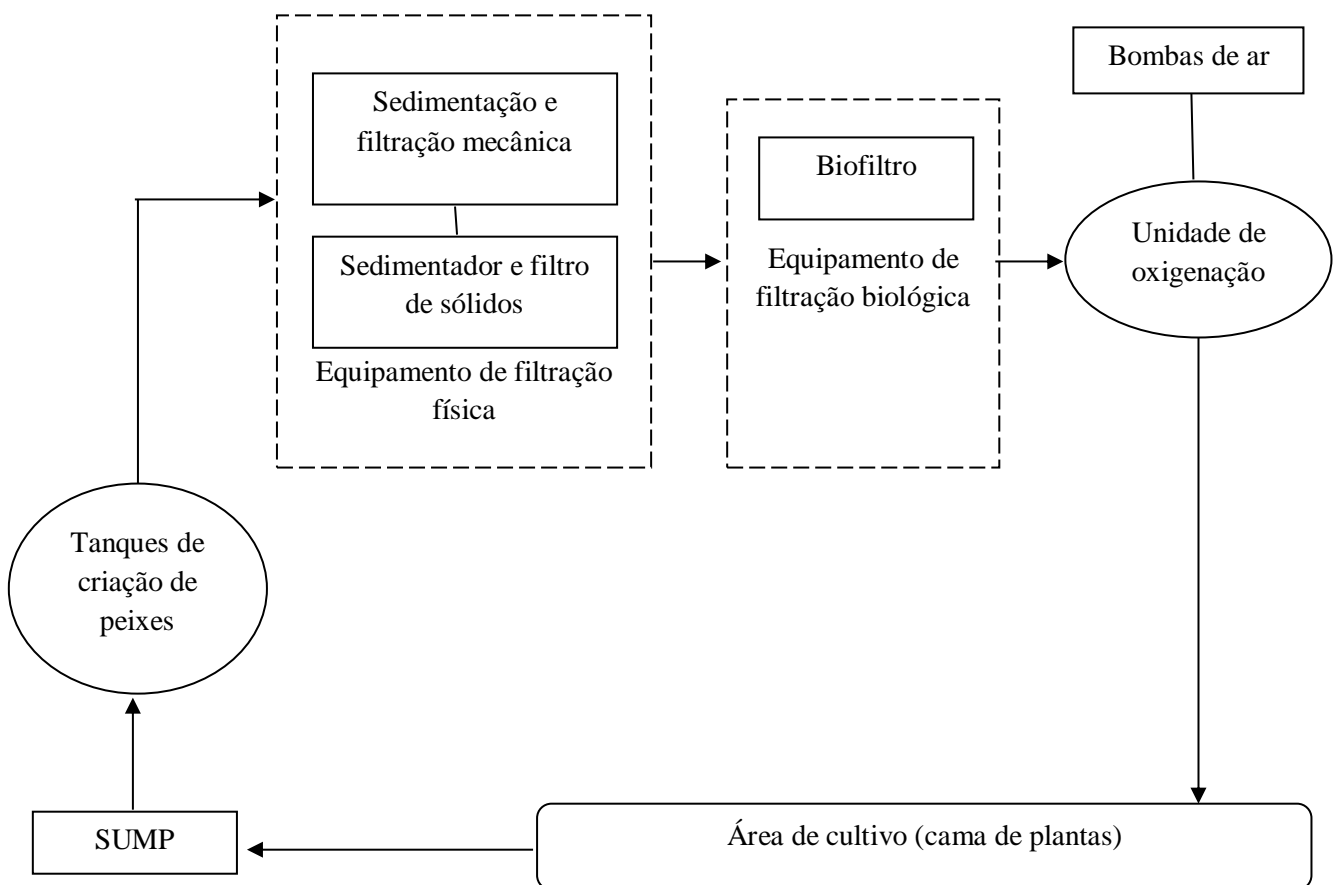


Figura 4- Estrutura Geral do Sistema de aquaponia, adaptado de Wei et al. (2019)

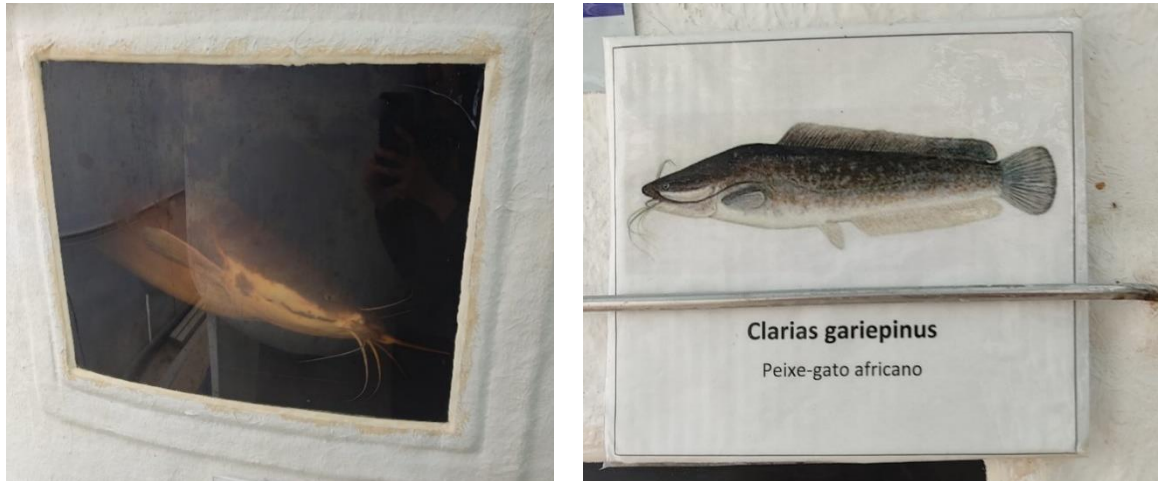
#### 4.1.1. Tanque dos peixes

Os tanques são estruturas onde se colocam peixes, ou outros organismos aquáticos, para permitir gerir facilmente as unidades populacionais e exercer um bom controle sobre os diferentes parâmetros ambientais, essenciais na aquacultura. Os tanques podem apresentar diferentes dimensões dependendo da quantidade e do tamanho dos peixes. Por exemplo, os tanques de cultura circulares de maiores dimensões (até 15 m de diâmetro) ajudam a maximizar a circulação da água de forma uniforme e constante e minimizar a acumulação de sedimentos (Wei et al., 2019).

No caso específico do sistema monitorizado, o mesmo é composto por um tanque circular (3400L) (Figura 5) que tem como vantagens: a) permitir uma maior distribuição dos peixes; b) permitir uma grande gama de velocidades de rotação dos peixes; c) promover a concentração rápida e remoção fácil de sólidos sedimentáveis. No sistema estão presentes peixes gatos-africanos (*Clarias gariepinus*) (Figura 6)



**Figura 5- Tanque dos Peixes Linha 3**



**Figura 6- Espécie de Peixe na Linha 3**

#### **4.1.2. Filtro Mecânico e Sedimentador**

Dentro dos sistemas de aquaponia, os animais precisam de ser alimentados com ração completa, com níveis adequados de proteína e lípidos para promover taxas de crescimento rápidas. A ração não é aproveitada por completo, cerca de 25 a 50% da ração é transformada em resíduos que devem ser removidos do sistema o mais rapidamente possível para evitar degradação da qualidade da água (Muñoz Gutiérrez, 2012).

Os resíduos sólidos variam em tamanho sendo os de maior tamanho removidos através de um filtro mecânico e de um sedimentador para evitar degradação da qualidade da água e entupimentos dos componentes do sistema (Figura 7).

O filtro mecânico permite separar as partículas de grande tamanho, de forma que quando a água passe para a cama hidropónica, as raízes das plantas sejam protegidas da acumulação de resíduos orgânicos. O filtro é constituído por um tambor rotativo que contém um rapador de lâminas que elimina os resíduos em cada volta (Maucieri et al., 2018), com o auxílio de jatos de água retirada do sistema (em recirculação). Combinado com o filtro mecânico existe também um sedimentador (90L) que permite que as partículas sedimentáveis se depositem no fundo do tanque, e desta forma reutilizar a água (usada na limpeza por jatos) na cama das plantas. Os sólidos de menor tamanho podem permanecer no sistema, sendo convertidos em minerais disponíveis para as plantas, na primeira fase da biofiltração (Zhang et al., 2020).



**Figura 7- Filtro Mecânico e Sedimentador no Sistema de Aquaponia**

#### **4.1.3. Biofiltro**

O biofiltro permite a transformação dos subprodutos da alimentação dos peixes (alguns deles nocivos para os peixes) em formas que podem ser aproveitadas pelas plantas, em particular a nitrificação. O filtro biológico (Figura 8) permite o desenvolvimento de bactérias nitrificantes que convertem amónia e nitrito em nitrato. O crescimento correto destas bactérias é limitado pela área de superfície disponível para fixação, pela temperatura, alcalinidade, pH, oxigénio dissolvido, entre outros fatores. Os biofiltros de forma geral têm um desempenho ótimo a uma temperatura entre 25 e 30 °C, pH entre 7,0 e 9,0, OD saturado e uma alcalinidade igual ou superior a 100 mg/L (Bracino et al., 2020).

Este dispositivo é constituído por um tanque (300L) com enchimento poroso fortemente arejado. O meio poroso é constituído por um material inerte, esferas de plástico ABS (*Acrilonitrilo Butadieno Estireno*), utilizado para proporcionar uma superfície de contacto mais elevada para a fixação das bactérias benéficas (Figura 8), que permitem o fluxo de uma grande quantidade água (água proveniente do tanque dos peixes que passou anteriormente pelo filtro de sólidos), e abrigam um grande número de culturas bacterianas, essenciais para a conversão em nitratos (Elia et al., 2014).



**Figura 8- Tanque de Bio-bolas no Sistema de Aquaponia**

#### **4.1.4. Cama das plantas**

A componente hidropónica refere-se à cama das plantas (2250L) que deverá ter em consideração o método de fornecimento de solução nutritiva para as plantas, o uso ou não uso de substrato, e a forma de colocação das plantas. Neste caso em específico, o cultivo é um sistema radicular flutuante, as plantas ficam a flutuar numa espécie de piscina com solução nutritiva (Figura 9). É comum o uso de placas *roofmate* com furos pequenos onde são colocados os vasos hidropónicos de plástico (5,00 cm x 5,00 cm), com um desenho de ranhuras, de forma que unicamente as raízes das plantas fiquem em contato direto com a água (Maucieri et al., 2018). Com esta configuração é importante um correto arejamento das raízes para o crescimento adequado das plantas. As plantas selecionadas são plantas folhosas de ciclo curto, e particularmente adequadas para este tipo de sistemas, tendo em conta que não é possível aplicar inseticidas químicos nem fungicida porque pode ter um efeito nocivo nos peixes. Plantas como alface, espinafre, pimentos, manjeriço e espinafres, são alguns exemplos de plantas cultivadas. Este tipo de configuração tem como vantagens, ser fácil de instalar e manter, minimizar o desperdício de água e proporcionar um bom arejamento ao drenar o excesso de água (Kumar et al., 2021).



Figura 9- Cama das Plantas Linha 3 (volume total 2250L)

#### 4.1.5. Sump e bomba de água circulante

O Sump ou tanque de drenagem (500L) corresponde à área de armazenamento final de água que flui por gravidade, colocado na zona mais baixa ou final de todo o sistema. Esse tanque serve como um reservatório que não contém plantas ou organismos aquáticos, e é o ponto de adição, se necessário, para misturar aditivos químicos e nutrientes que devem ser dissolvidos antes de entrar no sistema inteiro. Por exemplo, se necessário acertar os valores de pH no sistema é o local onde adicionada uma solução de hidróxido de potássio.

Cada zona hidropónica (cama das plantas), têm um canal de saída de água que vai para o reservatório de recirculação (Figura 10). A água armazenada é bombeada através de uma bomba submersível e recirculada no sistema, por tanto é importante manter o volume específico de água para acionar aquela bomba e, por conseguinte, a água de retorno consiga chegar ao início do sistema (Kumar et al., 2021).



Figura 10- Estrutura Geral do Sump

Cada elemento que compõe o sistema de aquaponia está sujeito a manutenção constante, de forma a evitar qualquer tipo de desequilíbrio. É importante ter um mecanismo de limpeza e manutenção de cada estrutura, desde o tanque dos peixes até à SUMP, de forma que o sistema consiga trabalhar adequadamente e a produção não seja afetada.

Para o desenvolvimento do sistema inteligente, foram escolhidos os parâmetros de T, pH, CE, OD, ORP e TDS devido a sua importância na análise da qualidade da água para sistemas de aquaponia; e além disso, existe informação já recolhida a partir da monitorização manual que tem sido efetuada ao longo dos últimos 3 anos. Dessa forma, a partir dos resultados obtidos de forma manual e através da aplicação do protótipo na linha 3 do LSMI, é possível realizar uma comparação entre os mesmos e determinar se os sensores recolhem dados dentro da gama aceitável e apresentam valores similares ou idênticos aos esperados. Também se pretende automatizar os processos de monitorização de parâmetros físico-químicos dentro do sistema de aquaponia e obter uma base de dados comparativa.

## **4.2. Equipamento de Monitorização**

Os sensores de pH, OD, TDS, ORP, CE e temperatura (Figuras 11, 12, 13, 14, 15, 16), cujas especificações são apresentadas detalhadamente no anexo A, Tabela A1, são descritos de seguida.

### **4.2.1. Sensor: pH**

O procedimento de leitura envolve a atribuição de um código da amostra que é carregado para a placa ESP32; o monitor de série é aberto para introduzir os diferentes comandos e poder entrar no modo de calibração. É importante ter em conta que o sensor de temperatura também é adicionado e tem de ser atribuída a função correspondente no código.

A calibração do sensor de pH (Figura 11) foi efetuada a pH 4,0 e 7,0 de 2 em 2 meses.

Para a calibração, o sensor é introduzido primeiro, na solução padrão de 7,0 sob agitação suave até estabilização do valor lido. Depois de ser lavado novamente com água destilada, é introduzido na solução de pH 4,0, seguindo o mesmo procedimento.

No momento de introduzir os comandos no monitor, o programa identifica automaticamente qual é a solução padrão (7,0 ou 4,0).



Figura 11- Sensor de pH Analógico V2. (Referência: SEN17004)

Também foram preparadas soluções tampão de pH 3,0, 5,0 e 9,0, que foram considerados como valores de referência para confirmar os valores lidos pelo sensor. Foram utilizados os reagentes descritos na Tabela 2 para preparar 100mL de solução.

Tabela 2- Soluções Padrão e de Calibração para o Sensor de pH

Valor pH	Reagente	Marca	Lote	Fórmula Química	Massa Molecular (g/mol)	Quantidade
3.0	Glicina 0,1 mol/L	BIOCHEM Chemopharma	500660500-0316011	$C_2H_5NO_2$	75,07	0,38 g
	Ácido Clorídrico 0,1 mol/L	VWR Chemicals	18I134007	HCl	36,45	0,42 mL
5.0	Acetato de Sódio 0,1 mol/L	MERCK KGaA	TA948168312	$C_2H_3NaO_2$	82,03	0,41 g
	Ácido Acético 0,1 mol/L	Chem-Lab NV	26.8312803	$CH_3COOH$	60,05	0,58 mL
7.0	Fosfato de Sódio Dibásico 0,1 mol/L	Carlo Erba	G207812 8D5559A	$NaH_2PO_4$ $H_2O$	137,99	3,58 g
	Hidrogenofosfato de Sódio 0,1 mol/L	PRONALAB	86447TLP	$Na_2HPO_4$	141,96	0,69 g
9.0	Glicina 0,1 mol/L	BIOCHEM Chemopharma	500660500-0316011	$C_2H_5NO_2$	75,07	0,38 g
	Hidróxido de Sódio 0,1 mol/L	VWR Chemicals	19H054144	NaOH	40,00	0,20 g

#### 4.2.2. Sensor: Temperatura (T)

A gama específica de leituras para o sensor de temperatura (Figura 12) é de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ . O valor referência para o protótipo é de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  (temperatura ambiente).



**Figura 12- Sensor de temperatura a prova de água DS18B20. (Referência: SEN06005)**

O sensor de temperatura DS18B20 não precisa de calibração prévia, é calibrado individualmente durante o processo de fabrico. Essa calibração inicial é geralmente suficiente para cumprir com as exigências da maioria dos aplicativos sem a necessidade de recalibração. Além disso, a comunicação entre o sensor e o microprocessador utiliza o protocolo *OneWire* que converte a temperatura diretamente em leitura digital, reduzindo assim a necessidade de ajustes manuais a calibração analógica.

#### **4.2.3. Sensor de Condutividade Elétrica (CE)**

O código da amostra é carregado para o microcontrolador ESP32 e através de comandos enviados pelo monitor de comunicações série do IDE (procedimento idêntico ao descrito para o sensor de pH). Para o efeito, o eletrodo de CE (Figura 13) e o sensor de temperatura são colocados na solução de calibração, sendo a solução agitada durante algum tempo até as leituras serem estáveis. Primeiro, a sonda é colocada na solução de condutividade mais baixa (1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) e o sensor é ajustado de modo a que a leitura corresponda ao valor conhecido da solução. Repete-se o mesmo procedimento com a solução de condutividade mais alta (12880  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Para verificar a linearidade do sensor, foram medidas soluções intermédias (500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 717,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) entre as duas soluções de calibração. A periodicidade entre calibrações foi de 3 meses.



Figura 13- Sensor Analógico para Condutividade Elétrica. (Referência: SEN08024)

A Tabela 3 apresenta as soluções preparadas para condutividade elétrica (100mL de solução). É de notar que para verificação de condutividade mais alta (12880  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) foi utilizada uma solução comercial.

Tabela 3- Soluções Padrão e de Calibração para o Sensor de CE

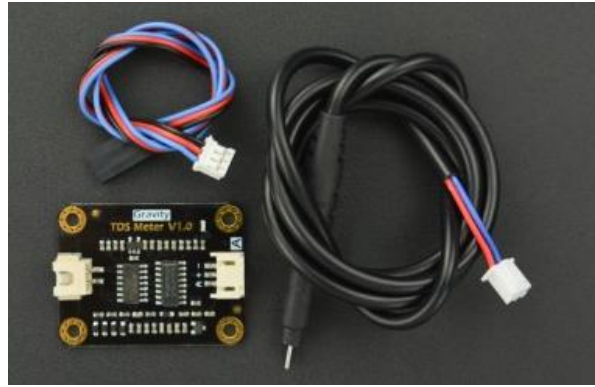
Reagente	Marca	Lote	Fórmula Química	Massa Molecular (g/mol)	Valor de CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	Concentração (mol/L)	Quantidade
Cloreto de Potássio	J.T. Baker	1711701832	KCl	74,55	1413	0,01	0,1863 g
					500	0,002	20 mL da solução (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )
					717.5	0,005	50 mL da solução (1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ )

#### 4.2.4. Sensor de Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)

Para a medição dos SDT é importante ter em conta a variável de temperatura no código, que é predefinida para 25 °C para realizar a compensação automática.

Geralmente a relação entre os valores SDT/EC é constante, na água doce de 0,65, como anteriormente mencionada na 2.1.6.

Para efeito da calibração do sensor SEN08030 (Figura 14), foi assumido o valor de k: 0,50. Valor obtido a partir da análise de correlação dos dados da monitorização manual do sistema de aquaponia ao longo do tempo (2020-2022).



**Figura 14- Sensor Analógico para Sólidos Dissolvidos Totais. (Referência: SEN08030)**

#### **4.2.5. Sensor de Oxigénio Dissolvido (OD)**

O código da amostra é carregado para o microcontrolador ESP32 e o monitor de série do IDE é aberto para colocar os comandos (procedimento idêntico ao descrito para o sensor de pH e CE). Antes do procedimento de calibração é adicionada a solução de enchimento na área da membrana do sensor para o efeito, o sensor é aberto para aceder à membrana e, com a ajuda de uma pipeta volumétrica, é adicionada uma quantidade de 2/3 do volume de 0,5 mol/L NaOH na membrana. A base do sensor é fechada e lavada com água destilada antes de iniciar o procedimento de calibração. A Tabela 6 apresenta os reagentes usados para a elaboração da solução de enchimento.

A calibração do sensor de OD (Figura 15) foi efetuada a 18 °C e 33 °C, uma vez por mês ou a cada duas semanas se necessário.



**Figura 15- Sensor Analógico de oxigénio dissolvido. (Referência: SEN08043)**

Para a solução de enchimento, foram preparadas 100 mL de NaOH 0,5 mol/L (Tabela 4)

**Tabela 4- Solução de Enchimento para sensor OD**

Solução	Reagente	Marca	Lote	Fórmula Química	Massa Molecular (g/mol)	Quantidade
NaOH 0.5 mol/L	Hidróxido de Sódio 0.0911 mol/L	VWR Chemicals	19H054144	NaOH	40,00	54,8 mL
	Biftalato de Potássio 0.1 mol/L	Honeywell Riedel de Haen	83030	C <sub>8</sub> H <sub>5</sub> KO <sub>4</sub>	204,22	0,1545 g

Para o efeito prepararam-se dois copos com água destilada (150 mL), um deles colocou-se no frigorífico durante 15 min a uma temperatura de aproximadamente 8 °C e o outro colocou-se na placa de aquecimento até 40 °C. De seguida, são colocados na placa de agitação (agitação continua durante 10 min) até atingir a concentração de saturação de oxigénio dissolvido na solução, e procedeu-se à medição da tensão e posteriormente aos valores de OD, com agitação suave da solução para evitar a formação de bolhas de ar. Os valores registados foram de 9,4 mg/L e 7,1 mg/L, respetivamente.

#### 4.2.6. Sensor de Potencial Oxidação-Redução (ORP)

O código da amostra é carregado para o microcontrolador ESP32 e o monitor de série do IDE é aberto para colocar os comandos (procedimento idêntico ao descrito para os sensores anteriores).

O procedimento de calibração foi efetuado mergulhando o sensor (Figura 16) numa solução padrão de KCl 3,5 mol/L (Tabela 5), sob agitação suave até obter o valor de referência 222 mV a 25 °C. Foram testados os valores de temperatura 20 °C, 35 °C e 38 °C, obtendo valores de 227 mV, 207 mV, e 206 mV, respetivamente. A periodicidade da calibração foi de uma vez por mês.



**Figura 16- Sensor Analógico Potencial Oxidação- Redução (Referência: SEN08052)**

**Tabela 5- Solução Padrão KCl 3,5 mol/L para sensor ORP (100 mL)**

<b>Reagente</b>	<b>Marca</b>	<b>Lote</b>	<b>Fórmula Química</b>	<b>Massa Molecular (g/mol)</b>	<b>Quantidade</b>
Cloreto de Potássio 3.5 mol/L	J.T. Baker	1711701832	KCl	74,55	26,092 g

A calibração efetuada é uma calibração corretiva aplicada na situação em que o sensor não está a enviar dados corretos. Como referência para definir a relação da temperatura e tensão, foram usados os valores da Tabela 6.

**Tabela 6- Valores referência para calibração sensor ORP, adaptado de: DF Robot (2023)**

<b>Temperatura (°C)</b>	<b>Tensão (mV)</b>
10	242
15	235
20	227
25	222
30	215
35	209
38	205
40	201

### **4.3.Observações e Limitações**

Os testes iniciais aos sensores de pH e condutividade foram realizados depois de março de 2023 e no caso do sensor de oxigénio dissolvido após maio de 2023. O protótipo com os sensores de temperatura, condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais e pH foi colocado para recolha de dados na primeira semana de abril do ano 2023 na linha 3 do sistema de aquaponia do LSMI. Cada sensor foi colocado dentro de um vaso hidropónico que serve como suporte para que os sensores não ficassem mergulhados por completo. Posteriormente, no mês de junho, foram adicionados os sensores de oxigénio dissolvido e de potencial de oxidação-redução. Atualmente o protótipo continua em funcionamento, a análise da informação recolhida neste trabalho considerou apenas os dados obtidos até 31 de agosto do

2023, por ser o mês onde foi possível obter uma maior quantidade de dados e pela limitação de tempo para o tratamento e análise de dados e posterior entrega do projeto de dissertação.

Ao longo do desenvolvimento do protótipo, realização de testes, calibração e implementação do sistema inteligente na linha 3, surgiram alguns problemas que não permitiram o funcionamento correto dos sensores e, conseqüentemente a recolha de dados. Especificamente no mês de maio, um ataque informático ao Instituto Politécnico de Leiria impôs restrições às comunicações, nomeadamente à rede Wi-Fi, pelo que o protótipo deixou de enviar dados.

Na primeira semana do mês de junho e no mês de julho aconteceram falhas de energia, impossibilitando o sistema de funcionar corretamente. Além disso, durante o período de funcionamento foram realizadas várias calibrações corretivas e de rotina, e de limpeza dos sensores, que implicaram a paragem do sistema de medição.

#### **4.4. Cálculo e validação dos resultados**

Os dados obtidos por cada sensor foram descarregados da plataforma *Fire Base* em formato JSON, e depois organizados num ficheiro EXCEL para análise. Foram elaboradas tabelas para cada parâmetro, onde se especifica a data e hora de recolha de dados. Todos os dados relativos aos parâmetros de estudo foram introduzidos, verificados e analisados através das funções estatísticas em duas etapas distintas. Na primeira etapa, aplicação da estatística descritiva aos dados dos meses de abril, junho e agosto, de 2023. Foram calculadas as médias, desvio padrão, valores máximo, mínimo e mediana para cada parâmetro a testar como variável independente. Na segunda etapa de tratamento dos dados, foi analisada a existência ou não de dependência significativa entre as variáveis, determinados os coeficientes de correlação e posterior aplicação de modelos de regressão linear.

## 5. Resultados e Discussão

Neste capítulo são abordados os resultados da calibração dos sensores de pH, EC e OD; os testes efetuados e os resultados destes, sendo comparados com os dados obtidos na monitorização manual com recurso às sondas: portátil LAQUA WQ-310, WQ-320, WQ-330, a sonda multiparamétrica Edge. da marca HANNA *Instruments*, e a sonda de bancada para oxigénio dissolvido, YSI 5000. Por fim, são apresentados e analisados os dados de cada parâmetro obtidos a partir do protótipo inteligente ao longo de três meses, abril, junho e agosto de 2023.

### 5.1. Comparação com a monitorização manual

Para a definição da gama de trabalho dos diferentes sensores do protótipo, é importante ter informação prévia e de referência para estabelecer os valores mínimos e máximos que o sensor pode captar dentro do sistema. Para definir os valores aceitáveis é efetuada a análise da informação recolhida em anos anteriores com base na monitorização manual com recurso a sonda multiparamétrica da linha 3 do Laboratório de Sistemas Multitróficos Integrados do IPLeiria. É esperado que os valores obtidos sejam próximos entre si e idênticos aos valores de referência (padrões de calibração). Os valores apresentados na Tabela 7, representam valores médios anuais de cada parâmetro físico-químico ao longo dos anos 2020, 2021 e 2022.

**Tabela 7- Valores Médios dos parâmetros físico-químicos de qualidade da água, 2020-2022 (n>200)**

Ano	pH	T (°C)	OD (mg/L)	CE (µS/cm)	SDT (mg/L)	ORP (mV)
2020	5,88	21,74	6,74	647,33	356,50	191,15
2021	5,66	22,08	6,93	910,63	479,46	214,82
2022	6,44	24,10	7,78	1363,52	711,53	136,87

Ao analisar os valores de pH obtidos pela sonda HI 3221 marca HANNA e pelo sensor de pH SEN17004, apresentados na Tabela 8 para o pH, em que são usadas soluções tampão de pH 3, 5, 9 e 10 e soluções padrão 4 e 7, é possível observar que os valores são significativamente próximos entre si (desvio não maior ao 6%) e que estão dentro da gama que é aceitável para o bom funcionamento dos sistemas de aquaponia. Os resultados, indicam que o sensor responde corretamente após o procedimento de calibração.

**Tabela 8- Resultados da comparação entre a Sonda multiparamétrica e o Sensor de pH**

<b>Solução Padrão pH</b>	<b>Sonda Lab.</b>	<b>Protótipo</b>
A (3)	3,21	3,40
B (4)	4,10	3,99
C (5)	4,95	5,08
D (7)	7,16	6,98
E (9)	9,50	9,12
F (10)	10,06	9,55

Em relação à condutividade elétrica, é efetuada a comparação entre a sonda HI 2030, HANNA e o sensor de CE SEN 08024, verificando-se através da análise da Tabela 9, que os valores são similares entre si e concordantes com os valores das soluções padrão, 1413  $\mu\text{S/cm}$  e 12880  $\mu\text{S/cm}$ , e muito próximos do valor da solução tampão de 717,5  $\mu\text{S/cm}$ , sendo verificado o maior desvio (1,5%) neste valor.

**Tabela 9- Resultados da comparação entre a Sonda multiparamétrica e Sensor de CE**

<b>Solução Padrão</b>	<b>Sonda Lab.</b>	<b>Protótipo</b>
A (717,5 $\mu\text{S/cm}$ )	717,2	706,5
B (1413 $\mu\text{S/cm}$ )	1413	1413
C (12880 $\mu\text{S/cm}$ )	12882	12880

O sensor de OD é calibrado usando as soluções de água destilada a 33 °C e 18 °C, e os valores de OD obtidos são de 7,10 mg/L e 9,40 mg/L, respetivamente. Após calibração, o valor de oxigénio dissolvido é medido com a sonda de laboratório YSI 5000 e com o sensor para comparação. Os resultados apresentados na Tabela 10 revelam que os valores são próximos, verificando-se o maior desvio (1,05%) aos 18 °C, indicando uma boa resposta do sensor de OD.

**Tabela 10- Resultados da comparação Sonda LSMI e Sensor OD**

<b>Água Destilada (150 mL)</b>	<b>Sonda Lab.</b>	<b>Protótipo</b>
A (18 °C)	9,50	9,40
B (33 °C)	7,06	7,10

## 5.2. Cartas de Controlo dos Sensores Calibrados

As cartas de controlo são usadas para monitorizar o desempenho do processo de calibração dos sensores pH, CE e de OD ao longo do tempo, tendo em consideração que estes três

sensores precisam obrigatoriamente de ser calibrados. Isto também permite identificar variações significativas que podem indicar problemas no processo e determinar se o método está a produzir resultados consistentes ao longo do tempo.

No caso do desenvolvimento do protótipo do sistema inteligente, as cartas de controlo permitem determinar se os sensores respondem e funcionam corretamente depois de calibrados, proceder à comparação entre o valor obtido pelo sensor e os valores das soluções padrão de concentração conhecida e ainda confirmar se os valores estão dentro da gama aceitável e não apresentam variações significativas no momento da calibração e teste.

Como se pode observar nas Figuras 17, 18, 19, 20, 21, e 22, a linha central (valor médio) fornece uma referência onde os valores dos parâmetros em análise deverão ser mantidos para um funcionamento adequado do sistema de aquaponia. Os limites de controlo, ajudam a estabelecer se o processo de medição se encontra dentro da gama de variação aceitável ou se há variação excessiva.

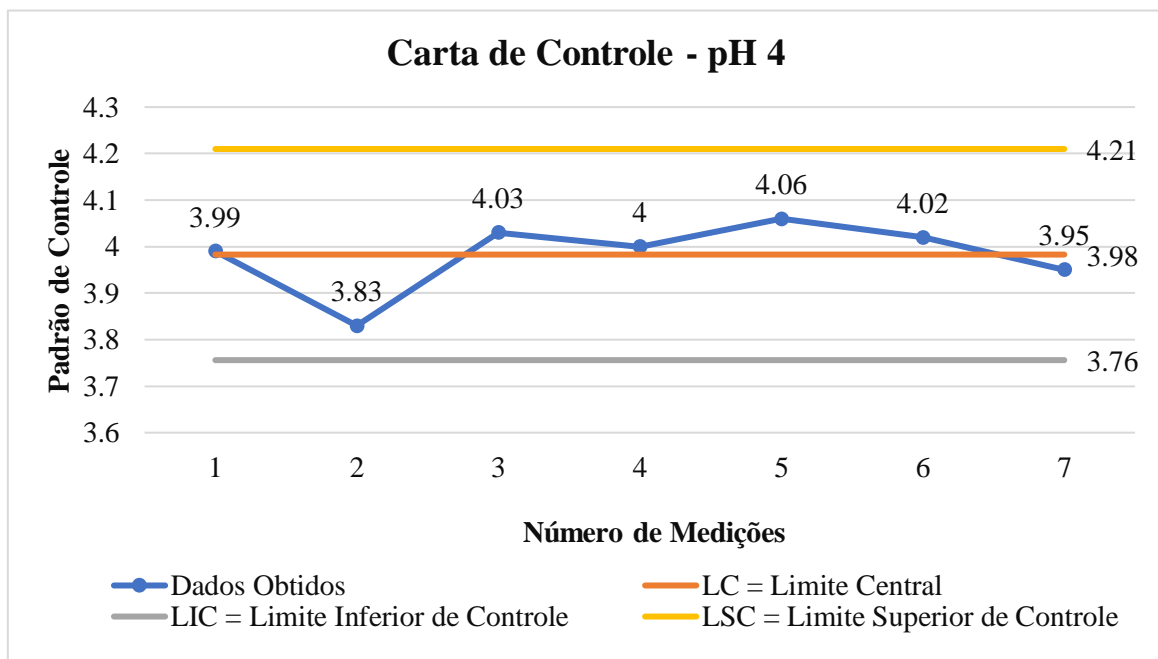
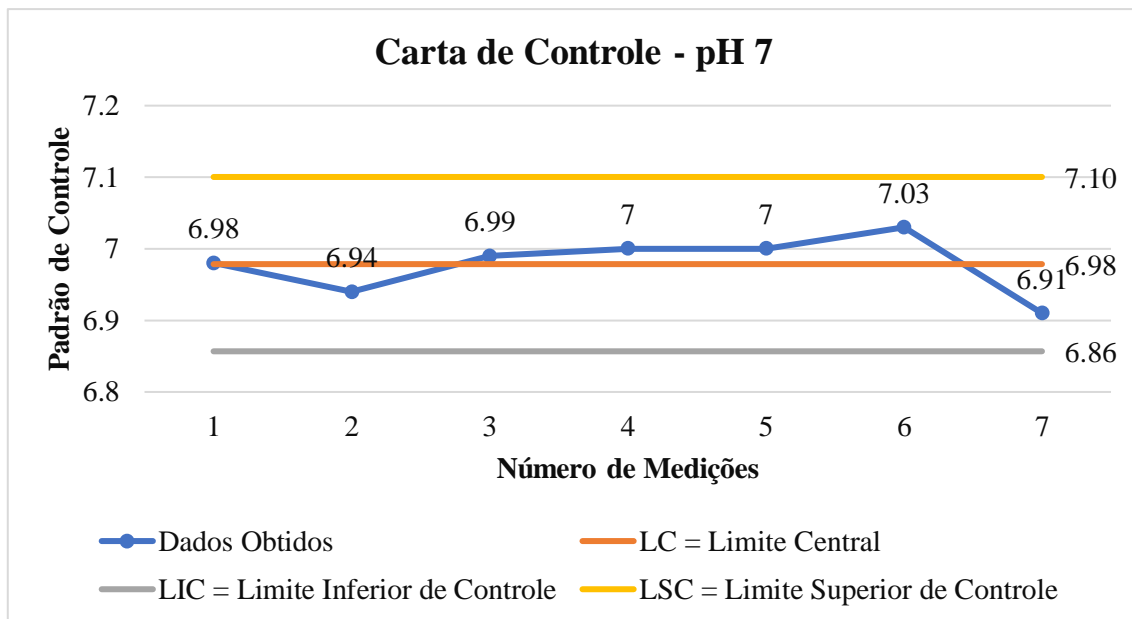


Figura 17- Carta de Controle de Calibração do Sensor de pH (solução padrão 4)



**Figura - 18 Carta de Controle de Calibração do Sensor de pH (solução padrão 7)**

No caso do sensor de pH (Figura 17 e 18), são realizadas 7 medições para cada ponto de calibração. Inicialmente o sensor é calibrado com maior frequência, uma vez que não funciona corretamente, não tendo sido identificada a causa. Foi realizada a calibração inicial com os valores padrão de pH 4 e 7, tendo sido testada posteriormente com as soluções de pH 3, 5, 9 e 10, para verificar se o sensor conseguia funcionar dentro dessa gama, entre os valores mínimos e máximos. A partir dos valores obtidos é possível determinar que existe uma variação mínima, em relação aos valores das soluções padrão, confirmando-se que o sensor opera dentro da gama aceitável e reconhece os valores de pH. Efetivamente após a calibração inicial e corretiva, o sensor de pH responde positivamente, apresentando valores que não ultrapassam os limites superior ou inferior. Para definir um plano de manutenção para este sensor, registam-se, aproximadamente 7500 leituras (2 meses) antes de o sensor ter de ser sujeito a procedimento de limpeza e uma nova calibração.

Após análise dos resultados do controlo do sensor de CE (Figura 19 e 20), onde foram realizadas 5 medições para cada ponto de calibração (1413  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e 12880  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), é possível confirmar que o sensor funciona dentro da gama aceitável, após as calibrações inicial e corretiva. O sensor CE apresenta uma maior capacidade de trabalho sem ter que ser calibrado novamente, e por tanto só é calibrado e sujeito a limpeza aos 3 meses de funcionamento aproximadamente após 11250 leituras.

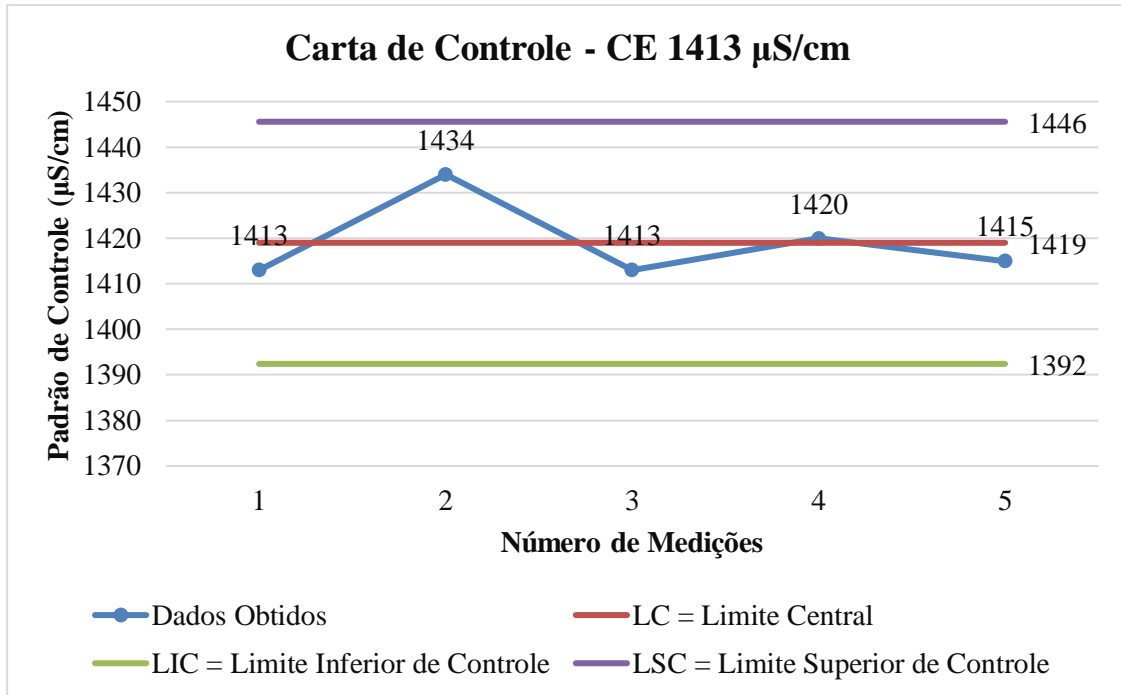


Figura 19- Carta de Controle de Calibração do Sensor de CE (solução padrão 1413  $\mu\text{S/cm}$ )

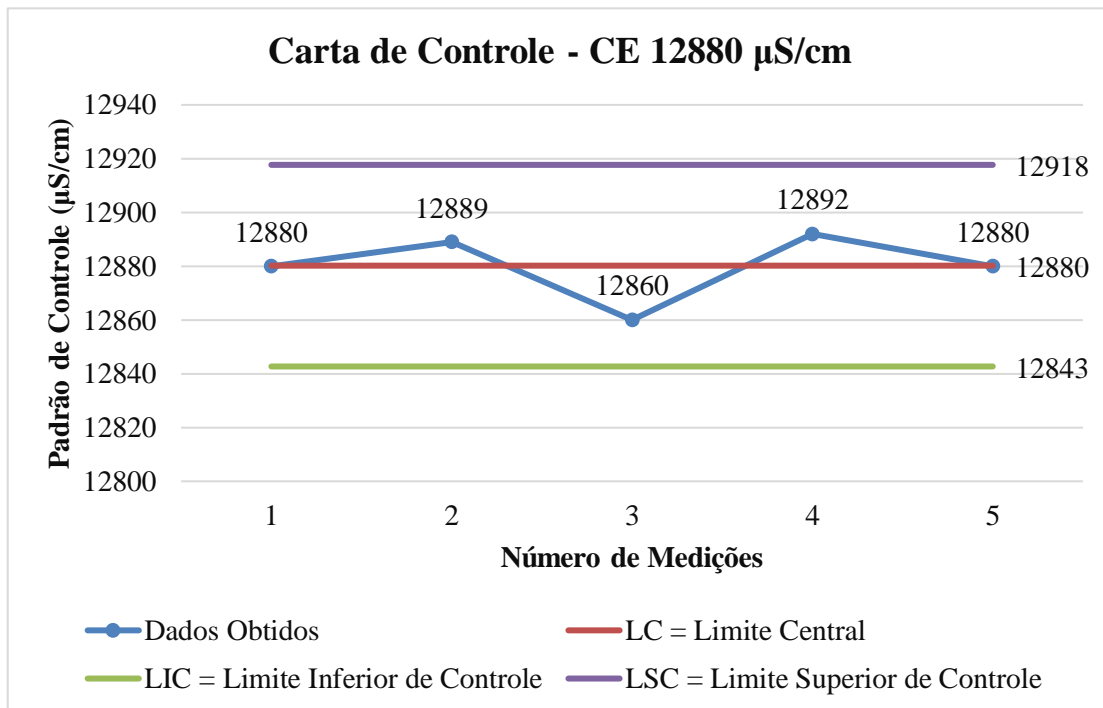


Figura 20 - Carta de Controle de Calibração do Sensor de CE (solução padrão 12880  $\mu\text{S/cm}$ )

Para o sensor de oxigénio dissolvido é possível observar que tem uma limitação, só funciona adequadamente e regista valores corretos, quando está sob agitação. Os resultados apresentados na Figura 21 e 22 demonstram que o sensor efetivamente consegue obter valores dentro da gama desejada, mas unicamente tendo em conta a particularidade mencionada. Para o efeito foram realizadas 5 medições para cada ponto de calibração, neste caso é considerada a variação da temperatura para obter os valores de referência, sendo que a 18 °C o valor obtido de OD deve ser 9,47 mg/L e a 33 °C o valor correspondente dever ser 7,17 mg/L. Verifica-se que o sensor precisa de manutenção frequente (pelo menos uma vez por mês), após 2500 leituras.

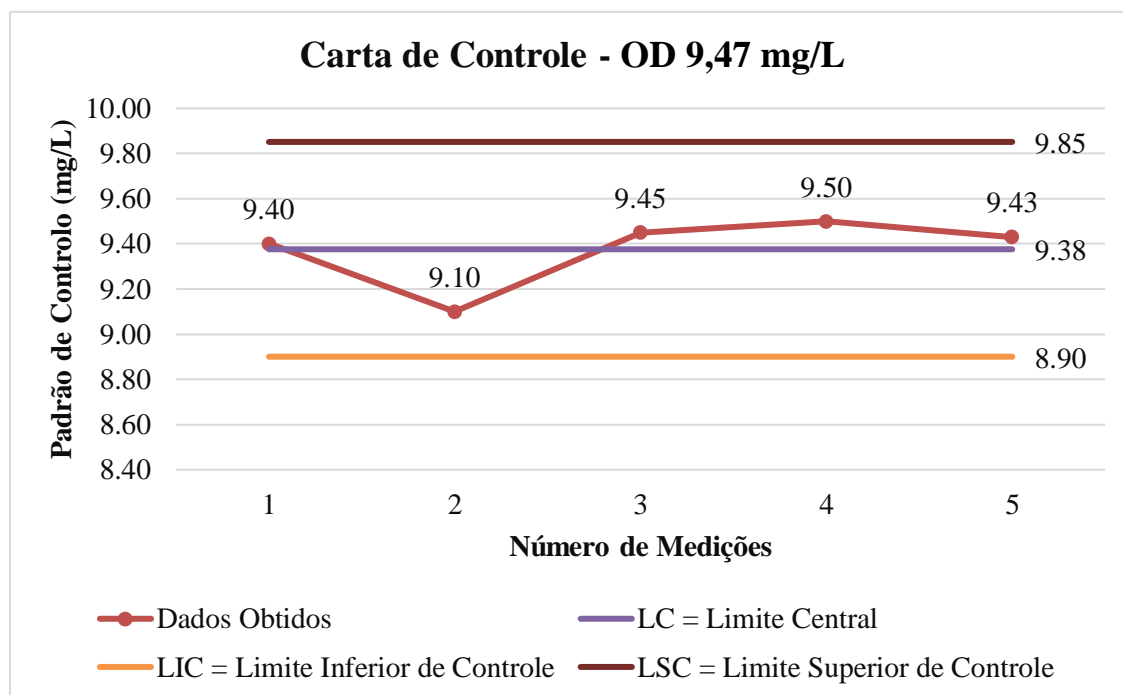


Figura 21 - Carta de Controle de Calibração do Sensor de OD 9,47 mg/L

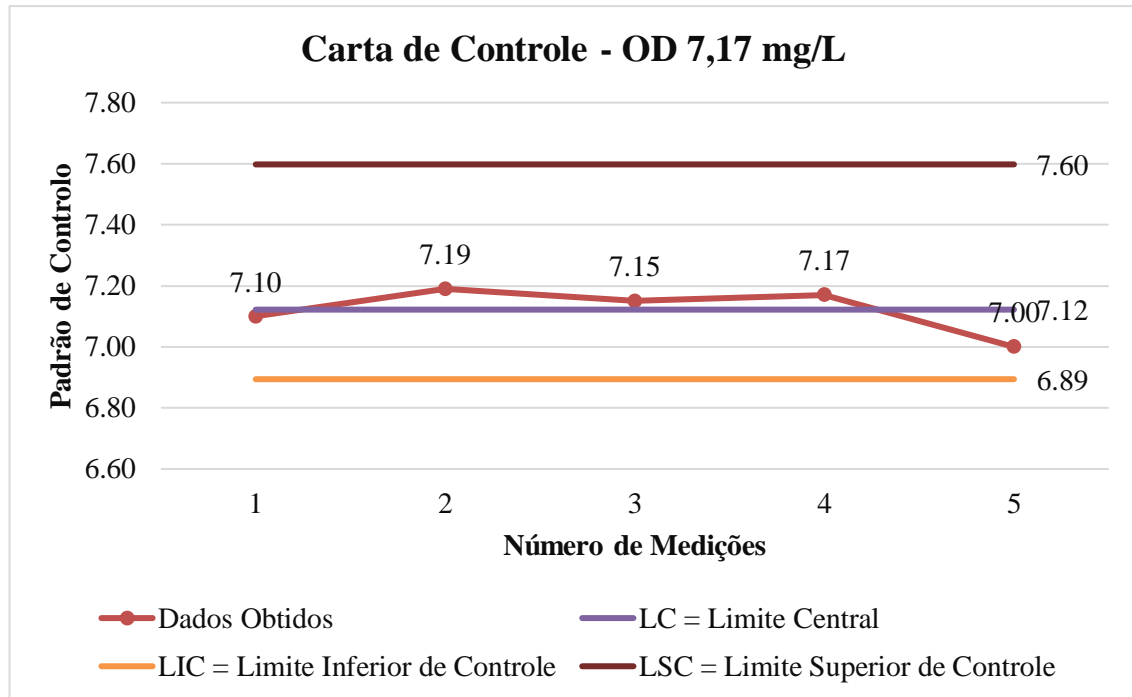


Figura 22 - Carta de Controle de Calibração do Sensor de OD 7,17 mg/L

### 5.3. Análise dos Resultados Experimentais

Nesta seção é apresentada a análise estatística e a interpretação dos dados obtidos da monitorização inteligente do sistema de aquaponia.

#### 5.3.1. Monitorização Inteligente – Análise Mensal

Os resultados revelam a estabilidade de medição dos sensores após calibração e que os valores obtidos, estão dentro dos intervalos esperados. Para os três meses, são analisados os valores máximos, mínimos e mediana. É apresentado também o valor do desvio padrão, apenas como medida de dispersão dos valores individuais.

Para os parâmetros CE e Temperatura (Tabela 12 e 14), é obtido o mesmo número de leituras; sendo que em abril são recolhidas 2247 leituras, que representam 20 dias, desde o dia 10/04 até o dia 30/04, em junho 2608 leituras que correspondem a 27 dias a partir do dia 03/06 até o dia 30/06, e em agosto são recolhidas 4288 leituras correspondentes a 29 dias, desde o 01/08 até o 30/08. Os outros parâmetros apresentam diferente número de leituras devido a certos problemas técnicos especificados na secção 4.3 e outras limitações dos sensores abaixo detalhadas.

Os valores de pH são descartados devido a limitações em relação à calibração e limpeza do sensor. Após os procedimentos estabelecidos de calibração, o sensor não responde adequadamente, mostrando valores fora da gama adequada para sistemas de aquaponia. Situação atípica que é confirmada pelos valores da medição manual. Para o mês de junho são consideradas 2393 leituras que correspondem a 22 dias, de 08/06 a 30/06; e para o mês de agosto são consideradas 3707 leituras correspondentes a 26 dias, de 01/08 a 26/08. Na monitorização do pH é obtido o valor médio de 7,08 durante esses meses (Tabela 11) e, portanto, conclui-se que os valores médios se encontram dentro da gama aceitável para os sistemas de aquaponia. Os resultados da monitorização manual nos meses em análise apresentam para junho, um valor médio de 5,9 e desvio padrão de 0,2 e para o mês de agosto, um valor médio de 5,8 e desvio padrão de 0,3. Comparando os valores registrados pelo sensor e o resultante de monitorização manual verifica-se uma diferença significativa, podendo ser explicada pelo fato de que o sensor fica mergulhado de forma continua nas camas das plantas, o que ao longo do tempo, poderá gerar o acúmulo de matéria orgânica e inorgânica nos componentes do sensor, formando depósitos que interferem na capacidade do sensor de medir com precisão os níveis de pH.

**Tabela 11- Valores de pH registados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023**

Estatísticas	Mês		
	abril	junho	agosto
Média	-	7,11	7,05
Desvio Padrão	-	0,35	0,43
Máximo	-	7,79	7,80
Mínimo	-	6,15	4,94
Mediana	-	7,20	7,16

A partir da análise da tabela 12, pode concluir-se que os valores médios da CE para os três meses estão dentro do intervalo aceitável para os sistemas de aquaponia; por tanto o sensor responde corretamente após o procedimento de calibração. É possível observar certa diferença por comparação com os valores médios a partir da monitorização manual. Sendo que em abril é obtido um valor de 1935,5  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 24,6, em junho um valor médio de 1838,0  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 13,6 e no mês de agosto, um valor médio de 1643,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e desvio padrão de 50,7. Apesar de que na monitorização manual ao igual que na monitorização inteligente os dados apresentam uma grande dispersão, existe uma diferença notável do desvio padrão no mês de junho. Situação que pode ser explicada por

diferenças de sensibilidade ou precisão associadas a cada um dos dispositivos de medição, a frequência de amostragem e em casos específicos por problemas técnicos dos sensores.

**Tabela 12- Valores de Condutividade Elétrica registados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023**

<b>Estatísticas</b>	<b>Mês</b>		
	abril	junho	agosto
Média	1319	1413	1345
Desvio Padrão	41,71	99,15	44,99
Máximo	1380	1587	1480
Mínimo	1167	1151	1204
Mediana	1330	1443	1342

Para o parâmetro SDT, no mês de abril são recolhidas 2247 leituras, correspondentes a 20 dias, de 10/04 a 30/06. Em junho são obtidas 1853 leituras, correspondentes a 21 dias, de 03/06 a 30/06, sendo que de 08/06 a 14/06 o sensor deixa de funcionar corretamente, tendo sido retirado para processo de limpeza e calibração. No mês de agosto são recolhidas 4288 medições. Tendo por base os resultados da Tabela 13, é possível observar que o valor médio dos três meses está no intervalo de valores de 750 mg/L a 880 mg/L, e por tanto os valores estão dentro da gama aceitável para sistemas de aquaponia. A partir da monitorização manual, para o mês de abril é obtido um valor médio de 1354,7 mg/L e desvio padrão de 17,5, para junho um valor médio de 919,8 mg/L e desvio padrão de 6,5 e no mês de agosto, um valor médio de 822,1 mg/L e desvio padrão de 25,4. É possível verificar uma diferença entre os valores obtidos pelo sensor e pela sonda multiparamétrica, que pode ser justificada por alguns problemas técnicos do sensor, anteriormente mencionado.

**Tabela 13- Valores dos Sólidos Dissolvidos Totais registados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023**

<b>Estatísticas</b>	<b>Mês</b>		
	abril	junho	agosto
Média	753,51	887,09	784,25
Desvio Padrão	26,95	52,91	19,87
Máximo	809,52	1058,74	834,57
Mínimo	683,97	792,34	740,54
Mediana	749,92	873,86	783,76

A partir da análise da tabela 14 pode concluir-se que para o parâmetro temperatura, os resultados mostram-se bastante satisfatórios. Os valores médios para os três meses estão dentro do intervalo aceitável para os sistemas de aquaponia. Estes valores são muito próximos aos valores obtidos na monitorização manual, 21,80 °C e desvio padrão de 1,50 em abril, 25,10 °C e desvio padrão de 1,30 em junho e 25,40 °C e desvio padrão de 1,70 em agosto; por tanto, pode concluir-se que o sensor responde corretamente após o procedimento de calibração.

**Tabela 14- Valores da Temperatura registados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023**

Estatísticas	Mês		
	abril	junho	agosto
Média	22,53	26,17	26,14
Desvio Padrão	1,67	0,97	1,50
Máximo	26,10	28,50	29,90
Mínimo	18,60	23,60	23,10
Mediana	22,40	26,10	26,00

Para o parâmetro ORP apenas é possível considerar os valores registados no mês de agosto, atendendo a que o sensor só foi disponibilizado em junho e teve de ser sujeito a procedimentos de calibração corretiva, e nos meses de junho e julho apenas foram obtidas 1076 leituras, o que se considera manifestamente reduzido para se proceder ao tratamento.

O mês de agosto apresenta 4288 leituras, que correspondem a 29 dias, de 01/08 a 30/08. Na tabela 15 pode observar-se que o valor médio de 125,67 mV, é um valor que está dentro da gama aceitável para o funcionamento adequado do sistema de aquaponia. O valor médio obtido a partir da monitorização manual é de 262 mV e desvio padrão de 16,34. É de referir que a sonda multiparamétrica utilizada, não deteta o valor de ORP automaticamente, e por tanto unicamente deteta a diferença de potencial em relação ao sensor de pH, sendo necessário realizar um cálculo específico para a obtenção do valor de ORP. Esta variação entre os valores médios obtidos através da sonda multiparamétrica e do sensor, pode dever-se a diferenças da sensibilidade entre os dispositivos e na estabilidade, considerando que o sensor foi exposto a variações ambientais ao estar de forma constante na cama das plantas, enquanto que a sonda que só regista os valores no momento da monitorização manual.

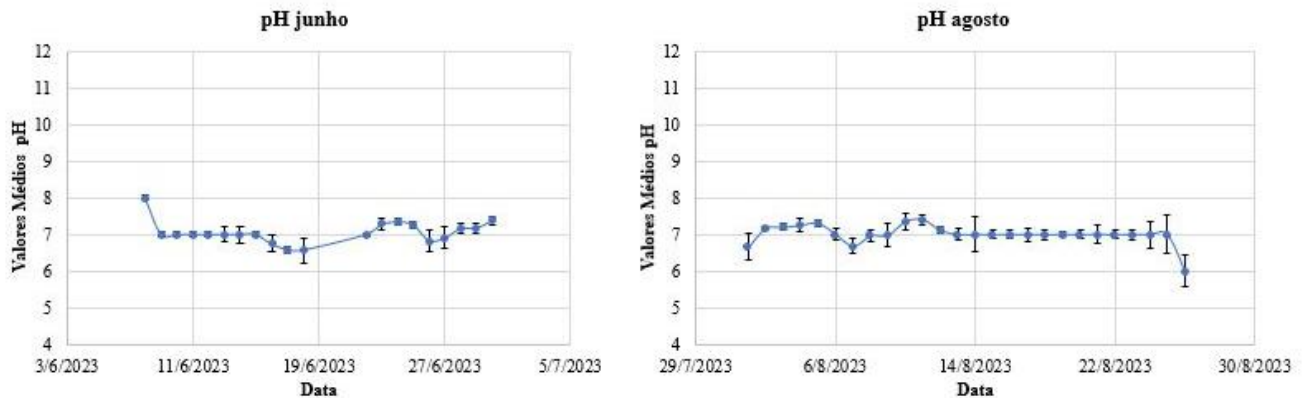
**Tabela 15- Valores do ORP registados pelo protótipo de medição, meses abril, junho e agosto de 2023**

Estatísticas	Mês		
	abril	junho	agosto
Média	-	-	125,67
Desvio Padrão	-	-	61,28
Máximo	-	-	392,42
Mínimo	-	-	22,79
Mediana	-	-	105,64

### 5.3.2. Resultados da monitorização temporal

Com o objetivo de determinar a resposta dos sensores de T, pH, EC, SDT, OD e ORP e as variações ao longo do tempo, são analisados os valores médios diários ao longo de cada mês e para cada parâmetro. Os dados da monitorização são apresentados nas Figuras 20 a 24.

Considerando que no mês de abril, o sensor de pH não esteve operacional, apenas são apresentados os resultados obtidos nos meses de junho e agosto (Figura 20).

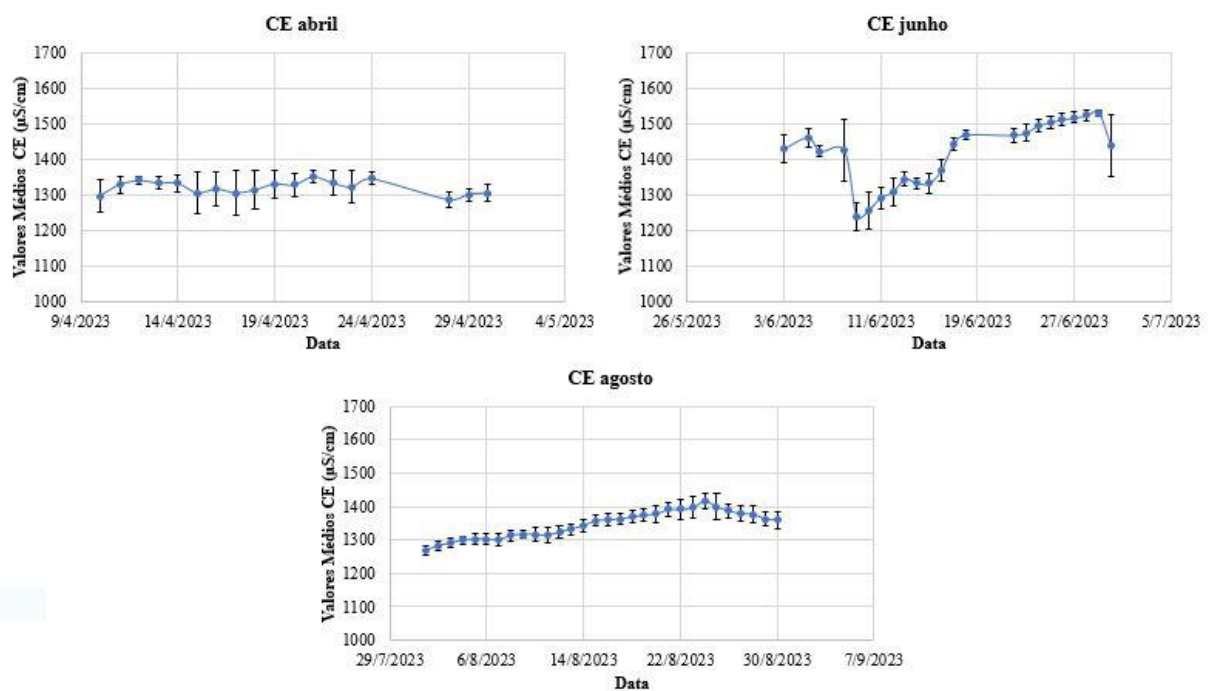


**Figura 23- pH: Valores médios diários e respetivo desvio padrão dos meses junho e agosto de 2023**

Observa-se na Figura 20 que tanto para o mês junho como para o de agosto, os valores de médios diários de pH encontram-se no intervalo de 5 a 8, concluindo-se que ao longo do tempo o sensor responde de forma adequada. Os valores obtidos estão de acordo aos valores aceitáveis para os sistemas de aquaponia. Daffa et al. (2021) define que o pH adequado para sistemas deve estar compreendido no intervalo de 5 a 8. Partindo dessa informação, pode concluir-se que o sensor de pH, após o processo de calibração, responde positivamente,

recolhendo e enviando dados corretos, revelando boa estabilidade e precisão, após procedimentos de calibração. A precisão é avaliada a partir da análise do desvio padrão do pH em junho e agosto, em que a maioria dos dados estão próximos da média.

Para a análise do comportamento da CE ao longo dos três meses em estudo (Figura 21), pode-se concluir que existe uma maior variação no mês de junho, apresentando valores mais altos de condutividade elétrica, chegando até valores médios diários de 1500  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Estes valores sugerem uma concentração significativa de nutrientes dissolvidos na água, estando os valores ainda dentro do intervalo aceitável em sistemas de aquaponia (Ding et al., 2018). Existe também uma maior dispersão dos dados em relação à média, o que sugere que há uma grande variação nos valores medidos, podendo para isso contribuir vários fatores, como flutuações ambientais, interferência eletromagnética ou ruído nos dados. Apesar das medições serem fiáveis, tendo em conta a variabilidade em relação ao valor médio, a comparação com as medições manuais não permitem garantir a validade das mesmas.

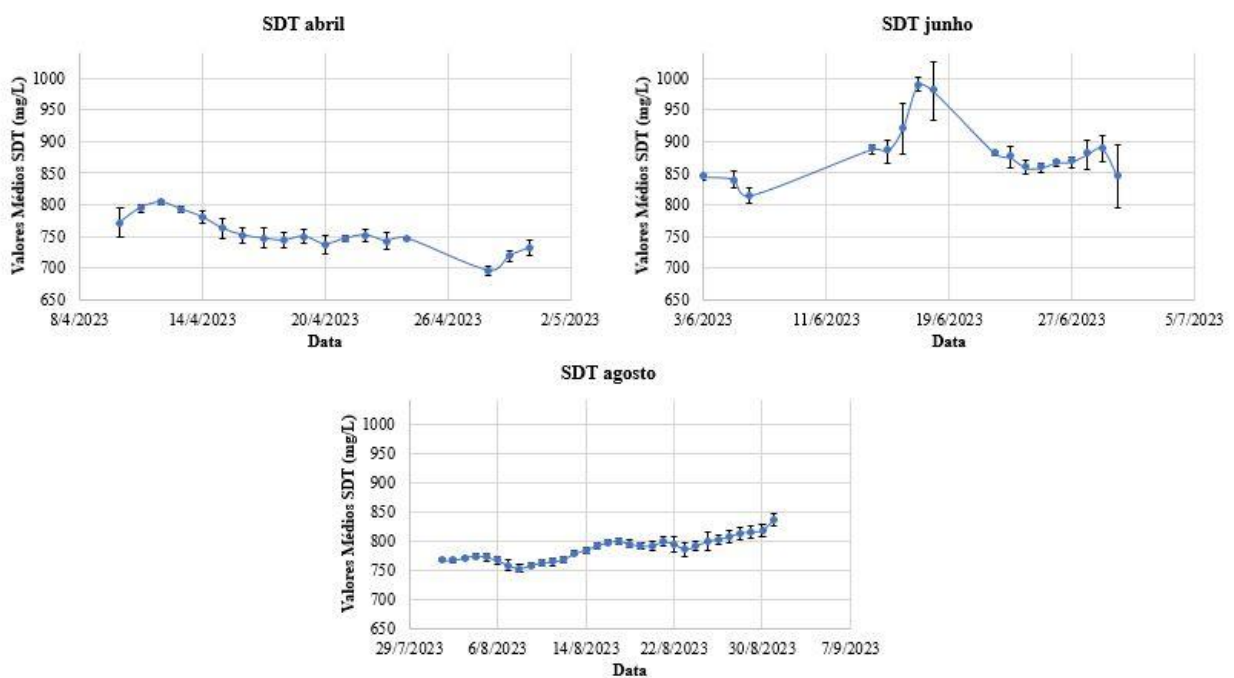


**Figura 24- CE: Valores médios e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023**

A partir da análise da variação dos valores de SDT nos meses em estudo (Figura 22), é evidente que a maior variação ocorre no mês de junho, valores até 1000 mg/L. Considerando que o sensor de SDT é calibrado automaticamente, tendo como referência os valores de CE, os resultados estão de acordo com os observados para CE. No caso específico do sensor de

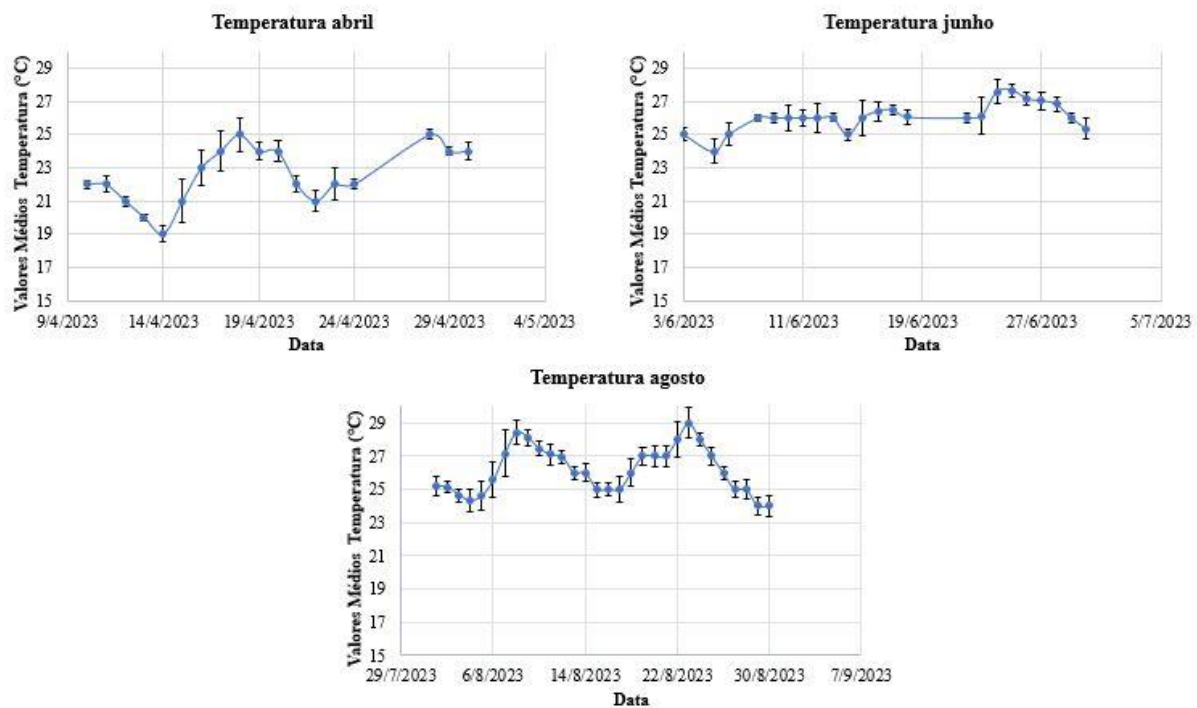
SDT, ocorreram falhas técnicas explicadas na secção 5.3.1., não havendo por isso uma série temporal completa.

Apesar das falhas técnicas, os valores obtidos pelo sensor estão dentro do intervalo aceitável; comparando-se os resultados obtidos para os SDT com o valor máximo permitido de 1000 mg/L (Medina et al., 2016). De igual forma nos meses de abril e agosto, os valores não excedem o valor máximo permitido e a dispersão dos dados em relação à média não é significativamente grande. Por tanto, conclui-se que existe um comportamento constante na medição dos SDT ao longo do tempo, revelando boa estabilidade e precisão do sensor de medida.



**Figura 25- SDT: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023**

Observa-se na Figura 23 que a variável temperatura apresenta um comportamento similar nos meses de junho e agosto, com valores médios entre 25 °C e 30 °C, que são temperaturas esperadas na época de verão. No mês de abril, os valores variam entre 19 °C e 25 °C, valores de temperaturas inferiores às registradas nos meses de verão. Seguindo a informação detalhada na secção 2.1.2., pode concluir-se que os valores registrados estão dentro da gama de temperatura indicada para os peixes e plantas, temperaturas entre 18 °C e 30 °C. Além disso, a partir da análise do desvio padrão, pode concluir-se que o desvio padrão se concentra em torno da média, o que significa que não existe uma dispersão significativamente grande dos valores em relação à média, revelando boa estabilidade e precisão do sensor de medida.



**Figura 26- T: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, meses abril, junho e agosto de 2023**

A Figura 24 mostra o comportamento do sensor de ORP no mês de agosto, o qual apresenta valores adequados em relação ao intervalo de ORP aceitável para aquaponia. É de notar que na última semana de agosto os valores de ORP aumentam consideravelmente, situação não observada durante a monitorização manual, o que poderá revelar necessidade de calibração de rotina, mesmo que os valores ainda estejam dentro da gama 100 mV a 400 mV, aceitáveis para aquaponia.

Existe uma variação notável em comparação com a monitorização manual, onde foi obtido um valor médio de 262 mV. Por tanto, não é possível garantir a validade das medições.

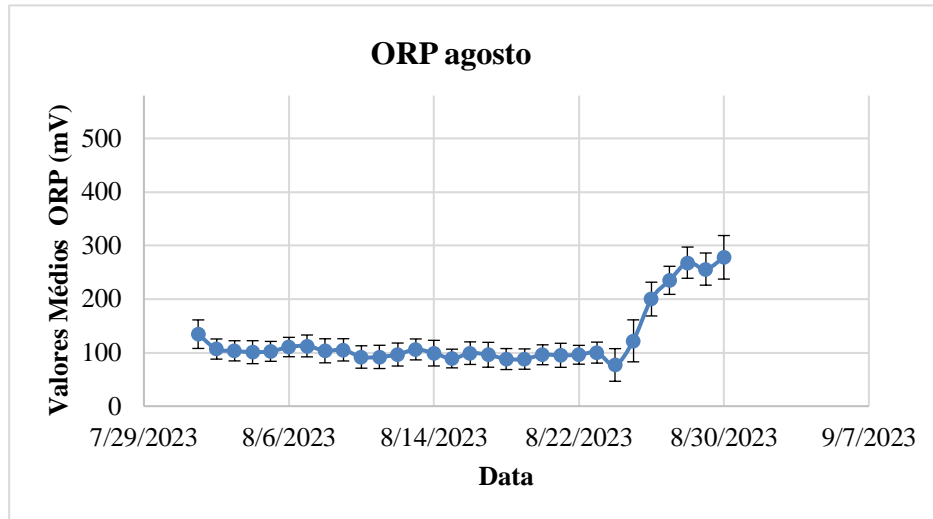


Figura 27- ORP: Valores médios diários e respetivo desvio padrão, mês agosto de 2023

#### 5.4. Correlação entre Parâmetros

Observa-se na Tabela 16, a magnitude de correlação entre os diferentes pares de parâmetros físico-químicos analisados. Sendo que em abril, existe uma correlação negativa forte entre os parâmetros de T-SDT, e uma correlação intermédia entre CE-SDT. No mês de junho, observa-se apenas uma correlação negativa forte, entre pH-SDT. E no mês de agosto, existem duas correlações fortes: uma correlação positiva entre CE-SDT, e outra correlação negativa entre pH-ORP. E ainda possível observar duas correlações intermédias entre T-SDT e ORP-SDT.

Tabela 16- Correlação entre os vários Parâmetros nos meses de estudo

Pares (Parâmetros)	Mês		
	abril	junho	agosto
CE-SDT	0,47	-	<b>0,76</b>
T-SDT	<b>-0,71</b>	-	-0,45
ORP-SDT	-	-	0,52
pH-SDT	-	<b>-0,73</b>	-
CE-ORP	-	-	-
pH-ORP	-	-	<b>-0,71</b>

Para a análise estatística da regressão linear, apenas são considerados os pares de parâmetros que apresentam uma correlação forte, tendo sido determinada a equação de previsão para explicar a tendência de dependência entre as variáveis.

No mês de abril existe uma forte correlação linear negativa (Tabela 16) entre as variáveis dependente “SDT” e independente “T”, tendo-se procedido à determinação da equação de regressão linear,  $\widehat{SDT} = -11,439 * T + 1011,2$ . O que significa que por cada aumento de uma unidade no valor da T, há uma tendência para ocorrer uma diminuição de 11,44 mg/L no valor previsto de SDT (Figura 25). Pode-se ainda concluir que a percentagem de variação do parâmetro SDT que o modelo explica é de aproximadamente 50% ( $R^2 = 50,1$ ), pelo que a qualidade do modelo é razoável. Esta correlação pode evidenciar, que apesar do aumento da Temperatura poder contribuir para o aumento da quantidade de sólidos dissolvidos na água (aumento de salinidade), as plantas poderão através das suas raízes absorver maior quantidade de nutrientes o que se reflete numa diminuição do teor de SDT em solução.

A temperatura, tem uma influência direta na taxa de absorção de nutrientes pelas plantas, devido a que a atividade metabólica e processo de transpiração das plantas tende a aumentar com altas temperaturas, o que pode aumentar a exigência de nutrientes. De igual forma, a temperatura da solução nutritiva afeta a velocidade com que os nutrientes são transportados da raiz para outras partes da planta, ao aumentar a temperatura, o transporte de nutrientes pode ser mais rápido e, também pode conduzir ao aumento de decomposição de matéria orgânica na solução, o que poderá contribuir para a redução da quantidade de sólidos dissolvidos totais (Adjovu et al., 2023).

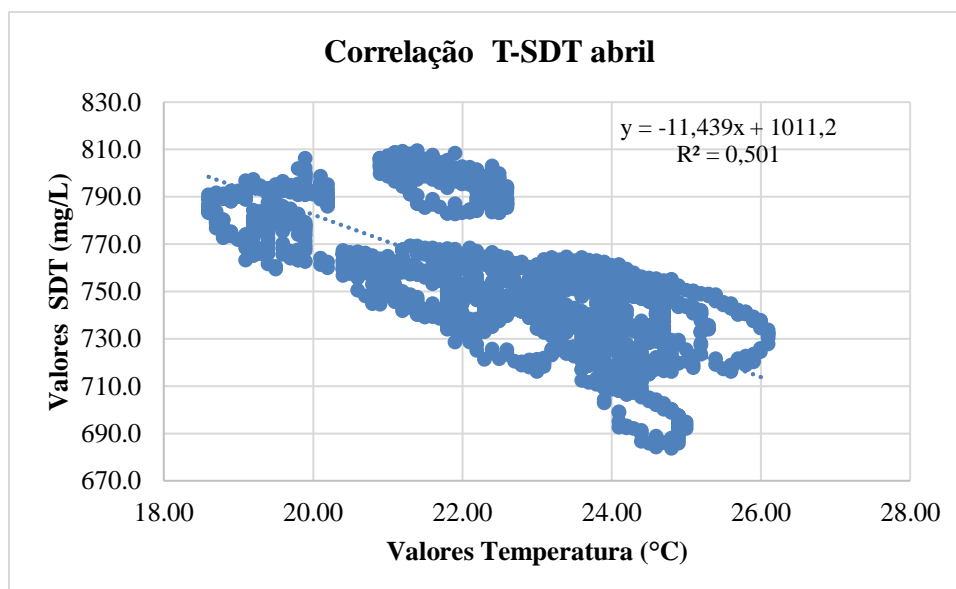


Figura 28- Regressão Linear entre os parâmetros T e SDT

No mês de junho, o modelo de regressão linear (Figura 26), apresenta a equação dada por:  $\widehat{SDT} = -109,66 \cdot \text{pH} + 1663,5$ , concluindo-se que por cada aumento de uma unidade no valor do pH, há uma tendência para ocorrer uma diminuição de 109,66 mg/L no valor previsto de SDT. É possível concluir que a percentagem da variação do parâmetro SDT que o modelo explica é de aproximadamente 53% ( $R^2 = 0,5299$ ), pelo que a qualidade do modelo é razoável.

O aumento do pH poderá levar a que ocorra precipitação de alguns cátions na solução, resultando numa menor concentração de iões na solução, isso pode diminuir os SDT, devido a que parte desses iões é convertida em formas menos solúveis (Blanchard et al., 2020).

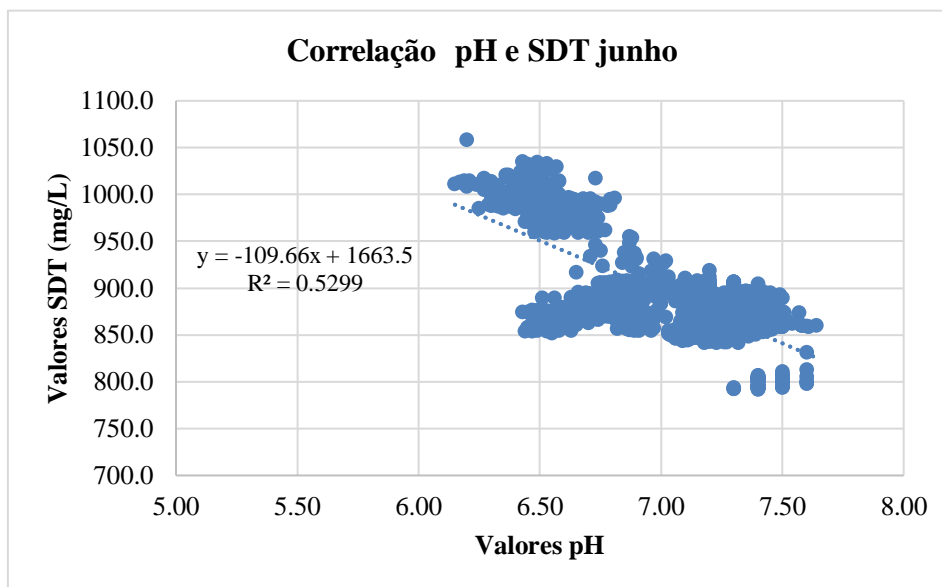
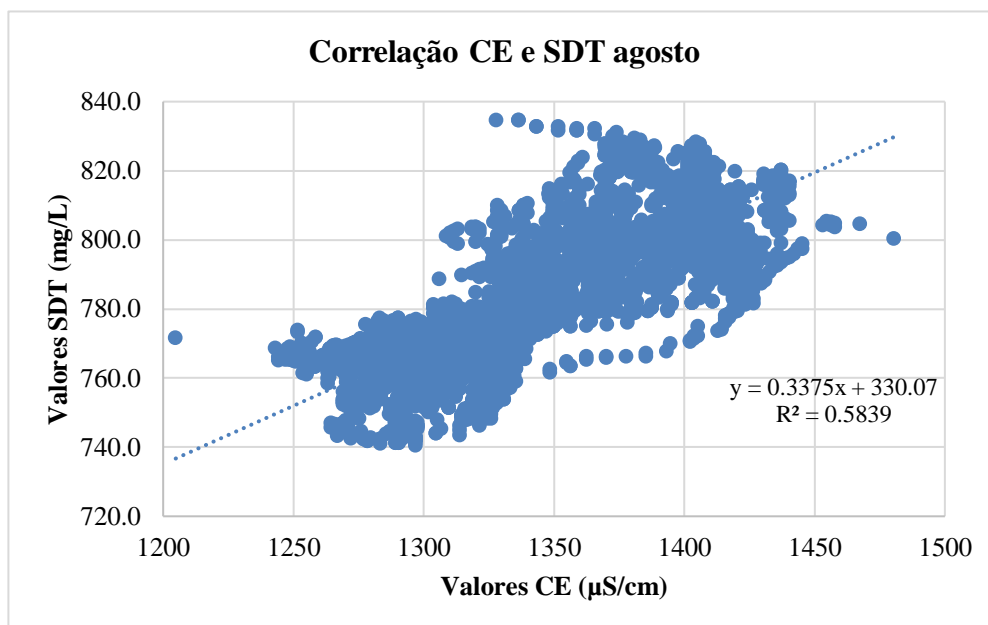


Figura 29- Regressão Linear entre os parâmetros pH e SDT

No mês de agosto, é observada na Figura 27 uma forte correlação linear positiva entre as variáveis dependente “SDT” e independente “CE”, e obtém-se a equação de regressão  $\widehat{SDT} = 0,3375 \cdot \text{CE} + 330,07$ . O que significa que por cada aumento de uma unidade no valor do CE, há uma tendência para ocorrer um aumento de 0,3375 mg/L no SDT. De igual forma, conclui-se que a percentagem de variação do parâmetro SDT que o modelo explica é de aproximadamente 60% ( $R^2 = 0,5839$ ), pelo que a qualidade do modelo é razoável. Este valor está de acordo com os pressupostos anteriormente referidos, em que a condutividade e salinidade estão relacionadas, considerando que a quantidade de iões dissolvidos aumenta os valores de ambas (Yanes et al., 2020). Ainda que a relação entre SDT/CE assumida tenha sido de 0,5 para a calibração do sensor SDT, e os resultados da regressão tenham evidenciado

uma relação de 0,34, tal desvio pode ser explicado pela incerteza das determinações e variabilidade temporal corrida no sistema.

Tendo em consideração que a capacidade de conduzir corrente elétrica na solução nutritiva está diretamente relacionada com a quantidade e natureza dos iões dissolvidos presentes na solução. A dissociação de sais iónicos em seus iões constituintes, aumenta significativamente a concentração total de sólidos dissolvidos e, em consequência, o aumento da capacidade de condução elétrica da solução (Siosemarde et al., 2010).



**Figura 30- Regressão Linear entre os parâmetros CE e SDT**

Ainda no mês de agosto, partindo da forte correlação negativa entre as variáveis dependente “ORP” e independente “pH”, obtém-se a equação de regressão  $\widehat{\text{ORP}} = -51,102 \cdot \text{pH} + 465,36$ . O que significa que por cada aumento de uma unidade no valor do pH, há uma tendência para ocorrer uma diminuição de 51,10 mV no ORP. A percentagem de variação do parâmetro ORP que é explicado pelo modelo, é de aproximadamente 50% (50,77), pelo que a qualidade do modelo é razoável (Figura 28).

A variação de pH e potencial redox poderá sofrer a influência da presença de matéria orgânica e minerais oxidáveis na água dependendo do teor de oxigénio. Com o aumento dos valores de pH poderá o potencial redox indicar condições levemente redutoras. O ORP é influenciado pelo pH devido à sua influência na distribuição de espécies químicas redox (que ganham ou perdem eletrões) na solução. A mudança na distribuição destas na solução causa

alteração na concentração de iões hidrogénio ( $H^+$ ) e hidróxido ( $OH^-$ ), ocorrendo uma diminuição do ORP (Saalidong et al., 2022).

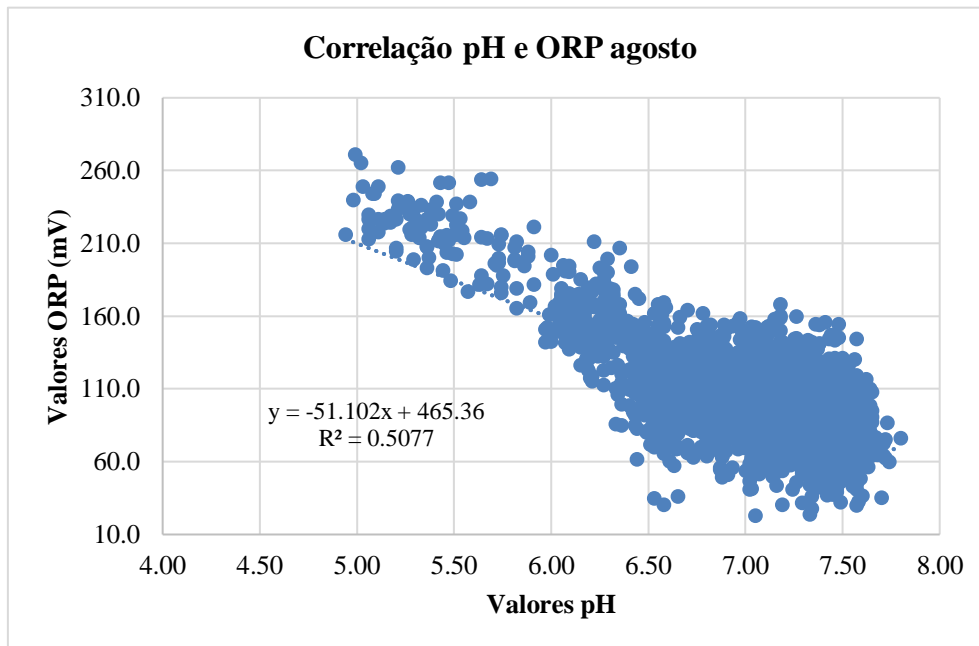


Figura 31- Regressão Linear entre os parâmetros pH e ORP

### 5.5. Monitorização do crescimento das plantas com recurso a análise de imagem

Os resultados das imagens obtidas para monitorizar o crescimento da biomassa, com recurso a câmara, são comparados com os parâmetros de crescimento medidos manualmente. Na Figura 29 é possível observar o crescimento notável das alfaces, e a comparação visual de aumento de biomassa desde o início do ensaio até ao momento da colheita da planta.



Figura 32- Comparação Crescimento das Alfaces: 20/09/2023 e 02/11/2023, respetivamente.

Como se observa na Figura 30, não há presença de insetos no período em que foi colocada a câmara 1 e a câmara 2, e há um crescimento rápido das plantas. As alfaces apresentam folhas com uma textura uniforme em grande parte de sua superfície, sem áreas danificadas.



**Figura 33- Crescimento das Alfaces em 3 semanas e Observação de Insetos**

Após 4 semanas de crescimento é realizada a monitorização e observação do crescimento das alfaces, notando um crescimento adequado das plantas. E apesar da qualidade da imagem, ainda se consegue perceber que as folhas apresentam uma coloração verde intensa, sem manchas escuras ou descoloração, o que revela um alto teor de clorofila, podendo assumir-se que o sistema dispunha da quantidade de nutrientes necessária.

No caso da observação dos insetos, é evidente a presença de cerca de 18 insetos (Figura 31), verificando-se que têm tamanhos diferentes, mas não sendo possível distingui-los. As imagens têm como objetivo verificar se existe uma tendência de aumento na população de insetos no sistema, e não a identificação dos mesmos. A quantidade de insetos presentes na armadilha não é significativamente elevada para se concluir que há risco de praga.



**Figura 34- Crescimento das Alfaces em 4 semanas e Observação de Insetos**

Nas Figuras 32 e 33 são apresentados os dados obtidos a partir da monitorização manual, para que se possa validar a informação recolhida com recurso às imagens. Conclui-se que existe um desenvolvimento gradual e saudável da maioria das alfaces, o que evidencia que existe no sistema a quantidade necessária de nutrientes para o seu desenvolvimento. Durante a fase inicial, o crescimento em altura é limitado, considerando que a energia da planta se concentra principalmente na formação das primeiras folhas e no desenvolvimento do sistema radicular. À medida que a planta se desenvolve, o crescimento em altura torna-se mais proeminente e novas folhas são produzidas no ápice da planta. Paralelamente ao crescimento em altura, ocorre o crescimento em diâmetro, devido a expansão das folhas e desenvolvimento de novas folhas.

Ao medir o diâmetro da planta, permite ter uma melhor noção do tamanho da planta, que pode também ser um indicador de saúde geral da planta. Folhas maiores e robustas geralmente indicam uma planta saudável, enquanto folhas pequenas podem sugerir deficiências nutricionais.

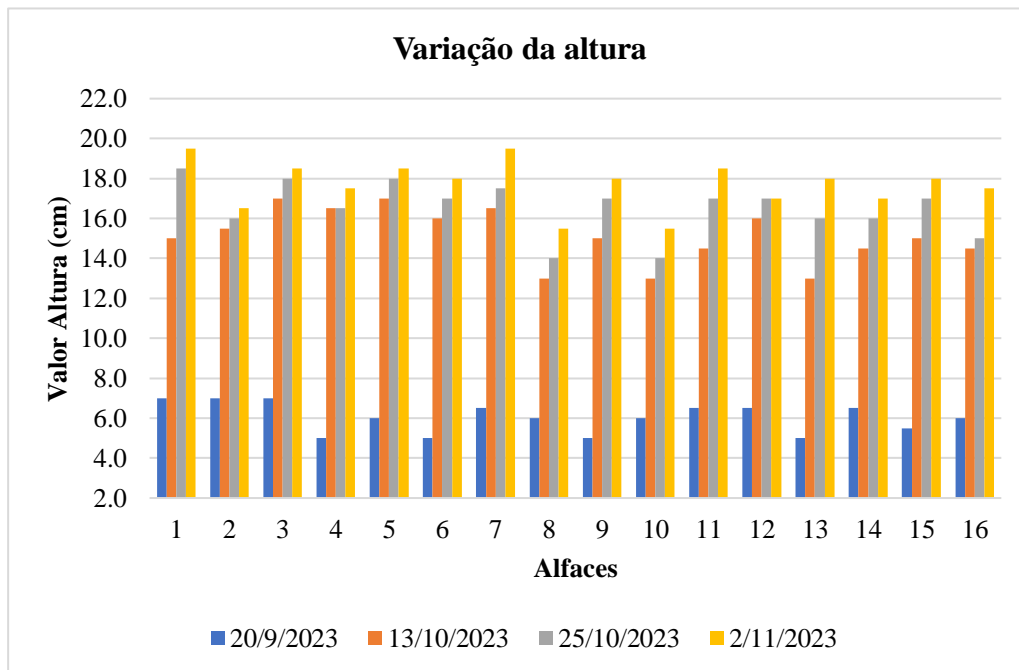


Figura 35- Resultados da Monitorização Manual da Altura das Alfaces

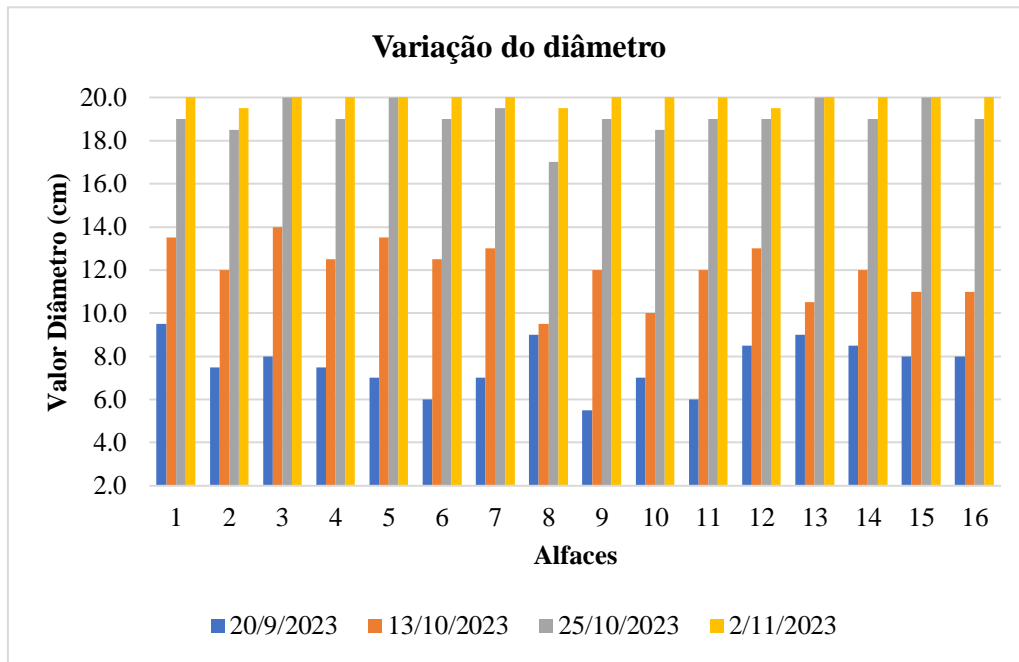


Figura 36- Resultado da Monitorização Manual do Diâmetro das Alfases

## 5.6. Estimativa de Custo para o Desenvolvimento do Protótipo

O protótipo de monitorização inteligente desenvolvido, tem um custo aproximado de 1019,35 €. Este valor é apurado tendo em conta os custos de equipamentos, dos reagentes usados para a elaboração de soluções padrão e de calibração e soluções comerciais (Tabela 17). De notar que os preços dos vários componentes podem variar de acordo com a marca, modelo, fornecedor e da quantidade necessária de cada reagente para a elaboração das diferentes soluções. Neste caso, os preços apresentados, servem para obter uma estimativa do valor total em função das quantidades que foram necessárias para a elaboração das soluções necessárias, cuja descrição foi detalhada na secção de materiais e métodos.

O sensor de oxigénio dissolvido é excluído considerando que, após procedimentos de calibração, limpeza e troca da membrana, ainda continua a dar valores fora da gama de trabalho, e que não era possível garantir as condições de agitação necessárias dentro do sistema para o sensor responder corretamente.

**Tabela 17 - Custos Estimados do Equipamento**

<b>Descrição do Equipamento</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Preço unitário</b>	<b>Custo</b>
Sensor de pH Analógico V2, Gravity	1	65,50 €	65,50 €
Sensor Analógico de oxigénio, Gravity	1	179,95 €	179,95 €
Sensor Analógico SDT para Arduino	1	14,90 €	14,90 €
Sensor Analógico Potencial Oxidação Redução	1	99,90 €	99,90 €
Sensor Analógico Condutividade Eléctrica, Gravity	1	84,90 €	84,90 €
Sensor de Temperatura a prova de água	1	14,70 €	14,70 €
Placas ESP32	6	5,00 €	30 €
<b>Total:</b>			<b>489,85 €</b>

Na Tabela 18 são apresentados os custos fixos de aquisição para cada reagente, usando como referência a marca Merck KGaA.

**Tabela 18 - Custos Estimados dos Reagentes**

<b>Reagente</b>	<b>Preço</b>	<b>Quantidade</b>
<b>Reagente sólido</b>		
Glicina ( $C_2H_5NO_2$ )	48,80 €	10 g
Acetato de Sódio ( $C_2H_3NaO_2$ )	36,60 €	250 g
Fosfato de Sódio Dibásico ( $NaH_2PO_4 \cdot H_2O$ )	50,90 €	500 g
Hidrogenofosfato de sódio ( $Na_2HPO_4$ )	47,30 €	1 kg
Hidróxido de Sódio ( $NaOH$ )	35,40 €	1 kg
Cloreto de Potássio ( $KCl$ )	83,80 €	500 g
Biftalato de Potássio ( $C_8H_5KO_4$ )	90,90 €	250 g
<b>Reagente líquido</b>		
Ácido Clorídrico ( $HCl$ )	40,30 €	100mL
Ácido Acético ( $CH_3COOH$ )	33,00 €	0,5 L
<b>Total:</b>		<b>467,00 €</b>

Para as calibrações do sensor de pH, também são usadas soluções padrão comerciais, apresentando os preços associados (Tabela 19). Informação obtida a partir da pesquisa na plataforma web de HANNA Instruments.

**Tabela 19 - Custos Estimados das Soluções de Calibração de pH**

<i>pH</i>	<i>Preço</i>	<i>Quantidade</i>
4.0	31,60 €	500 mL
7.0	30,90 €	500 mL
Total: 62,50 €		

Considerando o custo estimado de 1019,35 € para o protótipo inteligente e comparando com o custo de uma sonda multiparamétrica que é usada nas medições manuais (HI9829-00042 sem GPS) - 3255€, que inclui o eletrodo de OD, pode concluir-se que atendendo às funcionalidades que acrescenta, permitindo a recolha de dados em contínuo e disponíveis numa plataforma de acesso fácil, é sem dúvida uma solução economicamente viável, não obstante as limitações referidas.

Devido à sua complexidade e capacidade de medir múltiplos parâmetros, as sondas multiparamétricas geralmente tendem a ser mais caras do que os protótipos inteligentes.

## 6. Conclusões

Os resultados obtidos no presente trabalho indicam que o protótipo desenvolvido para monitorização inteligente da qualidade da água dentro de um sistema de aquaponia, após os procedimentos adequados de limpeza e calibração, permite a aquisição de dados que se encontram dentro da gama aceitável para aquaponia, fornecendo uma indicação direta da disponibilidade de nutrientes.

Uma das limitações principais destes sistemas inteligentes, está relacionada com o meio (composição da água) onde são colocados os sensores, e por isso requerem manutenção regular para garantir o seu funcionamento adequado ao longo do tempo. Além disso, atualizações de software podem ser necessárias para corrigir falhas ou melhorar o desempenho dos dispositivos.

Foi possível verificar que os sensores de pH, OD e ORP, foram os que apresentaram os maiores desafios de funcionamento durante o período observado, com a necessidade de limpeza e calibração periódica.

Os sensores integrados no protótipo testado podem ser utilizados nos sistemas de aquaponia, garantindo resultados fiáveis e precisos, validados por comparação com os resultados da monitorização manual

Foi possível ainda concluir através da análise estatística que há correlação entre os parâmetros T-SDT em abril, pH-SDT em junho, CE-SDT e pH-ORP em agosto, o que revela que as mudanças dos parâmetros, T, pH e CE tem uma influência direta sobre os outros parâmetros físico-químicos, o que por sua vez permite obter informação sobre a presença ou ausência de nutrientes e capacidade da água de reter oxigénio, elementos essenciais para o funcionamento adequado do sistema de aquaponia.

A monitorização da qualidade da água foi complementada com a recolha de imagens, que permitiu acompanhar o crescimento das plantas de forma mais direta, minimizando a necessidade de acompanhamento manual. Os dados resultantes na monitorização manual (altura e diâmetro das plantas) revelaram um aumento progressivo no crescimento das alfaces; de igual forma não foram observadas alterações na cor, tamanho ou forma das folhas, o que sugere que o sistema tem a quantidade necessária de nutrientes para o desenvolvimento

Uso eficiente de nutrientes na produção de biomassa vegetal num sistema de aquaponia com monitorização inteligente

---

correto das plantas. As imagens também revelaram a presença mínima de insetos, não representando um risco para os cultivos.

O protótipo inteligente demonstra ser uma boa opção para medições individuais de parâmetros específicos, tendo em conta a estabilidade das medições e o custo associado.

No futuro pretende-se que o protótipo testado possa ser aplicado para a deteção de poluição na água nas margens de recursos hídricos de água doce, procedendo à aquisição de dados sobre os parâmetros da qualidade da água. Trata-se de um sistema flexível que permite fazer uma configuração personalizada quanto ao tipo e número de sensores a utilizar e enviar informação para um servidor online, podendo estar acessível em qualquer lugar.

## Referências Bibliográficas

- Adjovu, G., Stephen, H., James, D., & Ahmad, S. (2023). Measurement of total dissolved solids and total suspended solids in water systems. *Remote Sensing*, 15(14), 1–43.
- Ajjah, N., Apriyana, A. Y., Sriwuryandari, L., Priantoro, E. A., Janetasari, S. A., Pertiwi, T. Y. R., Suciati, A. M., Ardeniswan, & Sembiring, T. (2021). Beneficiary of nitrifying bacteria for enhancing lettuce (*Lactuca sativa*) and vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.) growths align with carp (*Cyprinus carpio*) cultivation in an aquaponic system. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(1), 880–889. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10468-x>
- Albers, H. J., Baquedano, M., Chávez, C., Dresdner, J., & Yubini, K. (2021). Opportunities and challenges for small-scale aquaculture: The stakeholders' perspective in Los Lagos Region-Chile. *International Journal of Agriculture and Natural Resources*, 48(3), 259–287. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2316>
- Assa, F. B., Rumagit, A. M., & Najoan, M. E. L. (2022). Internet of Things-Based Hydroponic System Monitoring Design Perancangan Monitoring Sistem Hidroponik Berbasis Internet of Things. *Jurnal Teknik Informatika*, 17(1), 129–138.
- Atique, F., Lindholm-Lehto, P., & Pirhonen, J. (2022). Is Aquaponics Beneficial in Terms of Fish and Plant Growth and Water Quality in Comparison to Separate Recirculating Aquaculture and Hydroponic Systems? *Water (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/w14091447>
- Bhakar, V., Kaur, K., & Singh, H. (2021). Analyzing the Environmental Burden of an Aquaponics System using LCA. *Procedia CIRP*, 98(March), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.034>
- Bierkens, M. F. P., & Wada, Y. (2019). Non-renewable groundwater use and groundwater depletion: A review. *Environmental Research Letters*, 14(6). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab1a5f>
- Bjerge, K., Alison, J., Dyrmann, M., Frigaard, C. E., Mann, H. M. R., & Høye, T. T. (2023). Accurate detection and identification of insects from camera trap images with deep learning. *PLOS Sustainability and Transformation*, 2(3), e0000051. <https://doi.org/10.1371/journal.pstr.0000051>
- Blanchard, C., Wells, D. E., Pickens, J. M., & Blersch, D. M. (2020). Effect of pH on cucumber growth and nutrient availability in a decoupled aquaponic system with minimal solids removal. *Horticulturae*, 6(1), 1–12. <https://doi.org/10.3390/horticulturae6010010>
- Bracino, A. A., Concepcion, R. S., Dadios, E. P., & Vicerra, R. R. P. (2020). Biofiltration for Recirculating Aquaponic Systems: A Review. *2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management, HNICEM 2020*. <https://doi.org/10.1109/HNICEM51456.2020.9400136>

- Cáceres, R., Malińska, K., & Marfà, O. (2018). Nitrification within composting: A review. *Waste Management*, 72, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.049>
- Cerozi, B. da S., & Fitzsimmons, K. (2016). The effect of pH on phosphorus availability and speciation in an aquaponics nutrient solution. *Bioresource Technology*, 219, 778–781. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.079>
- Chen, J., & Yang, A. (2019). Intelligent Agriculture and Its Key Technologies Based on Internet of Things Architecture. *IEEE Access*, 7, 77134–77141. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921391>
- Daffa Fadillah, M., Ismail, N., Mardiaty, R., & Kusdiana, A. (2021). Fuzzy Logic-Based Control System to Maintain pH in Aquaponic. *Proceeding of 2021 7th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2021*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICWT52862.2021.9678404>
- Ding, X., Jiang, Y., Zhao, H., Guo, D., He, L., Liu, F., Zhou, Q., Nandwani, D., Hui, D., & Yu, J. (2018). Electrical conductivity of nutrient solution influenced photosynthesis, quality, and antioxidant enzyme activity of pakchoi (*Brassica campestris* L. Ssp. *Chinensis*) in a hydroponic system. *PLoS ONE*, 13(8), 1–15. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202090>
- Dutta, A., Dahal, P., Tamang, P., Saban Kumar, E., & Prajapati, R. (2018). IoT based Aquaponics Monitoring. *1st KEC Conference Proceedings, September*, 75–80. <https://www.researchgate.net/publication/327953706>
- Elia, E., Popa, D., & Nicolae, C. (2014). *S T A R T U P S T A G E S O F A L O W - T E C H A Q U A P O N I C S Y S T E M . L V I I .*
- Finogeev, A., Finogeev, A., Fionova, L., Lyapin, A., & Lychagin, K. A. (2019). Intelligent monitoring system for smart road environment. *Journal of Industrial Information Integration*, 15(April 2018), 15–20. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2019.05.003>
- Fruscella, L., Kotzen, B., & Milliken, S. (2021). Organic aquaponics in the European Union: towards sustainable farming practices in the framework of the new EU regulation. *Reviews in Aquaculture*, 13(3), 1661–1682. <https://doi.org/10.1111/raq.12539>
- Gillespie, D. P., Kubota, C., & Miller, S. A. (2020). Effects of Low pH of hydroponic nutrient solution on plant growth, nutrient uptake, and root rot disease incidence of Basil (*Ocimum basilicum* L.). *HortScience*, 55(8), 1251–1258. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI14986-20>
- Greenfeld, A., Becker, N., Bornman, J. F., Spatari, S., & Angel, D. L. (2022). Is aquaponics good for the environment?—evaluation of environmental impact through life cycle assessment studies on aquaponics systems. *Aquaculture International*, 30(1), 305–322. <https://doi.org/10.1007/s10499-021-00800-8>
- Gumisiriza, M. S., Kabirizi, J. M. L., Mugerwa, M., Ndakidemi, P. A., & Mbega, E. R. (2022). Can soilless farming feed urban East Africa? An assessment of the benefits and challenges of hydroponics in Uganda and Tanzania. *Environmental Challenges*, 6(August 2021), 100413. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100413>

- Harikrishna, R. B., Suraj, R., Paramasiva Pandi, N., Anand Kumar A, A., & Pandiaraj, S. (2021). Greenhouse automation using internet of things in hydroponics. *2021 3rd International Conference on Signal Processing and Communication, ICSPSC 2021, May*, 397–401. <https://doi.org/10.1109/ICSPSC51351.2021.9451668>
- Haryanto, Ulum, M., Ibadillah, A. F., Alfita, R., Aji, K., & Rizkyandi, R. (2019). Smart aquaponic system based Internet of Things (IoT). *Journal of Physics: Conference Series*, *1211*(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1211/1/012047>
- Huan, J., Li, H., Wu, F., & Cao, W. (2020). Design of water quality monitoring system for aquaculture ponds based on NB-IoT. *Aquacultural Engineering*, *90*(April), 102088. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102088>
- Huang, C. C., Lu, H. L., Chang, Y. H., & Hsu, T. H. (2021). Evaluation of the water quality and farming growth benefits of an intelligence aquaponics system. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(8), 1–15. <https://doi.org/10.3390/su13084210>
- Ikeura, H., Takahashi, H., Kobayashi, F., Sato, M., & Tamaki, M. (2018). Effects of microbubble generation methods and dissolved oxygen concentrations on growth of Japanese mustard spinach in hydroponic culture. *Journal of Horticultural Science and Biotechnology*, *93*(5), 483–490. <https://doi.org/10.1080/14620316.2017.1391718>
- Jung, D., Kim, H., Kim, H. S., Choi, J., Kim, J. Do, & Park, S. H. (2019). Fusion of Spectroscopy and Cobalt Electrochemistry Hydroponic Solution. *Sensors*.
- Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*, *147*(February), 70–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>
- Krastanova, M., Sirakov, I., Ivanova-Kirilova, S., Yarkov, D., & Orozova, P. (2022). Aquaponic systems: biological and technological parameters. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, *36*(1), 305–316. <https://doi.org/10.1080/13102818.2022.2074892>
- Krco, S., Pokric, B., & Carrez, F. (2014). Designing IoT architecture(s): A European perspective. *2014 IEEE World Forum on Internet of Things, WF-IoT 2014*, 79–84. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT.2014.6803124>
- Kumar, S., Singh, M., Yadav, K. K., & Singh, P. K. (2021). Opportunities and constraints in hydroponic crop production systems: A review. *Environment Conservation Journal*, *22*(3), 401–408. <https://doi.org/10.36953/ecj.2021.22346>
- Lafont, M., Dupont, S., Cousin, P., Vallauri, A., & Dupont, C. (2019). Back to the future: IoT to improve aquaculture: -time monitoring and algorithmic prediction of water parameters for aquaculture needs. *Global IoT Summit, GIOTS 2019 - Proceedings*, 19–24. <https://doi.org/10.1109/GIOTS.2019.8766436>
- Lin, J. Y., Tsai, H. L., & Lyu, W. H. (2021). An integrated wireless multi-sensor system for monitoring the water quality of aquaculture. *Sensors*, *21*(24). <https://doi.org/10.3390/s21248179>
- Liu, B., Soundararajan, P., & Manivannan, A. (2019). Mechanisms of Silicon-Mediated Amelioration of. *Plants*, *8*, 1–13.

- Love, D. C., Uhl, M. S., & Genello, L. (2015). Energy and water use of a small-scale raft aquaponics system in Baltimore, Maryland, United States. *Aquacultural Engineering*, 68, 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2015.07.003>
- Luis Lenz, G., Regina Lapa, K., Lapa Viana, M., & Gustavo Coelho Emerenciano, M. (2021). *CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DE SÓLIDOS DA ÁGUA EM UM SISTEMA DE CULTIVO INTEGRADO DE AQUAPONIA E BIOFLOCOS* Preliminary characterization of solids in the water of an integrated aquaponic and biofloc system. 54(2), 103–119. <http://dx.doi.org/10.32360/acmar.v54i2.44065>
- Martinez-Mate, M. A., Martin-Gorriz, B., Martínez-Alvarez, V., Soto-García, M., & Maestre-Valero, J. F. (2018). Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1298–1310. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.275>
- Maucieri, C., Nicoletto, C., Junge, R., Schmutz, Z., Sambo, P., & Borin, M. (2018). Hydroponic systems and water management in aquaponics: A review. *Italian Journal of Agronomy*, 13(1), 1–11. <https://doi.org/10.4081/ija.2017.1012>
- Maulini, R., Sahlinal, D., & Arifin, O. (2021). Monitoring of pH, Amonia (NH<sub>3</sub>) and Temperature Parameters Aquaponic Water in the 4.0 Revolution Era. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1012(1), 0–10. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1012/1/012087>
- McGehee, C., & Raudales, R. E. (2023). Irrigation Sources with Chlorine Drinking Water Standard Limits Cause Phytotoxicity on ‘Rex’ Lettuce Grown in Hydroponic Systems. *HortTechnology*, 33(1), 125–130. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH05091-22>
- Medina, M., Jayachandran, K., Bhat, M. G., & Deoraj, A. (2016). Assessing plant growth, water quality and economic effects from application of a plant-based aquafeed in a recirculating aquaponic system. *Aquaculture International*, 24(1), 415–427. <https://doi.org/10.1007/s10499-015-9934-3>
- Megantoro, P., Prastio, R. P., Kusuma, H. F. A., Abror, A., Vigneshwaran, P., Priambodo, D. F., & Alif, D. S. (2022). Instrumentation system for data acquisition and monitoring of hydroponic farming using ESP32 via Google Firebase. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 27(1), 52–61. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v27.i1.pp52-61>
- Mohamed, N. A., Saad, M. F., Shukry, M., El-Keredy, A. M. S., Nasif, O., Van Doan, H., & Dawood, M. A. O. (2021). Physiological and ion changes of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) under the effect of salinity stress. *Aquaculture Reports*, 19, 100567. <https://doi.org/10.1016/j.aqrep.2020.100567>
- Muñoz Gutiérrez, M. E. (2012). Sistemas de recirculación acuapónicos. *Informador Técnico (Colombia) Revistas Sena*, 76(60), 123–129. [revistas.sena.edu.co/index.php/inf\\_tec/article/download/36/41](http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/download/36/41)
- Nghi, N. H., Cuong, L. C., Dieu, T. V., Ngu, T., & Oanh, D. T. Y. (2018). Ozonation process and water disinfection. *Vietnam Journal of Chemistry*, 56(6), 717–720. <https://doi.org/10.1002/vjch.201800076>

- Nodo, P., Childs, A. R., Patrick, P., Lemley, D. A., & James, N. C. (2023). Response of demersal fishes to low dissolved oxygen events in two eutrophic estuaries. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 293(April), 108514. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108514>
- Okafor, N. U., & Delaney, D. T. (2021). Missing Data Imputation on IoT Sensor Networks: Implications for on-Site Sensor Calibration. *IEEE Sensors Journal*, 21(20), 22833–22845. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3105442>
- Pasha, A. K., Mulyana, E., Hidayat, C., Ramdhani, M. A., Kurahman, O. T., & Adhipradana, M. (2018). System Design of Controlling and Monitoring on Aquaponic Based on Internet of Things. *Proceeding of 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2018*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICWT.2018.8527802>
- Peng, Y., Dallas, M. M., Ascencio-Ibáñez, J. T., Hoyer, J. S., Legg, J., Hanley-Bowdoin, L., Grieve, B., & Yin, H. (2022). Early detection of plant virus infection using multispectral imaging and spatial–spectral machine learning. *Scientific Reports*, 12(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-06372-8>
- Pointet, T. (2022). The United Nations World Water Development Report 2022 on groundwater, a synthesis. *LHB: Hydrosience Journal*, 108(1). <https://doi.org/10.1080/27678490.2022.2090867>
- Ragaveena, S., Shirly Edward, A., & Surendran, U. (2021). Smart controlled environment agriculture methods: a holistic review. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 20(4), 887–913. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09591-z>
- Ren, Q., Zhang, L., Wei, Y., Li, D., Wei, Y., & Li, D. (2018). A method for predicting dissolved oxygen in aquaculture water in an aquaponics system. *Computers and Electronics in Agriculture*, 151(June), 384–391. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.06.013>
- Roots, P., Wang, Y., Rosenthal, A. F., Griffin, J. S., Sabba, F., Petrovich, M., Yang, F., Kozak, J. A., Zhang, H., & Wells, G. F. (2019). Comammox Nitrospira are the dominant ammonia oxidizers in a mainstream low dissolved oxygen nitrification reactor. *Water Research*, 157(2), 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.03.060>
- Rosero-Montalvo, P. D., López-Batista, V. F., Riascos, J. A., & Peluffo-Ordóñez, D. H. (2020). Intelligent WSN system for water quality analysis using machine learning algorithms: A case study (Tahuando river from Ecuador). *Remote Sensing*, 12(12). <https://doi.org/10.3390/rs12121988>
- Saalidong, B. M., Aram, S. A., Otu, S., & Lartey, P. O. (2022). Examining the dynamics of the relationship between water pH and other water quality parameters in ground and surface water systems. *PLoS ONE*, 17(1 1), 1–17. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0262117>
- Shetye, K., Gupta, S., Naidu, K., Keskar, S., Shahane, P., & Harikrishnan, R. (2023). IoT Based Stormwater Quality Management System. *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Knowledge Discovery in Concurrent Engineering, ICECONF 2023*, 1–7.

<https://doi.org/10.1109/ICECONF57129.2023.10084104>

- Singh, R., Baz, M., Gehlot, A., Rashid, M., Khurana, M., Akram, S. V., Alshamrani, S. S., & Alghamdi, A. S. (2021). Water quality monitoring and management of building water tank using industrial internet of things. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(15), 1–26. <https://doi.org/10.3390/su13158452>
- Siosemarde, M., Kave, F., Pazira, E., Sedghi, H., & Ghaderi, S. J. (2010). Determine of constant coefficients to relate total dissolved solids to electrical conductivity. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, *46*(10), 258–260.
- Siswanto, B., Dani, Y., Morika, D., & Mardiyana, B. (2023). A simple dataset of water quality on aquaponic fish ponds based on an internet of things measurement device. *Data in Brief*, *48*, 109248. <https://doi.org/10.1016/j.dib.2023.109248>
- Skarga-Bandurova, I., Krytska, Y., Velykzhanin, A., Barbaruk, L., Suvorin, O., & Shorokhov, M. (2020). Emerging Tools for Design and Implementation of Water Quality Monitoring Based on IoT. *Complex Systems Informatics and Modeling Quarterly*, *2020*(24), 1–14. <https://doi.org/10.7250/csimq.2020-24.01>
- Somerville, C., Cohen, M., Pantanella, E., Stankus, A., & Lovatelli, A. (2014). Small-scale aquaponic food production. In *FAO Fisheries and Aquaculture*. <http://www.fao.org/3/contents/1dea3c92-1faa-47bb-a374-0cf4d9874544/i4021e00.htm>
- Spiliotopoulou, A., Rojas-Tirado, P., Chhetri, R. K., Kaarsholm, K. M. S., Martin, R., Pedersen, P. B., Pedersen, L. F., & Andersen, H. R. (2018). Ozonation control and effects of ozone on water quality in recirculating aquaculture systems. *Water Research*, *133*, 289–298. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.01.032>
- Tupac-Yupanqui, M., Vidal-Silva, C., Pavesi-Farriol, L., Sanchez Ortiz, A., Cardenas-Cobo, J., & Pereira, F. (2022). Exploiting Arduino Features to Develop Programming Competencies. *IEEE Access*, *10*, 20602–20615. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3150101>
- Tyson, R. V., Treadwel, D. D., & Simonne, E. H. (2011). Opportunities and challenges to sustainability in aquaponic systems. *HortTechnology*, *21*(1), 6–13. <https://doi.org/10.21273/horttech.21.1.6>
- Van Rooyen, I. L., & Nicol, W. (2022). Nitrogen management in nitrification-hydroponic systems by utilizing their pH characteristics. *Environmental Technology and Innovation*, *26*, 102360. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102360>
- Wang, M., Dong, C., & Gao, W. (2019). Evaluation of the growth, photosynthetic characteristics, antioxidant capacity, biomass yield and quality of tomato using aeroponics, hydroponics and porous tube-vermiculite systems in bio-regenerative life support systems. *Life Sciences in Space Research*, *22*(January), 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.lssr.2019.07.008>
- Wei, Y., Li, W., An, D., Li, D., Jiao, Y., & Wei, Q. (2019). Equipment and Intelligent Control System in Aquaponics: A Review. *IEEE Access*, *7*, 169306–169326. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953491>

- Wu, W., Lin, Z., Zhu, X., Li, G., Zhang, W., Chen, Y., Ren, L., Luo, S., Lin, H., Zhou, H., Huang, Y., Yang, R., Xie, Y., Wang, X., Zhen, Z., & Zhang, D. (2022). Improved tomato yield and quality by altering soil physicochemical properties and nitrification processes in the combined use of organic-inorganic fertilizers. *European Journal of Soil Biology*, 109(December 2021), 103384. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103384>
- Xu, Z., Cao, J., Qin, X., Qiu, W., Mei, J., & Xie, J. (2021). Toxic effects on bioaccumulation, hematological parameters, oxidative stress, immune responses and tissue structure in fish exposed to ammonia nitrogen: A review. *Animals*, 11(11), 1–19. <https://doi.org/10.3390/ani11113304>
- Yanes, A. R., Martinez, P., & Ahmad, R. (2020). Towards automated aquaponics: A review on monitoring, IoT, and smart systems. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121571. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121571>
- Yu, L. J., Rengasamy, K., Lim, K. Y., Tan, L. S., Tarawneh, M., Zulkoffli, Z. B., & Se Yong, E. N. (2019). Comparison of activated carbon and zeolites' filtering efficiency in freshwater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(4). <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103223>
- Yuan, G. N., Marquez, G. P. B., Deng, H., Iu, A., Fabella, M., Salonga, R. B., Ashardiono, F., & Cartagena, J. A. (2022). A review on urban agriculture: technology, socio-economy, and policy. *Heliyon*, 8(11), e11583. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11583>
- Zainal Alam, M. N. H., Kamaruddin, M. J., Adzila, S., Nordin, N., & Othman, R. (2022). Solar-powered aquaponics prototype as sustainable approach for food production. *Materials Today: Proceedings*, 65, 2953–2959. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.530>
- Zhang, H., Gao, Y., Shi, H., Lee, C. T., Hashim, H., Zhang, Z., Wu, W. M., & Li, C. (2020). Recovery of nutrients from fish sludge in an aquaponic system using biological aerated filters with ceramsite plus lignocellulosic material media. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120886. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120886>
- Zhang, Y., Zhang, Y. kun, & Li, Z. (2022). A new and improved aquaponics system model for food production patterns for urban architecture. *Journal of Cleaner Production*, 342(February), 130867. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130867>

## Anexos

### Anexo A-Especificações Sistema Inteligente

Tabela A. 1. Especificações dos Sensores Utilizados

Sensor	Parâmetros	Especificações	Valores
<i>Gravity</i> : Sensor de pH Analógico V2	pH	Gama de deteção	0.00 a 14.00 pH / $\pm 600.0$ mV
Referência :SEN17004		Precisão	$\pm 0.1$ pH (25°C)
		Calibração	Padrão personalizado
		Solução de calibração	Soluções específicas
		Gama de calibração	(3.0; 4.0; 5.0; 7.0; 9.0, 10.0; 12.0).
<i>Gravity</i> : Sensor Analógico de oxigénio dissolvido	Oxigénio Dissolvido (OD)	Gama de deteção	0-20 mg/L
Referência :SEN08043		Gama de pressão	0~50PSI
		Calibração	DFRobot Manual
		Solução de calibração	Água destilada
		Gama de calibração	(Dois pontos: diferentes temperaturas)
		Solução de enchimento	0.5 mol/L NaOH
Sensor Analógico TDS para <i>Arduino</i>	Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	Gama de deteção	0 ~ 1000ppm
Referência :SEN08030		Precisão	$\pm 10\%$ F.S. (25 °C)
		Calibração	Relação quantitativa com CE
		Gama de calibração	Valores Previos de Referência (Laboratório)
		Temperatura adequada	< 55°C
Sensor Analógico (Potencial Oxidação Redução) para <i>Arduino</i>	Potencial de Oxidação Redução (ORP)	Gama de deteção	2000mV—2000mV
Referência :SEN08052		Precisão	$\pm 10$ mv (25 °C)
		Calibração	Solução Estándar
		Solução de calibração	3.5 mol/L Cloreto de Potássio (KCl)
		Gama de calibração	222 mV $\pm 15$ mV
		Temperatura adequada	5-70 °C
<i>Gravity</i> : Sensor Analógico de Condutividade Elétrica	Condutividade Elétrica (CE)	Gama de deteção	1ms/cm -- 20ms/cm
Referência :SEN08024		Precisão	< $\pm 10\%$ F.S (25°C)
		Calibração	Padrão personalizado
		Solução de calibração	0.01 mol/L e 0.1 mol/L Cloreto de Potássio (KCl)
		Gama de calibração	1413 $\mu$ S/cm e 12.88 ms/cm
		Temperatura adequada	5-40 °C
Sensor de Temperatura a prova de água (DS18B20)	Temperatura	Gama de deteção	(-55°C a +125°C)
Referência :SEN06005		Precisão	$\pm 0.5^\circ$ C de -10°C a +85°C
		Leituras	9 a 12 bits (configuráveis)
		Calibração	Protocolo 1 Wire
		Gama de calibração	Valores Previos de Referência (Laboratório)